İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

RÜZGÂR ENERJİSİ KAYNAKLARI İÇEREN GÜÇ SİSTEMLERİ İÇİN GÜVENLİK KISITLI OPTİMAL GÜÇ AKIŞI ÇÖZÜMÜ

DOKTORA TEZİ

Alişan AYVAZ

Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı

Elektrik Mühendisliği Programı

EYLÜL 2021

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

RÜZGÂR ENERJİSİ KAYNAKLARI İÇEREN GÜÇ SİSTEMLERİ İÇİN GÜVENLİK KISITLI OPTİMAL GÜÇ AKIŞI ÇÖZÜMÜ

DOKTORA TEZİ

Alişan AYVAZ
(504162006)

Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı

Elektrik Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. V. M. İstemihan GENÇ

EYLÜL 2021

İTÜ, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü'nün 504162006 numaralı Doktora Öğrencisi Alişan AYVAZ, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı "RÜZGÂR ENERJİSİ KAYNAKLARI İÇEREN GÜÇ SİSTEMLERİ İÇİN GÜVENLİK KISITLI OPTİMAL GÜÇ AKIŞI ÇÖZÜMÜ" başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı :	**Prof. Dr. V. M. İstemihan GENÇ** İstanbul Teknik Üniversitesi	.....
Jüri Üyeleri :	**Doç. Dr. Ramazan ÇAĞLAR** İstanbul Teknik Üniversitesi	.....
	Prof. Dr. Ali ÖZTÜRK Düzce Üniversitesi	.....
	Dr. Öğr. Üyesi Canan KARATEKİN İstanbul Teknik Üniversitesi	.....
	Doç. Dr. Ercan İZGİ Yıldız Teknik Üniversitesi	.....

Teslim Tarihi : 13 Temmuz 2021
Savunma Tarihi : 07 Eylül 2021

Sevgili eşim Birsen'e,

ÖNSÖZ

Bu tez çalışmasının hazırlanmasında bana birlikte çalışma fırsatı sunarak doktora eğitimim süresince engin bilgi birikimi ve tecrübesiyle desteklerini esirgemeyen tez danışmanım, saygıdeğer hocam Sayın Prof. Dr. V. M. İstemihan GENÇ'e teşekkürü bir borç bilirim.

Doktora tez çalışmamda fikir ve yönlendirmeleriyle değerli katkılar sunan değerli jüri üyesi hocalarım Sayın Doç. Dr. Ramazan ÇAĞLAR ve Sayın Prof. Dr. Ali ÖZTÜRK'e teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca tez çalışmamda 41935 numaralı proje kapsamında aldığım finansal destekten dolayı İstanbul Teknik Üniversitesi BAP Koordinasyon Birimi'ne ve doktora eğitimim süresince 2211 Yurt İçi Lisansüstü Burs Programı kapsamında aldığım burs desteğinden dolayı da TUBİTAK'a teşekkür ederim.

Her konuda beni destekleyip motive ederek her zaman yanımda olan sevgili eşim Birsen'e yürekten sevgilerimi sunar, sonsuz teşekkür ederim.

Temmuz 2021 Alişan Ayvaz
(Elektrik-Elektronik Mühendisi)

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ ..... **vii**
İÇİNDEKİLER ..... **ix**
KISALTMALAR ..... **xi**
SEMBOLLER ..... **xiii**
ÇİZELGE LİSTESİ ..... **xv**
ŞEKİL LİSTESİ ..... **xvii**
ÖZET ..... **xix**
SUMMARY ..... **xxiii**
1. GİRİŞ **1**
1.1 Tezin Amacı 5
1.2 Literatür Araştırması 6
1.2.1 Güvenlik kısıtlı optimal güç akışı 6
1.2.2 Rüzgâr enerjisi yatırımı 11
1.3 Tezin İçeriği 12
2. GÜÇ SİSTEMİNİN GÜVENLİĞİ VE KARARLILIĞI **15**
2.1 Güç Sisteminin Güvenliği 15
2.1.1 Statik ve dinamik güvenlik değerlendirmesi 17
2.1.2 Güvenlik değerlendirmesi adımları 17
2.1.2.1 Arıza analizi 18
2.1.2.2 Önleyici ve düzeltici kontrol eylemlerinin uygulanması 18
2.2 Güç Sisteminin Kararlılığı 19
3. GEÇİCİ HAL KARARLILIĞI KISITLI OPTİMAL GÜÇ AKIŞI (TSCOPF) **23**
3.1 Deterministik Problem Formülasyonu 24
3.1.1 Amaç fonksiyonu 25
3.1.2 Eşitlik kısıtları 26
3.1.3 Eşitsizlik kısıtları 26
3.1.4 Geçici hal kararlılığı kısıtları 27
3.2 Güç Sistemi Dinamik Modeli 27
3.2.1 Senkron generatör modeli 27
3.2.2 Rüzgâr generatörü modeli 29
3.3 GAMS'de Güç Sistemi Dinamik Modelinin Oluşturulması 30
3.3.1 Trapez integrasyon kuralının uygulanışı ve Kron indirgeme yöntemi 30
3.3.2 GAMS'de optimizasyon sonucu elde edilen generatör rotor açısı değişimlerindeki doğruluğun PSS/E ile test edilmesi 33
3.4 Bilgi Boşluğu Karar Teorisi (IGDT) 34
3.5 IGDT Bazlı TSCOPF Problem Formülasyonu 37
3.6 Çözüm Prosedürü 37
3.7 Yöntemin Farklı Güç Sistemleri Üzerinde Uygulanması 39
3.7.1 IEEE'nin 39 baralı ve 10 makineli test sistemi 39

3.7.1.1 Deterministik TSCOPF probleminin çözümüne ait sonuçlar 41
3.7.1.2 IGDT bazlı TSCOPF probleminin çözümüne ait sonuçlar 42
3.7.1.3 Karşılaştırmalı analiz 48
3.7.2 IEEE'nin 118 baralı ve 19 makineli test sistemi 50
4. GELİŞTİRİLMİŞ HİBRİT PSO-GWO (EHPSGWO) ALGORİTMASI 55
4.1 Parçacık Sürü Optimizasyon (PSO) Algoritması 55
4.2 Gri Kurt Optimizasyon (GWO) Algoritması 56
4.3 Geliştirilmiş Hibrit PSO-GWO (EHPSGWO) Algoritması 57
4.4 Optimal Güç Akışı (OPF) Probleminin Çözümü Üzerinden EHPSGWO Algoritmasının Diğer Optimizasyon Algoritmaları ile Karşılaştırılması 59
5. EKONOMİK VE GÜVENLİ YENİ BİR RÜZGÂR GÜCÜ YATIRIM MODELİ 63
5.1 Problem Formülasyonu 64
5.1.1 Amaç fonksiyonu 64
5.1.1.1 Toplam maliyet fonksiyonu 64
5.1.1.2 Gerilim profili iyileştirme amaç fonksiyonu 65
5.1.1.3 Penaltı faktörü 66
5.1.2 Eşitlik ve eşitsizlik kısıtları 66
5.1.3 Geçici hal kararlılığı kısıtları 66
5.2 Geçici Hal Kararlılığı Kısıtlarının Kontrolü 66
5.2.1 MATLAB-PSS/E arayüzünün kullanımı 67
5.2.2 MATLAB-TSAT arayüzünün kullanımı 67
5.2.3 MATLAB-PSS/E ve MATLAB-TSAT arayüzlerinin karşılaştırılması 68
5.3 Belirsizliklerin Modellenmesi 69
5.4 Çözüm Prosedürü 70
5.5 Problemin Farklı Durum Çalışmaları için Çözümü 72
5.5.1 Tek amaçlı çözüm (Durum A) 73
5.5.2 Çok amaçlı çözüm 74
5.5.2.1 Tam model çözümü (Durum B) 74
5.5.2.2 Geçici hal kararlılığı kısıtlarının ihmâl edilmesi (Durum C) 76
6. SONUÇLAR 79
KAYNAKLAR 83
EKLER 91
ÖZGEÇMİŞ 99

KISALTMALAR

DAE	**:** Differential Algebraic Equation / Diferansiyel Cebirsel Denklemler
EHPSGWO	**:** Enhanced Hybrid PSO-GWO Algorithm / Geliştirilmiş Hibrit PSO-GWO Algoritması
FSM	**:** Fuzzy Satisfying Method / Bulanık Tatmin Edici Yöntem
GWO	**:** Grey Wolf Optimization Algorithm / Gri Kurt Optmizasyon Algoritması
IEEE	**:** Institute of Electrical and Electronics Engineers
IGDT	**:** Information-Gap Decision Theory / Bilgi Boşluğu Karar Teorisi
OPF	**:** Optimal Power Flow / Optimal Güç Akışı
POÇ	**:** Pareto Optimal Çözüm
PSO	**:** Particle Swarm Optimization Algorithm / Parçacık Sürü Optimizasyon Algoritması
RGY	**:** Rüzgâr Gücü Yatırımı
TOAT	**:** Taguchi's Orthogonal Array Testing / Taguchi'nin Ortogonal Dizi Testi
TSCOPF	**:** Transient Stability Constrained Optimal Power Flow / Geçici Hal Kararlılığı Kısıtlı Optimal Güç Akışı

SEMBOLLER

$\boldsymbol{\alpha_i}$	**:** i'nci baradaki rüzgâr tarlası için bulunan sağlamlık değeri
$\boldsymbol{\sigma}$	**:** Deviasyon faktörü
$\boldsymbol{eo}$	**:** Enflasyon oranı
$\boldsymbol{\xi_{oak}}$	**:** Enflasyon oranına bağlı ortalama artış oranı
$\boldsymbol{\lambda_{yat}}$	**:** Rüzgâr tarlası MW başına saatlik yatırım maliyeti
$\boldsymbol{\lambda_{ibm}}$	**:** Rüzgâr tarlası MW başına saatlik işletim ve bakım maliyeti
$\boldsymbol{K}$Ö	**:** Rüzgâr türbini kullanım ömrü
$\boldsymbol{KF}$	**:** Rüzgâr tarlası kapasite faktörü

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 3.1 : Deterministik TSCOPF problem çözümüne ait sonuçlar **41**
Çizelge 3.2 : Durum 2 için elde edilen Pareto-optimal çözümler ile üyelik fonksiyonu değerleri **44**
Çizelge 3.3 : PTSCOPF ve IGDT bazlı TSCOPF probleminin çözümü için gerekli hesaplama süreleri **49**
Çizelge 3.4 : Modifiye edilmiş IEEE'nin 118 baralı test sistemi için gerçekleştirilen deterministik OPF ve TSCOPF çözümlerine ait sonuçlar **51**
Çizelge 4.1 : 30 popülasyon büyüklüğü ve 80 maksimum iterasyon sayısı için farklı optimizasyon algoritmaları ile elde edilen toplam güç üretim maliyeti değerleri **59**
Çizelge 4.2 : 50 popülasyon büyüklüğü ve 100 maksimum iterasyon sayısı için farklı optimizasyon algoritmaları ile elde edilen toplam güç üretim maliyeti değerleri **61**
Çizelge 5.1 : 3 belirsiz değişkenli ve 2 seviyeli bir OD tasarımı **70**
Çizelge 5.2 : Amaç fonksiyonu parametre ve değerleri **73**
Çizelge 5.3 : Arıza numaraları ve tanımlamaları **73**
Çizelge 5.4 : Durum A için elde edilen optimizasyon sonuçları **74**
Çizelge 5.5 : Durum B için elde edilen optimizasyon sonuçları **75**
Çizelge 5.6 : Monte Carlo test sonucu **76**
Çizelge 5.7 : Durum C için elde edilen optimizasyon sonuçları **77**
Çizelge 5.8 : Farklı durum çalışmaları için elde edilen güç sistemi işletim koşullarına ait tahmini kritik temizleme süreleri (saniye) **77**
Çizelge A.1 : IEEE'nin 39 baralı ve 10 makineli test sisteminde bulunan senkron generatörlere ait güç üretim limitleri ve maliyet fonksiyonu katsayıları **92**
Çizelge A.2 : IEEE'nin 39 baralı ve 10 makineli test sisteminde bulunan senkron generatörlere ait dinamik model parametre ve değerleri **92**
Çizelge A.3 : Senkron generatör uyarıcı dinamik model parametre ve değerleri **92**
Çizelge A.4 : Rüzgâr generatörlerine ait dinamik model parametre ve değerleri **93**
Çizelge A.5 : IEEE'nin 39 baralı test sistemine ait yük bilgileri **93**
Çizelge A.6 : IEEE'nin 39 baralı test sistemi iletim hattı bilgileri **94**
Çizelge B.1 : IEEE'nin 118 baralı ve 19 makineli test sisteminde bulunan senkron generatörlere ait maliyet fonksiyonu katsayıları **95**

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 : TEİAŞ 2020 ağustos ayı raporuna göre Türkiye elektrik enerjisi kurulu gücü ve kaynaklara göre paylaşımı **2**
Şekil 1.2 : (a) 2010 ve (b) 2020 yıllarına ait kişi başına ortalama su erişebilirliğini gösteren dünya haritaları **3**
Şekil 1.3 : NASA tarafından hazırlanan 2021 ocak ayı itibarıyla Türkiye yeraltı su rezervi haritası **4**
Şekil 2.1 : Güç sistemi işletim evreleri **16**
Şekil 2.2 : Güç sistemlerinde kararlılığın sınıflandırılması **19**
Şekil 3.1 : Trapez integrasyon kuralının uygulanışı **31**
Şekil 3.2 : (a) GAMS ve (b) PSS/E ile elde edilen rotor açısı değişimleri **34**
Şekil 3.3 : IGDT ve dayanıklı optimizasyon yöntemlerinin karşılaştırılması **35**
Şekil 3.4 : IGDT bazlı TSCOPF problemi çözümüne ait iş akış diagramı **38**
Şekil 3.5 : Rüzgâr tarlaları eklenerek modifiye edilmiş IEEE'nin 39 baralı test sistemi tek hat şeması **40**
Şekil 3.6 : Durum 1'de ele alınan arızanın Durum 0 için bulunan çalışma koşulları altında meydana gelmesi ile güç sisteminin kararsızlığa uğraması **42**
Şekil 3.7 : Deterministik TSCOPF probleminin çözümü ile elde edilen senkron generatör relatif rotor açısı değişimleri; (a) Durum 1, (b) Durum 2, (c) Durum 3 **43**
Şekil 3.8 : Deviasyon faktörü ($\boldsymbol{\sigma}$) 0.24'e eşit iken farklı durum çalışmaları için elde edilen Pareto-optimal çözümler **44**
Şekil 3.9 : Deviasyon faktörünün (a) α_{17} ve (b) α_{19} sağlamlık değerlerine göre değişimi **46**
Şekil 3.10 : Senkron generatör güç dağıtımlarının deviasyon faktörüne ($\boldsymbol{\sigma}$) göre değişimi; (a) Durum 0, (b) Durum 1 ..... **47**
Şekil 3.11 : PTSCOPF ve IGDT bazlı TSCOPF yöntemi ile elde edilen sonuçlar .. **49**
Şekil 3.12 : Modifiye edilmiş IEEE'nin 118 baralı test sistemi için gerçekleştirilen deterministik (a) OPF ve (b) TSCOPF problem çözümü için dikkate alınan arızanın uygulanması durumunda elde edilen relatif rotor açısı değişimleri **52**
Şekil 3.13 : Modifiye edilmiş IEEE'nin 118 baralı test sistemi için gerçekleştirilen IGDT bazlı OPF ve TSCOPF problem çözümüne ait sonuçlar; (a) $\boldsymbol{\alpha_{37}}$, (b) $\boldsymbol{\alpha_{71}}$. **53**
Şekil 4.1 : EHPSGWO algoritmasına ait iş akış diagramı **57**
Şekil 4.2 : Farklı optimizasyon algoritmaları için OPF probleminin çözümüne ait yakınsama eğrileri a) 1-80 b) 65-80 iterasyon aralığı **60**
Şekil 5.1 : MATLAB-TSAT arayüz bağlantısı işlem akış şeması **68**
Şekil 5.2 : Önerilen RGY problemine ait çözüm prosedürü iş akış şeması **71**
Şekil 5.3 : IEEE'nin 39 baralı test sistemi için varsayımsal olarak rüzgâr potansiyeli barındıran bölgelerin gösterimi **72**
Şekil 5.4 : Durum B için Aşama 1 ve Aşama 2 adımlarına ait Pareto-optimal çözümler (POÇ) ve Durum B için bulunan en iyi çözüm **76**
Şekil 5.5 : Farklı durum çalışmaları için elde edilen güç sistemi işletim koşullarına ait gerilim profilleri **78**

Şekil B.1 : Rüzgâr tarlaları eklenerek modifiye edilmiş IEEE'nin 118 baralı test sistemi tek hat şeması **95**

RÜZGÂR ENERJİSİ KAYNAKLARI İÇEREN GÜÇ SİSTEMLERİ İÇİN GÜVENLİK KISITLI OPTİMAL GÜÇ AKIŞI ÇÖZÜMÜ

ÖZET

Rüzgâr enerjisi, ülkemizde ve dünya genelinde gün geçtikçe şebekede etkinliğini arttırmakta ve ihtiyaç duyulan enerji gereksinimini karşılamada önemli bir rol almaktadır. Konvansiyonel enerji kaynaklarının küresel ısınmayı tetiklemesi, temiz ve çevre dostu olan yenilenebilir enerji kaynaklarının ve bu enerji kaynakları içerisinde önemli bir yere sahip olan rüzgâr enerjisinin, ilerisi için kullanımının daha da hızlı bir şekilde artacağının göstergesi olmaktadır. Öyle ki bazı ülkeler, yakın gelecek planları dahilinde fosil yakıt kullanımını tamamıyla sıfırlamak ve bu kapsamda enerji ihtiyacının önemli bir kısmını rüzgâr enerjisinden karşılamayı amaçlamaktadır.

Rüzgâr enerjisinin kullanımı sadece çevresel olarak değil, aynı zamanda ekonomik açıdan da avantajlar yaratmaktadır. Rüzgâr enerjisi kaynakları ile elden edilen gücün üretim maliyeti, yapılan doğru hesaplama ve planlamalar ile konvansiyonel enerji kaynaklarından elde edilene göre daha düşük olabilmektedir. Fakat, rüzgâr enerjisi, çevresel ve ekonomik olarak sunduğu avantajların yanında birtakım dezavantajlara da sahip bulunmaktadır. Bu dezavantajların temelinde ise rüzgâr enerjisi kaynağının, yani rüzgâr hızının, değişken ve belirsiz olması yatmaktadır. Bu değişken ve belirsiz olan rüzgâr hızına bağlı olarak rüzgâr enerjisi kaynakları ile üretilen güç de belirsiz olmakta ve bu kaynakları içeren güç sistemlerinde; ani yük akışı değişimleri meydana gelebilmekte, güç dengesi bozulabilmekte, güç sistemi bölgesel veya genel olarak aşırı yüklenmelere maruz kalabilmekte ve güç sistemi olası kritik arızalara karşı dayanıksız hale gelebilmektedir. Fakat, yine doğru hesaplama ve planlamalar ile rüzgâr enerjisi ile üretilen gücün belirsiz oluşuna bağlı bu dezavantajları telafi edebilir ve rüzgâr enerjisi kaynaklarının güç sistemine entegrasyonunu arttırarak, güç sistemini hem çevresel ve ekonomik açıdan avantajlı hem de teknik açıdan problemsiz bir şekilde işletebiliriz.

Optimal güç akışı (OPF, optimal power flow), güç sistemindeki generatörler arasındaki güç dağıtımının güç akışı eşitlik kısıtları ve güç sistemi fiziksel ve işletimine dair sınırları tanımlayan eşitsizlik kısıtları altında ekonomik olarak yapılmasıdır. OPF problemi, literatürde tek veya çok amaçlı yapıda birçok farklı amaç fonksiyonu ile formüle edilse de genel olarak kullanılan amaç fonksiyonu, konvansiyonel generatörler tarafından üretilen gücün toplam maliyetidir. Geleneksel OPF yaklaşımı, her ne kadar iletim hatlarındaki maksimum güç taşınım sınırı ve generatör güç üretim limitleri gibi işletimsel kısıtları koruyarak güç sisteminin güvenliğinin sağlanması noktasında uygun çözümler sunsa da güç sisteminde meydana gelebilecek beklenmedik arızalara karşı güç sisteminin kararlılığını garanti etmemektedir. Bu kapsamda, güç sisteminin beklenmedik arızalara karşı kararlılığını hem arıza esnasında hem de arıza sonrasında dikkate alarak güç sisteminin güvenliğini sağlayan çalışmalar, geçici hal kararlılığı kısıtlı optimal güç akışı (TSCOPF, transient stability constrained optimal power flow) başlığı altında ele alınmaktadır. TSCOPF

problem formülasyonunda, geleneksel OPF yaklaşımına ek olarak, güç sistemi dinamik davranışını belirleyen diferansiyel-cebirsel denklemler (DAEs, differential algebraic equations) de birer kısıt olarak yer almaktadır.

Literatürde, son yıllarda yapılan çalışmalardan çok azı TSCOPF probleminin çözümünü yenilenebilir enerji kaynaklarının sebep olduğu güç üretim belirsizliklerini de dikkate alarak yapmaktadır. Bu çalışmalarda, genellikle, rüzgâr enerjisi kaynaklarının neden olduğu belirsizlik, rüzgâr hızı geçmiş verilerine bağlı olan veya varsayıma dayanan bir olasılıksal yoğunluk fonksiyonu ile ele alınmakta ve bu fonksiyon bilgisi kullanılarak rüzgâr enerjisi güç üretim belirsizliği farklı yöntemler ile modellenerek problem çözümü gerçekleştirilmektedir. Fakat belirsizlik modellemesi, bu yöntemler ile örneklemeye bağlı olarak gerçekleştirildiği için optimizasyon çözümünde hesaplama yükü meydana getirmektedir. TSCOPF probleminin çözümünde, geçici hal kararlılığı kısıtlarının kontrolü için gerçekleştirilen zaman bölgesi simülasyonlar hali hazırda bir hesaplama gücü gerektirirken, buna ek olarak, belirsizlik modellemesinin de dahil edilmesiyle problem çözümü daha da zorlu bir hal almaktadır. Diğer yandan, belirsizliklerin olasılıksal olarak ele alınması ile problem çözümü ile elde edilen sonuç da olasılıksal olmakta ve bu sonucun güvenirliği için Monte Carlo yöntemiyle yüksek örneklemeye bağlı test yapılması gerekebilmektedir. Bu durum, bu yöntemler için, pratikte uygulanabilirlik açısından bir dezavantaj teşkil etmektedir.

Bu tez çalışmasında, literatürdeki eksikler göz önünde tutularak, rüzgâr enerjisi kaynaklarının neden olduğu güç üretim belirsizliği altında TSCOPF probleminin çözümüne yeni bir yaklaşım önerilmiştir. Bu çalışma dahilinde, rüzgâr enerjisinden kaynaklı belirsizliklerin ele alınması, olasılıksal olmayan ve örneklemeye dayanmadığı için hesaplama yüküne neden olmayan bilgi boşluğu karar teorisi (IGDT, information gap decision theory) yönteminin kullanımı ile gerçekleştirilmiştir. Önerilen metodoloji, uluslararası literatürde sıkça kullanılan küçük ve büyük ölçekli güç sistemleri üzerinde uygulanmış ve elde edilen sonuçlar literatürdeki diğer yöntemlerle karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir.

Tez çalışmasının bir diğer aşamasında ise, rüzgâr enerjisi kaynaklarının yatırım planlamalarına yönelik literatürde yapılan çalışmaların güç sisteminin güvenliğini yalnızca statik kısıtlar altında ele aldığı tespit edilmiş ve bu kapsamda, statik kısıtların yanında güç sistemi dinamik kısıtlarının da dikkate alındığı ve bu şekilde muhtemel kritik arızaların meydana gelmesi durumunda güç sistemi kararlılığının korunduğu yeni bir rüzgâr gücü yatırımı (RGY) optimizasyon modeli geliştirilerek literatürdeki eksiklik giderilmeye çalışılmıştır. Bu yeni optimizasyon probleminin çözümü ile hedeflenen, güç sitemine yapılacak olan yatırımdan kaynaklanan ve güç sistemi işletim ve bakım masraflarını da kapsayan toplam maliyeti minimize edecek, aynı zamanda ise güç sistemi güvenliğini de statik ve dinamik açıdan geliştirecek en uygun rüzgâr tarlası konum ve kapasitelerinin bulunmasıdır. Rüzgâr gücü üretimine bağlı belirsizlik, bu çalışma kapsamında da dikkate alınarak pratikte uygulanabilir bir yatırım stratejisi hem yatırımcılar hem de güç sistemi operatörlerine yönelik olarak sunulmuştur. Ayrıca, parçacık sürü optimizasyon (PSO, particle swarm optimization) algoritmasının keşif, gri kurt optimizasyon (GWO, grey wolf optimization) algoritmasının ise sömürü aşaması kabiliyetlerinden yararlanılarak yeni bir hibrit optimizasyon algoritması (EHPSGWO, enhanced hybrid PSO-GWO) önerilen RGY probleminin çözümünde kullanılmak üzere geliştirilmiştir. Geliştirilen algoritma, RGY probleminin yanı sıra OPF probleminin çözümü için de uygulanmış ve literatürdeki benzer optimizasyon

algoritmaları ile elde edilen sonuçlar da dikkate alınarak karşılaştırmalı şekilde performansı analiz edilmiştir.

Bu kapsamda, bu tez çalışması, günümüz güç sistemlerinin artan enerji talebinin, temiz ve çevre dostu olan rüzgâr enerjisi kaynaklarının güç sistemlerine entegrasyonu ile karşılanmasına ve bu entegrasyonun, rüzgâr enerjisi kaynakları ile elde edilen güç üretimi belirsizliğinin de dikkate alınarak hem ekonomik anlamda fayda sağlayacak hem de güç sisteminin güvenliği noktasında herhangi bir zafiyete neden olmayacak şekilde gerçekleştirilmesine yönelik pratiğe uygun çözümler sunmaktadır. Nitekim, farklı büyüklükteki güç sistemleri üzerinde çeşitli durum çalışmaları ile elde edilen sonuçlar, yapılan çalışmanın yenilenebilir enerji kaynakları ile büyüyen ve aynı zamanda daha karmaşık hale gelen modern güç sistemleri için önemini göstermektedir.

SECURITY CONSTRAINED OPTIMAL POWER FLOW SOLUTION FOR POWER SYSTEMS INCLUDING WIND ENERGY GENERATION

SUMMARY

In our country and around the world, wind energy is increasing its efficiency in the grid day by day and it plays an important role in meeting the energy demand. The fact that conventional energy sources trigger global warming indicates that the use of clean and environmentally friendly renewable energy sources (RESs) including wind energy resources, which have an important place among the RESs, will increase even more rapidly in the future. So much so that some countries aim to completely zero the use of fossil fuels within their near future plans and to meet a significant part of their energy demand from wind energy.

The use of wind energy resources creates advantages not only environmentally but also economically. The generation cost of the power supplied by wind energy sources can be lower with correct calculations and planning strategies compared to that supplied by conventional energy sources. On the other hand, wind energy has some disadvantages besides the advantages it offers environmentally and economically. The main reason for these disadvantages is that the source of wind energy, namely the wind speed, is variable and uncertain. Depending on this variable and uncertain wind speed, the power generated by the wind energy resources also becomes uncertain and this causes various problems, such as; sudden load flow changes in the power system may occur, the power balance may be disturbed, the power system may be exposed to regional or general overloads, and the power system may become vulnerable to potential critical failures. However, with correct calculations and planning strategies, we can overcome these disadvantages due to the uncertainty of the source of wind energy and, by increasing the integration of wind energy sources into the power system, we can operate the power system advantageously in terms of both environmentally and economically and also make the power system powerful in terms of security.

Optimal power flow (OPF) is the making of the power dispatch between generators economically under the equality and inequality constraints which are the power flow equations and the power system's physical limits, respectively. Although the OPF problem is formulated with many different objective functions in a single or multi-objective problem form in the literature, generally, the objective function is the total cost of the power generation. Although the traditional OPF approach provides a solution for the security of the power system by preserving operational constraints such as power generation limits of generators and maximum power transfer limits in transmission lines, it does not guarantee the dynamic security of the power system against unexpected failures that may occur in the power system. In this context, studies that maintain the dynamic security of the power system by considering the stability of the power system against unexpected failures both during and after the failure are discussed under the title of transient stability constrained optimal power flow

(TSCOPF). In the TSCOPF problem formulation, in addition to the traditional OPF approach, differential-algebraic equations (DAEs) that determine the power system's dynamic behavior are also included as constraints.

In the recent literature, few studies take into account the power generation uncertainties arising from renewable energy sources in the solution procedure of the TSCOPF problem. In these studies, the uncertainty due to wind energy resources is handled with a probability density function (PDF) which may be dependent or not the wind speed historical data, and problem-solving is achieved with the modeling of the uncertainty of wind power generation with different methods based on the PDF. One of the difficulties in using these methods is that they cause a computational burden in the optimization process because uncertainty modeling is performed depending on the sampling. In solving the TSCOPF problem, while time-dependent simulations for checking transient stability constraints already require computational effort, with the addition of uncertainty modeling, problem-solving becomes even more difficult. On the other hand, by handling the uncertainties with PDFs, the results of the optimization are obtained in a probabilistic manner and a Monte Carlo test with a large number of samples may be required for the reliability of the obtained result. This situation poses a disadvantage for these methods in terms of practical applicability.

In this thesis study, considering the shortcomings in the literature, a new approach to the solution of the TSCOPF problem is proposed under the power generation uncertainty caused by wind energy sources. In this study, the uncertainties due to wind power generation were handled using the information gap decision theory (IGDT) method, which is a non-probabilistic method and does not cause a computational burden because it is not based on sampling. The proposed methodology has been applied to small- and large-scale power systems, which are frequently used in the international literature, and the results have been analyzed comparatively with other methods in the literature.

In the next stage of the thesis study, it was determined that the studies in the literature on investment planning of wind energy resources deal with the security of the power system only under static constraints, and in this context, a new wind power investment (WPI) optimization model has been developed to preserve the power system stability against critical contingencies by taking into account the dynamic constraints of the power system as well as the static constraints, and thus, the deficiency in the literature has been tried to eliminate. The objective of this new optimization problem is to find the most suitable wind farm location and capacities, which will minimize the total cost arising from the investment of wind energy and power system operation and maintenance, and also improve the power system security both statically and dynamically. Similar to the study in the previous stage, the uncertainty related to wind power generation is considered within the scope of this study, and thus, a practically applicable investment strategy is presented for both investors and power system operators. Moreover, by benefitting from the exploration power of particle swarm optimization (PSO) algorithm and the exploitation ability of grey wolf optimization (GWO) algorithm, a new hybrid optimization algorithm (EHPSGWO) has been developed to be used in the solution of the proposed WPI problem. The developed algorithm has been applied to the solution of OPF problem as well as the WPI problem, and its performance has been analyzed comparatively by considering the results obtained with similar optimization algorithms in the literature.

In this context, this thesis study offers practical solutions to meet the increasing energy demand of today's power systems with the integration of clean and environmentally friendly wind energy resources into power systems and to carried out this integration in a way that will both benefit economically and not cause any weakness in the security of the power system considering the uncertainty due to power generation of wind energy resources. The results obtained for various case studies on small- and large-scale power systems show the importance of this thesis study for modern power systems that are growing with renewable energy sources and also becoming more complex.

1. GİRİŞ

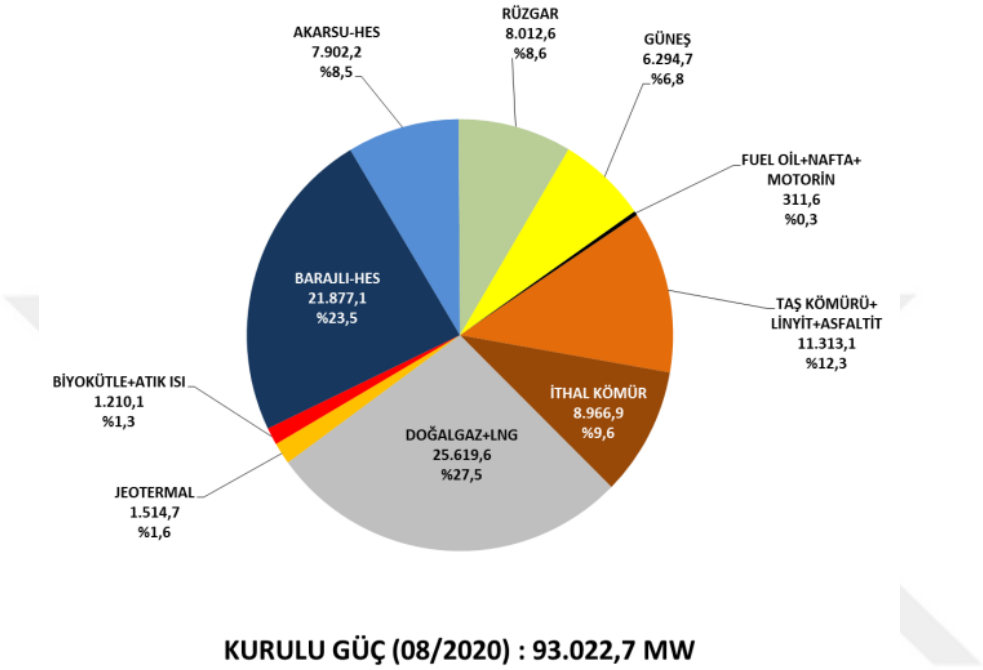
Yenilenebilir enerji, gezegenimizin kaynaklarını tüketmeden kısa süre içerisinde yenilenebilen ve doğal kaynaklardan elde edilen enerjidir. Bu kaynaklar; güneş ışığı, rüzgâr, yağmur, gelgitler, dalgalar, biyokütle ve yer kabuğunda depolanan termal enerji gibi sıralanabilir. Hemen hemen her yerde mevcut durumdadırlar ve neredeyse tükenmezler. Daha da önemlisi, iklime veya çevreye çok az zarar verirler.

Yenilenebilir enerji kaynaklarının aksine; petrol, kömür ve doğal gaz gibi fosil yakıtlar yalnızca sınırlı miktarlarda mevcuttur. Fosil yakıtlar da doğal süreç içerisinde oluşmasına rağmen, biz insanlar onları kullandığımız kadar çabuk yenilenmezler ve biz onları çıkarmaya devam ettikçe er ya da geç bir gün tükenecekler.

Bugün, dünyadaki enerji üretimi hala büyük ölçüde fosil yakıtlara dayanıyor ve bu kaynaklar dolayısıyla iklime zarar veren sera gazlarından sağlığı tehdit eden parçacıklara kadar meydana gelen kirlilik rekor seviyelere ulaşmış durumda [1]. Eğer bu kaynaklara olan bağlılığımızı azaltamaz ve enerji talebini karşılamada hızlı bir şekilde yenilenebilir enerji kaynaklarını ön sıralara çıkaramazsak dünya geri dönüşü olmayan bir durumla karşı karşıya kalabilir.

Dünyada ve Türkiye'de kurulu gücün enerji kaynaklarına göre dağılımı incelendiğinde yenilenebilir enerji kaynaklarının geleceği umut verici niteliktedir. Bir küresel yenilenebilir enerji topluluğu olan REN21'in 2020 Global Durum Raporu'na göre; 2019 yılı içerisinde dünya genelinde kurulan yeni yenilenebilir enerji kaynakları toplam kapasitesinin 200 GW'tan fazla bir değerde olduğu ve bunun son 5 yıldaki ortalama büyüme değerine paralel olarak yıl bazında %8 artış anlamına geldiği belirtilmiştir. Raporda ayrıca, 2019 yılı sonu itibari ile global elektrik üretimi içerisinde tahmin edilen yenilenebilir enerji kaynakları payının %27.3 olduğu, bunun da sırasıyla %15.9'unun su gücünden (hidroelektrik santrallerinden), %5.9'unun rüzgâr enerjisinden, %2.8'inin güneş enerjisinden ve geri kalan kısmın ise diğer yenilenebilir enerji kaynaklarından elde edildiği belirtilmiştir [2].

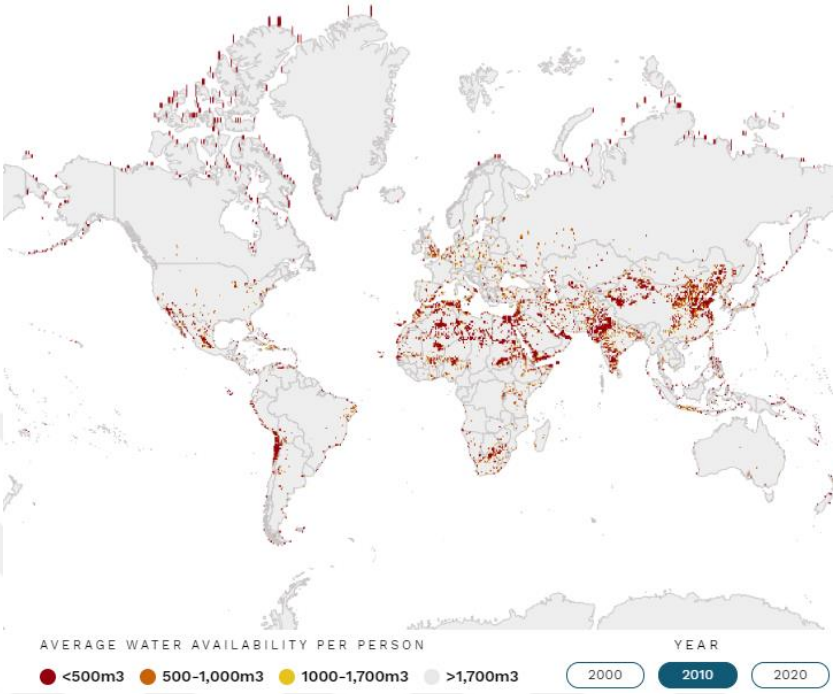
Ülkemizde ise kurulu gücün kaynaklara göre dağılımı TEİAŞ'ın 2020 ağustos ayı raporunda grafiksel olarak Şekil 1.1'deki gibi verilmiştir [3]. Şekil incelendiğinde, dünya genelinde olduğu gibi ülkemizde de yenilenebilir enerji kaynakları içerisinde en büyük paya %32 ile su gücünün yani hidroelektrik santrallerinin sahip olduğu ve onu hemen arkasından %8.6 ile rüzgâr enerjisinin takip ettiği görülmektedir.



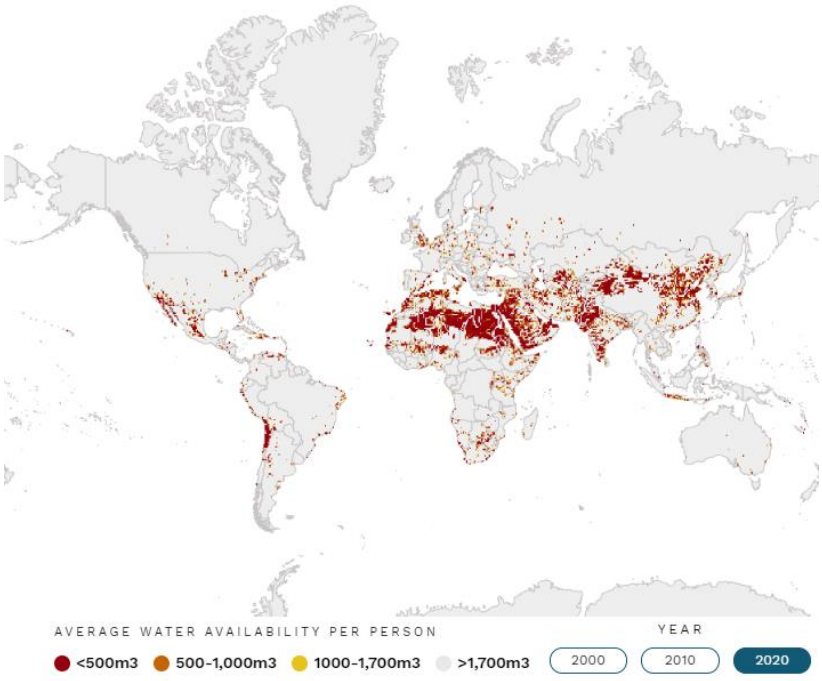
Şekil 1.1 : TEİAŞ 2020 ağustos ayı raporuna göre Türkiye elektrik enerjisi kurulu gücü ve kaynaklara göre paylaşımı [3].

Günümüz şartları için fosil yakıt kullanımına benzer şekilde hidroelektrik santrallerine dayalı enerji üretimi popüler bir durumda olsa da geçmişten bugüne artan kuraklık oranı ciddi sinyaller vermektedir. Şekil 1.2'de, 2010 ve 2020 yıllarına ait kişi başına düşen ortalama su erişilebilirliği haritaları görülmektedir [4]. Haritalar incelendiğinde sadece 10 yıl içerisinde 500 m^3 su miktarı altında kalan bölgelerin artışı dikkat çekicidir. Bu durum ülkemiz için de ne yazık ki pek iç açıcı değil. NASA tarafından ülkemize ait 2021 ocak ayı için hazırlanan bir harita (Şekil 1.3) ve bu haritayla birlikte verilen bilgiler yaşadığımız kuraklığa dair önemli tespitler içermektedir [5]. NASA tarafından verilen bilgilerde, 2020 yılı ekim-aralık aylarına ait dönemde ülkemize düşen yağış oranı, 1981 ve 2010 yılları arasındaki ortalama değerden %48 oranında daha düşük olduğu belirtilmiş ve 2020'nin son 5 yılın en kurak yılı olduğu vurgulanmıştır. Yine ülkemiz için yapılan çalışmalarda, kuraklığın gün geçtikçe önemli noktalara gittiği ve bu nedenle planlarımızı sadece insanlar tarafından

kullanılan içme suyuna yönelik değil aynı zamanda enerji talebini karşılamada hidroelektrik santrallerine alternatif enerji kaynaklarının kullanımına yönelik de yapmamız gerektiği sonucuna varılmıştır [6].

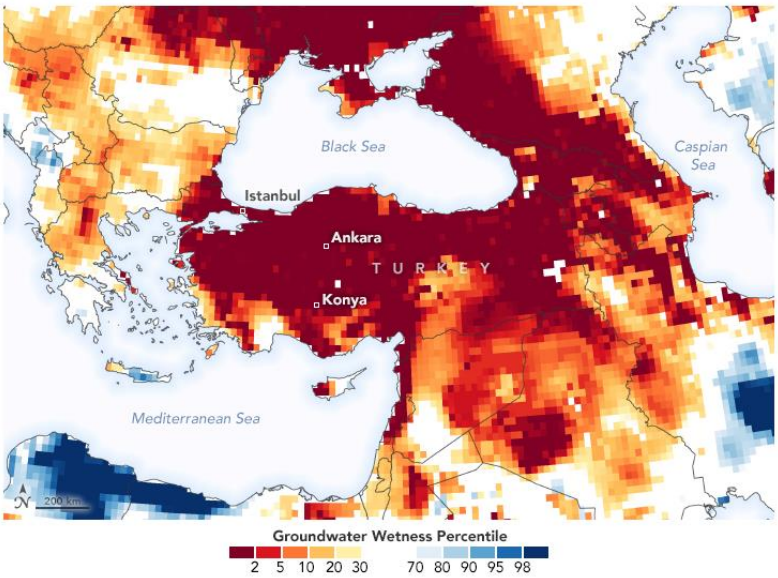


(a)



(b)

Şekil 1.2 : (a) 2010 ve (b) 2020 yıllarına ait kişi başına ortalama su erişebilirliğini gösteren dünya haritaları [4].



Şekil 1.3 : NASA tarafından hazırlanan 2021 ocak ayı itibarıyla Türkiye yeraltı su rezervi haritası [5].

Bu kapsamda, ileride yaşanabilecek su sorunları nedeniyle hidroelektrik santrallerine güçlü bir alternatif olarak, kaynağının herhangi bir risk altında olmaması sebebiyle ve güncel kurulu güç kapasitesi düşünüldüğünde, rüzgâr enerjisi santralleri gittikçe artan enerji talebini karşılamada ön plana çıkmaktadır. Rüzgâr enerjisi, diğer yenilenebilir enerji kaynakları gibi temiz ve çevre dostu bir enerji kaynağı olarak küresel ısınmayı tehdit etmemekle birlikte doğru hesaplamalar ve yatırımlarla birlikte ekonomik açıdan da avantaj yaratabilirler. Konvansiyonel enerji kaynaklarının enerji üretimi için kullandığı yakıt, rüzgâr enerjisi kaynaklarına göre ek bir maliyet oluşturmaktadır. Bir finansal analist firmasının 2016 yılında hazırladığı rapora göre rüzgâr enerjisi ile üretilen enerjinin 1 MW/saat için maliyeti 32 dolara kadar düşebilirken, bu durum kömür kullanılarak elde edilen enerji için minimum 60 dolar olmaktadır [7].

Rüzgâr enerjisi ile hem çevresel hem de ekonomik açıdan avantajlar elde edilmekte ve nitekim bu durumu en iyi kanıtlayan ölçek ise artan kurulu güç kapasitesi olmaktadır. Fakat rüzgâr enerjisinin sağladığı bu avantajlarının yanında neden olduğu birtakım dezavantajlar da bulunmaktadır. Rüzgâr hızının değişken ve belirsiz karakteristiğine bağlı olarak güç sisteminde önemli teknik sorunlar meydana gelebilmektedir. Aşağıda sıralanan durumlar rüzgâr enerjisi kaynaklı teknik sorunlara örnek olarak verilebilir:

- Güç sisteminde ani güç değişimlerine neden olmakta ve buna bağlı güç dengesi bozulabilmektedir.

- Güç sisteminde ani güç akışı dalgalanmaları meydana gelerek iletim hatları zarar görebilmektedir.
- Generatörlerin aktif ve reaktif güç üretimi hızlı bir şekilde değişebilmekte ve güç sistemi beklenmedik arızalara karşı dayanıksız hale gelebilmektedir.

Rüzgâr enerjisinin kaynağının, yani rüzgâr hızının, değişken ve belirsiz oluşuna bağlı teknik sorunlar yanında rüzgâr generatörlerinin güç sistemi efektif eylemsizliğini düşürmesi ve rüzgâr enerjisi kaynaklarından üretilen enerjinin şebekeye aktarımında kullanılan güç elektroniği ekipmanlarının güç sistemi dinamik davranışını değiştirmesi gibi teknik dezavantajlar da bulunmaktadır.

Sonuç olarak, önümüzdeki yıllar için artan enerji talebinin yenilenebilir enerji kaynakları ile sağlanması ve bu enerji kaynakları içerisinde de stratejik olarak üstün konumda olan rüzgâr enerjisi kaynaklarının kullanılması önem arz etmektedir. Bu noktada, rüzgâr enerjisi kaynaklarının neden olduğu teknik dezavantajları göz önüne alarak güç sisteminin güvenli aynı zamanda da ekonomik bir şekilde işletilmesini sağlayacak yeni çözüm yollarına ihtiyaç duyulmaktadır.

1.1 Tezin Amacı

Gittikçe artan enerji talebi ve bu talebinin karşılanması noktasında çevre dostu olmaları ve ekonomik avantajlar yaratmaları sebebiyle rüzgâr enerjisi kaynaklarının güç sistemlerine entegrasyonu kritik öneme sahiptir. Fakat bu entegrasyonun, rüzgâr enerjisi kaynaklarının neden olduğu teknik dezavantajların dikkate alınması ve buna yönelik çözümlerin üretilmesi ile gerçekleştirilmesi, güç sisteminin güvenliği noktasında oluşabilecek risklere karşı en doğru yoldur.

Rüzgâr enerjisinin güç sistemlerine entegrasyonu kapsamında geçmişten günümüze birçok problem ele alınmış ve çözüm yolları aranmıştır. Bu problemlerin çözümünde öne çıkan temel sorun ise rüzgâr enerjisinin kaynağını oluşturan rüzgârın hızının değişken ve belirsiz olmasıdır. Değişken rüzgâr hızına bağlı olarak rüzgâr generatörlerinden şebekeye aktarılan güç miktarı da değişken olmaktadır. Bu güç değişkenliği ise ne yazık ki sürekli ve kararlı işletim koşulları altında çalışmakta olan güç sistemlerini olumsuz olarak etkileyebilmektedir. Ayrıca, rüzgâr enerjisi kaynaklarının güç sisteminin dinamik karakteristiği noktasında neden olduğu olumsuz

etkiler de düşünüldüğünde güç sistemi muhtemel arızalara karşı dayanıksız hâle gelebilmektedir.

Bu kapsamda, bu tez çalışması ile ulaşılmak istenen hedefler aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- Rüzgâr enerjisi içeren güç sitemlerinin ekonomik ve güvenli bir şekilde işletilmesi,
- Rüzgâr enerjisi entegrasyonu sağlanacak güç sistemleri için yatırım ve işletim planlamalarının hem ekonomik hem de güç sisteminin güvenliğini kapsayacak şekilde yapılması,
- Güç sistemi güvenliğinin sadece statik kısıtlar ile değil aynı zamanda dinamik kısıtların da dikkate alınması ile sağlanması,
- Ele alınacak model ve çözümlerde rüzgâr enerjisi kaynaklarının belirsizlik etkisinin dikkate alınması ve bu belirsizliklerin modellenmesinde hesaplama yüküne neden olmayan yöntemlerin seçilmesi,
- Güç sistemi operatörlerine ve yenilenebilir enerji yatırımcılarına pratiğe uygun yeni çözümlerin sunulması.

1.2 Literatür Taraması

Bu tez çalışması kapsamında, literatürde ele alınan iki ayrı probleme yönelik yeni çözüm modelleri geliştirilmiş ve bu sebeple gerçekleştirilen literatür taraması iki farklı başlık altında verilmiştir.

1.2.1 Güvenlik kısıtlı optimal güç akışı

Optimal güç akışı (OPF, optimal power flow), güç sisteminin ekonomik ve güvenilir bir şekilde planlanması ve işletilmesi açısından sistem operatörleri için önemli bir araçtır. OPF vasıtasıyla üretim ekonomisi ve sistem güvenliği açısından en uygun işletme koşulları belirlenerek generatörler arasında üretim dağılım planı oluşturulur. OPF, yaygın olarak, iletim hattı ve generatör limitleri dahilinde toplam güç üretim maliyetini minimuma indirme tek amacı için kullanılmaktadır. Literatürde, bu amaç doğrultusunda birçok matematiksel programlama tekniği OPF problem çözümü için uygulanmıştır. Bunlardan bazıları; iç nokta metotları (IPMs, interior point methods)

[8], lineer programlama (LP, lineer programming) [9] ve kuadratik programlama (QP, quadratic programming)'dır [10]. Diğer yandan ise son zamanlarda yapılmış ve OPF'nin çok amaçlı olarak ele alındığı çalışmalar da mevcuttur. Bu çalışmalarda OPF problem çözümü; toplam güç üretim maliyetinin, iletim hattındaki toplam güç kayıplarının, generatörlerin neden olduğu toplam emisyon miktarının ve gerilim kararlılığıyla ilgili indislerin minimizasyonu gibi amaçlara yönelik gerçekleştirilmektedir. Bu kapsamda ele alınan problemlerin çoğu, amaçlar içerisinde toplam güç üretim maliyetinin minimizasyonu olmak kaydıyla iki veya daha fazla amaçlı formda modellenmiştir [11, 12]. İki amaçlı problemlerin çözümünde baskın olmayan sıralama genetik algoritması (NSGA, non-dominated sorting genetic algorithm) [13] ve geliştirilmiş hali olan NSGA-II [14] metotları iyi sonuçlar vermektedir. NSGA-II optimizasyon metodu, birtakım hesaplama zorluklarını ve olası sonuç derecelendirme eksiklerini gidermek üzere NSGA'nın modifiye edilmiş halidir. Bunun haricinde, güçlü pareto evrimsel algoritması (SPEA, strength pareto evolutionary algorithm) [15] ve çok amaçlı armoni arama algoritması (MOHSA, multi-objective harmony search algorithm) [16] da çok amaçlı OPF problem çözümleri için literatürde kullanılmış olan optimizasyon metotlarıdır. [16] numaralı çalışmada, MOHSA yönteminin NSGA-II yöntemine göre üstünlüğü gösterilmiştir. Ayrıca tek amaçlı OPF problem çözümünde armoni arama algoritmasının (HSA) diğer sezgisel algoritmalara göre üstün yakınsama performansı da [17] kaynak numaralı çalışmada görülmektedir.

Güç sistemlerinin gittikçe karmaşıklaşan yapısı ve güç sisteminde belirsiz enerji kaynaklarının sayısının artması ile ne yazık ki geleneksel OPF çözümleri yetersiz kalmakta ve güven vermemektedir. Bu doğrultuda, güç sistemindeki dinamiklerin etkisini de dikkate alarak beklenmedik durumlara karşı güç sisteminin kararlılığını sağlayan yeni tekniklerin geliştirilmesi önem arz etmektedir. Literatürde geçici hal kararlılığı kısıtlı OPF (TSCOPF, transient stability constrained OPF) başlığı ile yapılan çalışmalar, ekonomik işletme koşulları altında güç sisteminde meydana gelebilecek muhtemel arızalara karşı güç sisteminin güvenliğinin ve kararlılığının korunması kapsamında çözümler sunmaya yönelik olarak doğmuştur [18]. TSCOPF probleminde, birtakım arıza şartlarına karşı sistem geçici hal kararlılığının sağlanıp sağlanmadığına bakılarak minimum toplam güç üretim maliyetini veren güç sistemi işletim noktası bulunmaya çalışılır. Bu tarz yöntemlerde, kararlılık tespiti için algoritmanın içine

zaman bölgesinde diferansiyel denklem çözümleri veya simülasyon programlarının kullanımı dahil edilmektedir. TSCOPF problemin çözümüne yönelik çalışmalarda, genel olarak, eşik değer rotor açısı tayini ile güç sistemi kararlılığının kontrol edilmesi yöntemi kullanılmaktadır [19-21]. Güç sistemi için generatörlere ait eylemsizlik merkezi (COI, center of inertia) referanslı rotor açısı değişimleri dikkate alınan arıza ve işletim noktası için incelenerek daha önceden belirlenen bir eşik rotor açısı değerini geçip geçmediği kontrol edilir. Bu teknik ile arıza sonrası ilk rotor açısı salınımı göz önüne alınarak sistemin kararlı olup olmadığı belirlenir. [22] numaralı çalışmada, kararlılık kısıtlarının belirlenmesinde rotor açısı değerinden ziyade rotor hızı değişimine bakılmasının büyük güç sistemleri için daha olumlu sonuçlar verdiği belirtilmiştir. [23] numaralı çalışmada ise rotor açısı ve hızı yerine generatör baralarındaki gerilimin değişim yörüngesinin takibi yeni bir yöntem olarak önerilmektedir. Bu şekilde, güç sisteminin arıza sonrasındaki kararlılığı gerilim değişim yörüngesine bakılarak hızlı bir şekilde tespit edilmekte olduğu sonucuna varılmıştır. Fakat, bu yöntemin uygulanmasında güç sistemindeki her bir generatör için ayrı ayrı olarak kararlılık yörüngelerinin tespit edilmesi gerekmekte ve OPF probleminin çözümünde değişen işletim noktaları için bu yörüngelerin sürekli olarak güncellenmesi gerekmektedir. Bu sebeple TSCOPF probleminin çözümünde kullanımı uygun görünmemektedir.

Güç sisteminin kararlılık kısıtlarının belirlenmesinde matematiksel modellemelerle uğraşılmak istenmemesinden doğan bir diğer yöntem de yapay sinir ağları (ANN, artificial neural network) bazlı çalışmalardır [24, 25]. Bu çalışmaların ilk doğuşu aslında güç sisteminin çevrim içi olarak kararlılık şartlarının belirlenmesine dayanmaktadır [26]. Fakat daha sonrasında hesaplama avantajından dolayı TSCOPF çalışmaları için de önem arz eden bir yöntem olmuştur. ANN bazlı TSCOPF çalışmalarında, güç sistemine farklı işletim noktaları için farklı arıza koşulları uygulanarak geçici hal kararlılık ölçüm değerleri (rotor açısı değişimi, kritik temizleme zamanı vb.) zaman bölgesi simülasyonların gerçekleştirildiği programların da yardımıyla belirlenmektedir. Sonuçta ise girdi olarak farklı işletim noktaları ve arıza koşullarını, çıktı olarak ise geçici hal kararlılık ölçüm değerlerini kullanan bir ANN yapısı oluşturulur ve çevrim dışı olarak eğitilir. TSCOPF çözümünde ise bu oluşturulan ANN yapısı matematiksel denklem çözümüne gerek kalmadan hızlı bir şekilde sistemin kararlılığı hakkında bilgi vererek süreci hızlandırmaktadır. Fakat

ANN bazlı çalışmaların en büyük zorluğu, ANN eğitimi sırasında güç sisteminin tamamını kavrayıcı şekilde işletim noktalarının belirlenmesi ve arıza durumlarının seçilmesidir. Aksi takdirde çözüm doğruluktan uzaklaşabilir.

Geçici hal kararlılığı kısıtlarını dikkate alan OPF çalışmalarının yanında gerilim kararlılığı kısıtlarını baz alan çalışmalar da bulunmaktadır [27-29]. OPF problem çözümlerinde, gerilim kararlılığı indisleri, çalışmalarda bazen amaç fonksiyonunda yer alabilirken bazen de kısıt olarak ele alınmaktadır. Literatürde yoğunlukla kullanılan indislerden ikisi, L-indisi (L-index) [27, 28] ve yüklenme marjı (LM, loading margin) [29]'dır. L-indisi yönteminin geliştirilmiş versiyonu olan genişletilmiş L-indisi (EL-index, extended L-index) yöntemi, performans açısından [30] numaralı çalışma kapsamında yapılan numerik analiz sonucu diğer indislere göre daha iyi görünmektedir. Bunun yanında, güç sistemi bara gerilimi genlik değerlerinin nominal değere yakınsanması ile gerilim profilinin iyileştirilmesi de OPF problemlerinde gerilim kararlılığı bazlı çalışmalar için bir amaç olarak kullanılabilmektedir.

Güç sistemlerinin güvenliğinin sağlanması noktasında, gerilim kararlılığı da rotor açısı kararlılığına benzer şekilde kritiktir. Fakat bu iki kararlılık sınıfı birbirlerinden tamamiyle bağımsız değillerdir. Nitekim güç sistemleri için kritik önemde olan gerilim çökmesinin oluşması için gerilim kararsızlığına rotor açısı kararsızlığı da eşlik etmelidir [31]. Bu durumun yaşanmaması için beklenmedik olaylara karşı gerilim kararsızlığına en uzak ve ekonomik olan işletim noktasının seçilmesi bu kapsamdaki çalışmaların amacını oluşturmaktadır.

Rüzgâr enerjisinin güç sistemlerine entegrasyonunu arttırma amaçlı literatürde geniş bir çalışma alanı bulunmaktadır. Bunlar arasından ise çalışmaların yoğunlaştığı önemli alanlarda biri de geçici hal kararlılığı bazlı olanlardır. Rüzgâr hızının sürekli olmaması, güç sistemlerinin olası arıza ve hata gibi beklenmedik durumlara karşı daha dirençsiz kalmasına neden olmaktadır. Bu bağlamda, rüzgâr enerjisini içeren güç sistemlerinde OPF probleminin çözümünü amaç edinen ve rüzgâr enerjisinin dahil edilmesiyle güç sisteminin geçici hal kararlılığının analizi üzerinde duran birçok çalışma literatürde yer almaktadır. Bu çalışmaların çoğunda, rüzgâr enerjisinin dahil olduğu güç sistemlerinde, OPF problem çözümü rüzgâr enerjisi güç belirsizliğinin etkisiyle olasılıksal bir boyut kazanmaktadır. Olasılıksal boyutun bu etkisi sonucu, geleneksel OPF çözümü, yerini yeni OPF başlıklarına bırakmıştır. Olasılıksal OPF (POPF,

probabilistic OPF) çözümünde rüzgâr hızı belirli bir olasılıksal dağılım fonksiyonu ile ele alınmakta ve sonuç yine olasılıksal olarak elde edilmektedir [32]. Geleneksel OPF'ye kıyasla POPF çözümü, çok daha ağır bir hesaplama gerektirmektedir. Bu hesaplama yükü, nokta tahmini (PE, point estimate) [33] ve kümülant method (CM, cumilant method) [34] yaklaşımları ile hafifletilmeye çalışılmıştır. OPF çözümü ile elde edilen çıktıların sahip olduğu olasılık yoğunluk fonksiyonunun (PDF, probability density function) ilk 3 hareketini elde etmek için PE metodunun gelişmiş versiyonu olan iki nokta tahmini metodu (2PEM, two-point estimate method) [35] numaralı çalışmada kullanılmıştır. Bu çalışmalarda, OPF çıktı değerleri belirsizlik parametrelerine benzer şekilde bir olasılık dağılımı şeklinde elde edilmekte ve bu da pratiğe yönelik bakıldığında çözümün kullanışlılığı açısından olumsuzluk yaratmaktadır. Bu bağlamda, literatürdeki bu olumsuzluğu giderici bir çözüm olarak ihtimal kısıtlı OPF (CCOPF, chance constrained OPF) yöntemi doğmuştur [36]. CCOPF yönteminde bir veya birden fazla belirsiz parametrenin olduğu güç sistemlerinde OPF modeli, belirli bir olasılık değerine göre belirlenen bir güvenirlik derecesini sağlayacak şekilde tekrardan düzenlenir ve esnetilir. Fakat burada önemli olan konu, bu olasılık değerinin ne olacağıdır. Bu aşamada ise Monte Carlo (MC) örnekleme yöntemi veya alternatifleri güç sistemi üzerinde uygulanarak en uygun olasılık değeri bulunmaya çalışılmaktadır. Tüm işlem adımları düşünüldüğünde, CCOPF çalışmalarının ek uğraşlar gerektirdiği ve işlemsel olarak hesaplama ağırlığı yarattığı söylenebilir.

Hesaplama ağırlıkları düşünülmediğinde, olasılıksal yoğunluk fonksiyonları (Weibull, Gaussian vb.) üzerinden ne kadar çok örnekleme yapılırsa o kadar doğru ve güvenilir bir OPF çözümünün elde edilebileceği öngörülebilir. Son yapılan çalışmalarda hem güvenilir sonuç elde etmek hem de hesaplama ağırlığından kurtulmak için dayanıklı optimizasyon (RO, robust optimization) yöntemi kullanılmıştır [37]. Bu yöntemde, en kötü durum olabilecek senaryolar tüm belirsizlik parametrelerini kapsayacak şekilde OPF problemine uygulanarak belirsizliklere karşı güvenilir bir çözüm elde edilmeye çalışılmaktadır. Diğer yandan, bu yöntem, belirsizlik parametrelerinin en kötü durum senaryolarına odaklandığı için hesaplama süresi olarak da avantaj sağlamaktadır. Bu yöntemin kullanımında ise bir dezavantaj olarak çözümün dayanıklı olup olmadığının kontrolü için yüksek örneklemeli MC testine ihtiyaç duyulabilmektedir. Bu da ek bir işlem yükü anlamına gelmektedir [38, 39].

1.2.2 Rüzgâr enerjisi yatırımı

Literatürde rüzgâr enerjisi yatırımına yönelik son zamanlarda geliştirilen birçok problem modeli bulunmaktadır [40-43]. [40] numaralı çalışmada, tüketici maliyetini azaltıcı bir rüzgâr enerjisi ve yeni iletim hattı yatırım modeli sunulmaktadır. [41] numaralı çalışmada, dağıtım sistemlerinin doğal afetlere karşı dayanıklılığını sağlama amaçlı ve en uygun rüzgâr enerjisi konumunu bulmayı hedefleyen çok aşamalı stokastik yeni bir optimizasyon modeli önerilmektedir. Aynı şekilde [42] numaralı çalışmada, rüzgâr bazlı dağıtılmış generatörler (DG, distributed generator) için istatistiksel bir optimum konum bulma problem modeli enerji kaybının minimizasyonu ve gerilim kararlılığının arttırılması amaçları ile ele alınmıştır. [43] numaralı çalışmada ise uzun vadeli bir planlama kapsamında gerilim kararlılığı kısıtlı bir rüzgâr gücü yatırım problemi önerilmiştir.

Rüzgâr enerjisi yatırımı problemine benzer amaçlar içeren fakat yatırım, işletim ve bakım masrafları gibi maliyetlerin genellikle dikkate alınmadığı çalışmalar, dağıtılmış generatör en uygun konumlandırma başlığı altında yapılmaktadır. Bu çalışmalarda, sıklıkla, güç sistemi gerilim profilinin iyileştirilmesi ortak bir amaç olarak kullanılmaktadır. Gerilim profili, güç sisteminin güvenliği ve güç kalitesinin değerlendirilmesi açısından önemli bir göstergedir. Zayıf kalmış bir gerilim profili, güç sisteminde meydana gelebilecek arızalar, iletim hattı devre dışı kalması ve aşırı yük artışları durumunda gerilim kararsızlığını tetikleyebileceği için güç sisteminin güvenliği açısından risk oluşturmaktadır. Ayrıca, modern güç sistemlerindeki gerilim hassasiyetli ekipmanların kullanımının artması ile de gerilim profilinin iyileştirilmesi yine önem arz etmektedir. Dağıtılmış generatörlerin güç sistemi gerilim profilinin iyileştirilmesi noktasında olumlu etkileri bulunmaktadır. Dağıtılmış generatör bağlanan güç sistemi barası veya bölgesi, muhtemel aşırı yüklenmelere ve buna bağlı gerilim çökmesi gibi olumsuzluklara karşı DG'lerin sağladığı aktif ve reaktif güç desteği sayesinde dayanaklı kalabilmektedir. Gerilim profili iyileştirmesi yanında benzer birçok kriter veya amaç da yine bu tarz çalışmalarda dikkate alınmıştır. [44] numaralı çalışmada, DG en uygun yerleşim ve kapasite bulumu için güç sistemi enerji kaybı minimizasyonunu amaçlayan ve problem çözümünde denetimli Büyük Patlama-Büyük Çöküş (supervised Big Bang-Big Crunch) optimizasyon algoritmasını kullanan bir model önerilmektedir. [45] numaralı çalışmada ise enerji kayıplarının minimizasyonu ve güç sistemi gerilim profilini iyileştirme amaçlarının yanında toplam

harmonik bozulmasının azaltılması da bir diğer amaç olarak problem formülasyonunda dikkate alınmıştır. Toplam güç üretim maliyetinin, toplam bakır kayıplarının ve aynı zamanda da generatörlerden kaynaklı emisyonların minimize edilmesi, [46] numaralı çalışmada yine optimal DG konum ve kapasite bulumu için amaç edinilmiştir. Buna rağmen, literatürdeki benzer birçok çalışmada güç sisteminin arızalara karşı geçici hal kararlılık performansı veya dinamik cevabı incelenmemiş, bir güvenlik kriteri olarak kullanılmamıştır. Nitekim, [47] numaralı çalışmada literatürdeki bu eksikliğe değinilmiştir. Hâlbuki, rüzgâr tarlalarının eklenmesi ile güç sisteminin dinamik davranışı değişmekte ve bu sebeple güç sisteminin herhangi bir güvenlik problemi ile yüz yüze kalmaması için dinamik kararlılık analizinin gerçekleştirilmesi gerekli hale gelmektedir. [48] numaralı çalışmada, rüzgâr enerjisi entegrasyonunun güç sisteminin geçici hal kararlılık performansı üzerindeki etkisi detaylı olarak incelenmiştir. Çalışmanın sonuçlarına göre, güç sistemlerine belirli bir rüzgâr enerjisi katılımından sonra rüzgâr enerjisi entegrasyonun devam ettirilmesi durumunda, güç sisteminin muhtemel arızalara karşı geçici hal kararlılık performansının önemli ölçüde olumsuz etkilendiği görülmüştür.

1.3 Tezin İçeriği

Tez toplam 6 bölümden oluşmaktadır. Birinci bölümde, yenilenebilir enerji kaynakları ve bu enerji kaynakları içerisinde önemli bir yere sahip olan rüzgâr enerjisi kaynaklarının güç sistemlerine entegrasyonunun gelecek yıllar için gerekliliği vurgulanmış, bu kaynaklarla birlikte güç sisteminin işletimine ve yeni kaynakların entegrasyonuna yönelik yapılan literatürdeki ilgili çalışmalar sunularak tezin amacı açıklanmıştır. İkinci bölümde, güç sistemi güvenliği ve kararlılığı kavramları detaylı olarak ele alınmış, bu tez çalışmasında kullanılan güvenlik kriterleri açıklanmıştır. Üçüncü bölümde, literatürdeki eksikler dikkate alınarak geliştirilen yeni bir geçici hal kararlılığı kısıtlı optimal güç akışı problemi ve bu problemin farklı ölçeklerdeki güç sistemlerine uygulanışı ile elde edilen sonuçlar karşılaştırmalı analizler ile verilmiştir. Dördüncü bölümde, geliştirilen yeni bir meta-sezgisel optimizasyon algoritması, detaylı olarak anlatılmış ve OPF problemine uygulanarak elde edilen sonuçlar karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Beşinci bölümde, geliştirilen optimizasyon algoritması kullanılarak önerilen yeni rüzgâr gücü yatırım problemi farklı durum çalışmaları kapsamında çözülmüş ve bu çözümlere ait elde edilen sonuçlar

paylaşılmıştır. Altıncı ve son bölümde ise sonuçlar yorumlanarak gelecek çalışmalar için önerilerde bulunulmuştur.

2. GÜÇ SİSTEMİNİN GÜVENLİĞİ VE KARARLILIĞI

Güç sisteminin güvenliği, güç sistemi hasara uğramadan ve tüketicilere sağlanan enerji desteğinde bir kesinti meydana gelmeden olması muhtemel fiziksel bozuculara karşı güç sisteminin dayanıklılık yeteneğindeki riskin derecesini ifade etmektedir. Bir diğer ifadeyle, güç sisteminin bozucu etkilere karşı dayanıklılığındaki sağlamlığın ölçümüdür. Bu bozucular; tek, çift veya üç fazda meydana gelebilecek bir kısa devre arızası, ani yük değişimi, generatör veya iletim hattının devre dışı kalması, gerilim çökmesi veya bu durumların bir kombinasyonu olarak tanımlanabilir. Diğer yandan, güç sisteminin kararlılığı, bozucu etki meydana geldikten sonraki süreçte güç sisteminin normal çalışma şartlarına devam edebilme veya tekrardan dengeli çalışma koşullarını yakalayabilme yeteneği olarak tanımlanabilir.

Güç sisteminin güvenliği ve kararlılığı ilişkili terimlerdir, fakat güç sisteminin güvenliği daha kapsamlı bir ifadedir. Güç sisteminin kararlılığı, güç sisteminin dinamik güvenliğinin sağlanması için gerekli koşuldur.

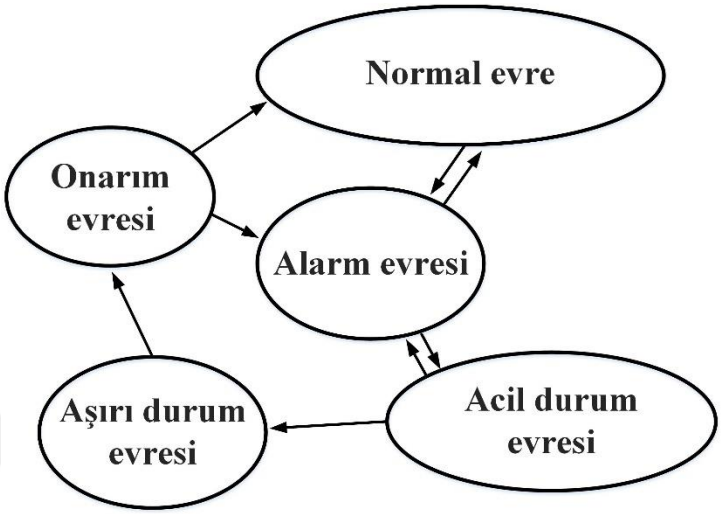
2.1 Güç Sisteminin Güvenliği

Güç sisteminin güvenliği, bozucu etkinin gerçekleşme olasılığına bağlı olduğu kadar güç sisteminin işletim koşullarına da oldukça bağlıdır. Güç sisteminin güvenliği hakkında bilgi edinmek ve en uygun kontrol stratejisini belirlemek için güç sisteminin güvenliği çeşitli güç sistemi işletim evreleri ile ifade edilmektedir. Literatürde bu işletim evreleri; normal evre, alarm evresi, onarım evresi, acil durum evresi ve aşırı durum evresi olarak 5 sınıfa ayrılmaktadır [49]. Şekil 2.1'de bu işletim evreleri arasında geçişin hangi yönlerde gerçekleştiği görülmektedir.

Normal evrede, güç sistemindeki tüm tüketicilerin enerji talebi karşılanmakta ve güç sistemindeki ekipmanlara ait fiziksel limitler sınırlar dahilindedir. Bunlara ek olarak, güç sistemi olası arızalara karşı dayanaklılık yeteneğine sahiptir.

Alarm evresinde, güç sistemindeki ekipmanlardan bazılarına ait değerler (örneğin; hat akımı, bara gerilimi vb.) aşırı yük artışı veya arıza durumu gibi nedenlerle teknik

limitlerinin dışına çıkmıştır, fakat güç sistemi hâlen tüketicilerin enerji talebini karşılamaktadır. Buna rağmen, ek bir yük artışı veya bir başka arızanın meydana gelme ihtimali güç sistemini tehdit etmekte ve bu sebeple önleyici kontrol eylemleri ile güç sistemi onarılarak normal evre işletim koşullarına geçirilmelidir.



Şekil 2.1 : Güç sistemi işletim evreleri.

Acil durum evresinde, alarm evresinde olduğu gibi tüketicilerin enerji talebi karşılanmakta, fakat güç sistemindeki teknik sınır ihlalleri oldukça ciddi durumdadır. Genellikle, alarm evresinde işletilmekte olan güç sistemi ek bir arıza meydana gelmesi veya yük artışı gibi durumla karşılaşması ile acil durum evresine geçmektedir. Bu sebeple, etkili düzeltici kontrol eylemleri ile öncelikle alarm evresine daha sonra ise normal evreye geçilmelidir.

Güç sistemi, doğru ve etkili düzeltici kontrol eylemlerinin uygulanmadığı durumda acil durum evresinde iken aşırı durum evresine geçmektedir. Bu evrede, generatörler arasındaki senkronizasyonun kaybolması ve buna bağlı bazı generatörlerin devreden çıkarılması ile güç üretiminde düşüş meydana gelmektedir. Bu evrenin en uç noktasında, güç sistemi bölgesel olarak veya tamamen devre dışı hale gelmektedir.

Güç sisteminin aşırı durum evresinden alarm evresine veya normal evreye geçebilmesi için onarım evresine ihtiyaç duyulmaktadır. Onarım evresinde, güç sistemi operatörleri güç sistemindeki yüklere yeterli gücü sağlayarak güç sistemini kademeli olarak normal evreye getirmek amacıyla düzeltici kontrol eylemlerini uygularlar.

Bu tez çalışmasında, güç sisteminin sürekli durumda normal evrede kalacak şekilde güvenlik analizi yapılarak önleyici kontrol eylemleri uygulanmış, alarm evresi veya

acil durum evresine geçişe neden olabilecek ani yük artışının veya ardışık çoklu arızaların meydana gelme ihtimali ihmâl edilmiştir.

2.1.1 Statik ve dinamik güvenlik değerlendirmesi

Güvenlik değerlendirmesi, güç sisteminin güvenliğini test etmek ve garanti altına almak amacıyla yapılmakta, statik ve dinamik güvenlik değerlendirmesi olmak üzere ikiye ayrılmaktadır.

Statik güvenlik değerlendirmesi, arıza sonrası kararlı hal çalışma koşullarında güç sistemindeki ekipmanların fiziksel limitlerinin ve gerilim kısıtlarının ihlal edilip edilmediğini belirler. Statik güvenlik değerlendirmesi ile arızanın meydana gelmesi durumunda güç sisteminin statik çıktılar dahilinde güvenliğinin sağlanıp sağlanmadığı hızlıca ve basit bir şekilde belirlenebilir, fakat daha detaylı ve kapsamlı bir güvenlik değerlendirmesi için dinamik güvenlik değerlendirmesinin gerçekleştirilmesi gerekmektedir.

Dinamik güvenlik değerlendirmesinde kullanılan yöntemler ile arıza öncesi durumdan arıza sonrası duruma geçişte güç sisteminin kabiliyet ve kararlılığı değerlendirilir. Dinamik güvenlik değerlendirmesinde kullanılan kriterler ise şu şekilde sıralanabilir [49]:

- Rotor açısı, gerilim ve frekans kararlılığı,
- Arıza esnası ve sonrası dinamik evrede belirli bir eşik değerin üstünde kalan frekans ve gerilim sapmaları,
- Güç sistemi bölgeler arası ve bölge içi güç salınımlarının sönümlenmesi.

2.1.2 Güvenlik değerlendirmesi adımları

Güç sistemlerinin güvenliğini en iyi şekilde sağlayabilmek için sistemi zora sokabilecek kritik durumları en iyi şekilde tanımlamak ve bu durumlara (arızalara) karşı en etkili önleyici tedbirleri almak gerekmektedir. Bu tedbirlerin yeterli olmadığı durumda ise gerçekleştirilecek düzeltici kontrol eylemlerinin doğru bir şekilde planlanması gerekmektedir.

Güç sistemi güncel işletim noktasına ait bilgiler toplandıktan sonra güvenlik değerlendirmesinin ilk adımını arıza analizi oluşturmaktadır. Arıza analizi ile güç sisteminde kararsızlığa neden olabilecek muhtemel arızalar değerlendirilerek

içlerinden en kritik olanlar seçilir. Güvenlik değerlendirmesinin ikinci adımında ise seçilen bu arızalara karşı güç sisteminin güvenliğini garanti altına alacak şekilde gerekli önleyici ve düzeltici kontrol eylemleri planlanır.

2.1.2.1 Arıza analizi

Arıza analizi, üç aşamaya ayrılabilir. İlk aşamada, güç sisteminin güvenliğinin sağlanması noktasında probleme yol açabilecek generatör, yük veya transformatör devreden çıkması, iletim hattının kısa devre olması veya bu durumların birleşimi gibi muhtemel arızalar belirlenir. İkinci aşamada ise bu arızalar güç sistemi için barındırdıkları potansiyel riske göre değerlendirilerek sıralanırlar. Üçüncü ve son aşamada ise arıza setinin büyüklüğüne göre güç sisteminin güvenliğini tehdit eden kritik arızalar seçilir ve arıza analizi tamamlanmış olur.

2.1.2.2 Önleyici ve düzeltici kontrol eylemlerinin uygulanması

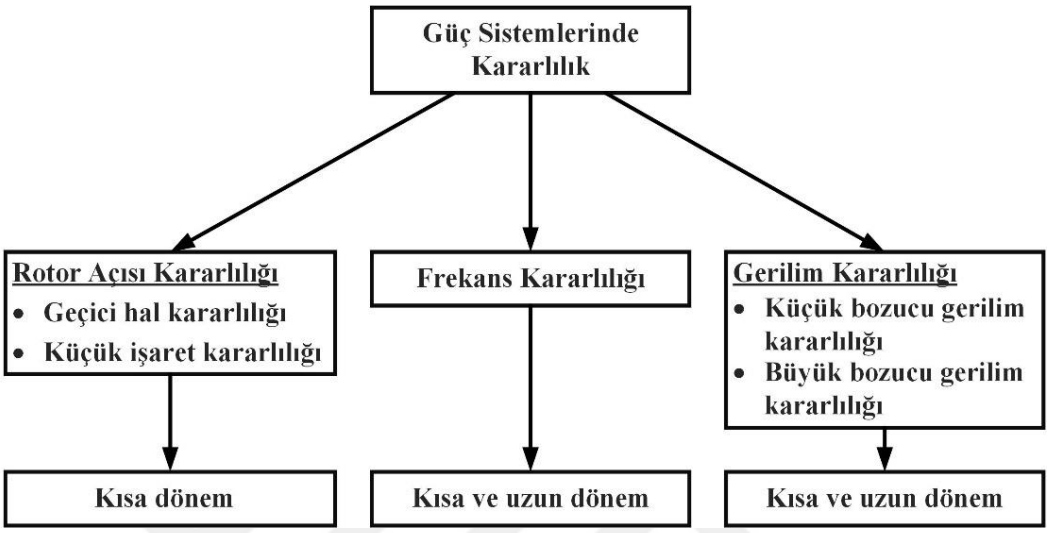
Genel olarak, güç sisteminde güvenlik eylemleri, önleyici ve düzeltici olmak üzere iki ana kategoriye ayrılmaktadır. Önleyici kontrol eylemlerinin uygulanmasındaki amaç, normal çalışma durumundaki güç sistemine beklenmedik durumlara karşı kararlılığını ve sürekliliğini koruyacak şekilde yetenek kazandırmaktır. Önleyici kontrol eylemlerine; generatör güç dağıtımının yeniden yapılması, yük azaltma ve reaktif güç kompanzasyonu örnek verilebilir. Diğer yandan, düzeltici kontrol eylemlerinin uygulamalarındaki amaç, meydana gelen bir arıza sonrasında güç sistemi dinamiklerini kontrol ederek oluşabilecek hasarı en aza indirmektir. Düzeltici kontrol eylemlerine; şönt kapasitör ve reaktör anahtarlaması, güç üretimini azaltma ve yük atma örnek verilebilir [50].

Önleyici ve düzeltici kontrol eylemleri arasındaki fark, arızanın meydana gelip gelmediğidir. Önleyici kontrol eylemlerinde arıza henüz meydana gelmemiş ve aynı zamanda meydana gelip gelmeyeceği de belirsizdir. Diğer yandan, düzeltici kontrol eylemlerinde arıza meydana gelmiş ve güç sistemi bu arızanın neden olduğu veya olabileceği olumsuz etkilerden kurtarılmaya çalışılmaktadır.

Bu tez çalışmasında, arıza analizi ile belirlenen olası kritik arızalara karşı güç sisteminin güvenliği önleyici kontrol eylemlerinden generatörler arası güç dağıtımının yeniden yapılması ile garanti altına alınmaya çalışılmıştır.

2.2 Güç Sisteminin Kararlılığı

Güç sisteminin kararlılığı, güç sistemlerinde güvenlik değerlendirmesi için kullanılan kriterleri oluşturmaktadır ve Şekil 2.2'de görüldüğü gibi rotor açısı, gerilim ve frekans kararlılığı olmak üzere 3 başlıkta sınıflandırılabilir [51, 52].



Şekil 2.2 : Güç sistemlerinde kararlılığın sınıflandırılması.

Rotor açısı kararlılığı, bir bozucu etki sonrasında güç sisteminin senkronize durumda kalabilme yeteneği olarak tanımlanabilir. Generatör rotor açısı, generatör elektriksel güç çıkışı etkisiyle oluşan elektromanyetik tork ile generatör tahrik sistemine aktarılan giriş mekanik gücün etkisiyle oluşan mekanik tork arasındaki dengeye bağlıdır. Generatörler arasındaki senkronizasyon da tüm generatörler için bu iki değerin birbirine eşit olması durumu ile ancak sağlanmaktadır. Herhangi bir generatörde bir bozucu etki sonucu bu dengenin bozulması, rotor açısında osilasyon meydana getirmektedir.

Rotor açısı kararlılığı, bozucu etki şiddetine göre küçük ve büyük bozucu rotor açısı kararlılığı olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Küçük bozucu rotor açısı kararlılığı veya bir diğer ifadeyle küçük işaret açı kararlılığı, güç sisteminde sınırlı miktarda yük değişimi, küçük ölçekli yüklerin anahtarlanması ve küçük ölçekli generatörlerin devre dışı bırakılması gibi küçük bozucular ile ilgili kararlılık analizlerini kapsarken; büyük bozucu rotor açısı kararlılığı veya bir diğer ifadeyle geçici hal kararlılığı, güç sistemindeki kısa devre arızaları, büyük ölçekli yüklerin anahtarlanması ve yine büyük ölçekli generatörlerin devre dışı bırakılması gibi büyük bozucular ile ilgili kararlılık analizlerini kapsamaktadır. Küçük bozucu sonucu salınımsız ve salınımlı olmak üzere

güç sisteminde iki tipte kararsızlık durumu oluşabilmektedir. Salınımsız durumda generatör rotor açıları sürekli bir artış halindeyken; salınımlı durumda generatör rotor açılarında artan genlikte bir osilasyon meydana gelmektedir. Geçici hal kararlılığı kapsamında ele alınan büyük bozucular sonucu, küçük işaret kararlılığındakine kıyasla, generatör rotor açılarında büyük dalgalanmalar meydana gelmektedir. Diğer yandan, rotor açısı kararlılığına bağlı analizler 0.1 ile 10 saniye arasında bir zaman bölgesi için yapılmakta ve bu sebeple kısa dönemli bir olgu olarak dikkate alınmaktadır.

Gerilim kararlılığı, bir bozucu etkiye maruz kalan güç sisteminin tüm baralardaki kararlı hal gerilimini koruyabilme yeteneğidir. Gerilim kararlılığı, rotor açısı kararlılığına benzer şekilde, bozucu şiddetine bağlı olarak küçük ve büyük bozucu gerilim kararlılığı olarak ikiye ayrılmaktadır.

Gerilim kararlılığı, rotor açısı kararlılığından farklı olarak hem kısa hem de uzun dönemli bir olgu olabilmektedir. Kısa dönemli olguya, indüksiyon motorlar ve güç elektroniği sürücü sistemleri gibi tepkisi hızlı olan cihazlardan kaynaklı güç sisteminde gerilim dalgalanmalarının meydana gelmesi örnek verilebilirken; uzun dönemli olguya, güç sistemi yük talebindeki geniş zamanlı azalmalar veya artmalar, transformatör kademe ayarı vb. durumlar nedeniyle bara gerilimlerinde yavaş şekilde meydana gelen değişimler örnek verilebilir. Gerilim kararlılığı analizi, 10 saniyeden birkaç dakikaya varan zaman bölgesinde yapılabilmektedir.

Gerilim kararlılığı ve rotor açısı kararlılığı arasındaki diğer bir fark, gerilim kararlılığının güç sistemindeki reaktif güç üretim ve tüketim dengesine; rotor açısı kararlılığının ise daha çok aktif güç dengesine bağlı olmasıdır.

Frekans kararlılığı, güç üretim ve tüketimi arasındaki dengenin kaybolduğu bir bozucu etki sonrası güç sisteminin normal durum frekans değerini koruyabilme yeteneğidir. Kararsızlık durumu, güç sisteminde sürekli frekans dalgalanmaları şeklinde meydana gelebilmekte ve buna bağlı generatör ve yüklerin devreden çıkarılmasına yol açabilmektedir. Frekans kararlılığı problemleri; genellikle, yetersiz güç üretim rezervi, güç sistemindeki koruma ve kontrol ekipmanları arasındaki koordinasyon zayıflığı vb. durumlarla ilgilidir. Gerilim kararlılığına benzer şekilde frekans kararlılığı da hem kısa hem de uzun dönemli bir olgudur.

Güç sistemi kararlılığı her ne kadar rotor açısı, gerilim ve frekans kararlılığı olarak sınıflandırılsa da bunlar birbirlerinden bağımsız değillerdir. Örnek olarak; gerilim çökmesi durumuna rotor açısı ve frekans kararsızlığı da eşlik etmektedir.

Bu tez çalışmasında, güç sisteminin güvenliği, ağırlıklı olarak geçici hal kararlılığı kriteri ile ele alınmış ve bu kapsamda muhtemel kritik kısa devre arızalarına karşı önleyici kontrol eylemleri uygulanmıştır.

3. GEÇİCİ HAL KARARLILIĞI KISITLI OPTİMAL GÜÇ AKIŞI (TSCOPF)

Literatürde, TSCOPF probleminin doğuşu IEEE tarafından 1995 yılında gerçekleştirilen "*Winter Power Meeting Panel Session on Challenges to optimal power flow (OPF)*" isimli oturuma dayanmaktadır. Oturumda, gelecekteki OPF yaklaşımının güç sisteminde gerilim ve rotor açısı kararsızlığına neden olabilen beklenmedik durumların yarattığı etkileri yerel ve global kontrol önlemleri ile nasıl bertaraf edebileceği sorusuna cevap aranmıştır [53]. Bunun sonucunda, TSCOPF, güç sisteminin kapsamlı dinamik modelinin dikkate alındığı ve muhtemel arızalara karşı güç sisteminin kararlı ve ekonomik bir şekilde işletilmesini hedefleyen bir araştırma alanı olarak literatürde yer bulmuştur. TSCOPF problemine yönelik çalışmalar, modern güç sistemleri elemanlarının karmaşık yapısı ve güç sistemi güvenliğini tehdit eden dinamik etkileri nedeniyle günümüzde de halen önem arz etmektedir.

Literatürde, belirsiz değişken içeren birçok OPF problem modeli varken, TSCOPF problemi için belirsizliklerle ele alınan model sayısı kısıtlı kalmıştır. OPF probleminin belirsizliklerle ele alınmasında bir takım farklı yöntemler söz konusudur. Bunları 3 başlıkta kategorize edebiliriz; olasılıksal teknikler, dayanıklı optimizasyon tekniği ve bulanık-bazlı yaklaşımdır. Olasılıksal tekniklerde, belirsiz değişkenler olasılıksal yoğunluk fonksiyonları ile ele alınmaktadır. Bu teknikte girişin olasılıksal olduğu göz önüne alınırsa, elde edilen çıktılar da olasılıksal olmakta ve bu durum pratiğe yönelik olarak karar verici açısından pek uygulanabilir bir çözüm sunmamaktadır. Diğer yandan, dayanıklı optimizasyon tekniğinin kullanıldığı çalışmalarda ise problemin çözümü için hesaplama hızı açısından avantajlar sağlansa da birtakım eksiklikler yine söz konusudur. Bu çalışmalarda, optimizasyon için kullanılan az miktardaki senaryo, problem modelindeki belirsiz değişkenlerin neden olduğu tüm belirsizliği kapsayacak şekilde seçilmelidir. Fakat, bunun testini yapmak için Monte Carlo gibi örnekleme tekniklerinden yararlanılmakta ve bu da yine ek işlem yüküne neden olmaktadır. Bulanık-bazlı yaklaşımlarda, olasılıksal tekniklere benzer şekilde, belirsiz değişkenlerin olasılık yoğunluk fonksiyonları kullanılmakta ve bu fonksiyon bilgilerine bağlı olarak elde edilen üyelik fonksiyonları (MF, membership function) ile

de belirsizlik modellemesi gerçekleştirilmektedir. Bu noktada, bu üç yöntemden herhangi birinin kullanımı ile yapılan bir çalışmada, belirsiz değişkenlerin olasılık yoğunluk fonksiyonu bilgilerine kesin olarak ihtiyaç vardır. Bu fonksiyonlar, belirsiz değişkenin geçmiş verileri üzerinden elde edilebileceği gibi birtakım varsayımlara dayandırılarak da oluşturulabilmektedir.

Bu tez çalışmasında, rüzgâr enerjisi üretimindeki belirsizliklerin ele alınmasında IGDT yöntemi kullanılarak rüzgâr enerjisi içeren güç sistemleri için yeni bir TSCOPF problem çözümü önerilmiştir. IGDT, olasılıksal olmayan bir karar verme yöntemi olarak son zamanlarda güç sistemleri ile ilgili geleneksel OPF problemi de dahil olmak üzere çeşitli optimizasyon çalışmalarında kullanılmıştır [54-56]. IGDT yönteminde, belirsiz değişkenlere ait olasılıksal dağılım fonksiyonu veya üyelik fonksiyonu bilgilerine ihtiyaç duyulmamaktadır. Ayrıca IGDT, problem tipinden bağımsız olarak kolaylıkla uygulanabilmektedir. IGDT ile yapılan problem çözümleri sonucunda güvenilir çıktılar elde edilmekte ve bu çıktılar rahatlıkla pratikte karşılık bulabilmektedir.

Diğer yandan TSCOPF problemi, geleneksel OPF probleminden farklı olarak güç sistemi dinamik modelini ifade eden diferansiyel-cebirsel denklemler içermektedir. Bu denklemlerin çözümü ise optimizasyon sürecinde hesaplama yoğunluğu oluşturmaktadır. Hesaplama açısından zorlukların yaşandığı bir durumda, TSCOPF probleminin belirsizlikler altında uygulanması ise oldukça zor olacaktır. Bu kapsamda, IGDT yönteminin hesaplama yönünden sağladığı avantaj ile problem çözümünde meydana gelen bu zorluk telafi edilebilecektir.

Bu tez çalışması kapsamında ele alınan deterministik TSCOPF ve IGDT bazlı TSCOPF problemleri, güç sisteminin kapsamlı dinamik modelini de içerecek şekilde GAMS yazılımında [57] oluşturulmuştur. GAMS yazılımı dahilinde kullanılabilen IPOPT [58], CONOPT [59] vb. gibi çözücüler TSCOPF problemi gibi binlerce değişken ve kısıt içerebilen optimizasyon problemlerinin çözümü noktasında oldukça güçlüdürler. Nitekim bu durum, [22] ve [60] numaralı çalışmalarda görülmektedir.

3.1 Deterministik Problem Formülasyonu

TSCOPF problemi, geleneksel OPF probleminden farklı olarak geçici hal kararlılığıyla ilgili kısıtlar ve bu kısıtların test edilmesi için gerekli bir takım

diferansiyel-cebirsel denklemleri içermektedir. Literatürde TSCOPF problemi, genel olarak deterministik olarak ele alınmış ve güç üretiminin senkron generatörlere bağlı olduğu güç sistemi modelleri üzerinde uygulanmıştır. Bu çalışmada, senkron generatörlere bağlı güç üretimi yanında rüzgâr enerjisine bağlı da üretim söz konusu olduğundan rüzgâr generatörüne ait dinamikler de güç sistemi dinamik modelinde dikkate alınmıştır.

TSCOPF probleminde statik kısıtları, güç akış denklemleri ve güç sistemi ekipmanlarına ait fiziksel sınırlar oluşturmaktadır. Dinamik kısıtları ise geçici hal kararlılığı kısıtları yani güç sistemi dinamik modelini temsil eden DAE denklemleri oluşturmaktadır. TSCOPF probleminde geçici hal kararlılığı kısıtlarının kontrolü, generatör rotor açısı değişimi ile yapılmaktadır. Literatürde, simülasyon süresi boyunca relatif rotor açısı değişiminin 100, 120 veya 180 dereceyi geçmemesi güç sisteminin kararlı kaldığının göstergesi olarak ele alınmaktadır. Literatürdeki yaklaşımlara benzer olarak bu çalışmada relatif (göreceli) rotor açısı kısıtı 100 derece olarak belirlenmiştir.

TSCOPF probleminin deterministik çözümü için güç sisteminde bulunan tüm belirsiz değişkenler tahmin edilen değerleri ile kullanılmaktadır. Deterministik çözümde kullanılan bu tahmin değerleri, aynı zamanda IGDT bazlı TSCOPF probleminin çözümünde belirsiz değişkenler için bir referans değer olarak kabul edilmektedir.

3.1.1 Amaç fonksiyonu

Deterministik TSCOPF problemindeki amaç, statik ve dinamik kısıtlara dikkat edilerek generatör toplam güç üretim maliyetinin minimize edilmesidir. Bu tez çalışması kapsamında rüzgâr enerjisine bağlı güç üretim maliyeti ihmal edilmiştir. Rüzgâr generatörleri hariç tüm generatörler tarafından üretilen gücün toplam maliyetini içeren amaç fonksiyonu aşağıdaki gibidir:

$$\text{Minimize et: } OF = \sum_{i \in \mathcal{G}} (a_i P_{Gi}^2 + b_i P_{Gi} + c_i) \tag{3.1}$$

Burada, a_i, b_i ve c_i i'nci barada bulunan generatöre ait maliyet fonksiyonu katsayılarını; P_{Gi} i'nci baraya bağlı senkron generatör aktif güç üretim değerini; ve $\mathcal{G}$ senkron generatörlerin bulundukları bara numaraları kümesini ifade etmektedir.

3.1.2 Eşitlik kısıtları

Eşitlik kısıtları, aşağıda formüle edilen güç akışı denklemlerinden oluşmaktadır:

$$P_{Gi} + P_{Wi} = P_{Li} + V_i \sum_{n \epsilon \mathcal{N}} V_n Y_{in} \cos(\theta_i - \theta_n - \varphi_{in}) \tag{3.2}$$

$$Q_{Gi} + Q_{Wi} = Q_{Li} + V_i \sum_{n \epsilon \mathcal{N}} V_n Y_{in} \sin(\theta_i - \theta_n - \varphi_{in}) \tag{3.3}$$

Burada, V_i i'nci baradaki gerilim değerini; P_{Wi} i'nci baradaki rüzgâr tarlası aktif güç üretimini; Q_{Gi} ve Q_{Wi} sırasıyla güç sistemindeki senkron generatörlerden ve rüzgâr tarlalarından üretilen reaktif güç değerini; P_{Li} ve Q_{Li} i'nci baradaki sırasıyla aktif ve reaktif yük değerini; $\mathcal{N}$ güç sistemindeki tüm baraların kümesini; Y_{in} bara admitans matrisinin ixn'nci elemanının genliğini; ve φ_{in} bara admitans matrisinin ixn'nci elemanının açısını göstermektedir. θ_i ve θ_n ifadeleri ise sırasıyla i'nci ve n'nci baralardaki gerilimin açısını ifade etmektedir.

3.1.3 Eşitsizlik kısıtları

TSCOPF probleminde eşitsizlik kısıtları, generatör maksimum aktif güç üretimi ve iletim hattı maksimum taşıma kapasitesi gibi güç sistemi fiziksel limitlerinden oluşmakta ve aşağıdaki gibi formüle edilmektedir:

$$P_{Gi}^{min} \leq P_{Gi} \leq P_{Gi}^{maks} \quad \forall i \, \epsilon \, \mathcal{G} \tag{3.4}$$

$$Q_{Gi}^{min} \leq Q_{Gi} \leq Q_{Gi}^{maks} \quad \forall i \, \epsilon \, \mathcal{G} \tag{3.5}$$

$$Q_{Wi}^{min} \leq Q_{Wi} \leq Q_{Wi}^{maks} \quad \forall i \, \epsilon \, W \tag{3.6}$$

$$V_i^{min} \leq V_i \leq V_i^{maks} \quad \forall i \, \epsilon \, N \tag{3.7}$$

$$S_{ij} \leq S_{ij}^{maks} \quad \forall i, j \, \epsilon \, N \tag{3.8}$$

Burada, S_{ij} i'nci ve j'nci baralar arasındaki güç akışını ve W ise rüzgâr tarlalarının bağlı olduğu baraların kümesini belirtmektedir.

3.1.4 Geçici hal kararlılığı kısıtları

Geçici hal kararlılığı kısıtları, güç sistemi dinamik modelini ve generatör rotor açısı değişiminin sınırlandırılmasını kapsayan bir takım eşitlik ve eşitsizlikten oluşmaktadır.

Güç sistemi dinamik modeli, aşağıdaki gibi ifade edilen bir takım diferansiyel ve cebirsel eşitlikten oluşmaktadır:

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f(\boldsymbol{x}, \boldsymbol{y}, \alpha) \\ g(\boldsymbol{x}, \boldsymbol{y}, \alpha) \end{bmatrix} \tag{3.9}$$

Burada, $\boldsymbol{x}$ dinamik durum değişkenlerine, $\boldsymbol{y}$ cebirsel değişkenlere ve α ise karar değişkenlerine ait vektörü ifade etmektedir.

Diğer yandan, arıza esnası ve sonrası güç sistemi geçici hal kararlılığının korunması adına generatör rotor açısı değişimleri aşağıda verilen eşitsizlik ile sınırlandırılmaktadır:

$$\left|\delta_i^{rel}\right|_{max} \leq \delta_{th} \quad \forall i \in \mathcal{G} \tag{3.10}$$

Burada, δ_i^{rel} i'nci baraya bağlı generatöre ait relatif rotor açısını ve δ_{th} ise relatif rotor açısı değişimi için sınır olarak belirlenen eşik değerini ifade etmektedir. δ_i^{rel} aşağıdaki eşitlik ile elde edilmektedir:

$$\delta_i^{rel} = \delta_i - \delta^{COI} \quad \forall i \in \mathcal{G} \tag{3.11}$$

Burada, δ^{COI} eylemsizlik merkezi referanslı rotor açısını ifade etmektedir.

3.2 Güç Sistemi Dinamik Modeli

Bu tez çalışmasında, güç sistemi dinamik modeli, senkron generatörlere ve rüzgâr generatörlerine ait DAE'leri içerecek şekilde oluşturulmuştur.

3.2.1 Senkron generatör modeli

Güç sistemindeki konvansiyonel enerji birimleri için denklem 3.12 ile verilen 4. dereceden senkron generatör modeline ait diferansiyel eşitlikler kullanılmıştır. Bu model, güç sistemi geçici hal kararlılığının analizi için literatürde en çok kullanılan yöntemlerden biridir.

$$T'_{do}\frac{dE'_q}{dt} = -E'_q - (X_d - X'_d)I_d + E_{fd}$$

$$T'_{qo}\frac{dE'_d}{dt} = -E'_d + (X_q - X'_q)I_q$$

$$\frac{d\delta}{dt} = \omega - \omega_s \tag{3.12}$$

$$\frac{2H_{sg}}{\omega_s}\frac{d\omega}{dt} = T_{M,sg} - T_{E,sg} - D(\omega - \omega_s)$$

Burada, δ rotor açısı; ω ve ω_s sırasıyla rotor hızı ve senkron hız; $E_d^{'}$ ve $E_q^{'}$ senkron generatör iç gerilimi dq komponentleri; X_d ve X_q senkron reaktanslar dq komponentleri; $X_d^{'}$ ve $X_q^{'}$ geçici reaktanslar dq komponentleri; $T_{do}^{'}$ ve $T_{qo}^{'}$ açık devre geçici zaman sabiti dq komponentleri; I_d ve I_q senkron generator dq komponentleri; H_{sg} ve D sırasıyla eylemsizlik ve sönümleme sabitleri; ve E_{fd} ise alan gerilimidir.

Denklem 3.12'de senkron generator giriş mekanik torkunun, $T_{M,sg}$, simülasyon zamanı süresince sabit kaldığı kabul edilmiştir. Bunun nedeni, geçici hal kararlılığı kısa dönemli bir olgudur ve analizler genellikle arıza meydana geldikten sonraki ilk birkaç saniyelik süreyi kapsamaktadır. Dolayısıyla, bu süreler için mekanik torktaki değişim çok kısıtlı kalmaktadır. Buna bağlı olarak türbin ve hız regülatörü dinamikleri de ihmal edilmiştir.

Senkron generator elektriksel torkuna ve terminal gerilimi dq komponentlerine ait eşitlikler denklem 3.13 ile verilmiştir.

$$T_{E,sg} = E'_d I_d + E'_q I_q + (X'_q - X'_d)I_q I_d$$

$$V_d = X'_q I_q - R_s I_d + E'_d \tag{3.13}$$

$$V_q = -X_d^{'} I_d - R_s I_q + E_q^{'}$$

Burada, R_s stator rezistansıdır.

Güç sistemindeki tüm senkron generatörler için basitleştirilmiş uyarıcı sistem modeli (SEXS, simplified exciter system model) kullanılmıştır. Bu uyarıcıya ait dinamik model eşitlikleri denklem 3.14'te verilmiştir.

$$T_a \frac{dE_{fd}}{dt} = -E_{fd} + K_a(V_r - V_{term})$$
$$V_{term} = \sqrt{V_d^2 + V_q^2} \tag{3.14}$$

Burada, T_a ve K_a sırasıyla uyarıcı zaman sabiti ve uyarıcı kazanç değeridir. V_r gerilim referansıdır.

3.2.2 Rüzgâr generatörü modeli

Güç sistemindeki arızalara karşı güçlü ve güvenilir bir çözümün sağlanması için sistem şartlarını zorlayacak şekilde durumların seçilmesi önem arz etmektedir. Bu kapsamda, rüzgâr generatörü dinamikleri için denklem 3.15 ile verilen ve genellikle sabit hızlı rüzgâr türbinleri için kullanılan sincap kafes indüksiyon generatörü (SCIG, squirel cage induction generator) modeli dikkate alınmıştır. Bu generatör modeli güç sistemindeki arızalara karşı dayanıksız oluşları ile bilinmektedirler.

$$T_{o,ig} \frac{de'_{d,ig}}{dt} = -e'_{d,ig} + \left(X_{ig} - X'_{ig}\right) i_{qs} + s\omega_s e'_{q,ig}$$
$$T_{o,ig} \frac{de'_{q,ig}}{dt} = -e'_{q,ig} - \left(X_{ig} - X'_{ig}\right) i_{ds} - s\omega_s e'_{d,ig} \tag{3.15}$$
$$\frac{2H_{ig}}{\omega_s} \frac{d\omega_r}{dt} = T_{m,ig} - T_{e,ig}$$

Burada, $e'_{d,ig}$ ve $e'_{q,ig}$ indiüksiyon generatörü iç gerilimi dq komponentleri; X_{ig} ve X'_{ig} sırasıyla indüksiyon generatörü senkron ve geçici reaktansı; i_{ds} ve i_{qs} stator akımı dq komponentleri; $T_{m,ig}$ ve $T_{e,ig}$ sırasıyla indüksiyon generatörü mekanik ve elektriksel torkları; ω_r indüksiyon generatörü rotor açısal hızı; $T_{o,ig}$ indüksiyon generatörü açık devre zaman sabiti; H_{ig} indüksiyon generatörü eylemsizlik sabiti; ve s ise kaymadır.

Senkron generatör denklemlerine benzer şekilde terminal gerilimi dq komponentlerine ve indüksiyon generatörü elektriksel torkuna ait eşitlikler denklem 3.16 ve 3.17 ile verilmiştir.

$$v_{ds} = X'_{ig} i_{qs} - r_s i_{ds} + e_d$$
$$v_{qs} = -X'_{ig} i_{ds} - r_s i_{qs} + e_q \tag{3.16}$$

$$T_{m,ig} = e_q i_{qs} + e_d i_{ds} \tag{3.17}$$

3.3 GAMS'de Güç Sistemi Dinamik Modelinin Oluşturulması

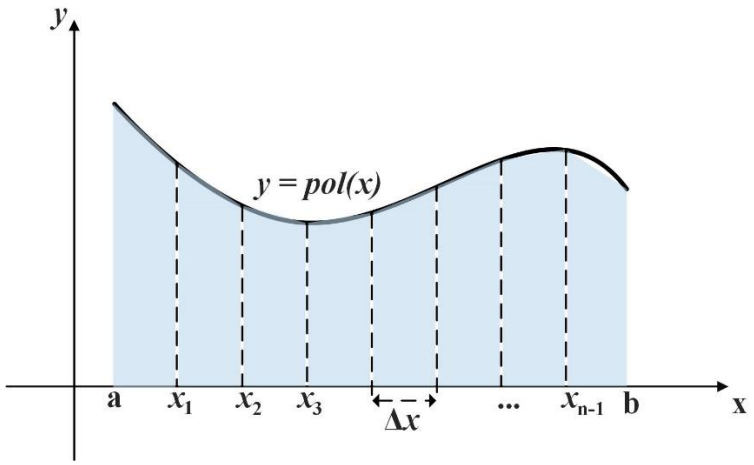
GAMS, matematiksel programlama ve optimizasyon için üst düzey bir modelleme sistemidir. GAMS, bir dil derleyici ve bir takım entegre edilmiş yüksek performanslı çözücülerden oluşmaktadır. GAMS ile doğrusal, doğrusal olmayan ve karma tamsayılı optimizasyon problemleri kolaylıkla modellenebilmekte ve etkin çözümler gerçekleştirilebilmektedir.

GAMS'de problemler, cebirsel eşitlikler ile modellenmekte ve diferansiyel denklemlerin çözümüne yönelik ek bir özellik bulunmamaktadır. Bu sebeple, GAMS'de problem çözümü ile birlikte diferansiyel denklem çözümünün gerekmesi durumunda, bu denklemlerin integrasyon metotları kullanılarak cebirsel eşitliklere dönüştürülmesi gerekmektedir.

Bu çalışmada, TSCOPF problem çözümünün tamamiyle GAMS kullanılarak gerçekleştirilmesi planlandığı için güç sistemi dinamik modelinin ve bu modele ait diferansiyel denklemlerin çözümünün de GAMS'de yapılması gerekmektedir. Bu kapsamda, problemdeki diferansiyel denklemler trapez sayısal integrasyon kuralı kullanılarak cebirsel eşitliklere dönüştürülmüştür. Bu yöntem ile senkron generatörlere ve indüksiyon generatörlerine ait tüm dinamik denklemler cebirsel eşitliklere dönüştürülmekte ve elde edilen bu eşitlikler zaman bölgesine bağlı ayrık eşitlik kısıtları şeklinde GAMS'de modellenmektedir. Bu şekilde gerçekleştirilen modelleme ile GAMS'de aslında birer kısıt olarak atanan eşitlikler, optimizasyon çıktısında zaman bölgesine bağlı diferansiyel denklemlerin çözümünün elde edilmesini sağlamaktadır. Diferansiyel denklemler dışında diğer amaç fonksiyonu ve kısıtlar GAMS'de ek bir yöntem kullanımına gerek kalmadan modellenebilmekte ve TSCOPF problemi bu şekilde bütünüyle GAMS kullanılarak çözülebilmektedir.

3.3.1 Trapez integrasyon kuralının uygulanışı ve Kron indirgeme yöntemi

Trapez integrasyon kuralı, bir eğrinin altında kalan yaklaşık alanı hesaplamanın en doğru ve kolay yollarından biridir. Şekil 3.1'de bir $pol(x)$ fonksiyonuna ait eğri ve altında kalan alanın trapez integrasyon kuralının uygulanışı ile parçalara ayrılmış hali görülmektedir.



Şekil 3.1 : Trapez integrasyon kuralının uygulanışı.

Trapez integrasyon kuralı ile yaklaşık $\int_a^b pol(x)dx$ değeri denklem 3.18'deki gibi bulunmaktadır.

$$\int_a^b pol(x)dx = \frac{\Delta x}{2}[pol(x_0) + 2pol(x_1) + 2pol(x_2) + .. + pol(x_n)] \tag{3.18}$$

Burada, n eğri altında kalan alana ait x eksenindeki aralık sayısı olmak üzere $\Delta x = \frac{b-a}{n}$ 'ye eşittir.

Trapez integrasyon kuralı, bu tez çalışmasında, diferansiyel denklemlerin cebirsel eşitliklere çevrilmesinde kullanılmıştır. Bu kuralın bu çalışma için uygulanışına örnek olarak; denklem 3.12 ile verilen senkron generatöre ait diferansiyel denklemler, denklem 3.19'daki gibi zaman bölgesine bağlı cebirsel eşitliklere dönüştürülmektedir [22].

$$E_d^{\prime\, t+1}\left(1+\frac{\Delta t}{2}\frac{1}{T_{qo}^{\prime}}\right) - E_d^{\prime\, t}\left(1-\frac{\Delta t}{2}\frac{1}{T_{qo}^{\prime}}\right) - \frac{\Delta t}{2}\frac{1}{T_{qo}^{\prime}}\left(X_q - X_q^{\prime}\right)\left(I_q^{t+1} + I_q^t\right) = 0$$

$$E_q^{\prime\, t+1}\left(1+\frac{\Delta t}{2}\frac{1}{T_{do}^{\prime}}\right) - E_q^{\prime\, t}\left(1-\frac{\Delta t}{2}\frac{1}{T_{do}^{\prime}}\right) - \frac{\Delta t}{2}\frac{1}{T_{do}^{\prime}}\left[\left(E_{fd}^{t+1} + E_{fd}^t\right) - \left(X_d - X_d^{\prime}\right)\left(I_d^{t+1} + I_d^t\right)\right] = 0 \tag{3.19}$$

$$\delta^{t+1} - \delta^t - \frac{\Delta t}{2}\omega_s(\Delta\omega^{t+1} + \Delta\omega^t) = 0$$

$$\Delta\omega^{t+1}\left(1 + D\frac{\Delta t}{2}\frac{1}{2H_{sg}}\right) - \Delta\omega^t\left(1 - D\frac{\Delta t}{2}\frac{1}{2H_{sg}}\right) - \frac{\Delta t}{2}\frac{1}{2H_{sg}}\left(2T_{M,sg} - T_{E,sg}^{t+1} - T_{E,sg}^t\right) = 0$$

Burada, t zaman bölgesi indisini ve Δt ise integrasyon zaman sabitini ifade etmektedir.

Bu tez çalışması kapsamında, güç sisteminin farklı noktalarında 3 faz - toprak arızasının meydana geldiği ve bu arızaların belirli iletim hatlarının devreden çıkarılması ile temizlendiği varsayılmıştır. Bu durumda, arıza esnası ve sonrasında güç sistemi bara admitans matrisleri değişmekte ve bu matrislerin her bir arıza dönemi için ayrı ayrı hesaplanarak dinamik model çözümünde kullanılması gerekmektedir. Diğer yandan, arıza esnası ve sonrası periyotlarda denklem çözümünü kolaylaştırmak için güç sistemindeki tüm yükler sabit empedans olarak kabul edilmiştir. Yüklerin sabit empedans olarak kabul edilmesi ile kolaylaşan çözüme ek olarak hesaplama hızını da azaltmak için Kron indirgeme yöntemi [61] kullanılmıştır. Bu yöntem ile sadece generatör iç düğümlerini içerecek şekilde admitans matrisinde indirgeme yapılmakta ve bu da TSCOPF probleminin çözümünde hız sağlamaktadır.

Bu tez çalışmasında, Kron indirgeme yöntemi, denklem 3.20'de güç sistemi akım dengesini ifade eden eşitliğe uygulanmıştır.

$$\bar{I} = \bar{Y}_{mxm}\bar{V} \tag{3.20}$$

Burada, m güç sistemindeki bara sayısı olmak üzere; $\bar{I}$ baralara giren net akım vektörünü, $\bar{V}$ bara gerilim vektörünü ve $\bar{Y}_{mxm}$ simetrik bara admitans matrisini göstermektedir.

Kron indirgeme yönteminin uygulanışında, denklem 3.20'deki $\bar{I}$ ve $\bar{V}$ vektörlerinde generatör baralarını içeren satırlar bara numarasına göre sıralanacak ve üstte kalacak şekilde yeniden düzenlenir. Bu durumda, elenecek veya atılacak olan satırlar da en büyük bara numarasına sahip generatöre ait satırın altında kalacak şekilde sıralanır. Aynı düzenleme bara admitans matrisi için de uygulanır ve denklem 3.21'deki eşitlik elde edilir.

$$\begin{bmatrix}\bar{I}_G \\ \bar{I}_E\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}\bar{Y}_1 & \bar{Y}_2 \\ \bar{Y}_3 & \bar{Y}_4\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\bar{V}_G \\ \bar{V}_E\end{bmatrix} \tag{3.21}$$

Burada, $\bar{I}_G$ ve $\bar{V}_G$ generatör baralarına ait alt matrisleri, $\bar{I}_E$ ve $\bar{V}_E$ ise elimine edilecek alt matrisleri göstermektedir. Denklem 3.21'deki matris çarpımı gerçekleştirildiğinde denklem 3.22 ve 3.23'teki eşitlikler elde edilmektedir.

$$\bar{I}_G = \bar{Y}_1\bar{V}_G + \bar{Y}_2\bar{V}_E \tag{3.22}$$

$$\bar{I}_E = \bar{Y}_3\bar{V}_G + \bar{Y}_4\bar{V}_E \tag{3.23}$$

$\bar{I}_E$ alt matrisinin tüm elementleri sıfır olduğu için denklem 3.23'ten, $\bar{Y}_3\bar{V}_G = -\bar{Y}_4\bar{V}_E$ eşitliği elde edilmektedir. Bu eşitliğin her iki tarafını $\bar{Y}_4$ matrisinin tersi ile çarptığımız durumda ise $\bar{V}_E = -\bar{Y}_4{}^{-1}\bar{Y}_3\bar{V}_G$ eşitliği elde edilmektedir. Bu durumda, elde edilen $\bar{V}_E$ ifadesini denklem 3.22'ye uyguladığımızda denklem 3.24 elde edilmektedir.

$$\bar{Y}_{red} = \bar{Y}_1 - \bar{Y}_2\bar{Y}_4{}^{-1}\bar{Y}_3 \tag{3.24}$$

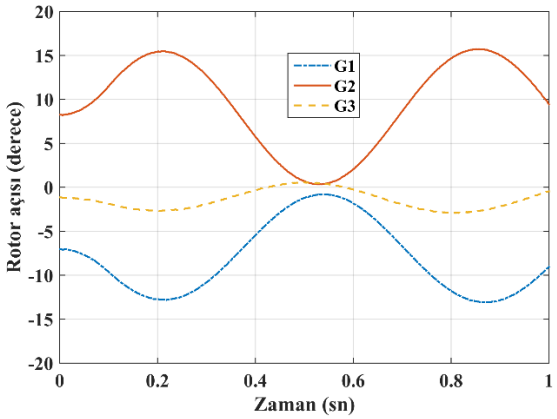
Burada, $\bar{Y}_{red}$ generatör baralarına indirgenmiş bara admitans matrisini ifade etmektedir.

Kron indirgeme yöntemi uygulanmadan önce, meydana gelecek kısa devre arızasının konumu ve arızanın temizlenmesi için devreden çıkarılacak ilettim hattı bilgisi yardımıyla güç sistemine ait arıza öncesi, esnası ve sonrası bara adimatans matrisleri bulunur. Daha sonrasında, arıza öncesi, esnası ve sonrasındaki her bir periyoda ait bara admitans matrisleri generatör baralarına indirgenir ve elde edilen indirgenmiş matrisler GAMS'e tablo bilgisi olarak girilir.

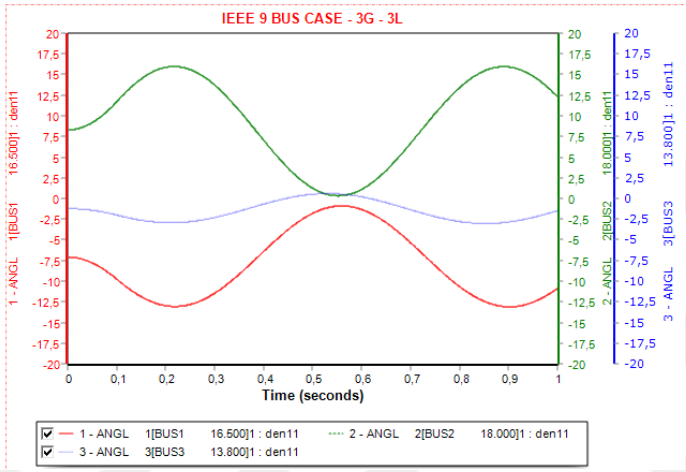
3.3.2 GAMS'de optimizasyon sonucu elde edilen generatör rotor açısı değişimlerindeki doğruluğun PSS/E ile test edilmesi

Bu bölümde, GAMS'de gerçekleştirilen TSCOPF problem çözümü sonucunda bulunan güç sistemi işletim koşulları için dikkate alınan arızanın meydana gelmesi durumunda elde edilen rotor açısı değişimleri, PSS/E'de [62] aynı işletim koşulları ve aynı arıza durumu için elde edilen rotor açısı değişimleri ile kıyaslanarak GAMS'de oluşturulan güç sistemi dinamik modelinin güvenirliği test edilmiştir. Bu test için IEEE'nin 9 baralı ve 3 makineli güç sistemi kullanılmıştır. Bu güç sistemi için [63] numaralı kaynakta verilen bilgiler kullanılmıştır.

Kıyaslama için, güç sisteminde 4 numaralı barada bir 3 faz-toprak arızasının meydana geldiği ve bu arızanın 4 ve 5 numaralı baralar arasındaki hattın 100 mili saniye sonra açılarak temizlendiği durum dikkate alınmış ve bu durum için GAMS'de TSCOPF problem çözümü gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.2'de GAMS çözümü ile elde edilen ve GAMS çözümü ile bulunan işletim koşulları için PSS/E'de gerçkeleştirilen dinamik analiz sonucu elde edilen rotor açısı değişimleri verilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 3.2 : (a) GAMS ve (b) PSS/E ile elde edilen rotor açısı değişimleri.

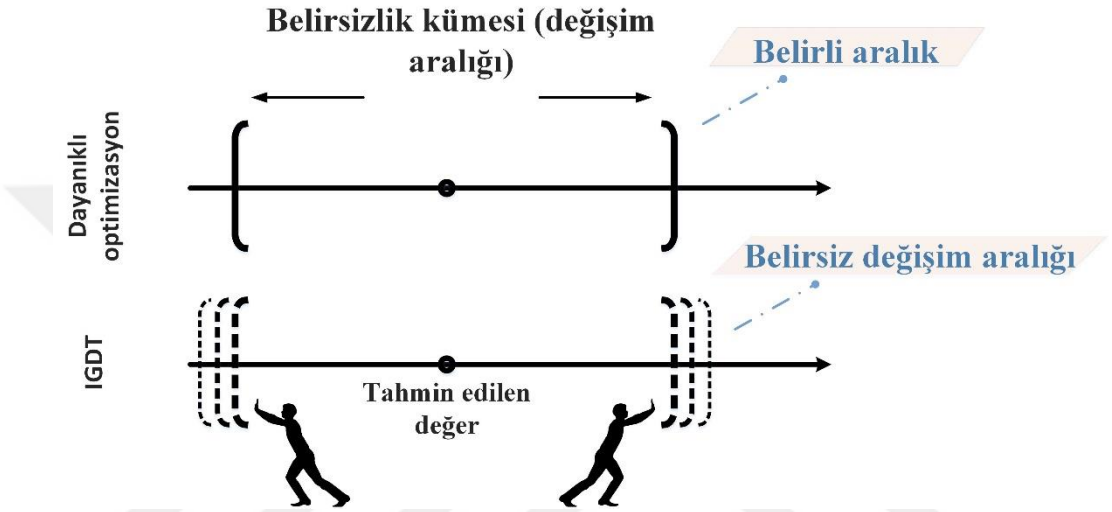
Şekil 3.2'de, GAMS çıktısı olarak elde edilen zamana bağlı rotor açısı değerleri MATLAB aracılığıyla çizdirilmiştir. Şekil 3.2 incelendiğinde, GAMS ile elde edilen rotor açısı değişimlerinin PSS/E ile elde edilenlere oldukça yakın olduğu görülmektedir. Bu gerçekleştirilen test ile GAMS'de oluşturulan güç sistemi dinamik modelinin ve bu modeli içeren TSCOPF problem çözümünün doğruluğu kanıtlanmış olmaktadır.

3.4 Bilgi Boşluğu Karar Teorisi (IGDT)

IGDT, optimizasyon problemlerinin çözümünde hesaplama açısından avantajlar sunan ve olasılıksal olmayan bir karar teorisidir. IGDT yöntemi ile belirsiz değişkenler için herhangi bir olasılıksal dağılıma dayalı bir varsayım yapılmaz. Bu nedenle, IGDT yöntemi, belirsizliğin yüksek seviyede olduğu veya belirsiz değişkenlere ait yeterli bilginin olmadığı problemlerin çözümü için oldukça uygundur. Bu yöntemde, her

belirsiz değişkenin bir tahmin edilen değerinin olduğu farzedilir ve amaç fonksiyonlarının duyarlılığı, bu belirsiz parametrelerin her birinin tahmin edilen değerlerinden sapmasına göre analiz edilir.

Şekil 3.3'te belirsizliklerin ele alınmasında IGDT ve dayanıklı optimizasyon yöntemleri arasındaki farkı gösteren grafik görülmektedir. IGDT yönteminin dayanıklı optimizasyon yöntemlerinden en önemli farkı, belirsizlik parametrelerine ait değişimin belirsiz olmasıdır.



Şekil 3.3 : IGDT ve dayanıklı optimizasyon yöntemlerinin karşılaştırılması.

IGDT bazlı belirsizlik modeli, denklem 3.25'teki matematiksel formülasyon ile ifade edilmektedir.

$$U(\alpha,\tilde{u}) = \left\{u: \left|\frac{u-\tilde{u}}{\tilde{u}}\right| \leq \alpha\right\}, \alpha \geq 0, u \in U(\alpha,\tilde{u}) \tag{3.25}$$

Burada, u belirsiz değişkeni ve $\tilde{u}$ ise u'nun tahmin edilen değerini ifade etmektedir. u'ya ait belirsizliğin erişebileceği sınırlar ise α ile ölçülmektedir.

IGDT yöntemi, kendi içinde risk karşıtı (RA, risk averse) ve risk arayıcı (RS, risk seeker) olarak iki farklı stratejiye ayrılmaktadır. Risk karşıtı stratejide amaç, deterministik çözüm ile bulunan optimum amaç fonksiyonu değerinden daha kötü bir değere uzaklaşır yönde belirlenen tolerans seviyesine göre belirsiz parametrelerin değişiminin ne kadar maksimum olabileceğidir.

Denklem 3.26 ile belirsiz değişken içeren bir minimizasyon problemine ait formülasyon verilmiştir.

$$\text{Minimize et} \quad f(x,u)$$

$$\text{Kısıtlar: } \begin{cases} h_i(x,u) \leq 0 \\ g_i(x,u) = 0 \\ u \in U(\alpha, \tilde{u}) \end{cases} \tag{3.26}$$

Burada, $f(x,u)$ amaç fonksiyonunu; x karar değişkenlerine ait kümeyi; $h_i(x,u)$ ve $g_i(x,u)$ ise sırasıyla eşitsizlik ve eşitlik kısıtlarını ifade etmektedir.

Denklem 3.26 dikkate alındığında, risk karşıtı IGDT yöntemi şu şekilde formüle edilebilir:

$$\text{Maksimize et} \quad \alpha$$

$$\text{Kısıtlar: } \begin{cases} h_i(x,u) \leq 0 \\ g_i(x,u) = 0 \\ f(x,u) \leq f_{opt} \times (1+\sigma) \\ \tilde{u}(1-\alpha) \leq u \\ 0 \leq \sigma, u \end{cases} \tag{3.27}$$

Burada, f_{opt} belirsizlik değişkenin tahmini değeri, $\tilde{u}$, kullanılarak denklem 3.26'nın deterministik çözümü ile elde edilmiş amaç fonksiyonu değeridir. σ ise f_{opt} amaç fonksiyonu değerindeki artışı belirleyen deviasyon faktörüdür.

Risk arayıcı stratejide ise amaç, deterministik çözüm ile bulunan amaç fonksiyonu değerinden daha iyi bir değere yaklaşır yönde belirlenen tolerans sevsiyesine göre belirsiz parametrelerin değişiminin ne kadar minimum olabileceğidir. Risk arayıcı IGDT yöntemi, şu şekilde formüle edilebilir:

$$\text{Minimize et} \quad \alpha$$

$$\text{Kısıtlar: } \begin{cases} h_i(x,u) \leq 0 \\ g_i(x,u) = 0 \\ f(x,u) \leq f_{opt} \times (1-\sigma) \\ \tilde{u}(1+\alpha) \leq u \\ 0 \leq \sigma, u \end{cases} \tag{3.28}$$

Bu iki IGDT metodolojisinin kullanımı problem tipine ve amacına göre değişebilmektedir. Bu tez çalışmasında, belirsiz değişken olan rüzgâr generatörleri tarafından üretilen güç değerinin maksimum değerinin araştırılmasına yönelik planlanlama yapıldığı için risk karşıtı IGDT metodolojisi kullanılmıştır.

3.5 IGDT Bazlı TSCOPF Problem Formülasyonu

IGDT bazlı TSCOPF problemindeki amaç, deterministik çözüm ile bulunan amaç fonksiyonu değerinin belirli bir toleransta artışına karşılık belirsiz değişkende meydana gelebilecek maksimum değişimi bulmaktır. Bu çalışmadaki belirsiz değişken rüzgâr generatöründe üretilen güçtür. Buna göre, IGDT bazlı TSCOPF probleminin formülasyonu denklem 3.29 ve 3.30 ile verilmiştir.

Amaç fonksiyonu:

$$\text{Maksimize et} \quad \alpha_{TUH} = \sum_{i \in \Omega_W} w_i \alpha_i \tag{3.29}$$

Kısıtlar:

$$\begin{gathered} \text{Güç sistemi dinamik denklemleri (3.12-3.17)} \\ \text{Güç akışı denklemleri (3.2, 3.3)} \\ \text{Geçici hal kararlılığı kısıtları (3.10, 3.11)} \\ \text{Güç sistemi işletim kısıtları (3.4-3.8)} \\ OF_B\,(1+\sigma) \geq OF \\ P_{\mathrm{Wi}} \geq (1-\alpha_i)\widetilde{P_{\mathrm{W1}}}\; i \in \mathrm{W} \\ 0 \leq \alpha_i \quad i \in \mathrm{W} \\ 0 \leq \sigma \end{gathered} \tag{3.30}$$

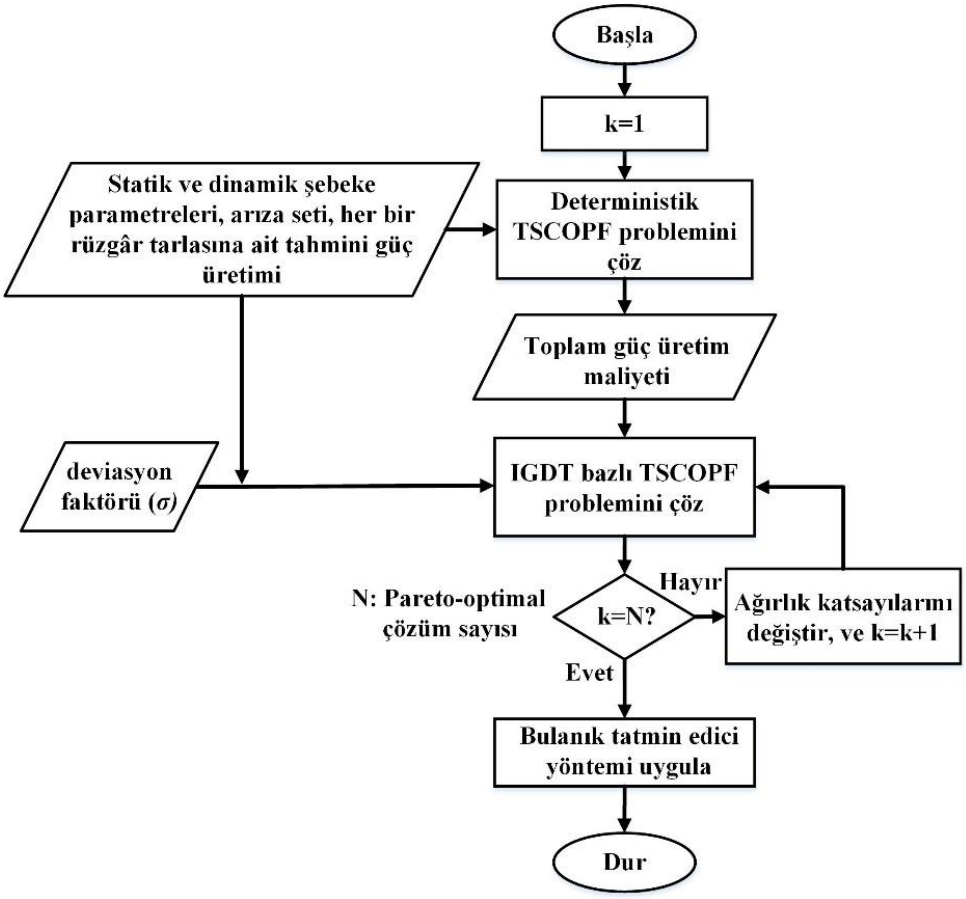
Burada, α_{TUH} ağırlık kazandırılmış sağlamlık fonksiyonunu; α_i i'nci baradaki rüzgâr tarlası tarafından üretilen güç değerinin belirsizliğine karşı bulunan sağlamlık değerini; $\widetilde{P_{\mathrm{W1}}}$ i'nci baradaki rüzgâr tarlası tahmini aktif güç üretimini; OF_B deterministik çözüm ile bulunan optimum amaç fonksiyonu değerini; ve w_i ise α_i'nin ağırlık katsayısını ifade etmektedir.

Denklem 3.29'da sağlamlık fonksiyonu, farklı konumlarda birden çok rüzgâr tarlası olduğu durumda her bir rüzgâr tarlasındaki güç üretimine ait belirsizlik değişiminin ayrı ayrı olarak değerlendirilmesi amacıyla ağırlık kazandırılmış şekilde çok amaçlı yapıda modellenmiştir.

3.6 Çözüm Prosedürü

Çözüm prosedürüne ait iş akış diagramı Şekil 3.4 ile verilmiştir. Bu çalışma kapsamında önerilen çözüm yöntemi, temelde 3 aşamadan oluşmaktadır. Bunlardan ilki, belirsizliğin olmadığı durum yani rüzgâr tarlasının tahmin edilen değerde güç

üretimi yapıyor olduğu durum için deterministik TSCOPF probleminin çözülmesidir. Bu çözüm sonucu elde edilen toplam güç üretim maliyeti değeri ikinci aşamayı oluşturan IGDT bazlı TSCOPF probleminin çözümünde kullanılmaktadır. IGDT bazlı TSCOPF problemi ile toplam güç üretim maliyetindeki artışa karşılık rüzgâr gücünde meydana gelebilecek maksimum düşüş bulunmaya çalışılmaktadır. Rüzgâr gücündeki düşüş, güç dengesinin değişmesine ve azalan üretimin güç sistemindeki senkron generatörlerden karşılanacağı anlamına gelmektedir. Bu durumda, senkron generatörler için güç üretimi belirli bir maliyete sahip olduğundan toplam üretim maliyeti de rüzgâr gücünün düşüşü ile ters yönde olacak şekilde artış gösterecektir.



Şekil 3.4 : IGDT bazlı TSCOPF problemi çözümüne ait iş akış diagramı.

Denklem 3.29 ve 3.30 ile verilen çok amaçlı yapıdaki IGDT bazlı TSCOPF problemini çözebilmek için bu çalışma kapsamında bulanık tatmin edici yöntem (FSM, fuzzy-satisfying method) [64] kullanılmıştır. Bu yöntemde Z_n n'inci Pareto-optimal çözüm olmak üzere $\mu_k(Z_n)$ denklem 3.31 ile elde edilen bir lineer üyelik fonksiyonudur. $\mu_k(Z_n)$, f_k fonksiyonunu maksimize eden Pareto-optimal çözümlerin (POÇ) derecesini belirtmektedir.

$$\mu_k(Z_n) = \begin{cases} 0, & f_k(Z_n) \leq f_k^{min} \\ \dfrac{f_k(Z_n) - f_k^{min}}{f_k^{maks} - f_k^{min}}, & f_k^{min} < f_k(Z_n) < f_k^{maks} \\ 1, & f_k^{maks} \leq f_k(Z_n) \end{cases} \quad (3.31)$$

Burada, f_k^{maks} ve f_k^{min} sırasıyla k'ncı amaç fonksiyonunun maksimum ve minimum değerleridir. Üyelik foksiyonu derecelerinin belirlenmesi ile denklem 3.32 kullanılarak her iki amaç fonksiyonu açısından da tatmin edici en iyi çözüm bulunur.

$$\max_{N_S \quad N_O}(\min(\mu_k(Z_n))) \quad (3.32)$$

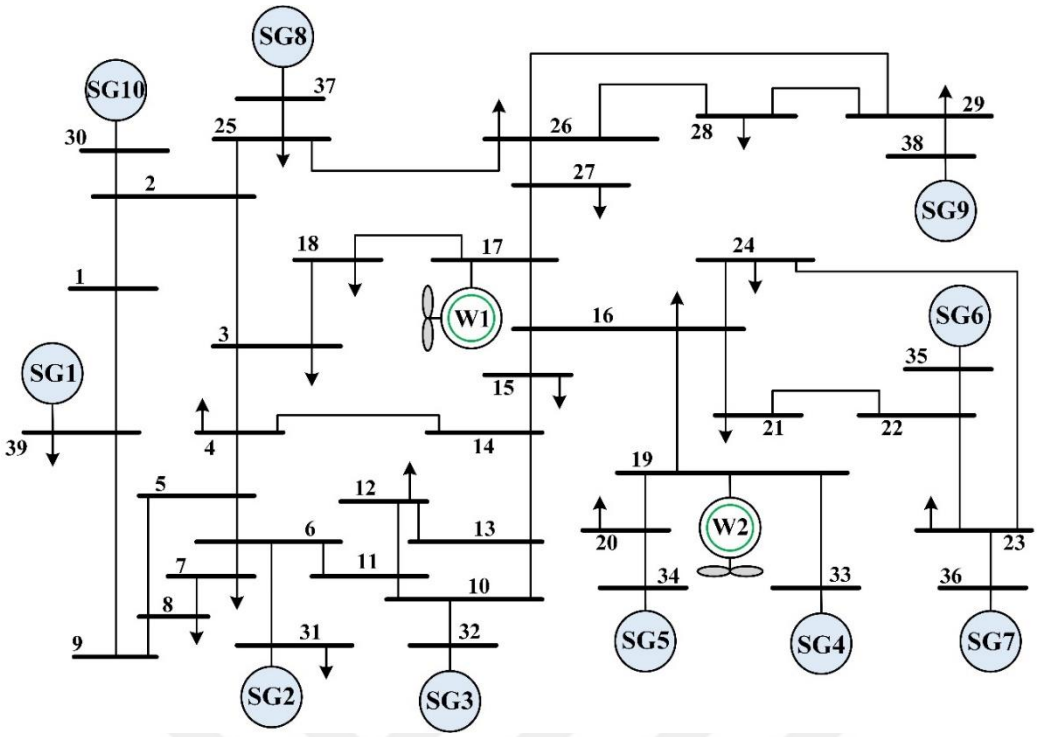
Burada, N_S ve N_O sırasıyla toplam çözüm ve amaç fonksiyonu sayısını ifade etmektedir.

3.7 Yöntemin Farklı Güç Sistemleri Üzerinde Uygulanması

Önerilen yöntem, rüzgâr tarlaları eklenerek modifiye edilen IEEE'nin 39 baralı ve 10 makineli test sistemi ile IEEE'nin 118 baralı ve 19 makineli güç sistemleri üzerinde test edilmiştir. Ele alınan problemlerin tamamı geçici hal kararlılığı kısıtlarının kontrolü için gerekli güç sistemi dinamik modelini de içerecek şekilde GAMS'de modellenmiş, problemlerin çözümü ise IPOPT çözücüsü ile gerçekleştirilmiştir. Zaman bölgesi analizleri için simülasyon zamanı 1.5 saniye, integrasyon zaman sabiti ise 0.01 saniye seçilmiştir. Geçici hal kararlılık kısıtı olarak δ_{th} relatif rotor açısı eşik değeri 100 derece belirlenmiştir.

3.7.1 IEEE'nin 39 baralı ve 10 makineli test sistemi

IEEE'nin 39 baralı ve 10 makineli test sisteminde 17 ve 19 numaralı baralara rüzgâr tarlaları eklenerek güç sistemi Şekil 3.5'teki gibi modifiye edilmiştir. Güç sistemine ait şebeke ve dinamik parametre bilgileri Ek A'da verilmiştir [65, 66]. 17 ve 19 numaralı baralarda bulunan her bir rüzgâr tarlası için aktif güç üretim kapasitesinin 500 MW, toplamda ise 1000 MW olduğu varsayılmıştır. Rüzgâr tarlalarının kapasitelerinin %80'i kadarında işletildiği ve bu değerin, deterministik TSCOPF probleminin çözümünde kullanılan rüzgâr gücü tahmin edilen güç üretimine eşit olduğu kabul edilmiştir.



Şekil 3.5 : Rüzgâr tarlaları eklenerek modifiye edilmiş IEEE'nin 39 baralı test sistemi tek hat şeması.

Durum çalışmaları, ele alınan güç sistemi için kritik olan 3 farklı 3-faz toprak arızası dikkate alınarak aşağıdaki gibi oluşturulmuştur:

- **Durum 0:** geçici hal kararlılığı kısıtları (denklem 3.10 ve 3.11) dikkate alınmamıştır.
- **Durum 1:** 4 numaralı barada 3-faz toprak arızasının meydana geldiği ve 250 milisaniye sonra 4 ve 5 numaralı baralar arasındaki iletim hattının devreden çıkarılarak temizlendiği durumun gerçekleşme ihtimaline karşılık geçici hal kararlılığı kısıtları dikkate alınmıştır.
- **Durum 2:** 21 numaralı barada 3-faz toprak arızasının meydana geldiği ve 160 milisaniye sonra 21 ve 22 numaralı baralar arasındaki iletim hattının devreden çıkarılarak temizlendiği durumun gerçekleşme ihtimaline karşılık geçici hal kararlılığı kısıtları dikkate alınmıştır.
- **Durum 3:** 29 numaralı barada 3-faz toprak arızasının meydana geldiği ve 100 milisaniye sonra 26 ve 29 numaralı baralar arasındaki iletim hattının devreden çıkarılarak temizlendiği durumun gerçekleşme ihtimaline karşılık geçici hal kararlılığı kısıtları dikkate alınmıştır.

3.7.1.1 Deterministik TSCOPF probleminin çözümüne ait sonuçlar

Deterministik TSCOPF probleminin çözümü ile elde edilen sonuçlar Çizelge 3.1'de görülmektedir. Problem çözümünde her bir rüzgâr tarlası için güç üretiminin 400 MW tahmini değerinde olduğu varsayılmıştır. Durum 0, geçici hal kararlılığı kısıtlarının belirsizlik üzerindeki etkisini görebilmek için seçilmiş bir referans durum çalışmasıdır. Durum 0, geçici hal kararlılığı kısıtlarının ihmal edilmesiyle geleneksel OPF problemi çözümünü ifade etmektedir.

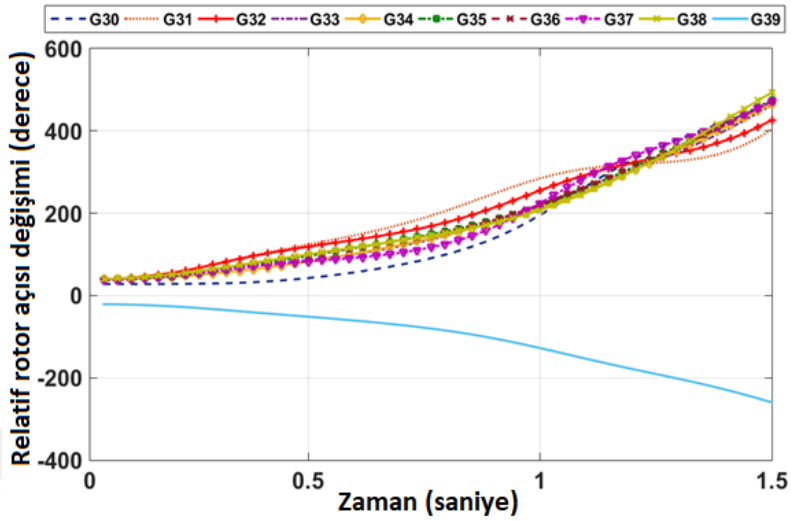
Çizelge 3.1 : Deterministik TSCOPF problem çözümüne ait sonuçlar.

Değişkenler	Generatör çıkış gücü (MW)			
	Durum 0	Durum 1	Durum 2	Durum 3
P_{G30}	202.54	217.11	214.48	207.30
P_{G31}	498.15	476.57	514.97	500.29
P_{G32}	569.65	541.54	577.05	571.83
P_{G33}	539.70	518.15	517.07	542.35
P_{G34}	445.34	417.89	428.57	444.71
P_{G35}	565.98	566.27	528.83	568.46
P_{G36}	482.10	481.84	449.36	484.56
P_{G37}	474.83	494.58	492.17	476.14
P_{G38}	741.68	767.06	760.78	721.00
P_{G39}	861.46	901.58	896.33	865.71
Saatlik toplam güç üretim maliyeti (dolar)	49378.53	49461.00	49441.64	49403.30

Çizelge 3.1'deki sonuçlar incelendiğinde, Durum 0'da geçici hal kararlılığı kısıtlarının ihmal edilmesi nedeniyle beklenildiği gibi en düşük toplam güç üretim maliyeti değeri bulunmuştur. Fakat, Durum 0 için bulunan işletim sistemi noktasının olası arızalara karşı kararlı olup olmadığı kesin değildir. Nitekim, Durum 1'de ele alınan arızanın Durum 0 için bulunan işletim koşulları altında meydana gelmesi durumunda, güç sistemi Şekil 3.6'da görüldüğü üzere kararsız hale gelmektedir. Buradan çıkarımla, Durum 1, Durum 2 ve Durum 3 için dikkate alınan muhtemel kritik arızalara karşı güç sistemi kararlılığının, Durum 0 için bulunan maliyete göre sırasıyla saatlik 82.47, 63.11 ve 24.77 dolar üretim maliyeti artışı ile korunduğu söylenebilir.

Durum 1, Durum 2 ve Durum 3 için Çizelge 3.1'de verilen işletim koşulları altında ilgili arızaların meydana gelmesi durumunda, güç sistemindeki senkron generatörlere ait relatif rotor açısı değişimleri Şekil 3.7'de görülmektedir. Şekil incelendiğinde,

simülasyon zamanı boyunca tüm durum çalışmaları için relatif rotor açısı değişimlerinin 100 derece sınırı içerisinde yani geçici hal kararlılığı kısıtları içerisinde kaldığı görülmektedir.



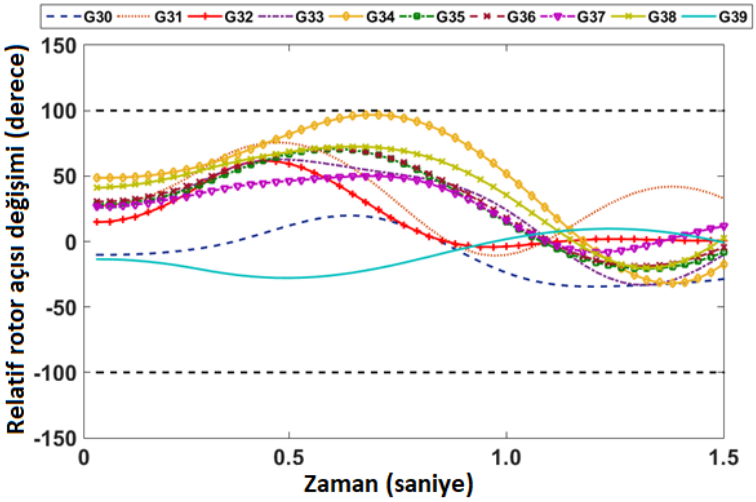
Şekil 3.6 : Durum 1'de dikkate alınan arızanın Durum 0 için bulunan çalışma koşulları altında meydana gelmesi ile güç sisteminin kararsızlığa uğraması.

3.7.1.2 IGDT bazlı TSCOPF probleminin çözümüne ait sonuçlar

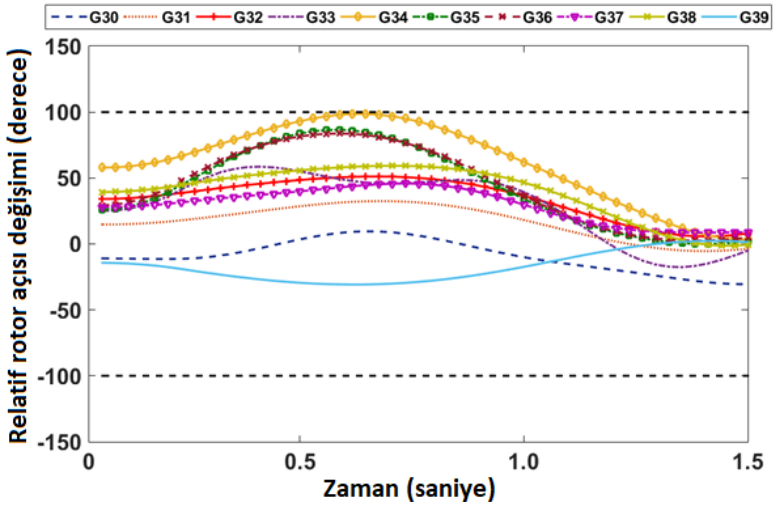
Bu tez çalışmasında, denklem 3.29 çok amaçlı bir probleminin çözümü ile optimum sonuca ulaşmak için FSM yöntemi kullanılmıştır. FSM yönteminde, denklem 3.29'un denklem 3.30'daki kısıtlara bağlı olarak farklı ağırlık katsayıları için çözümü ile elde edilen Pareto-optimal sonuçlar arasından tatmin edici en iyi çözüme ulaşılmaktadır.

Şekil 3.8'te farklı durum çalışmaları için deviasyon faktörü (σ) değerinin 0.24'e eşit olduğu durumda IGDT bazlı TSCOPF probleminin çözümü ile elde edilen sonuçlar görülmektedir. Şekil 3.8 incelendiğinde, geçici hal kararlılığı kısıtlarının dikkate alınması durumunda belirsizliğe karşı sağlamlık azalmakta, diğer yandan ise risk artmaktadır. Bu sonuca, Durum 0 yani geçici hal kararlılığı kısıtlarının dikkate alınmadığı durum çalışması için FSM ile elde edilen en iyi çözüm değerinin diğer durum çalışmalarına kıyasla en yüksek sağlamlık değerini almasından ulaşılabilmektedir.

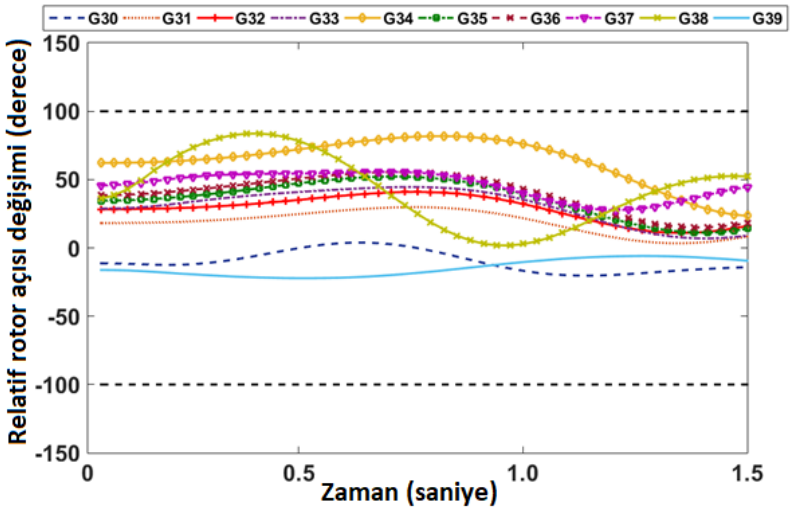
Diğer yandan, Şekil 3.8'de, Durum 2 için bulunan sonuçlarda en düşük sağlamlık değerlerinin elde edildiği görülmektedir. Bu noktada, rüzgâr tarlaları güç üretiminin neden olduğu belirsizliğe karşı riskin Durum 2 için bulunan çözümde en yüksek olduğu anlaşılmaktadır.



(a)

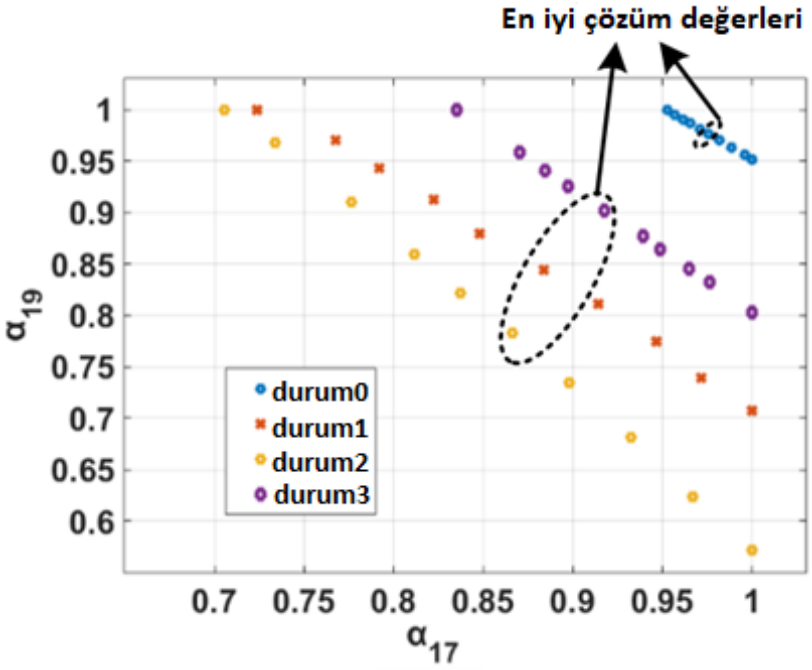


(b)



(c)

Şekil 3.7 : Deterministik TSCOPF probleminin çözümü ile elde edilen senkron generatör relatif rotor açısı değişimleri; (a) Durum 1, (b) Durum 2, (c) Durum 3.



Şekil 3.8 : Deviasyon faktörü (σ) 0.24'e eşit iken farklı durum çalışmaları için elde edilen Pareto-optimal çözümler.

Şekil 3.8'de sağlamlık değerlerinin en üst seviyede 1'e eşit olması, elde edilen çözümde ilgili rüzgâr gücünün minimum değerinde yani 0 MW üretimde olduğu anlamına gelmektedir.

Çizelge 3.2'de, deviasyon faktörünün 0.24 değerinde iken Durum 2'ye ait elde edilen Pareto-optimal çözümler ve bu çözümlere bağlı elde edilen üyelik fonksiyonu değerleri verilmiştir.

Çizelge 3.2 : Durum 2 için elde edilen Pareto-optimal çözümler ile üyelik fonksiyonu değerleri.

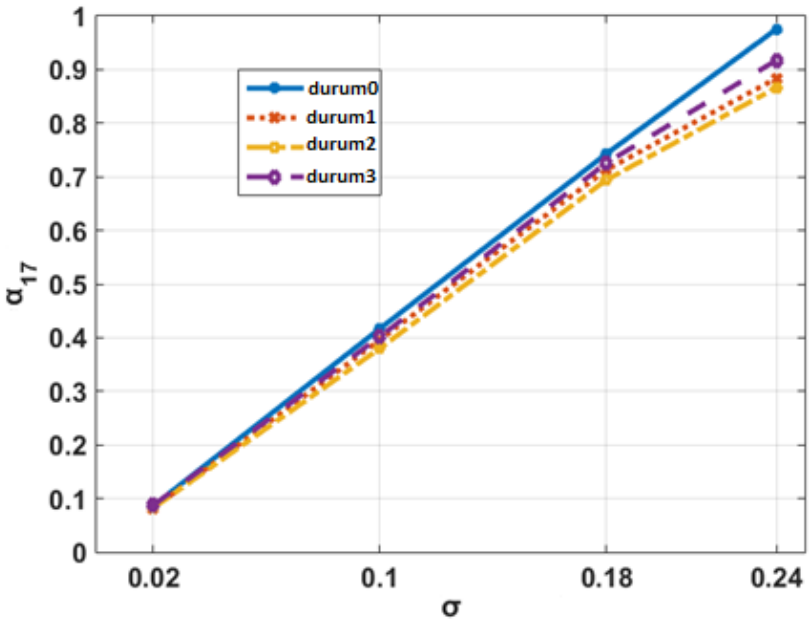
Çözüm numarası	α_{17}	α_{19}	$\mu_{\alpha_{17}}$	$\mu_{\alpha_{19}}$
1	0.7060	1.0000	0.0000	1.0000
2	0.7343	0.9678	0.0963	0.9248
3	0.7768	0.9108	0.2408	0.7917
4	0.8115	0.8598	0.3588	0.6727
5	0.8375	0.8215	0.4473	0.5832
6	0.8665	0.7828	0.5459	0.4929
7	0.8980	0.7350	0.6531	0.3813
8	0.9323	0.6820	0.7697	0.2575
9	0.9668	0.6243	0.8871	0.1228
10	1.0000	0.5717	1.0000	0.0000

Çizelge 3.2'de, denklem 3.32'nin çözülmesi ile elde edilen en iyi çözümün 6 numaralı çözüm olduğu görülmektedir. Bu çözüm aynı zamanda Şekil 3.8'de Durum 2 için daire içine alınmış çözümdür. Bu çözüm için α_{17}'de %86.65'lik bir değişimin olduğu varsayılarak α_{19}'daki değişimin %78.28'in altında olması durumunda, maksimum toplam güç üretim maliyetinin saatlik 61307.63 dolar olması beklenir. Bir diğer ifadeyle, saatlik 61307.63 dolar değeri, α_{17}'deki %86.65'lik ve α_{19}'daki %78.28'lik maksimum belirsizlik değişim sınırına karşılık toplam güç üretimi için oluşabilecek maksimum maliyet değeridir. Bu çözümde olduğu gibi, IGDT yöntemi ile, yüksek seviyeli belirsizliklere karşı amaç fonksiyonu belirli bir olurlu çözüm değerinde korunmaktadır.

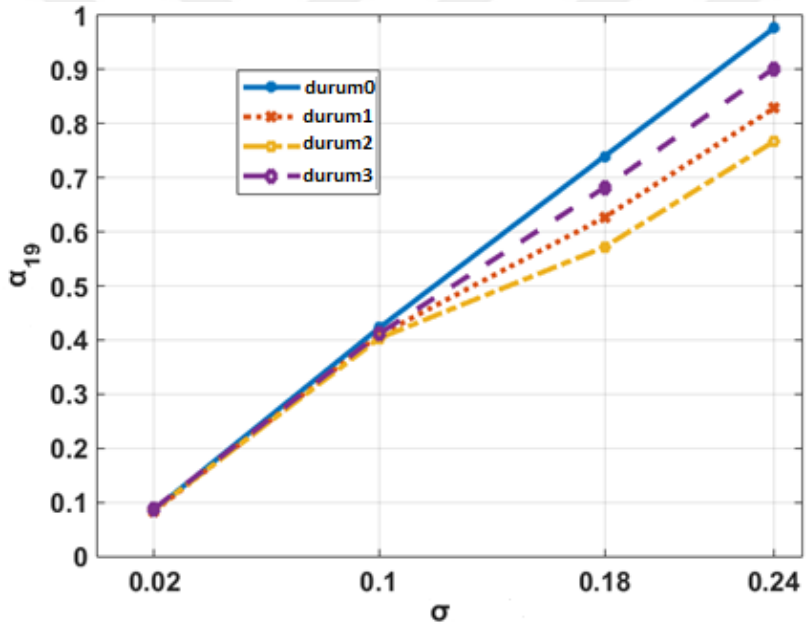
Şekil 3.9'da, deviasyon faktörünün (σ) 0.02 ile 0.24 arasındaki değişimine karşılık farklı durum çalışmaları için bulunan sağlamlık değerlerinin değişimi görülmektedir. IGDT bazlı TSCOPF probleminin çözümü ile toplam güç üretim maliyetindeki belirli oranda artışa karşılık gelen rüzgâr gücünün azalır yöndeki maksimum değişimi bulunmaktadır. Bu bağlamda, belirli bir deviasyon faktörü için IGDT bazlı TSCOPF probleminin çözümü ile bulunan sağlamlık değeri, rüzgâr tarlaları tarafından sağlanan güç üretiminin alt sınırını belirtmektedir.

Şekil 3.9 incelendiğinde, deviasyon faktörü arttıkça elde edilen sağlamlık değerleri arasındaki fark da artmakta ve farklı durum çalışmalarına karşılık bulunan değerler arasındaki ayrım daha kolay yapılabilmektedir. Bu sonuç, belirsizliklerin toplam güç üretim maliyeti üzerindeki etkisinin, geçici hal kararlılığı kısıtlarını dikkate alan tüm durum çalışmaları (Durum 1, Durum 2 ve Durum 3) için aynı olmadığını göstermektedir. Durum 2'de, her iki rüzgâr tarlasına ait elde edilen sağlamlık değerlerinin, tüm deviasyon faktörü değerleri için en küçük olduğu görülmektedir. Diğer yandan, her iki rüzgâr tarlası için karşılaştırma yapılırsa, deviasyon faktöründeki değişime karşılık α_{19}'daki değişimin α_{17}'ye göre daha sınırlı kaldığı görülmektedir. Bu da 19 numaralı baraya bağlı rüzgâr tarlasındaki güç üretim belirsizliğinin, güç sisteminin güvenliği ve ekonomik işletimi için 17 numaralı baraya bağlı rüzgâr tarlasına kıyasla daha riskli olduğu anlamına gelmektedir.

Şekil 3.9'dan görüldüğü üzere, IGDT bazlı TSCOPF çözümünde deviasyon faktörünün seçimi belirleyicidir. Karar verici, uygulamak istediği stratejiye yönelik olarak uygun deviasyon faktörü değeri atayabilir ve bu şekilde ekonomik işletim ile belirsizliklere karşı sağlamlık arasındaki dengeyi kurabilir.



(a)

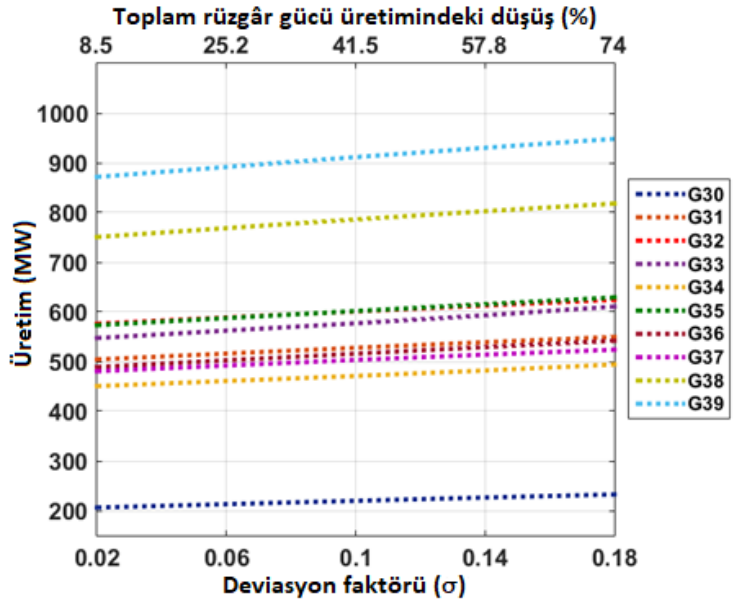


(b)

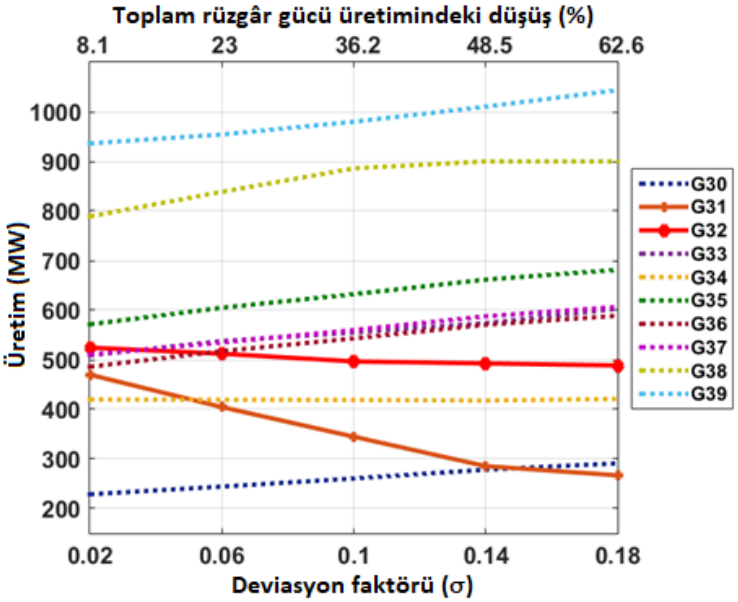
Şekil 3.9 : Deviasyon faktörünün (a) α_{17} ve (b) α_{19} sağlamlık değerlerine göre değişimi.

Şekil 3.10'da Durum 0 ve Durum 1 için deviasyon faktörünün değişimine ve toplam rüzgâr gücündeki yüzdelik düşüşe karşılık senkron generatörlere ait güç üretimi değişimleri görülmektedir. Burada, toplam rüzgâr gücündeki düşüş, rüzgâr tarlaları için belirlenen toplam işletim kapasitesi (800 MW) baz alınarak hesaplanmıştır. Durum 0 için toplam rüzgâr gücündeki düşüşe karşılık senkron generatör güç üretimlerinin lineer bir şekilde arttığı görülmektedir. Deviasyon faktörünün 0.02'den

0.18'e değişimine karşılık toplam rüzgâr gücündeki düşüş yaklaşık %65.5 (524 MW), senkron generatörlerin toplam güç üretimindeki artış ise yaklaşık %9.6 (522.9 MW) olmuştur. Diğer yandan, Durum 1 için deviasyon faktörünün 0.02'den 0.18'e değişimine karşılık toplam rüzgâr gücündeki düşüş yaklaşık %54.5 (436 MW), senkron generatörlerin toplam güç üretimindeki artış ise yaklaşık %8.2 (446 MW) olmuştur.



(a)



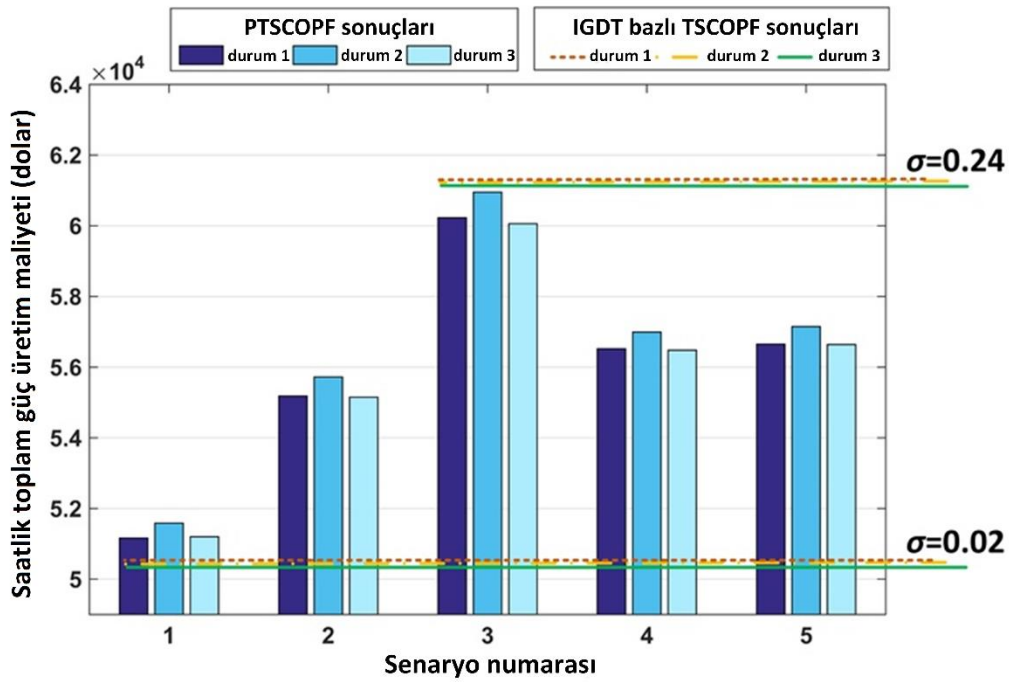
(b)

Şekil 3.10 : Senkron generatör güç dağıtımlarının deviasyon faktörüne (σ) göre değişimi; (a) Durum 0, (b) Durum 1.

Şekil 3.10'da, Durum 0 ve Durum 1 için elde edilen sonuçlar arasında belirgin farkların olduğu görülmektedir. Durum 1 için deviasyon faktörünün artışına karşılık, toplam rüzgâr gücünde düşüşe paralel olarak, 31 ve 32 numaralı baraya bağlı olan senkron generatörlerin güç üretiminde düşüş görülmektedir. Bu düşüş, 31 ve 32 numaralı baraya bağlı generatörler için sırasıyla %43.2 ve %6.9 civarındadır. Bu durumun nedeni, bu generatörlerin, Durum 1'de ele alınan arıza için güç sisteminin geçici hal kararlılığını önemli ölçüde etkileyen kritik makinalar olmasıdır. Güç sistemi geçici hal kararlılığı analizlerinde, güç sistemi işlerim koşullarına ve arıza durumlarına bağlı olarak değişir şekilde kritik olan ve olmayan senkron generatörler gruplanabilir. Bu gruplandırmada, kritik olan generatörler, güç sisteminin arıza durumunda kararsızlığa uğramasından sorumlu olan generatörlerdir. Eğer güç sisteminin kararsızlığa gitmesi önlenmek isteniyorsa, bu generatörlerin güç üretimi azaltılarak toplam güç üretiminin kritik olmayan generatörlere kaydırılması gerekmektedir. Durum 1 çözümünde, optimizasyon yöneliminin bu doğrultuda olduğu elde edilen sonuçlar ile Şekil 3.10'da görülmektedir.

3.7.1.3 Karşılaştırmalı analiz

Literatürde, TSCOPF probleminin çözümü için önerilen çalışmaların çoğu deterministik bazlıdır. Yani bu çalışmalarda herhangi bir belirsiz değişken bulunmamaktadır. Günümüz güç sistemlerinin yenilenebilir enerji kaynaklarının katılımı ile değişen yapısı düşünüldüğünde, bu çalışmalar gerçekçi çözümlerden uzak durmaktadır. Bu nedenle, TSCOPF probleminin çözümü, günümüz beklentilerini karşılar nitelikte belirsiz değişkenleri içeren bir problem modeli yardımıyla gerçekleştirilmelidir. Literatürde, sınırlı miktarda çalışma TSCOPF problemini belirsiz değişkenler ile birlikte ele almaktadır [67, 68]. [67] numaralı çalışmada bir istatistiksel TSCOPF (PTSCOPF, probabilistic TSCOPF) modeli önerilmiş ve belirsizliklerin ele alınmasında $2m+1$ nokta tahmini (PE, point estimate) yöntemi kullanılmıştır. PTSCOPF yöntemi, IGDT bazlı TSCOPF ile karşılaştırma amacıyla bu çalışmaya uyarlanmış ve IEEE'nin 39 baralı test sistemi üzerinde uygulanmıştır. Bu tez çalışmasında iki rüzgâr tarlası ve buna bağlı iki farklı belirsizlik değişkeni olduğu için [67] numaralı çalışmada önerilen metodolojiye göre PTSCOPF çözümüne yönelik belirsizlik modellemesi 5 farklı belirsizlik değerlendirmesi (senaryosu) ile yapılmıştır. PTSCOPF ve IGDT bazlı TSCOPF yöntemleri ile elde edilen sonuçlar Şekil 3.11'de görülmektedir.



Şekil 3.11 : PTSCOPF ve IGDT bazlı TSCOPF yöntemi ile elde edilen sonuçlar.

Şekil 3.11'e göre IGDT bazlı TSCOPF problem çözümünün deviasyon faktörünün 0.24 seçilmesi durumunda korunumlu özellikte sonuçlar, diğer yandan 0.02 seçilmesi durumunda ise ekonomik özellikte sonuçlar verdiği görülmektedir. Nitekim, PTSCOPF yöntemi ile elde edilen, Durum 1, Durum 2 ve Durum 3 için sırasıyla saatlik 55673.6, 56175.2 and 55638.4 dolar beklenilen (expected) değerler de dahil olmak üzere, toplam güç üretim maliyeti değerleri, deviasyon faktörü değerinin 0.24 ve 0.02'ye eşit olduğu durumlar için IGDT bazlı TSCOPF yöntemi ile bulunan maliyet değerleri arasında kalmıştır. Diğer yandan, problem çözümleri için CPU'da harcanan zamanlar Çizelge 3.3'te verilmiştir. Bu çözümlerin tümü, 3.6 GHz CPU hızına ve 16 GB RAM değerine sahip bir iş istasyonunda gerçekleştirilmiştir. Çizelgedeki sonuçlar incelendiğinde, IGDT bazlı TSCOPF çözümünün PTSCOPF çözümüne kıyasla hesaplamada avantajlar sağladığı net bir şekilde görülmektedir.

Çizelge 3.3 : PTSCOPF ve IGDT bazlı TSCOPF problemlerinin çözümü için gerekli hesaplama süreleri.

Yöntem	CPU'da harcanan zaman (saniye)		
	Durum 1	Durum 2	Durum 3
PTSCOPF [67]	936.3	945.9	937.8
IGDT bazlı TSCOPF (σ=0.02)	163.7	164.8	148.4
IGDT bazlı TSCOPF (σ=0.24)	178.1	173.0	154.9

Diğer yandan [68] numaralı çalışmada, belirsizlik değişken içeren TSCOPF problem çözümü için dayanıklı optimizasyon yöntemi uygulanmıştır. Fakat bu yöntemin kullanımında seçilen az sayıdaki belirsizlik senaryoları, belirsiz değişkenlerden kaynaklı tüm belirsizlik kombinasyonlarını kapsayacak şekilde olmalıdır. Bunu test etmek için de yüksek örneklemeli ve buna bağlı yüksek hesaplama performansı gerektiren Monte Carlo simülasyonlarına ihtiyaç duyulabilir.

Ayrıca [68] numaralı çalışmada, rüzgâr gücü belirsizliği %10 standart sapmaya sahip bir normal dağılım ile modellenmiştir. Burada seçilen standart sapma değeri gerçekçi sonuçlar elde etmek için oldukça yetersizdir. Nitekim, bu çalışmada ele alınan IGDT bazlı yöntem ile yapılan analizler minimum %78.3 rüzgâr gücü üretimi sapmasını içermektedir.

3.7.2 IEEE'nin 118 baralı ve 19 makineli test sistemi

IGDT bazlı TSCOPF yönteminin büyük ölçekli güç sistemleri için de uygun olduğunu göstermek amacıyla, IEEE'nin 39 baralı test sisteminin yanında, IEEE'nin 118 baralı ve 19 makineli test sistemi üzerinde de analizler gerçekleştirilmiştir. Rüzgâr tarlaları eklenerek modifiye edilmiş IEEE'nin 118 baralı test sistemi tek hat şeması Ek B'de verilmiştir. Bu güç sistemi için rüzgâr tarlaları 37 ve 71 numaralı baralara bağlanmıştır. Güç sistemindeki termal generatörlere ait maliyet fonksiyonu katsayıları da Ek B'de verilmiştir [63]. Diğer yandan rüzgâr genaratörü dinamikleri için IEEE'nin 39 baralı test sistemine ait Ek A'da verilen bilgiler kullanılmış, senkron generatör dinamiklerine ait parametre bilgileri ise [69] kaynak numarası ile verilen kitaptan alınmıştır. Bu kapsamda aşağıda tanımlanan arıza durumu için deterministik ve IGDT bazlı TSCOPF problem çözümü gerçekleştirilmiştir.

IEEE 118-bara güç sistemi analizleri kapsamında, 23 numaralı barada 3-faz toprak arızasının meydana geldiği ve 400 milisaniye sonra 23 ve 32 numaralı baralar arasındaki iletim hattının devreden çıkarılarak temizlendiği durumun gerçekleşme ihtimaline karşılık geçici hal kararlılığı kısıtları dikkate alınmıştır.

Bu kapsamda, modifiye edilmiş IEEE'nin 118 baralı test sistemi için gerçekleştirilen deterministik OPF ve TSCOPF çözümüne ait sonuçlar Çizelge 3.4 ile verilmiştir. Çizelge 3.4'e göre TSCOPF çözümü için toplam güç üretim maliyetinin beklenildiği şekilde bir miktar yüksek çıktığı görülmektedir.

Çizelge 3.4 : Modifiye edilmiş IEEE'nin 118 baralı test sistemi için gerçekleştirilen deterministik OPF ve TSCOPF çözümlerine ait sonuçlar.

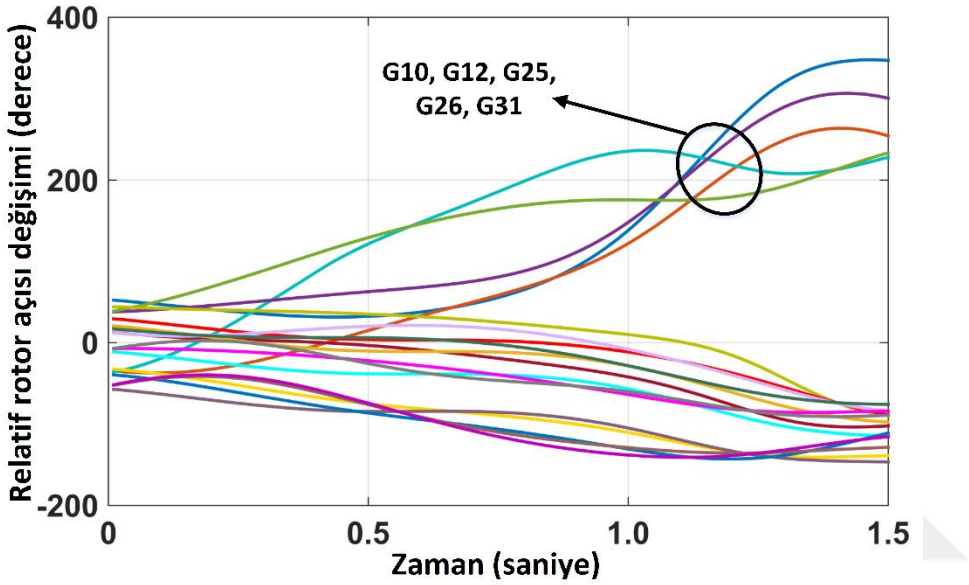
Problem	Üretim (MW)	Saatlik toplam güç üretim maliyeti (dolar)
OPF	P_{G10}=302.2, P_{G12}=134.1, P_{G25}=183.2, P_{G26}=218.4, P_{G31}=8.0, P_{G46}=17.1, P_{G49}=174.3, P_{G54}=53.2, P_{G59}=152.4, P_{G61}=137.4, P_{G65}=285.5, P_{G66}=284.6, P_{G69}=322.8, P_{G80}=329.0, P_{G87}=2.7, P_{G89}=380.5, P_{G100}=200.6, P_{G103}=34.4, P_{G111}=33.7	90313.15
TSCOPF	P_{G10}=297.8, P_{G12}=128.1, P_{G25}=172.8, P_{G26}=215.9, P_{G31}=7.4, P_{G46}=17.3, P_{G49}=176.7, P_{G54}=55.2, P_{G59}=156.5, P_{G61}=140.1, P_{G65}=288.0, P_{G66}=288.4, P_{G69}=320.8, P_{G80}=333.6, P_{G87}=2.7, P_{G89}=385.9, P_{G100}=205.8, P_{G103}=35.6, P_{G111}=34.7	90593.31

Şekil 3.12'de, IEEE 118-bara güç sistemi analizleri kapsamında dikkate alınan arıza durumunun deterministik OPF ve TSCOPF problem çözümleri ile bulunan işletim koşulları altında uygulanmasıyla elde edilen relatif rotor açısı değişimleri görülmektedir. Determenistik OPF çözümü için güç sistemi kararsızlığa gitmiştir. Kararsızlık durumu rotor açısı değişimlerinden görüldüğü üzere 10, 12, 25, 26 ve 31 numaralı baralara bağlı generatörler dikkate alınan arıza durumu ve güç sistemi işletim koşulları için kritik makinalardır. Diğer yandan, deterministik TSCOPF çözümü için tüm generatör relatif rotor açısı değişimlerinin 100 derece sınırı içerisinde kaldığı görülmektedir.

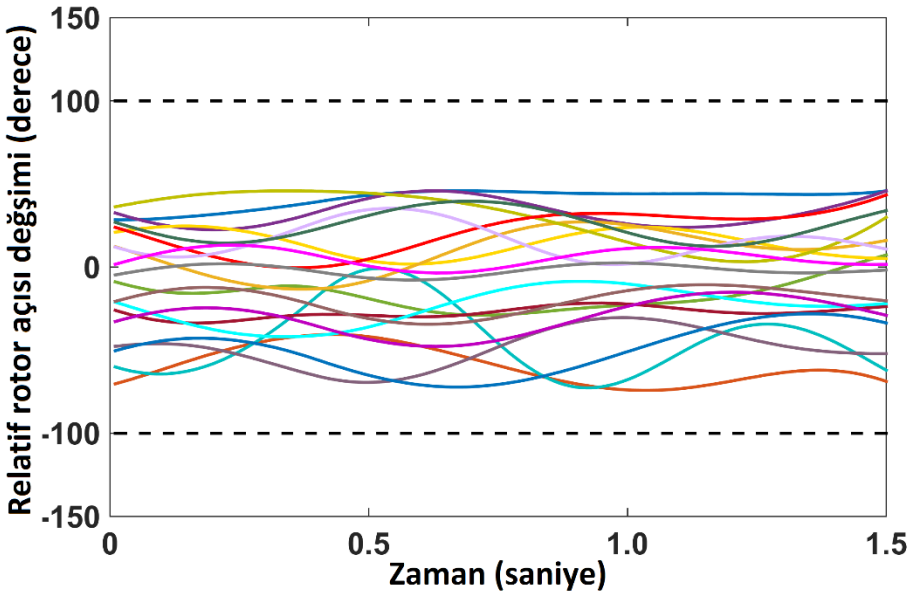
Şekil 3.13'te Çizelge 3.4'teki sonuçlar kullanılarak deviasyon faktörü değişimine karşılık IGDT bazlı OPF ve TSCOPF çözümüyle elde edilen 37 ve 71 numaralı baralara bağlı rüzgâr tarlalarına ait sağlamlık değerleri verilmiştir. Şekil 3.13 incelendiğinde, IGDT bazlı TSCOPF çözümü için sağlamlık değerlerinin düşük kaldığı görülmektedir. IGDT bazlı TSCOPF çözümünde, sağlamlık değerleri düşük kalsa da güç sisteminde meydana gelebilecek arızalara karşı güç sistemi kararlılığı korunmaktadır. Buna karşın, aynı durum IGDT bazlı OPF için geçerli değildir.

IEEE'nin 39 baralı test sistemi için gerçekleştirilen analizlere benzer şekilde IEEE'nin 118 baralı test sistemi için de deviasyon fakötürünün artışına karşılık IGDT bazlı OPF

ve TSCOPF çözümleri ile bulunan sağlamlık değerleri arasındaki fark da artmıştır. Yine benzer şekilde, rüzgâr tarlaları için bulunan sağlamlık değerleri arasında da farklılıklar görülmektedir. Her iki rüzgâr tarlası için karşılaştırma yapılırsa, deviasyon faktöründeki değişime karşılık α_{71}'daki değişim α_{37}'ye göre sınırlı kalmıştır. Bu da 71 numaralı baraya bağlı rüzgâr tarlasındaki güç üretim belirsizliğinin, güç sisteminin güvenliği ve ekonomik işletimi için 37 numaralı baraya bağlı rüzgâr tarlasına kıyasla daha riskli olduğu anlamına gelmektedir.

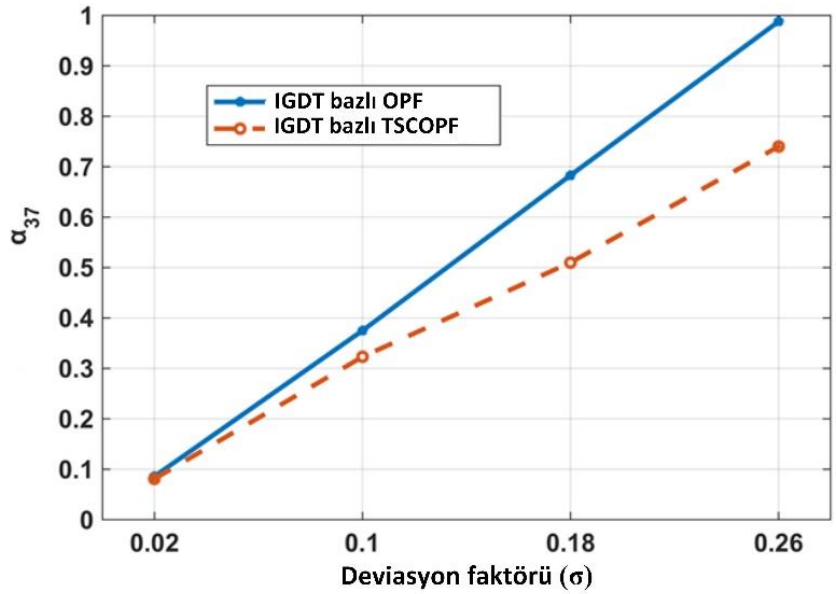


(a)

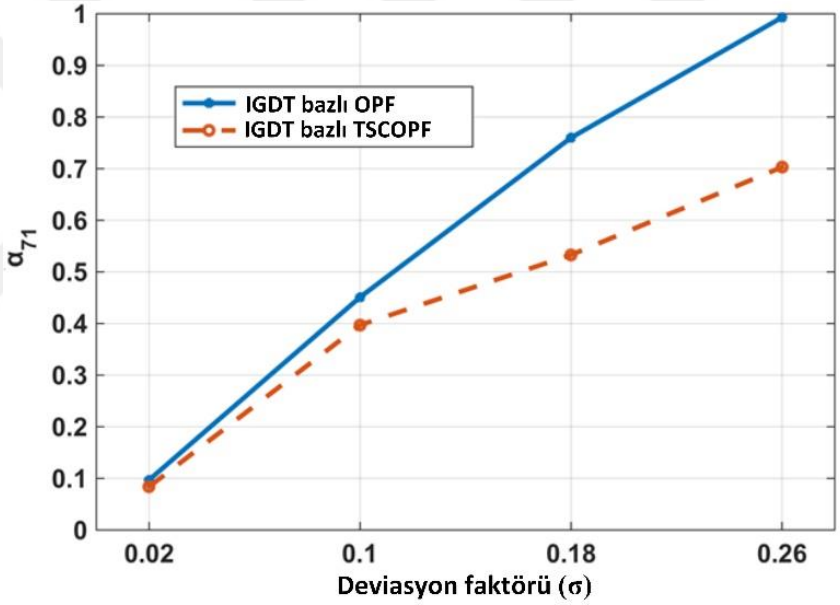


(b)

Şekil 3.12 : Modifiye edilmiş IEEE'nin 118 baralı test sistemi için gerçekleştirilen deterministik (a) OPF ve (b) TSCOPF problem çözümü için dikkate alınan arızanın uygulanması durumunda elde edilen relatif rotor açısı değişimleri.



(a)



(b)

Şekil 3.13 : Modifiye edilmiş IEEE'nin 118 baralı test sistemi için gerçekleştirilen IGDT bazlı OPF ve TSCOPF problem çözümüne ait sonuçlar; (a) α_{37}, (b) α_{71}.

4. GELİŞTİRİLMİŞ HİBRİT PSO-GWO (EHPSGWO) ALGORİTMASI

Tez çalışmaları kapsamında, parçacık sürü optimizasyon (PSO) [70] algoritmasının keşif aşaması kabiliyetinden ve gri kurt optmizasyon (GWO) [71] algoritmasının ise sömürü aşaması kabiliyetinden yararlanılarak meta-sezgisel yeni bir geliştirilmiş hibrit parçacık sürü-gri kurt optimizasyon (EHPSGWO) algoritması tasarlanmıştır. Algoritmanın lokal optimum çözümlere yönelmesinin engellenmesi amacıyla, keşif aşamasında çözümler arasındaki çeşitlilik kontrol edilmekte ve uygun çeşitliliğin oluşması sağlanmaktadır. EHPSGWO algoritması, temelde bu tez çalışmasında önerilen RGY probleminin çözümüne yönelik geliştirmiştir. Fakat bu bölümde, tasarlanan algoritmanın performansı, OPF probleminin çözümü üzerinden diğer algoritmalar ile karşılaştırma yapılarak gösterilmeye çalışılmıştır.

4.1 Parçacık Sürü Optimizasyon (PSO) Algoritması

Parçacık sürü optimizasyonu, kuş sürülerinin yiyecek arama davranışından esinlenilerek geliştirilmiş bir popülasyon bazlı meta-sezgisel optimizasyon algoritmasıdır. Popülasyon bazlı diğer algoritmalarda olduğu gibi PSO'da da başlangıç popülasyonu rastgele çözümler ile belirlenir. Burada her bir çözümü popülasyondaki parçacıklar belirlemektedir. Optimizasyon süresince her bir parçacığın ve sürünün elde ettiği en iyi çözüm hafızada tutulur. Her optimizasyon iterasyonunda ise güncellenerek hafızada tutulan bu en iyi çözümler kullanılarak parçacık pozisyonları ve hızları sırasıyla denklem 4.1 ve 4.2 ile hesaplanır.

$$x_i(t+1) = x_i(t) + v_i \times (t+1) \tag{4.1}$$

$$v_i(t+1) = \omega \times v_i(t) + C_1 \times rand_1 \times \left(x_i^{pei} - x_i(t)\right) + C_2 \times rand_2 \times \left(x^{sei} - x_i(t)\right) \tag{4.2}$$

Burada, $x_i(t)$ ve $v_i(t)$ i'nci parçacığın t anındaki sırasıyla pozisyon ve hızını; C_1 ve C_2 hızlanma katsayılarını; $rand_1$ ve $rand_2$ 0 ile 1 arasında değişen rastgele bir sayıyı; x_i^{pei} ve x^{sei} ise sırasıyla i'nci parçacık ve sürü tarafından o zamana kadar elde edilmiş en iyi amaç fonksiyonu değerine karşılık gelen pozisyonu ifade etmektedir.

4.2 Gri Kurt Optimizasyon (GWO) Algoritması

Gri kurt optimizasyon (GWO) algoritması, gri kurtların avlanma hiyerarşi ve kurallarından yaralanılarak geliştirilmiş bir popülasyon bazlı optimizasyon algoritmasıdır. Sürüde liderlik hiyerarşisini belirleyen 4 kurt grubu bulunmaktadır. Bunlar; alfa (α), beta (β), delta (δ), ve omega (ω) olarak isimlendirilmektedir. Hiyerarşide alfa kurtları en iyi çözümü verenlerdir. Diğer iyi çözümleri ise alfa kurtlarının ardından sırasıyla beta ve delta kurtları vermektedir.

Gri kurtların avlanma esnasındaki konum alma davranışı denklem 4.3'deki eşitlik ile belirlenmektedir.

$$X(t+1) = X_p(t) - A \times \left| C \times X_p(t) - X(t) \right| \tag{4.3}$$

Burada, $X(t)$ ve $X(t+1)$ sırasıyla t ve $t+1$ iterasyonlarındaki yani şuanki ve sonraki pozisyonlarını; $X_p(t)$ ava ait posizyonu; A ve C ise denklem 4.4 ile hesaplanan katsayı değerlerini ifade etmektedir.

$$A = \gamma \times (2 \times r_1 - 1), \;\; C = 2 \times r_2 \tag{4.4}$$

Burada, r_1 ve r_2 0 ile 1 arasında değişen rastgele sayıları; γ ise denklem 4.5'e göre 2'den 0'a doğru lineer şekilde azalan bir sayıyı ifade etmektedir.

$$\gamma = 2 - \frac{2t}{T} \tag{4.5}$$

Burada, t optimizasyon iterasyonu olmak üzere, T maksimum iterasyon sayısını ifade etmektedir.

Gri kurtların avlanma süreci, avın potansiyel konumunu en iyi sırasıyla alfa, beta ve delta kurtlarının bildiği varsayımı üzerinden gerçekleşmektedir. Bu sebeple diğer kurtlar pozisyonlarını bu kurtlara göre belirler. Bu sürecin matematiksel modeli denklem 4.6 ve 4.7 ile verilmiştir.

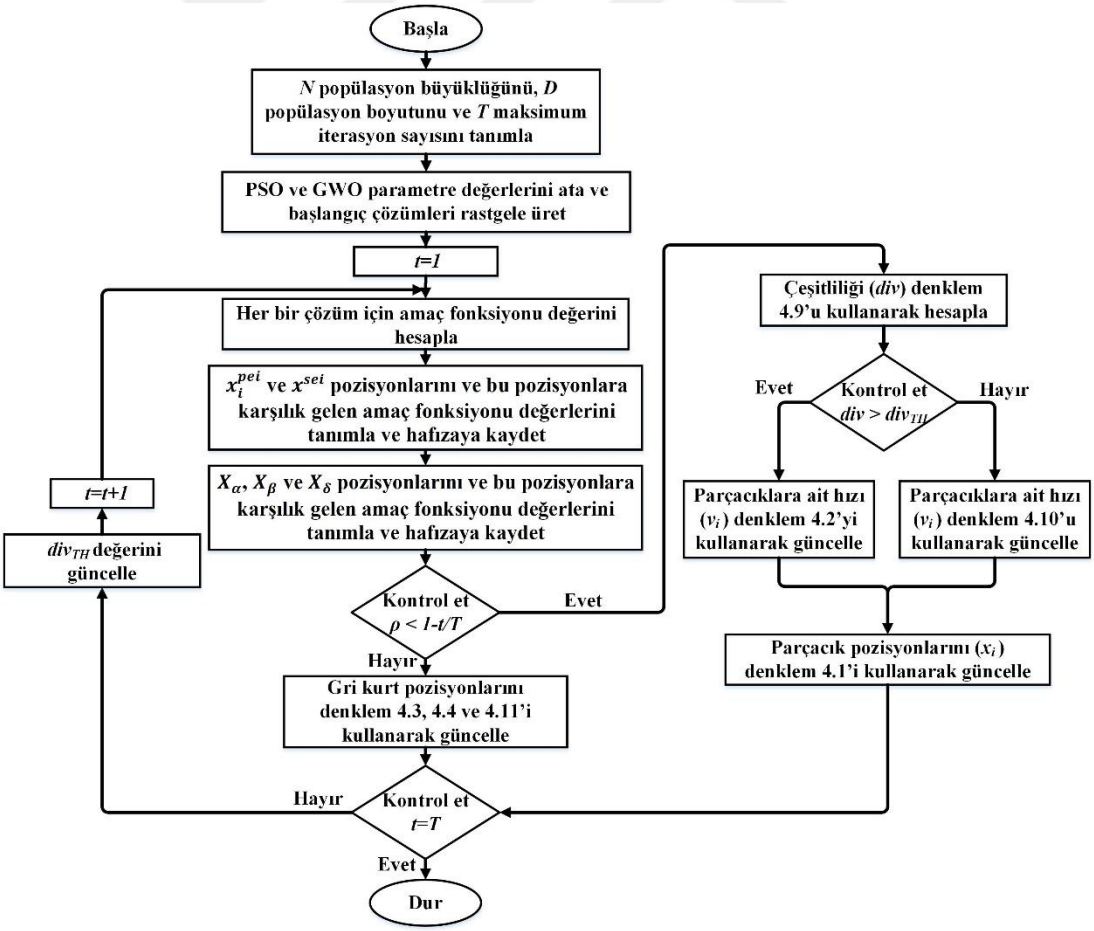
$$\begin{aligned} X_1 &= X_\alpha - A_1 |C_1 \times X_\alpha - X(t)| \\ X_2 &= X_\beta - A_2 \left| C_2 \times X_\beta - X(t) \right| \\ X_3 &= X_\delta - A_3 |C_3 \times X_\delta - X(t)| \end{aligned} \tag{4.6}$$

$$X(t+1) = \frac{X_1 + X_2 + X_3}{3} \tag{4.7}$$

Denklem 4.6 ve 4.7'deki A_1, A_2, A_3, C_1, C_2 ve C_3 değerleri, denklem 4.4'teki gibi belirlenmektedir.

4.3 Geliştirilmiş Hibrit PSO-GWO (EHPSGWO) Algoritması

EHPSGWO algoritması, PSO algoritmasının keşif aşaması ve GWO algoritmasının ise sömürü aşaması kabiliyetleri göz önünde tutularak hibrit bir formda tasarlanmıştır. Ayrıca, EHPSGWO'nun keşif aşamasında çözümler arasındaki çeşitliliğin kontrol edilmesini ve tüm arama uzayını kapsayacak şekilde uygun çeşitliliğin oluşmasını sağlayan bir prosedür algoritmaya dahil edilmiştir. Bu şekilde, lokal optimum çözümlere yakalanma riskinin azaltılması amaçlanmıştır. Şekil 4.1'de, EHPSGWO algoritmasına ait iş akış diagramı görülmektedir.



Şekil 4.1 : EHPSGWO algoritmasına ait iş akış diagramı.

Algoritmanın keşif ve sömürü aşaması arasındaki geçiş, denklem 4.8 ile verilen koşul ile belirlenmektedir.

$$\rho < 1 - t/T \tag{4.8}$$

Burada, ρ değeri 0 ile 1 arasında değişen rastgele bir sayıdır. Bu koşula göre, optimizasyonun başlarında EHPSGWO algoritması daha çok keşif aşamasındayken, son iterasyonlara doğru algoritma daha çok sömürü aşamasında olmaktadır. Şekil 4.1'den de görüldüğü üzere, hibritleme stratejisi ile uyumlu olarak keşif aşamasında PSO parametreleri kullanılırken, sömürü aşamasında ise GWO parametreleri kullanılmaktadır.

Keşif aşamasında çözümler arasındaki çeşitliliğin ölçümü denklem 4.9 ile yapılmaktadır.

$$div = \frac{1}{N_s}\sum_{k=1}^{N_s}\sqrt{\sum_{l=1}^{N_d}(X_{kl} - {X_k}^{avg})^2} \tag{4.9}$$

Burada, N_s ve N_d sırasıyla popülasyon büyüklüğü ve boyutunu; X_{kl} l'nci çözüme ait k'ncı değişkenin değerini; ${X_k}^{avg}$ ise tüm çözümler üzerinden k'ncı değişkene ait ortalama değeri ifade etmektedir. Bu hesaplamaya göre; eğer ki div değeri güncellenen eşik çeşitlilik değerinin (div_{TH}) üstündeyse çözümler arasındaki çeşitliliğin global optimimu yakalamak için arama uzayını yeterince kapladığı anlamına gelmekte ve parçacıklara ait hız denklem 4.2'ye göre güncellenmektedir. Diğer yandan, tam tersi olması durumunda ise ($div_{TH} > div$) parçacıklara ait hız denklem 4.10 ile verilen eşitliğe göre güncellenmektedir [72].

$$v_i(t+1) = \omega \times v_i(t) - C_1 \times rand_1 \times \left(x_i^{pei} - x_i(t)\right) - C_2 \times rand_2 \times \left(x^{sei} - x_i(t)\right) \tag{4.10}$$

[72] numaralı çalışmada önerilen sabit bir div_{TH} değeri kullanmak yerine EHPSGWO algoritmasında, daha etkili sonuçlar vermesi dolayısıyla iterasyon sayısı arttıkça azalarak güncellenen bir div_{TH} kullanılması uygun bulunmuştur.

EHPSGWO algoritmasının sömürü aşamasında, GWO algoritması prosedüründen farklı olarak, sadece denklem 4.5'teki γ değeri denklem 4.11 ile verilen eşitliğe göre güncellenmektedir.

$$\gamma = 0.5(1 - \frac{1}{T}) \tag{4.11}$$

4.4 OPF Probleminin Çözümü Üzerinden EHPSGWO Algoritmasının Diğer Optimizasyon Algoritmaları ile Karşılaştırılması

EHPSGWO algoritmasının yakınsama performasını test etmek amacıyla, optimal güç akışı (OPF) probleminin çözümü Ek A'da bilgileri verilen IEEE'nin 39 baralı test sistemi için balina optimizasyon algoritması (WOA, whale optimization algorithm) [73], Harris şahinleri optimizasyon (HHO, Harris hawk optimization) algoritması [74], PSO, GWO ve EHPSGWO optimizasyon algoritmaları ile gerçekleştirilmiştir. Aynı zamanda, literatürde kaotik WOA (CWOA, chaotic WOA) [20] ve kendinden uyarlamalı diferansiyel evrim algoritması (SeDE, self-adaptive differential evolution algorithm) [75] ile yapılan OPF çözümüne ait sonuçlar da karşılaştırma amacıyla verilmiştir. Çalışmanın ilk etabında, 30 popülasyon büyüklüğü ve 80 maksimum iterasyon sayısı için WOA, HHO, PSO, GWO ve EHPSGWO algoritmaları 20 farklı çalıştırmaya bağlı olarak OPF probleminin çözümünde kullanılmıştır. Bu çalışmaya ait sonuçlar Çizelge 4.1'de verilmiştir.

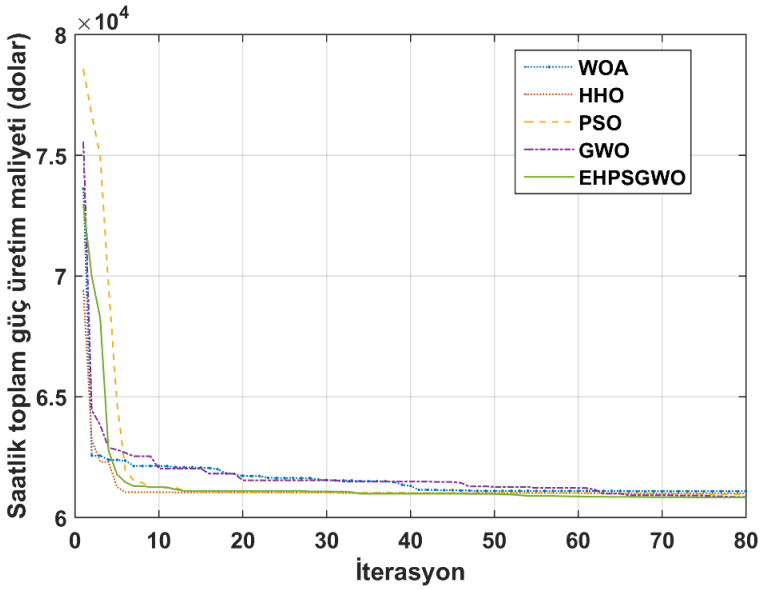
Çizelge 4.1 : 30 popülasyon büyüklüğü ve 80 maksimum iterasyon sayısı için farklı optimizasyon algoritmaları ile elde edilen toplam güç üretim maliyeti değerleri.

Algoritma	Saatlik toplam güç üretim maliyeti (dolar)		
	En iyi	En kötü	Ortalama
WOA	61,089	61,727	61,359
HHO	60,995	62,129	61,375
PSO	60,963	61,097	61,017
GWO	60,850	60,887	60,869
EHPSGWO	60,833	60,843	60,837

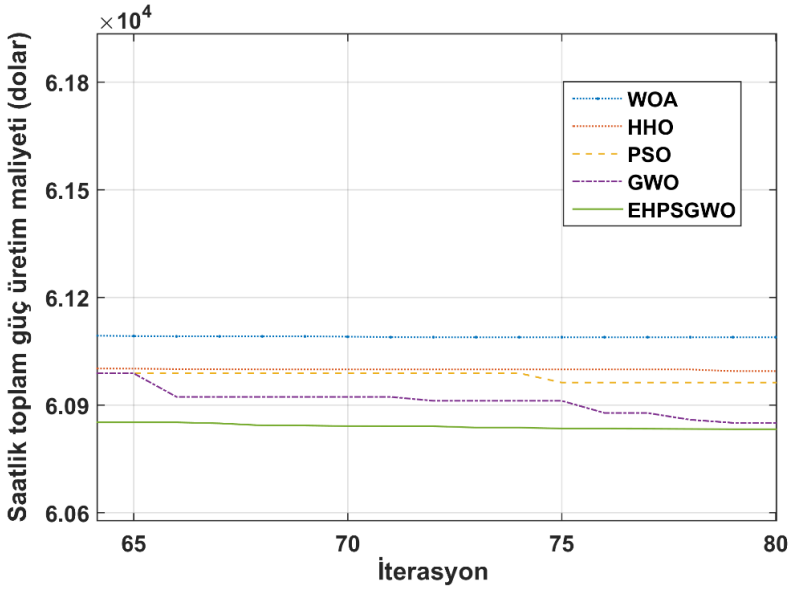
Çizelge 4.1'deki sonuçlar incelendiğinde, elde edilen çözümler içerisinde en iyi, en kötü ve ortalamada EHPSGWO algoritmasının en iyi performası gösterdiği görülmektedir.

Şekil 4.2'de ise her bir algoritma tarafından bulunan en iyi çözümlere ait yakınsama eğrileri görülmektedir. Şekil 4.2 incelenirse, EHPSGWO algoritmasına en yakın performansı GWO algoritmasının verdiği görülmektedir. Özellikle GWO

algoritmasının 65-80 iterasyon aralığında hızlı bir yakınsamaya gittiği görülmekte ve bu da GWO algoritmasının sömürü aşamasında etkili bir performans gösterdiğini teyit etmektedir. Diğer yandan ise ilk iterasyonlarda PSO algoritmasının GWO algoritmasına göre daha iyi bir yakınsama eğrisi gösterdiği ve bunun da PSO algoritmasının keşif aşamasındaki performansının GWO'ya göre daha iyi olduğunu ispatlamaktadır. Elde edilen sonuçlar ile yapılan bu her iki değerlendirme ışığında ise EHPSGWO algoritması ile gerçekleştirilen hibritleme stratejinin başarısı doğrulanmış olmaktadır.



(a)



(b)

Şekil 4.2 : Farklı optimizasyon algoritmaları için OPF probleminin çözümüne ait yakınsama eğrileri a) 1-80 b) 65-80 iterasyon aralığı.

Çalışmanın ikinci etabında ise PSO, GWO ve EHPSGWO algoritmaları 50 popülasyon büyüklüğü ve 100 maksimum iterasyon sayısı için yine 20 farklı çalıştırmaya bağlı olarak OPF probleminin çözümünde kullanılmıştır. Ayrıca literatürde benzer popülasyon büyüklüğü ve maksimum iterasyon sayısı için CWOA ve SaDE ile gerçekleştirilen OPF çözümleri de karşılaştırma yapmak amacıyla verilmiştir. Çizelge 4.2'de, 50 popülasyon büyüklüğü ve 100 maksimum iterasyon sayısı için OPF probleminin farklı optimizasyon algoritmaları ile çözümüne ait sonuçlar verilmiştir.

Çizelge 4.2 : 50 popülasyon büyüklüğü ve 100 maksimum iterasyon sayısı için farklı optimizasyon algoritmaları ile elde edilen toplam güç üretim maliyeti değerleri.

Algoritma	Saatlik toplam güç üretim maliyeti (dolar)		
	En iyi	En kötü	Ortalama
CWOA [20]	60,914	60,936	60,927
SaDE [75]	60,904	60,925	60,912
PSO	60,918	61,054	60,992
GWO	60,837	60,871	60,848
EHPSGWO	60,831	60,835	60,834

Çizelge 4.2 incelendiğinde, en iyi performansı EHPSGWO'nun gösterdiği görülmektedir. Çalışmanın ilk etabında olduğu gibi yakınsama performansı açısından EHPSGWO algoritmasının ardından GWO algoritmasının geldiği görülmektedir. Fakat GWO ile elde edilen en iyi çözüm değerinin EHPSGWO ile elde edilen en kötü çözüm değerinden daha büyük bir değerde olduğu görülmektedir. Bu durum, EHPSGWO ile daha düşük sayıda veya tek bir optimizasyon çalıştırması ile dahi etkili sonuçlar elde edilebileceği şeklinde rahatlıkla yorumlanabilir. En iyi ve en kötü çözüm arasındaki değer farkın da diğer algoritmalara göre çok daha küçük olması bunu ayrıca desteklemektedir.

5. EKONOMİK VE GÜVENLİ YENİ BİR RÜZGÂR GÜCÜ YATIRIM MODELİ

Son yıllarda, fosil yakıt rezervlerinin gittikçe tükenmesi ve konvansiyonel enerji kaynaklarının küresel ısınma üzerindeki tehlikeli etkileri nedeniyle yenilenebilir enerji kaynaklarının güç sistemlerine entegrasyonunu artırma çabaları dikkat çekmiştir. Buna örnek, bazı ülkelerin enerji politikalarını değiştirmeye karar vermesi gösterilebilir [76]. Örneğin, Danimarka 2050 yılına kadar %100 fosil yakıtsız bir ülke olma hedefi belirlemiştir [77]. Avrupa Birliği (AB) sera gazı emisyonlarını 2050 yılında 1990 yılındaki seviyeye göre %80-95 oranında düşürmeyi planlamakta ve buna bağlı olarak enerji talebinin 2050 yılında en az %55'inin yenilenebilir enerji kaynakları tarafından karşılanacağını öngörmektedir [78].

Dünya genelinde oluşan yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımını artırma stratejisi, enerji talebinin karşılanması noktasında çevresel ve ekonomik avantajlar sunmakta, fakat diğer yandan, bir takım teknik dezavantajları da içerisinde barındırmaktadır. Yenilenebilir enerji kaynaklarının en çok tercih edilen formlarından biri olan rüzgâr enerjisi kaynaklarının özellikle güç sistemi dinamik dayanıklılığında yarattığı riskler son derece önemli bir araştırma konusudur. Bu noktada, bu enerji kaynaklarının neden olabileceği teknik problemler dikkate alınarak uygun yatırım ve planlama stratejilerinin belirlenmesi önem arz etmektedir. Literatürde, çeşitli amaç ve kriterler doğrultusunda rüzgâr enerjisi yatırım planlamasını içeren birçok problem modeli bulunmaktadır [40-46]. Fakat bu problem modelleri incelendiğinde, güç sistemi dinamik güvenlik değerlendirmelerinin göz önüne alınmadığı ve sadece statik güvenliğin dikkate alındığı görülmektedir.

Bu tez çalışmasında, literatürdeki eksikler dikkate alınarak hem ekonomik olan hem de güç sistemi güvenliğini statik ve dinamik olarak ele alan bir RGY planlaması önerilmektedir. Bu model, ekonomik fayda bakımından, rüzgâr enerjisi yatırım maliyetinin ve rüzgâr enerjisi ile birlikte güç sistemindeki diğer konvansiyonel enerji kaynaklarının işletiminin neden olduğu toplam maliyetin minimize edilmesini; aynı zamanda da, güç sisteminin güvenliği açısından, güç sistemi gerilim profilinin

iyileştirilmesini ve rüzgâr enerjisi belirsizliği altında muhtemel kritik arızalara karşı güç sisteminin kararlılığının korunmasını amaçlamaktadır. Bu çalışmada, rüzgâr enerjisi kaynaklarının neden olduğu güç üretimi belirsizlikleri, hesaplamada sağladığı avantajlar dolayısıyla Taguchi'nin ortogonal dizi testi (TOAT, Taguchi's orthogonal array testing) yöntemi ile modellenmiştir. Problem çözümü, farklı durum çalışmaları için MATLAB'da [79]; güç sistemi geçici hal kararlılığının kontrolü ise MATLAB ile arayüzlenen DSATools [80] yazılımının TSAT modülü aracılığıyla gerçekleştirilmiştir.

5.1 Problem Formülasyonu

5.1.1 Amaç fonksiyonu

Bu çalışmada amaç fonksiyonu, çok amaçlı bir yapıda rüzgâr tarlası yatırımından ve rüzgâr tarlalarıyla birlikte konvansiyonel generatörlerin işletilmesinden kaynaklı maliyeti, bunun yanında ise güç sistemi gerilim profili iyileştirmesini içerecek şekilde tasarlanmıştır. Amaç fonksiyonu formülasyonu, denklem 5.1 ile verilmiştir.

$$\text{Minimize et:} \qquad Obj = \{\, \boldsymbol{w_1 TM + w_2 GP\dot{I} + PF} \,\} \tag{5.1}$$

Burada, w_1 ve w_2 ağırlık katsayılarını; TM toplam maliyet fonksiyonunu; $GP\dot{I}$ gerilim profili iyileştirilmesi amaç fonksiyonunu; ve PF penaltı faktörünü ifade etmektedir.

5.1.1.1 Toplam maliyet fonksiyonu

Toplam maliyet fonksiyonu, TM, denklem 5.2'deki gibi üç farklı maliyet fonksiyonunun toplamından oluşmaktadır.

$$TM = \sum (M_{T\dot{U}M} + M_{YM} + M_{\dot{I}BM}) \tag{5.2}$$

Burada, $M_{T\dot{U}M}$ konvensiyonel generatörler tarafından üretilen gücün saatlik toplam maliyetini; M_{YM} rüzgâr tarlalarının kullanım ömürlerine bağlı elde edilen saatlik rüzgâr enerjisi yatırım maliyetini; ve $M_{\dot{I}BM}$ ise rüzgâr tarlaları için saatlik işletim ve bakım maliyetini ifade etmektedir. Bu fonksiyolara ait formülasyonlar denklem 5.3-5.5 ile verilmiştir.

$$M_{TÜM} = \sum_{i \in \Omega_G} \xi_{oak}(a_i P_{Gi}^2 + b_i P_{Gi} + c_i) \tag{5.3}$$

$$M_{YM} = \sum_{i \in \Omega_W} \lambda_{yat} P_{Wi}^{kap} \tag{5.4}$$

$$M_{İBM} = \sum_{i \in \Omega_W} \xi_{oak} \lambda_{ibm} P_{Wi}^{kap} \tag{5.5}$$

Burada, λ_{yat} rüzgar tarlası yatırımı MW başına düşen saatlik toplam maliyeti, λ_{ibm} ise rüzgâr tarlası MW başına saatlik toplam işletim ve bakım maliyetini ifade etmektedir. ξ_{oak} rüzgâr tarlalarının kullanım ömürlerine ve yıllık enflasyon oranına (eo) bağlı elde edilen yıllık ortalama maliyet artış oranını simgelemekte ve denklem 5.6'daki gibi hesaplanmaktadır. P_{Wi}^{kap} ise i'nci baradaki rüzgâr tarlasının kurulu gücünü ifade etmekte ve denklem 5.7'deki eşitlik ile elde edilmektedir.

$$\xi_{oak} = \frac{1}{K\ddot{O}} \sum_{y=1}^{K\ddot{O}} (1 + eo)^{y-1} \tag{5.6}$$

$$P_{Wi}^{kap} = P_{Wi}/KF \tag{5.7}$$

Burada, $K\ddot{O}$ rüzgâr tarlalarının kullanım ömrünü ve KF ise rüzgâr tarlaları için kapasite faktörünü ifade etmektedir.

5.1.1.2 Gerilim profili iyileştirme amaç fonksiyonu

Güç sistemi gerilim profili iyileştirme amaç fonksiyonu, $GP\dot{I}$, güç sisteminde reaktif güç dağıtımının optimizasyonunu ve bu vesileyle baralardaki gerilim değerlerinin nominal değere yakınlaşmasını sağlamaktadır. Gerilim profili iyileştirme amaç fonksiyonu, denklem 5.8'deki gibi formüle edilmektedir.

$$GP\dot{I} = \sum_{i \in \Omega_B} (V_i - V_{nom})^2 \tag{5.8}$$

Burada, V_{nom} güç sistemi baraları için nominal gerilim değerini ifade etmekte ve değeri 1 birim değer (b.d.)'dir.

5.1.1.3 Penaltı faktörü

Denklem 5.1'deki PF ifadesi, problem çözümünde kısıtların aşılmaması ve güç sistemi geçici hal kararlılığının korunması için eklenmiş penaltı değeridir. Bu değer, özellikle güç sisteminin geçici hal kararlılığının korunması noktasında yardımcı olmaktadır. Her bir optimizasyon iterasyonunda bulunan her bir çözüm için, eğer güç sistemi, herhangi bir rüzgâr gücü üretim belirsizliği senaryosu altında, belirlenmiş kritik arızalardan herhangi birine karşı kararlılığını koruyamıyorsa, bu o çözüm için amaç fonksiyonuna yüksek bir ceza değeri olarak yansımaktadır.

5.1.2 Eşitlik ve eşitsizlik kısıtları

RGY probleminin eşitlik ve eşitsizlik kısıtları, Bölüm 3'te ele alınan deterministik TSCOPF problemindeki eşitlik (denklem 3.2 ve 3.3) ve eşitsizlik (denklem 3.4-3.8) kısıtlarının yanı sıra, denklem 5.9 ile verilen rüzgâr tarlalarının aktif güç üretim limitlerini belirleyen eşitsizlik kısıtından oluşmaktadır.

$$P_{Wi}^{min} \leq P_{Wi} \leq P_{Wi}^{maks} \quad \forall i \in W \tag{5.9}$$

5.1.3 Geçici hal kararlılığı kısıtları

RGY probleminde, geçici hal kararlılığı kısıtlarını, güç sistemi dinamik modelini ifade eden diferansiyel ve cebirsel eşitlikler oluşturmaktadır. Bölüm 3'te ele alınan deterministik TSCOPF probleminden farklı olarak, önerilen RGY probleminde, geçici hal kararlılığının kontrolü DSATools yazılımının TSAT modülü ile güç sistemi dinamik modeline bağlı gerçekleştirilen zaman bölgesi simülasyonların sonuçlarına göre yapılmıştır. TSAT ile belirli bir güç sistemi konfigürasyonu ve çalışma noktası için ele alınan arızaya karşı güç sisteminin kararlı olup olmadığının kontrolü yapılabilmektedir.

5.2 Geçici Hal Kararlılığı Kısıtlarının Kontrolü

Güç sistemi dinamik analizini yapabilmek için birçok alternatif yöntem bulunmaktadır. Bunlardan bazılarında, MATLAB veya benzeri yazılımlar kullanılarak güç sistemi dinamik davranışını belirleyen diferansiyel-cebirsel denklemler sayısal entegrasyon kuralları ile çözümlenmektedir. Bu tarz yöntemlerde, optimizasyonun da aynı yazılım üzerinde gerçekleştirilmesi durumunda hesaplama süresi bakımından

avantaj sağlanmaktadır. Fakat uygulanabilirlik, doğruluk ve pratiklik açısından dezavatajları bulunmaktadır. Örneğin, değişken bir güç sistemi konfigürasyonu için güç sistemi dinamik modeli de değişken olmakta ve her durum için ayrı olarak algoritmanın değiştirilmesi veya güncellenmesi gerekmektedir. Bunun yerine, dinamik çözümleme için özel olarak geliştirilmiş yazılımların kullanılması daha uygun olacaktır. Bu kullanımdaki zorluk ise bu yazılımlar ile optimizasyon algoritmasının oluşturulduğu yazılım arasında arayüzün sağlanması sorunudur. Fakat bu arayüzün sağlanması durumunda ise değişken güç sistemi konfigürasyonlarına karşı çözüm algoritmasının tekrar tekrar düzenlenmesine gerek kalmayacaktır. Ayrıca DSATools, PSS/E vb. belirli standartların sağlandığı yazılımların kullanılması durumunda ise çözümün doğruluğunda herhangi bir şüphe oluşmayacaktır.

Bu çalışmada, MATLAB, problem çözümünde kullanılmış; geçici hal kararlılığının kontrolü ise PSS/E ve TSAT'in MATLAB ile arayüzü sağlanarak gerçekleştirilmiştir.

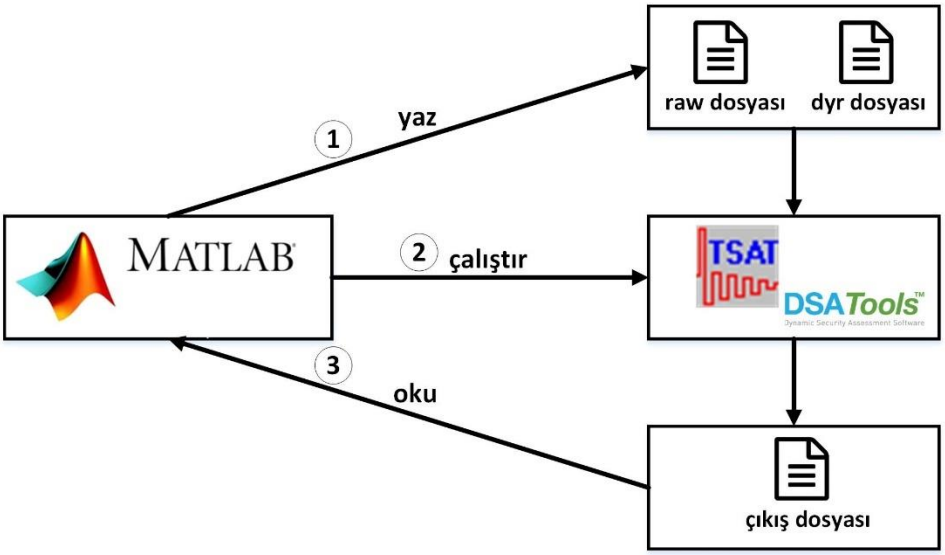
5.2.1 MATLAB-PSS/E arayüzünün kullanımı

MATLAB-PSS/E arayüzünün gerçekleştirilebilmesi için öncelikli olarak gerekli algoritmanın Python'da oluşturulması gerekmektedir. PSS/E'nin otomasyonu, Python dahil olmak üzere çeşitli yazılım ve komutlar ile yapılabilmektedir. Bu otomasyona yönelik özel bir kullanım kılavuzu oluşturulmuştur. Bu kılavuz yardımıyla Python'da oluşturulan algoritma, PSS/E'de istenen güç sistemi için istenen dinamik analizin gerçekleştirilebilmesine imkân sunmaktadır. MATLAB'da gerçekleştirilen optimizasyonun her bir iterasyonunda, güç sistemi geçici hal kararlılığının kontrolü için Python'da oluşturulan kod dosyası MATLAB "system" komutu ile çalıştırılmakta ve bu şekilde MATLAB üzerinden PSS/E'de güç sistemi dinamik analizi yapılabilmektedir. Dinamik analiz ile elde edilen sonuçlar ise Python kodunda yapılabilecek düzenleme ile MS Excel'e, buradan da MATLAB'a aktarılabilmektedir. Ek C'de, PSS/E'nin otomasyonu için tez çalışmaları kapsamında hazırlanan Python kodu verilmiştir.

5.2.2 MATLAB-TSAT arayüzünün kullanımı

MATLAB-TSAT arayüzü işlem akış şeması Şekil 5.1'de verilmiştir. İlk işlem basamağında, güç sistemi şebeke ve dinamik bilgilerini içeren sırasıyla "raw" ve "dyr" uzantılı dosyalar hazırlanır. İkinci işlem basamağında, arıza ve senaryo bilgilerini içeren ve daha önce TSAT'de oluşturulan durum dosyası, MATLAB komutları

yardımıyla TSAT'de çalıştırılır. Üçüncü ve son işlem basamağında ise TSAT'de elde edilen ve güç sisteminin çeşitli arıza ve senaryolar altındaki kararlılık durumunu içeren çıktı dosyası MATLAB yardımıyla okunur. Bu süreç her optimizasyon iterasyonunda gerçekleştirilerek ilgili çözüme ait işletim koşullarında güç sisteminin farklı arıza ve belirsizlik senaryosuna karşı geçici hal kararlılığının sağlanıp sağlanmadığının bilgisine ulaşılmak olmaktadır.



Şekil 5.1 : MATLAB-TSAT arayüz bağlantısı işlem akış şeması.

5.2.3 MATLAB-PSS/E ve MATLAB-TSAT arayüzlerinin karşılaştırılması

Bir dinamik analizin gerçekleştirilmesi için öncelikli olarak güç sisteminin başlangıç değerlerinin ayarlanması gerekmektedir. Bu işlem, PSS/E'nin Python üzerinden otomatize edilmesi durumunda bilgisayar özelliklerine göre değişkenlik gösterebilir olmakla birlikte 3.6 GHz CPU hızı ve 16 GB RAM değerlerindeki bir bilgisayarda PSS/E versiyon 33 için hemen hemen 2 saniye sürmektedir. Dinamik analizin gerçekleştirilmesi işleminin de dahil edilmesi ile bu süre, her bir geçici hal kararlılığı analizi için güç sisteminin büyüklüğüne göre değişken bir şekilde daha da artmaktadır. Optimizasyon çözümlemesi yapılırken, her iterasyon adımında bu işlemin her bir çözüm için gerçekleştirileceği düşünüldüğünde problem çözümleme süresi üzerinde önemli ölçüde bir yoğunluk meydana gelmektedir. Fakat PSS/E birden çok donanım üzerinden paralel çalıştırılabilme özelliğine sahip olduğundan bu süre bir miktar kısaltılabilir.

Diğer yandan PSS/E ile bir geçici hal kararlılığı analizi sonucunda güç sistemin kararlı veya kararsız olduğu kanısına kesin olarak varmak zordur. Bunun kesinleşebilmesi

için simülasyon süresinin yeterli uzunlukta tutulması gerekir ki bu da yine çözümleme süresine direkt olarak negatif etkide bulunmaktadır. Literatürde, kısa simülasyon sürelerinde güç sisteminin kararlı veya kararsızlığa gittiği konusunda bilgiye varmak için geliştirilmiş yöntemler bulunmaktadır. Bunlardan biri de tek makine eşdeğeri (SIME, single machine equivalent,) yöntemidir. Fakat bu yöntemin uygulanışında PSS/E'de gerçekleştirilen dinamik analiz sonucu elde edilen bazı verilerin işlenmesi gerekmektedir. Bu da yine süre ve işlem yükü bakımında bir olumsuz durum demektir.

Bu tez çalışmasında, MATLAB/TSAT arayüzü "tsat_batch.exe" uygulama dosyasının MATLAB'da çalıştırılması ile Python'a gerek kalmadan gerçekleştirilmiştir. TSAT'de PSS/E'den farklı olarak birden çok senaryo ve arıza durumu modellenebilmekte ve bu durumlara ait dinamik analizler hızlı bir şekilde yapılabilmektedir. Bu da problem çözüm süresini önemli ölçüde kısaltmaktadır. PSS/E'de, farklı arızaları analiz edebilmek için güç sistemi bilgilerinin tekrardan başlangıç değerlerine getirilerek dinamik analizin tekrarlanması gerekmektedir.

TSAT kendi algoritmasında gömülü olarak bulunan hesaplama teknikleri ile, yapılan dinamik analiz sonucu güç sisteminin kararlı veya kararsız duruma gittiğinin bilgisini direkt olarak vermektedir. Ayrıca TSAT, opsiyona göre, her bir arıza durumu için ayrı ayrı olarak güç sisteminin kararsızlığa ne derecede yakın olduğunun bilgisini bir geçici hal kararlılığı indisi değeri ile verebilmektedir. Bu da optimizasyon sürecinde amaç fonksiyonun global optimuma daha hızlı bir yakınsama yapmasında fayda sağlamaktadır.

Bu değerlendirmelerle, güç sistemi geçici hal kararlılığı analizinde sağladığı avantajlar dolayısıyla, önerilen rüzgâr gücü yatırım probleminin çözümünde MATLAB-TSAT arayüzü kullanılmıştır.

5.3 Belirsizliklerin Modellenmesi

Problem dahilinde, rüzgâr gücü üretimi belirsizliğinin modellenmesi TOAT metodu kullanılarak yapılmıştır. TOAT metodu, çok sayıda belirsiz değişken içeren problemler için belirsizlik modellemesinin birkaç senaryo ile yapılmasına imkân vererek problem çözümünde işlem süresinden kazanım sağlamaktadır.

TOAT metodu, Dr. Genichi Taguchi tarafından belirsiz değişkenlere ait tüm istatistiksel bilgiyi az sayıda senaryo ile modellemek amacıyla geliştirilmiştir [81].

TOAT metodunda, $\tilde{x}_1, \ldots \tilde{x}_M$ bir belirsiz değişken seti ve M de bu belirsiz değişken setinin büyüklüğünü vermek üzere eğer her bir değişken için iki seviyenin olduğu kabul edilirse, 2^M toplam senaryo sayısını vermektedir. TOAT metodunda, senaryolar ortogonal diziler (OD) ile belirlenmekte ve $L_H(B^M)$ ifadesi ile tanımlanan en uygun ortogonal dizi, B seviye ve M belirsiz değişken sayısına göre ilgili OD kütüphanesinden seçilerek belirlenmektedir [82]. Burada H, kütüphaneden seçilen uygun ortogonal dizi için senaryo sayısını ifade etmektedir. Bir örnek olarak $L_4(2^3)$ ile tanımlanan ortogonal dizi Çizelge 5.1'de verilmiştir. Verilen bu örnekte, seviye sayısı 2 olarak seçilmiştir. Seviye sayısının 2 seçilmesi durumunda her bir belirsiz değişken için Seviye 1 $(\mu - \sigma)$ değerine ve Seviye 2 ise $(\mu + \sigma)$ değerine eşittir. μ ve σ değerleri her bir değişkene ait dağılım bilgilerinden elde edilen ortalama ve varyans değerleridir.

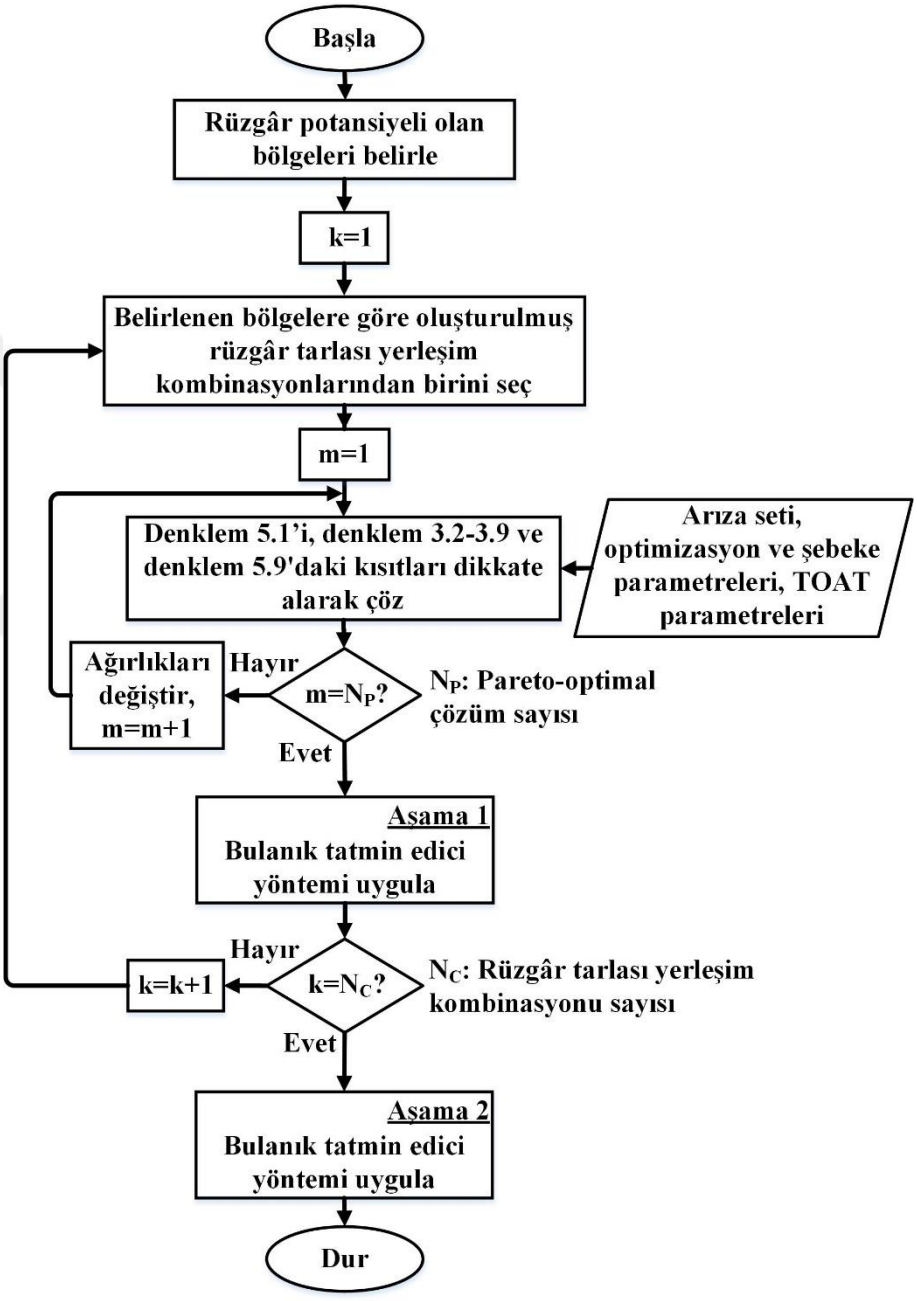
Çizelge 5.1 : 3 belirsiz değişkenli ve 2 seviyeli bir OD tasarımı.

Senaryo numarası	Belirsiz değişkenler ve seviyeleri		
	$\tilde{x}_1$	$\tilde{x}_2$	$\tilde{x}_3$
1	Seviye 1	Seviye 1	Seviye 1
2	Seviye 1	Seviye 2	Seviye 2
3	Seviye 2	Seviye 1	Seviye 2
4	Seviye 2	Seviye 2	Seviye 1

5.4 Çözüm Prosedürü

Önerilen RGY problemine ait çözüm prosedürünün iş akış şeması Şekil 5.2'de verilmiştir. Şekilden görüldüğü üzere, işlem akışının ilk adımını, güç sistemi üzerinde rüzgâr potansiyeli barındıran bölgelerin seçimi oluşturmaktadır. Bu adım, pratikte de rüzgâr gücü yatırımı için gerçekleştirilen ilk süreçtir [83]. Aynı zamanda, bu adım, seçilen her bir bölgeye sadece bir rüzgâr tarlası yerleştirileceği varsayılarak rüzgâr tarlası konum kombinasyonlarının belirlenmesini de içermektedir. Sonraki adımda, bu kombinasyonlar içerisinden seçilen biri için Bölüm 5.1'de tanımlanan RGY problemi çözülür. Bu işleme denklem 5.1'deki amaç fonksiyonuna farklı ağırlık katsayıları verilerek önceden belirlenen çözüm sayısına ulaşılıncaya kadar devam edilir. Burada, her bir iterasyon adımında TOAT metodu yardımıyla elde edilmiş belirsizlik senaryoları altında farklı arıza durumlarına karşı güç sistemi geçici hal kararlılığının korunup korunmadığı kontrol edilir. Eğer ki ilgili çözüm, herhangi bir belirsizlik

senaryosu için dikkate alınan arızalardan herhangi birine karşı güç sisteminde kararsızlığa neden oluyorsa, bu yüksek bir penaltı değeri ile amaç fonksiyonuna yansımaktadır. Bir diğer ifadeyle, geçici hal kararlılığıyla ilgili amaç fonksiyonunda bir penaltı değeri oluşmaması için belirsizlik senaryolarına bağlı elde edilen tüm işletim koşullarında dikkate alınan tüm arıza durumlarına karşı güç sistemi kararlılığını koruyor olmalıdır.



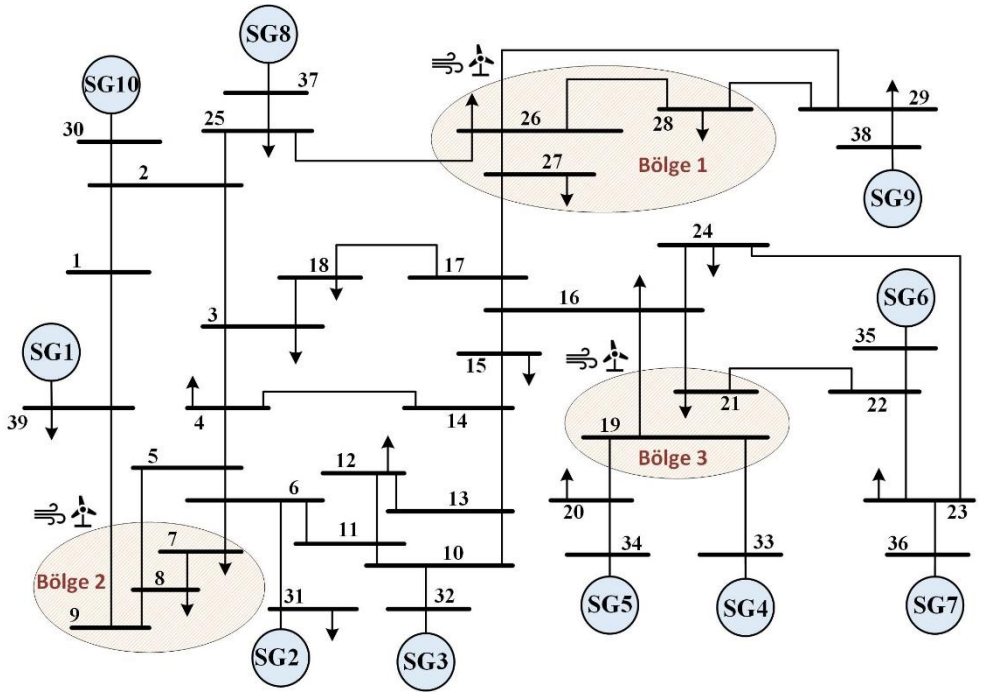
Şekil 5.2 : Önerilen RGY problemine ait çözüm prosedürü iş akış şeması.

Denklem 5.1'de ağırlık katsayılarının değiştirilmesi ile istenilen sayıda ulaşılan Pareto-optimal çözümler içerisinden [84] numaralı çalışmada verilen bulanık tatmin

edici yöntem kullanılarak en iyi çözüme ulaşılır. Bu adım, bulanık tatmin edici yöntemin uygulandığı ilk aşamayı oluşturmaktadır ve Şekil 5.2'de Aşama 1 olarak isimlendirilmiştir. Böylelikle her bir rüzgâr tarlası konum kombinansyonu için Aşama 1 sonucunda belirlenen en iyi çözümler, bu sefer Aşama 2 ile ifade edilen adıma birer Pareto-optimal çözüm olarak gelmektedir. Aşama 2 sonucunda bulunan en iyi değer ise RGY probleminin çözümünü yani güç sistemi için ekonomik bakımdan ve güç sisteminin güvenliği açısından optimal olan rüzgâr tarlası yerleşim konumlarını, rüzgâr tarlası kapasitelerini ve güç sistemi işletim noktasını ifade etmektedir.

5.5 Problemin Farklı Durum Çalışmaları için Çözümü

RGY problemi, Ek A'da bilgileri verilen IEEE'nin 39 baralı test sistemi üzerinde uygulanmıştır. Durum çalışmaları kapsamında, Ek A'da verilen güç sistemi aktif ve reaktif güç yük talebi, yeni eklenecek rüzgâr enerjisi kaynakları ile artan güç üretimi düşünülerek %5 oranında arttırılmıştır. Senkron generatör ve uyarıcılara ait dinamik parametre değerleri için Ek A'daki, rüzgâr generatörleri için [85] numaralı kaynakta verilen bilgiler kullanılmıştır. IEEE'nin 39 baralı test sistemi tek hat şeması üzerinde varsayımsal olarak rüzgâr potansiyeli barındıran bölgeler Şekil 5.3'te gösterilmiştir.



Şekil 5.3 : IEEE'nin 39 baralı test sistemi için varsayımsal olarak rüzgâr potansiyeli barındıran bölgelerin gösterimi.

Amaç fonksiyonuna ait parametreler ve değerleri Çizelge 5.2'de verilmiştir. Her bir rüzgâr tarlası tarafından gerçekleştirilen rüzgâr gücü üretimi 20 ile 250 MW arasında sınırlandırılmıştır. Rüzgâr enerjisi berlirsizliğinin %20 standart sapmalı bir normal dağılıma sahip olduğu varsayılarak TOAT yöntemi ile belirsizlik senaryoları elde edilmiştir.

Çizelge 5.2 : Amaç fonksiyonu parametre ve değerleri.

Parametre	λ_{yat} (dolar/MWsaat)	λ_{ibm} (dolar/MWsaat)	eo (%)	$K\ddot{O}$ (yıl)	KF (%)
Değer	5.023	6	3	23	52

IEEE'nin 39 baralı test sistemi için güç sistemi güvenliğini tehdit eden 3 farklı kritik arızaya ait bilgiler Çizelge 5.3'te verilmiştir. Problem çözümü için MATLAB 2018b kullanılmış, geçici hal kararlılığı kısıtlarının kontrolü ise MATLAB/TSAT arayüzü ile gerçekleştirilmiştir. Durum çalışmaları kapsamında tüm optimizasyon çözümleri için maksimum iterasyon sayısı 80 ve popülasyon büyüklüğü ise 15 seçilmiştir.

Çizelge 5.3 : Arıza numaraları ve tanımlamaları.

Arıza numarası	Arıza tipi	Arıza konumu (bara numarası)	Arıza süresi (saniye)	Devreden çıkartılan iletim hattı (baralar arası)
1	Üç faz-toprak arızası	29	0.11	29-26
2	Üç faz-toprak arızası	16	0.14	16-17
3	Üç faz-toprak arızası	25	0.18	25-2

5.5.1 Tek amaçlı çözüm (Durum A)

Bu durum çalışmasında, RGY problemi denklem 5.1'deki gerilim profili iyileştirilmesi amaç fonksiyonu ihmâl edilerek (w_1=1, w_2=0) PSO, GWO ve EHPSGWO algoritmaları ile çözülmüştür. Durum 1 için Şekil 5.2'deki çözüm prosedürünün Aşama 1 adımı, RGY probleminin tek amaçlı olarak ele alınması nedeniyle pas geçilmiş sadece rüzgâr tarlası konumlarının değişikliğine bağlı elde edilen Pareto-optimal çözümler ile Aşama 2 adımı için bulanık tatmin edici yöntem kullanılarak en iyi çözüme ulaşılmıştır.

Çizelge 5.4'te, Durum A için farklı optimizasyon algoritmaları kullanılarak elde edilen çözümler verilmiştir. Çizelgede verilen sonuçlara göre, rüzgâr tarlası en iyi konumları, PSO algoritması ile elde edilen çözüm için 7, 19 ve 28 numaralı baralar; GWO ve EHPSGWO algoritmaları ile elde edilen çözümler için ise 8, 21 ve 28 numaralı baralar olarak bulunmuştur. Fakat, EHPSGWO algoritması ile bulunan toplam maliyet değeri PSO ve GWO algoritmaları ile bulunan değerlere kıyasla daha düşüktür. Bu sonuç, Bölüm 4'te OPF probleminin çözümü ile elde edilen sonuçlara paralel olarak EHPSGWO algoritmasının güçlü yakınsama performansını teyit etmektedir.

Çizelge 5.4 : Durum A için elde edilen optimizasyon sonuçları.

Algoritma	Rüzgâr tarlası konumları (bara no.)	Rüzgâr tarlası kapasiteleri (MW)	Saatlik maliyet değerleri			
			$M_{TÜM}$ (dolar)	M_{YM} (dolar)	$M_{İBM}$ (dolar)	TM (dolar)
PSO	7, 19, 28	P_{R7}^{kap}=393.8, P_{R19}^{kap}=170.8, P_{R28}^{kap}=49.8	86,282	3,086	5,202	94,569
GWO	8, 21, 28	P_{R8}^{kap}=259.5, P_{R21}^{kap}=121.7, P_{R28}^{kap}=158.4	87,141	2,710	4,568	94,419
EHPSGWO	8, 21, 28	P_{R8}^{kap}=142.7, P_{R21}^{kap}=144.4, P_{R28}^{kap}=230.6	87,399	2,600	4,383	94,382

5.5.2 Çok amaçlı çözüm

Bu bölüm altında dikkate alınan tüm durum çalışmalarına ait problem çözümleri için EHPSGWO algoritması kullanılmıştır.

5.5.2.1 Tam model çözümü (Durum B)

Bu durum çalışmasında, RGY problemi, çok amaçlı formda ($w_1,\ w_2 \neq 0$) Şekil 5.2'deki tüm adımların gerçekleştirilmesiyle çözülmüştür. Durum B'ye ait sonuçlar Çizelge 5.5'te verilmiştir. Çizelgeye göre, Durum B için bulunan rüzgâr tarlası konumlarının Durum A'da EHPSGWO algoritması ile bulunan konumlarla (8, 21 ve 28 numaralı baralar) aynı olduğu görülmektedir. Diğer yandan Durum B için bulunan çözümde toplam rüzgâr gücü katılımı 622.5 MW'dır. Bu katılım seviyesi,

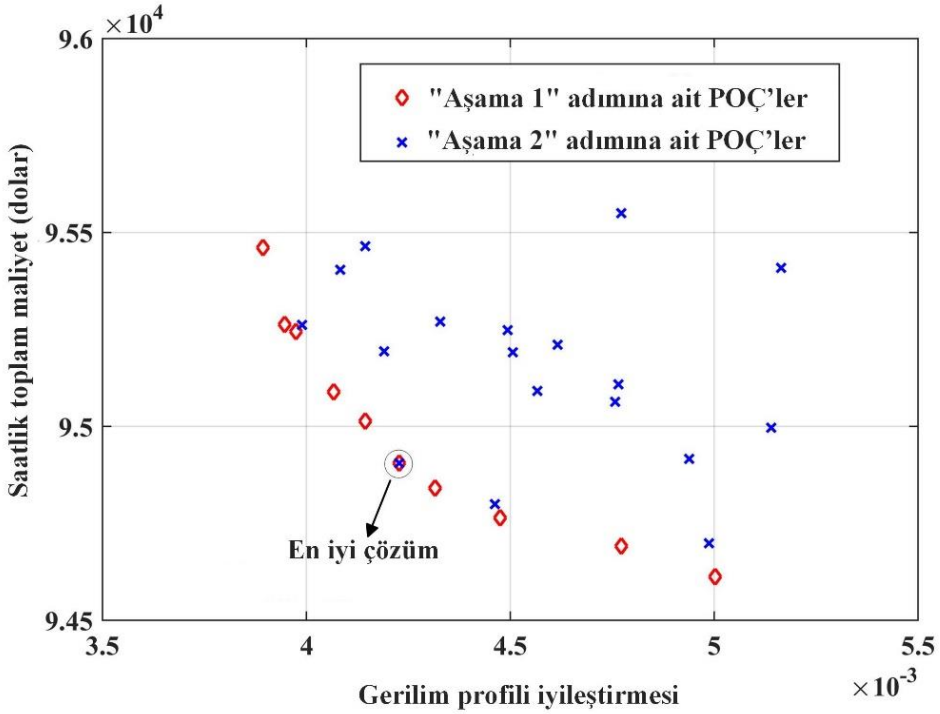
farklı optimizasyon algoritmaları ile Durum A için bulunan tüm değerlerden yüksektir. Bu sonuç, rüzgâr enerjisi katılımının güç sistemi gerilim profili üzerindeki olumlu etkisini göstermektedir.

Çizelge 5.5 : Durum B için elde edilen optimizasyon sonuçları.

Rüzgâr tarlası konumları (bara no.)	Rüzgâr tarlası kapasiteleri (MW)	Termal birimler arasındaki güç dağıtımı (MW)	GPİ (b.d.)	TM (dolar/saat)
8, 21, 28	P_{R8}^{kap}=183.2, P_{R21}^{kap}=223.0, P_{R28}^{kap}=216.3	P_{G30}=273.6, P_{G31}=616.8, P_{G32}=769.4, P_{G33}=677.2, P_{G34}=475.4, P_{G35}=556.8, P_{G36}=469.9, P_{G37}=482.9, P_{G38}=718.1, P_{G39}=1,076.3	0.00423	94,905

Şekil 5.4'te, rüzgâr tarlalarının 8, 21 ve 28 numaralı baralara bağlı olduğu durum için denklem 5.1'de ağırlık katsayıları değiştirilerek elde edilen Aşama 1 adımına ait Pareto-optimal çözümler ve farklı rüzgâr tarlası konum kombinasyonları için Aşama 1 adımı ile elde edilen Aşama 2 adımına ait Pareto-optimal çözümler görülmektedir. Şekil incelendiğinde, Aşama 2 için Pareto-optimal çözümlerin Pareto eğrisinde geniş bir yayılım gösterdiği görülmektedir. Bu sonuç, rüzgâr tarlası konum seçiminin ne derece çözüme etki ettiğini ortaya koymaktadır. Durum B için elde edilen çözüme göre, rüzgâr tarlalarını 8, 21 ve 28 numaralı baralara yerleştirmenin; toplam maliyet, güç sistemi gerilim profilinin iyileştirilmesi ve belirsizlikler altında arızalara karşı geçici hal kararlılığının sağlanması anlamında en doğru yatırım stratejisi olduğu anlaşılmaktadır.

Durum B için bulunan çözümün Çizelge 5.3'teki arızaların meydana gelmesi durumunda rüzgâr enerjisi belirsizliğine karşı güç sistemi geçici hal kararlılığının korunmasındaki sağlamlığının testi, rüzgâr gücü üretimi olasılıksal dağılımına göre rastgele üretilen 1000 senaryo altında Monte Carlo yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Teste ait sonuçlar Çizelge 5.6'da verilmiştir. Çizelge 5.6'ya göre, 1 ve 3 numaralı arızalara karşı güç sistemi tüm senaryolar için kararlılığını korurken, 2 numaralı arızaya karşı ise 1000 senaryodan sadece 9'u için güç sistemi kararsızlığa gitmiştir.



Şekil 5.4 : Durum B için Aşama 1 ve Aşama 2 adımlarına ait Pareto-optimal çözümler (POÇ) ve Durum B için bulunan en iyi çözüm.

Çizelge 5.6 : Monte Carlo test sonucu.

Arıza numarası	Sağlamlık (%)
1	100
2	99.1
3	100

5.5.2.2 Geçici hal kararlılığı kısıtlarının ihmâl edilmesi (Durum C)

Bu durum çalışmasında, RGY problemi, çok amaçlı formda (w_1, $w_2 \neq 0$) geçici hal kararlılığı kısıtları ihmâl edilerek rüzgâr tarlalarının 8, 21 ve 28 numaralı baralara bağlı olduğu durum için çözülmüştür. Çizelge 5.7'de Durum C'ye ait sonuçlar görülmektedir. Çizelgeye göre Durum C için bulunan sonuçların Çizelge 5.5'te Durum B için bulunanlardan daha küçük değerler olduğu görülmektedir. Bunun sebebi, geçici hal kararlılığı kısıtlarının direkt olarak generatörler arası güç üretim dağıtımı üzerindeki etkisinden kaynaklanmaktadır. Güç sistemindeki bazı generatörler belirli işletim koşulları altında bir veya birden fazla arızaya karşı duyarlı olabilmektedir. Bu generatörlere kritik makinalar (KM) denilmektedir. Güç sisteminin arızalara karşı dayanıklılığının arttırılması için bu generatörlerdeki yüklenmenin azaltılması ve oluşan güç üretimindeki açığın kritik olmayan diğer generatörler ile

karşılanması gerekmektedir. Fakat, bu durum, generatörlerin fiziksel güç üretim limitlerinden farklı olarak ek bir güç üretim limitine neden olmakta ve generatörler arası güç üretim dağıtımını etkilemektedir.

Çizelge 5.7 : Durum C için elde edilen optimizasyon sonuçları.

Rüzgâr tarlası kapasiteleri (MW)	GPİ (b.d.)	TM (dolar/saat)
P_{R8}^{kap}=272.0, P_{R21}^{kap}=262.6, P_{R28}^{kap}=197.4	0.00358	94,281

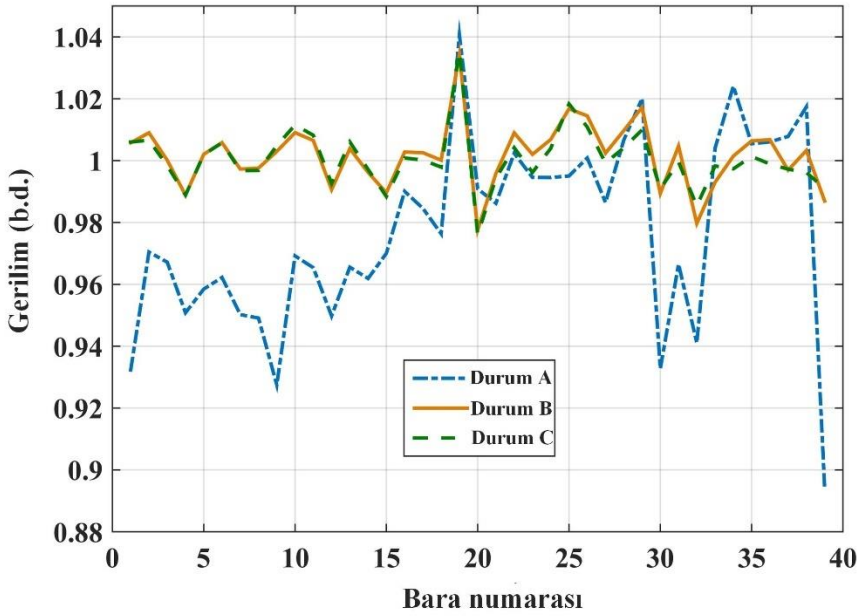
Çizelge 5.8'de farklı durum çalışmaları için TSAT kullanılarak elde edilen tahmini kritik temizleme zamanı değerleri görülmektedir. Çizelge 5.3'te tanımlanan arızalara ait temizleme süreleri göz önüne alındığında, bu arızaların meydana gelmesi durumunda Durum A ve Durum B ile bulunan işletim koşulları için güç sistemi kararlılığını korurken Durum C için bir kararsızlık söz konusudur. Eğer arızalara ait temizleme süreleri dikkate alınmaz ise Durum C ile bulunan işletim noktasının arızalara karşı en dayanıksız çözüm olduğu söylenebilir. Örneğin 1 numaralı arıza dikkate alındığında, güç sisteminin kararsızlığı gitmesini önlemek için Durum A ve Durum B için bulunan güç sistemi işletimlerinde, Durum C için bulunana göre sırasıyla 44.2 ve 53.3 milisaniye ek süre bulunmaktadır. Güç sistemlerinde koruma alanından bakıldığında, güç sistemindeki koruma elamanlarının (örneğin; röleler ve kesiciler) devreye girerek güç sisteminin hasar görmeden arızayı atlatması açısından milisaniyeler büyük öneme sahiptir.

Çizelge 5.8 : Farklı durum çalışmaları için elde edilen güç sistemi işletim koşullarına ait tahmini kritik temizleme süreleri (saniye).

Arıza numarası	Durum A	Durum B	Durum C
1	0.1207	0.1298	0.0765
2	0.1428	0.1484	0.1049
3	0.2075	0.2025	0.1422

Şekil 5.5'te farklı durum çalışmaları için elde edilen çözümlere ait güç sistemi gerilim profilleri görülmektedir. Şekil 5.5 incelendiğinde Durum B ve Durum C için RGY probleminde gerilim profili iyileştirilmesi amaç fonksiyonunun dikkate alınmasından dolayı bara gerilimlerindeki deviasyonunun bu durumlar için Durum A'ya göre daha sınırlı kaldığı görülmektedir. Sırasıyla Durum A, Durum B ve Durum C için en düşük

gerilimler 0.894, 0.978 ve 0.976 b.d. olarak; en yüksek gerilimler ise 1.041, 1.034 ve 1.035 b.d. olarak elde edilmiştir.



Şekil 5.5 : Farklı durum çalışmaları için elde edilen güç sistemi işletim koşullarına ait gerilim profilleri.

6. SONUÇLAR

Bu tez çalışmasında, rüzgâr enerjisi kaynaklarının güç sistemine entegrasyonunun arttırılması ve bu enerji kaynaklarının güç sisteminde bulunan diğer konvansiyonel enerji kaynakları ile birlikte işletilmesi, hem ekonomik açıdan hem de güç sisteminin güvenliği açısından ele alınmış ve oluşturulan farklı problem modelleri altında güç sistemi işletim ve planlamaları çeşitli durum çalışmaları ile sunulmuştur.

Tez çalışmasının ilk etabında, literatürdeki eksiklerin tespiti neticesinde, rüzgâr enerjisi içeren güç sistemleri için yeni bir güvenlik kısıtlı optimal güç akışı problem modeli, geçici hal kararlılığı kısıtlarını ve rüzgâr enerjisi güç üretim belirsizliğini içerecek şekilde oluşturulmuştur. Bu model, değişken güç üretimi altında güç sisteminde muhtemel kritik arızaların meydana gelmesi durumunda, güç sisteminin kararlılığının ve sürekliliğinin sağlanmasını ve aynı zamanda ise ekonomik bir güç üretim dağıtımının gerçekleştirilmesine imkân sunmaktadır. Önerilen model, küçük ve büyük ölçekli güç sistemleri üzerinde farklı kritik güç sistemi arızaları dikkate alınarak oluşturulan durum çalışmaları ile ele alınmış ve etkili sonuçlar elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, aynı deviasyon faktörü değerinde, rüzgâr enerjisi kaynaklarında üretilen gücün belirsizliğine karşı farklı arızalar için değişken sağlamlık değerleri elde edilmiştir. Diğer yandan, geçici hal kararlılığı kısıtlarının dikkate alınmadığı durumda belirsizliklere karşı sağlamlık daha yüksek veya bir diğer ifadeyle risk daha düşük olarak elde edilmiş, fakat buna karşılık muhtemel kritik arızaların meydana gelmesi durumunda güç sistemi kararsızlığa gitmiştir. Elde edilen sonuçlar neticesinde, tez kapsamında önerilen yöntem ile literatürdeki benzer yöntemler kıyaslandığında, önerilen yöntemin çözümde hesaplama avantajı sağlarken pratiğe yönelik uygulanabilir sonuçlar sunduğu görülmektedir. Literatürde yapılan önceki benzer çalışmalar genel olarak belirsizlikleri bir olasılıksal yoğunluk fonksiyonu ile tanımlamakta ve bu da hem pratiklik hem de örneklemeye dayalı işlem yükü açısından dezavantaj oluşturmaktadır. Ayrıca, bu çalışmalarda rüzgâr enerjisi kaynaklarında üretilen gücün belirsizliği kısıtlı bir standart sapma değeri aralığında ele alınmış ve güç değişiminde meydana gelebilecek aşırı dalgalanmalar ihmâl edilmiştir. Buna

karşılık, tez kapsamında önerilen IGDT bazlı TSCOPF problem modelinde, belirsizlikler için bir olasılıksal yoğunluk fonksiyonu tanımlamasına ve örneklemeye ihtiyaç duyulmamakta ve buna bağlı oluşan hesaplama avantajı ise problem çözümünde güç sistemi geçici hal kararlılığının kontrolünün sebep olduğu işlem yükünün telafi edilmesinde önemli bir rol oynamaktadır. Nitekim, elde edilen optimizasyon sonuçlarına göre, önerilen IGDT bazlı yöntemin olasılıksal yönteme kıyasla daha az bir CPU işlem süresi gerektirdiği görülmektedir. Diğer yandan, önerilen yöntemde karar vericinin tercihine göre deviasyon faktörü değeri 0 ile 1 arasında değiştirilebilmekte ve bu da rüzgâr enerjisi kaynaklarında üretilen gücün belirsizliğinin geniş bir aralıkta analiz edilmesine imkân vermektedir. Yöntemin pratiğe yönelik uygulanışını ülkemiz üzerinden örneklendirebiliriz. Buna göre; karar verici statüsünde bulunan EPİAŞ (Enerji Piyasaları İşletme A.Ş.), rüzgâr enerjisi kaynakları içeren küçük veya büyük ölçekli bir bölgesel güç sistemi üzerinde Gün Öncesi Piyasası işletimini gerçekleştirebilir. Yöntem, hesaplamada sunduğu avantajlar dolayısıyla Gün İçi Piyasasının işletilmesine yönelik de uygulanabilir. Fakat bu noktada, konvansiyonel enerji kaynakları ile güç üretimi yapan piyasa katılımcılarının güç üretim maliyeti parametrelerini, minimum ve maksimum güç üretim planlarını EPİAŞ ile paylaşması gerekmektedir. Katılımcılara ait bu verileri kullanarak yöntemi ilgili güç sistemi için uygulayan EPİAŞ, rüzgâr enerjisi belirsizliğine karşı uygun bulduğu stratejiye göre güvenilir ve ekonomik bir güç sistemi işletimi belirleyebilir. Fakat bu çözümde, katılımcıların piyasaya katılımı sınırlı kalmakta ve katılımcılar EPİAŞ'ın belirlediği fiyat üzerinden güç üretimlerine karşılık kazanç elde etmektedirler. Bu noktada, yöntem, katılımcıların fiyat tekliflerinin de dikkate alındığı bir piyasa şeklinde sonraki çalışmalar ile geliştirilebilir.

Tez çalışmasının ikinci ve son etabında ise, yeni bir rüzgâr gücü yatırım planlaması, ekonomik açıdan oluşacak rüzgâr tarlası toplam yatırım maliyeti ile güç sistemi işletim ve bakım maliyetlerinin minimize edilmesini, güç sisteminin güvenliği açısından ise gerilim profilinin iyileştirilmesi ve birden çok muhtemel kritik güç sistemi arızalarına karşı güç sistemi kararlılığının korunması amaçlarını içerecek şekilde modellenmiştir. Aynı zamanda, rüzgâr enerjisi güç üretim belirsizliği yine bu çalışmada da dikkate alınarak güç sisteminin dinamik davranışına ve dolayısıyla kararlılığına etki eden güç akışı değişimlerine karşı güvenilir çözümlerin elde edilmesi amaçlanmıştır. Önerilen RGY probleminin çeşitli durum çalışmaları için çözümü ile elde edilen sonuçlar,

rüzgâr tarlalarının yerleştirildiği konumların, yapılacak yatırımın ve gerçekleştirilecek güç sistemi işletiminin neden olduğu maliyetler ile güç sisteminin güvenliğine etki eden gerilim profilinin iyileştirilmesi açısından önemli ölçüde fark yarattığını göstermiştir. Diğer yandan, literatürdeki benzer çalışmalardan farklı olarak, önerilen problem modeli dahilinde geçici hal kararlılığı kısıtlarının dikkate alınması, devrenin açılması ve arızanın temizlenmesi noktasında güç sistemi koruma elemanlarına önemli zaman avantajı yaratmış ve muhtemel kritik arızalara karşı güç sistemini daha dayanıklı bir hale getirmiştir. Bunların yanında, yeni bir hibrit algoritma (EHPSGWO), önerilen RGY probleminin çözümünde kullanılmak üzere geliştirilmiş ve RGY probleminin yanı sıra çeşitli problemler üzerinde de uygulanarak performansı test edilmiştir. Sonuçlar, EHPSGWO algoritmasının diğer benzer algoritmalara göre üstünlüğünü göstermiş ve uygulanan hibritleme stratejisinin doğruluğunu teyit etmiştir.

Tez kapsamında ele alınan tüm problemler, tek ve merkezi bir marketin olduğu piyasaya yönelik olarak modellenmiştir. İleriki çalışmalarda, tez kapsamında ele alınan problem modelleri; çoklu market yapısının olduğu, üreticinin ve tüketicinin sosyal refahının da dikkate alındığı bir piyasa için geliştirilebilir. Fakat yine bu noktada, belirsizliklerin ele alınması ve güç sistemi dinamik denklem çözümleri hesaplamada zorluk yaratacaktır. İlerleyen yıllar için gittikçe artan işlem kapasiteleri ile kullanımı yaygınlaşan güçlü bilgisayarların yardımıyla bu problemlerin ortadan kalkması muhtemel görünmektedir.

KAYNAKLAR

[1] **Url-1** <*https://www.ren21.net/why-is-renewable-energy-important*>, erişim tarihi: 20.03.2021.

[2] **REN21** (2020). Renewables 2020 Global Status Report. <*https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/gsr_2020_full_report_en.pdf*>, erişim tarihi: 22.03.2021.

[3] **TMMOB Elektrik Mühendisleri Odası** (2020). Türkiye'de Elektrik Enerjisi Kurulu Gücü. <*https://www.emo.org.tr/ekler/167451d7abef853_ek.pdf?tipi=41&turu=X&sube=0*>, erişim tarihi: 27.03.2021.

[4] **Url-2** < *https://www.worldwater.io*>, erişim tarihi: 22.03.2021.

[5] **NASA Earth Observatory** (2021). Turkey Experiences Intense Drought. <*https://earthobservatory.nasa.gov/images/147811/turkey-experiences-intense-drought*>, erişim tarihi: 27.03.2021.

[6] **Kurnaz, L.** (2014). Drought in Turkey. *Istanbul Policy Center*. Erişim: 28 Mart 2021, https://ipc.sabanciuniv.edu/Content/Images/CKeditorImages/20200323-16034017.pdf

[7] **Lazard Ltd.** (2016). Lazard's Levelized Cost of Energy Analysis – Version 10. <*https://www.lazard.com/media/438038/levelized-cost-of-energy-v100.pdf*>, erişim tarihi: 28.03.2021.

[8] **Momoh, J.A., Austin, R.A., Adapa, R., ve Ogbuobiri, E.C.** (1992). Application of Interior Point Method to Economic Dispatch, *IEEE International Conference on Systems Man & Cybernetics*, Chicago, IL, USA: Ekim 18-21.

[9] **Momoh, J.A., El-Hawary, M.E., ve Adapa, R.** (1999). A review of selected optimal power flow literature to 1993. II. Newt ,on linear programming and interior point methods, *IEEE Transactions on Power Systems, 14*(1), 105–111.

[10] **Burchett, R.C., Happ, H.H., ve Vierath, D.R.** (1984). Quadratically Convergent Optimal Power Flow, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, PAS-103*(11), 3267-3275.

[11] **Tan, S., Lin, S., Yang, L., Zhang, A., Shi, W., ve Feng, H.** (2013). Multi-objective optimal power flow model for power system operation dispatching, *2013 IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC)*, Hong Kong, China: Aralık 8-11.

[12] **Surrender Reddy, S. ve Bijwe, P.R.** (2017). Multi-Objective Optimal Power Flow Using Efficient Evolutionary Algorithm, *International journal of emerging electric power systems, 18*(2), 1-21.

[13] **Kumari, M.S. ve Maheswarapu, S.** (2010). Enhanced Genetic Algorithm Based Computation Technique for Multi-Objective, Optimal Power Flow Solution, *International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 32*(6), 736-742.

[14] **Ye, C. ve Huang, M.** (2015). Multi-Objective Optimal Power Flow Considering Transient Stability Based on Parallel NSGA-II, *IEEE Transactions on Power Systems, 30*(2), 857-866.

[15] **Abido, M.A. ve Waqar Ahmed, M.** (2016). Multi-objective optimal power flow considering the system transient stability, *IET Generation Transmission and Distribution, 10*(16), 4213-4221.

[16] **Sivasubramani, S. ve Swarup, K.S.** (2011). Multi-objective harmony search algorithm for optimal power flow problem, *International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 33*(3), 745-752.

[17] **Pandiarajan, K. ve Babulal, C.K.** (2016). Fuzzy harmony search algorithm based optimal power flow for power system security enhancement, *International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 78*, 72-79.

[18] **Geng, G., Abhyankar, S., Wang, X., ve Dinavahi, V.** (2017). Solution techniques for transient stability-constrained optimal power flow – Part II, *IET Generation Transmission and Distribution, 11*(12), 3186-3193.

[19] **Ayan, K., Kılıç, U., ve Baraklı, B.** (2015). Chaotic artificial bee colony algorithm based solution of security and transient stability constrained optimal power flow, *International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 64*, 136-147.

[20] **Prasad, D., Mukherjee, A., Shankar, G., ve Mukherjee, V.** (2017). Application of chaotic whale optimisation algorithm for transient stability constrained optimal power flow, *IET Science, Measurement and Technology, 11*(8), 1002-1013.

[21] **Jiang, Q., Huang, Z., ve Xu, K.** (2013). Contingency Filtering Technique for Transient Stability Constrained Optimal Power Flow, *IET Generation Transmission and Distribution, 7*(12), 1536-1546.

[22] **Ledesma, P., Calle, I.A., Castronuovo, E.D., ve Arredondo, F.** (2015). Multi-Contingency Transient Stability Constrained Optimal Power Flow Based on Full-system Simulation, *IET Generation Transmission and Distribution, 11*(1), 64–72.

[23] **Gurusinghe, D.R. ve Rajapakse, A.D.** (2016). Post-Disturbance Transient Stability Status Prediction Using Synchrophasor Measurements, *IEEE Transactions on Power Systems, 31*(5), 3656-3664.

[24] **Miranda, V., Fidalgo, J.N., Lopes, J.A.P., ve Almeida, L.B.** (1995). Real time preventive actions for transient stability enhancement with a hybrid neural network-optimization approach, *IEEE Transactions on Power Systems, 10*(2), 1029-1035.

[25] **Ahmadi, H., Ghasemi, H., Haddadi, A.M., ve Lesani, H.** (2013). Two approaches to transient stability-constrained optimal power flow, *International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 47*, 181-192.

[26] **Sawhney, H. ve Jeyasurya, B.** (2004). On-line transient stability assessment using artificial neural network, *2004 Large Engineering Systems Conference on Power Engineering*, Halifax, NS, Canada: Temmuz 28-30.

[27] **Kessel, P. ve Glavitsch, H.** (1995). Estimating the Voltage Stability of a Power System, *IEEE Transactions on Power Delivery*, *1*(3), 346-354.

[28] **Panuganti, S., John, P., Devraj, D., ve Dash, S.** (2013). Voltage Stability Constrained Optimal Power Flow Using Non-dominated Sorting Genetic Algorithm-II (NSGA II), *Computational Water, Energy, and Environmental Engineering, 2*, 1-8.

[29] **Rabiee, A., Nikkhah, S., Soroudi, A., ve Hooshmand, E.** (2017). Information gap decision theory for voltage stability constrained OPF considering the uncertainty of multiple wind farms, *IET Renewable Power Generation, 11*(5), 585-592.

[30] **Wang, Y., Wang, C., Lin, F., Li, W., Wang, L.Y., ve Zhao, J.** (2013). Incorporating Generator Equivalent Model Into Voltage Stability Analysis, *IEEE Transactions on Power Systems, 28*(4), 4857-4866.

[31] **Kundur, P.** (1994). *Power System Stability and Control*. New York: McGraw-Hill.

[32] **Zhang, H. ve Li, P.** (2010). Probabilistic analysis for optimal power flow under uncertainty, *IET Generation Transmission and Distribution, 4*(5), 553 – 561.

[33] **Saunders, C.S.** (2014). Point Estimate Method Addressing Correlated Wind Power for Probabilistic Optimal Power Flow, *IEEE Transactions on Power Systems, 29*(3), 1045-1054.

[34] **Schellenberg, A., Rosehart, W., ve Aguado, J.** (2005). Introduction to cumulant-based probabilistic optimal power flow (P-OPF), *IEEE Transactions on Power Systems, 20*(2), 1184-1186.

[35] **Verbic, G. ve Canizares, C.A.** (2006). Probabilistic Optimal Power Flow in Electricity Markets Based on a Two-Point Estimate Method, *IEEE Transactions on Power Systems, 21*(4), 1883-1893.

[36] **Zhang, H. ve Li, P.** (2011). Chance Constrained Programming for Optimal Power Flow Under Uncertainty, *IEEE Transactions on Power Systems, 26*(4), 2417-2424.

[37] **Xu, Y., Ma, J., Dong, Z.Y., ve Hill, D.J.** (2017). Robust Transient Stability-Constrained Optimal Power Flow With Uncertain Dynamic Loads, *IEEE Transactions on Smart Grid, 8*(4), 1911-1921.

[38] **Li, J., Ye, L., Zeng, Y., ve Wei, H.** (2016). A scenario-based robust transmission network expansion planning method for consideration of wind power uncertainties, *CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2*(1), 11-18.

[39] **Han, X., Zhao, L., Wen, J., Ai, X., Liu J., ve Yang, D.** (2017). Transmission network expansion planning considering the generators' contribution to uncertainty accommodation, *CSEE Journal of Power and Energy Systems, 3*(4), 450-460.

[40] **Baringo, L. ve Conejo, A.J.** (2012). Transmission and Wind Power Investment, *IEEE Transactions on Power Systems, 27*(2), 885-893.

[41] **Nikkhah, S., Jalilpoor, K., Kianmehr, E., ve Gharehpetian, G.B.** (2018). Optimal wind turbine allocation and network reconfiguration for enhancing resiliency of system after major faults caused by natural disaster considering uncertainty, *IET Renewable Power Generation, 12*(12), 1413-1423.

[42] **Akbari, M.-A., Aghaei, J., ve Barani, M.** (2017). Convex probabilistic allocation of wind generation in smart distribution networks, *IET Renewable Power Generation, 11*(9), 1211-1218.

[43] **Nikkhah, S. ve Rabiee, A.** (2018). Optimal wind power generation investment, considering voltage stability of power systems, *Renewable Energy, 115*, 308-325.

[44] **Othman, M.M., El-Khattam, W., Hegazy, Y.G., ve Abdelaziz, A.Y.** (2015). Optimal Placement and Sizing of Distributed Generators in Unbalanced Distribution Systems Using Supervised Big Bang-Big Crunch Method, *IEEE Transactions on Power Systems, 30*(2), 911-919.

[45] **Abdelsalam, A.A., Zidan, A.A., ve El-Saadany, E.F.** (2015). Optimal DG Allocation in Radial Distribution Systems with High Penetration of Non-linear Loads, *Electric Power Components and Systems, 43*(13), 1487-1497.

[46] **Cheng, S., Chen, M.-Y., ve Fleming, P.J.** (2015). Improved multi-objective particle swarm optimization with preference strategy for optimal DG integration into the distribution system, *Neurocomputing, 148*, 23-29.

[47] **Jordehi, A.R.** (2016). Allocation of distributed generation units in electric power systems: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 56*, 893-905.

[48] **Chowdhury, M.A., Shen, W., Hosseinzadeh, N., ve Pota, H.R.** (2015). Transient stability of power system integrated with doubly fed induction generator wind farms, *IET Renewable Power Generation, 9*(2), 184-194.

[49] **Machowski, J., Bialek, J.W., ve Bumby, J.R.** (2008). *Power System Dynamics: Stability and Control* (2nd ed.). Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons Ltd.

[50] **Wehenkel, L. ve Pavella, M.** (2004). Preventive vs. emergency control of power systems, *IEEE PES Power Systems Conference and Exposition*, New York, USA, Ekim 10-13.

[51] **Kumar, B.K.** Power System Stability and Control. < *https://nptel.ac.in/content/storage2/courses/108106026/chapter1.pdf*>, erişim tarihi: 11.04.2021.

[52] **Kundur, P., Paserba, J., Ajjarapu, V., Andersson, G., Bose, A., Canizares, C., ….. Vittal, V.** (2004). Definition and classification of power system stability IEEE/CIGRE joint task force on stability terms and definitions, *IEEE Transactions on Power Systems, 19*(3), 1387-1401.

[53] **Momoh, J.A., Koessler, R.J., Bond, M.S., Stott, B., Sun, D., Papalexopoulos, A., ve Ristanovic, P.** (1997). Challenges to optimal power flow, *IEEE Transactions on Power Systems, 12*(1), 444-455.

[54] **Rabiee, A., Soroudi, A., ve Keane, A.** (2015). Information Gap Decision Theory Based OPF With HVDC Connected Wind Farms, *IEEE Transactions on Power Systems, 30*(6), 3396-3406.

[55] **Ahmadigorji, M., Amjady, N., ve Dehghan, S.** (2018). A Robust Model for Multiyear Distribution Network Reinforcement Planning Based on Information-Gap Decision Theory, *IEEE Transactions on Power Systems, 33*(2), 1339-1351.

[56] **Zhao, J., Wan, C., Xu, Z., ve Wang, J.** (2017). Risk-Based Day-Ahead Scheduling of Electric Vehicle Aggregator Using Information Gap Decision Theory, *IEEE Transactions on Smart Grid, 8*(4), 1609-1618.

[57] **General Algebraic Modeling System** (**GAMS) User's Guide**, GAMS Development Corporation, Fairfax, VA, USA.

[58] **IPOPT Home Page** (2018). Erişim: 5 Nisan 2021, https://www.coin-or.org/Ipopt/

[59] **CONOPT Home Page** (1996). Erişim: 5 Nisan 2021, http://www.conopt.com/

[60] **Zarate-Minano, R., Van Cutsem, T., Milano, F., ve Conejo, A.J.** (2010). Securing Transient Stability Using Time-Domain Simulations Within an Optimal Power Flow, *IEEE Transactions on Power Systems, 25*(1), 243-253.

[61] **Sauer, P.W. ve Pai, M.A.** (2006). *Power System Dynamics and Stability*. Champaign, Illinois: Stipes Publishing L.L.C.

[62] **Power System Simulator for Engineering (PSS/E)** (Version 33) [Computer software]. Schenectady, New York, USA.

[63] **MATPOWER: A Matlab Power System Simulation Package** (2011). Erişim: 7 Nisan 2021, https://matpower.org/

[64] **Sayyaadi, H., Babaie, M., ve Farmani, M.R.** (2011). Implementing of the multi-objective particle swarm optimizer and fuzzy decision-maker in exergetic, exergoeconomic and environmental optimization of a benchmark cogeneration system, *Energy, 36*(8), 4777 – 4789.

[65] **Zerigui, A., Dessaint, L.-A., Hannat, R., Ah King, R.T., ve Kamwa, I.** (2015). Statistical approach for transient stability constrained optimal power flow, *IET Generation Transmission and Distribution, 9*(14), 1856-1864.

[66] **Pai, M.A.** (1989). *Energy function analysis for power system stability*. Boston: Kluwer Academic Publishers.

[67] **Xia, S., Luo, X., Chan, K.W., Zhou, M., ve Li, G.** (2016). Probabilistic Transient Stability Constrained Optimal Power Flow for Power Systems With Multiple Correlated Uncertain Wind Generations, *IEEE Transactions on Sustainable Energy, 7*(3), 1133-1144.

[68] **Xu, Y., Yin, M., Dong, Z.Y., Zhang, R., Hill, D.J., ve Zhang, Y.** (2018). Robust Dispatch of High Wind Power-Penetrated Power Systems Against Transient Instability, *IEEE Transactions on Power Systems, 33*(1), 174-186.

[69] **Anderson, P.M. ve Fouad, A.A.** (2002). *Power System Control and Stability*. USA: Wiley-IEEE Press.

[70] **Kennedy, J. ve Eberthart, R.** (1995). Particle swarm optimization, *1995 IEEE International Conference on Neural Networks,* Perth, Australia, Aralık 1942-1948.

[71] **Mirjalili, S., Mirjalili, ve Lewis, A.** (2014). Grey Wolf Optimizer, *Advances in Engineering Software, 69*(2014), 46-61.

[72] **Riget, J. ve Vesterstom, J.S.** (2002). Adiversity-Guided Particle Swarm Optimizer – the arPSO. Denmark: EVAlife Technical Report.

[73] **Mirjalili, S. ve Lewis, A.** (2016). The Whale Optimization Algorithm, *Advances in Engineering Software, 95*, 51-67.

[74] **Heidari, A.A., Mirjalili, S., Faris, H., Aljarah, I., Mafarja, M. ve Chen, H.** (2019). Harris hawks optimization: Algorithm and applications, *Advances in Engineering Software, 97*, 849-872.

[75] **Chen, Y., Luo, F., Xu, Y., ve Qiu, J.** (2016). Self-adaptive differential approach for transient stability constrained optimal power flow, *IET Generation Transmission and Distribution, 10*(15), 3717– 3726.

[76] **Global Wind Energy Council (GWEC)** (2013). Global Wind Report - Annual Market Update 2012. <*https://www.gwec.net/wp-content/uploads/2012/06/Annual_report_2012_LowRes.pdf*>, erişim tarihi: 31.03.2021.

[77] **Danish Energy Agency (DEA)** (2012). Energy Policy in Denmark. <https://www.ft.dk/samling/20121/almdel/KEB/bilag/90/1199717.pdf>, erişim tarihi: 31.03.2021.

[78] **European Commission** (2011). Energy roadmap 2050. <https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/2012_energy_roadmap_2050_en_0.pdf>, erişim tarihi: 31.03.2021.

[79] **MATLAB** (Version 9.5) [Computer software]. Natick, Massachusetts: The MathWorks Inc.

[80] **DSATools™** (Version 14) [Computer software]. Surrey, BC, Canada.

[81] **Roy, R.K.** (2001). *Design of experiments using the Taguchi approach*. New York: John Wiley & Sons Inc.

[82] **The University of York** (2004). Orthogonal Arrays (Taguchi Designs). <*https://www.york.ac.uk/depts/maths/tables/orthogonal.htm*>, erişim tarihi: 31.03.2021.

[83] **Danish Energy Agency (DEA)** (2018). Wind Project Development Roadmap. <*https://www.infoafrica.it/wp-content/uploads/2018/03/wind_project_development_roadmap.pdf*>, erişim tarihi: 31.03.2021.

[84] **Knezović, K., Soroudi, A., Keane, A., ve Marinelli, M.** (2017). Robust multi-objective PQ scheduling for electric vehicles in flexible unbalanced distribution grids, *IET Generation Transmission and Distribution*, *11*(16), 4031 – 4040.

[85] **Hiskens, I.A.** (2012). Dynamics of Type-3 Wind Turbine Generator Models, *IEEE Transactions on Power Systems*, *27*(1), 465-474.

EKLER

EK A: IEEE'nin 39 Baralı ve 10 Makineli Test Sistemine Ait Bilgiler
EK B: IEEE'nin 118 Baralı ve 19 Makineli Test Sistemine Ait Bilgiler
EK C: PSS/E Otomasyonu için Tez Kapsamında Oluşturulmuş Python Kodu

EK A: IEEE'nin 39 Baralı ve 10 Makineli Test Sistemine Ait Bilgiler

Çizelge A.1 : IEEE'nin 39 baralı ve 10 makineli test sisteminde bulunan senkron generatörlere ait güç üretim limitleri ve maliyet fonksiyonu katsayıları.

Bara numarası	Aktif güç üretimi		Reaktif güç üretimi		Generatör maliyet katsayıları		
	Min (MW)	Maks (MW)	Min (MVAr)	Min (MW)	a_i (dolar/ MW^2saat)	b_i (dolar/ MWsaat)	c_i (dolar/ saat)
30	0	350	-400	400	0.0193	6.9	0
31	0	650	-400	400	0.0111	3.7	0
32	0	800	-400	400	0.0104	2.8	0
33	0	750	-400	400	0.0088	4.7	0
34	0	650	-400	400	0.0128	2.8	0
35	0	750	-400	400	0.0094	3.7	0
36	0	750	-400	400	0.0099	4.8	0
37	0	700	-400	400	0.0113	3.6	0
38	0	900	-400	400	0.0071	3.7	0
39	0	1200	-400	400	0.0064	3.9	0

Çizelge A.2 : IEEE'nin 39 baralı ve 10 makineli test sisteminde bulunan senkron generatörlere ait dinamik model parametre ve değerleri.

Bara no	R_s, b.d.	X_d, b.d.	X'_d, b.d.	X_q, b.d.	X'_q, b.d.	T'_{do}, san.	T'_{qo}, san.	H_{sg}, MWsaat/MVA	D
30	0	0.1000	0.0310	0.0690	0.0080	10.20	0.00	42.0	0
31	0	0.2950	0.0697	0.2820	0.1700	6.56	1.50	30.3	0
32	0	0.2495	0.0531	0.2320	0.0876	5.70	1.50	35.8	0
33	0	0.2620	0.0436	0.2580	0.1660	5.69	1.50	28.6	0
34	0	0.6700	0.1320	0.6200	0.1660	5.40	0.44	26.0	0
35	0	0.2540	0.0500	0.2410	0.0814	7.30	0.40	34.8	0
36	0	0.2950	0.0490	0.2920	0.1860	5.66	1.50	26.4	0
37	0	0.2900	0.0570	0.2800	0.0911	6.70	0.41	24.3	0
38	0	0.2106	0.0570	0.2050	0.0587	4.79	1.96	34.5	0
39	0	0.0200	0.0060	0.0190	0.0080	7.00	0.00	500.0	0

Çizelge A.3 : Senkron generatör uyarıcı dinamik model parametre ve değerleri.

T_a, san.	K_a	E_{fd}^{max}, b.d.	E_{fd}^{min}, b.d.
0.01	10	3	0

Çizelge A.4 : Rüzgâr generatörlerine ait dinamik model parametre ve değerleri.

X_{ig}, b.d.	X'_{ig}, b.d.	$r_{s,ig}$, b.d.	$T_{o,ig}$, san.	H_{ig}, MWsaat/MVA
3.01	0.02	0	0.887	2

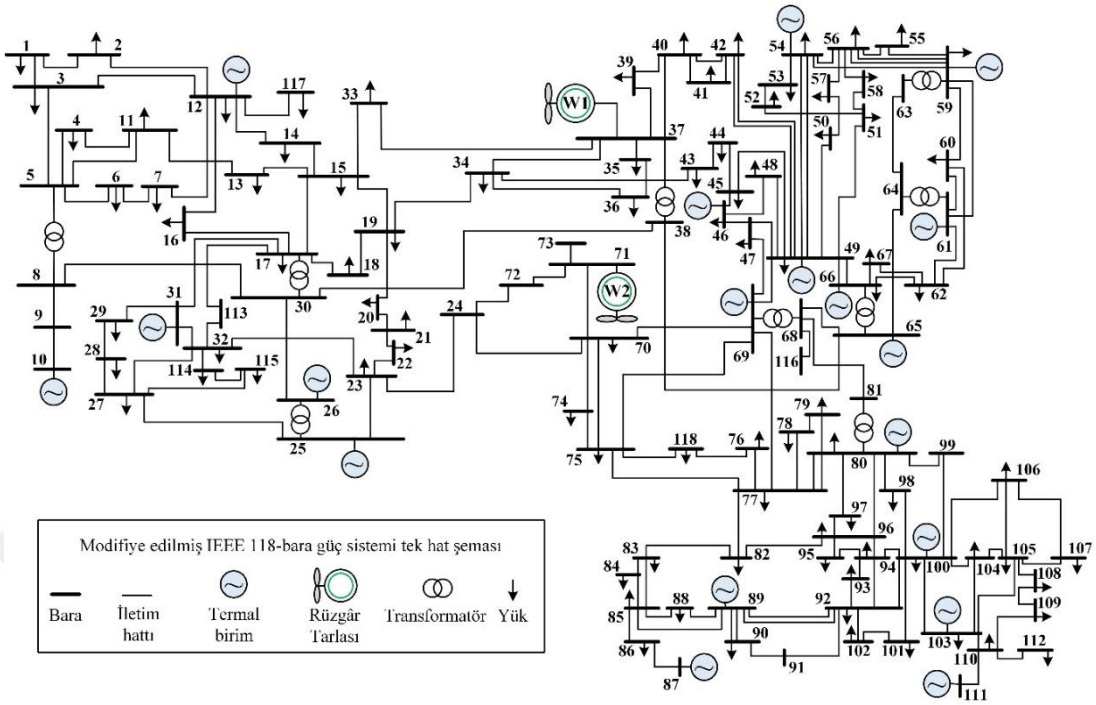
Çizelge A.5 : IEEE'nin 39 baralı test sistemine ait yük bilgileri.

Bara numarası	Aktif yük (MW)	Reaktif yük (MVAr)
1	0.00	0.00
2	0.00	0.00
3	322.00	2.40
4	500.00	184.00
5	0.00	0.00
6	0.00	0.00
7	233.80	84.00
8	522.00	176.00
9	0.00	0.00
10	0.00	0.00
11	0.00	0.00
12	7.50	88.00
13	0.00	0.00
14	0.00	0.00
15	320.00	153.00
16	329.00	32.300
17	0.00	0.00
18	158.00	30.00
19	0.00	0.00
20	628.00	103.00
21	274.00	115.00
22	0.00	0.00
23	247.50	84.60
24	308.60	-92.20
25	224.00	47.20
26	139.00	17.00
27	281.00	75.50
28	206.00	27.60
29	283.50	26.90
30	0.00	0.00
31	9.20	4.60
32	0.00	0.00
33	0.00	0.00
34	0.00	0.00
35	0.00	0.00
36	0.00	0.00
37	0.00	0.00
38	0.00	0.00
39	1104.00	250.00

Çizelge A.6 : IEEE'nin 39 baralı test sistemi iletim hattı bilgileri.

İletim hattı (baradan-baraya)	R (b.d.)	X (b.d.)	B (b.d.)	S_{ij}^{maks} (MW)
2-30	0.0000	0.0181	0.0000	500
31-6	0.0000	0.0250	0.0000	500
10-32	0.0000	0.0200	0.0000	500
12-11	0.0016	0.0435	0.0000	500
12-13	0.0016	0.0435	0.0000	500
19-20	0.0007	0.0138	0.0000	500
19-33	0.0007	0.0142	0.0000	500
20-34	0.0009	0.0180	0.0000	500
22-35	0.0000	0.0143	0.0000	500
23-36	0.0005	0.0272	0.0000	500
25-37	0.0006	0.0232	0.0000	500
29-38	0.0008	0.0156	0.0000	500
1-2	0.0035	0.0411	0.6987	500
1-39	0.0010	0.0250	0.7500	500
2-3	0.0013	0.0151	0.2572	500
2-25	0.0070	0.0086	0.1460	500
3-4	0.0013	0.0213	0.2214	500
3-18	0.0011	0.0133	0.2138	500
4-5	0.0008	0.0128	0.1342	500
4-14	0.0008	0.0129	0.1382	500
5-6	0.0002	0.0026	0.0434	500
5-8	0.0008	0.0112	0.1476	500
6-7	0.0006	0.0092	0.1130	500
6-11	0.0007	0.0082	0.1389	500
7-8	0.0004	0.0046	0.0780	500
8-9	0.0023	0.0363	0.3804	500
9-39	0.0010	0.0250	1.2000	500
10-11	0.0004	0.0043	0.0729	500
10-13	0.0004	0.0043	0.0729	500
13-14	0.0009	0.0101	0.1723	500
14-15	0.0018	0.0217	0.3660	500
15-16	0.0009	0.0094	0.1710	500
16-17	0.0007	0.0089	0.1342	500
16-19	0.0016	0.0195	0.3040	500
16-21	0.0008	0.0135	0.2548	500
16-24	0.0003	0.0059	0.0680	500
17-18	0.0007	0.0082	0.1319	500
17-27	0.0013	0.0173	0.3216	500
21-22	0.0008	0.0140	0.2565	500
22-23	0.0006	0.0096	0.1846	500
23-24	0.0022	0.0350	0.3610	500
25-26	0.0032	0.0323	0.5130	500
26-27	0.0014	0.0147	0.2396	500
26-28	0.0043	0.0474	0.7802	500
26-29	0.0057	0.0625	1.0290	500
28-29	0.0014	0.0151	0.2490	500

EK B: IEEE'nin 118 Baralı ve 19 Makineli Test Sistemine Ait Bilgiler



Şekil B.1 : Rüzgâr tarlaları eklenerek modifiye edilmiş IEEE'nin 118 baralı test sistemi tek hat şeması.

Çizelge B.1 : IEEE'nin 118 baralı ve 19 makineli test sisteminde bulunan senkron generatörlere ait maliyet fonksiyonu katsayıları.

Bara numarası	Generatör maliyet katsayıları		
	a_i (dolar/MW^{2}saat)	b_i (dolar/MWsaat)	c_i (dolar/saat)
10	0.022222222	20	0
12	0.117647059	20	0
25	0.045454545	20	0
26	0.031847134	20	0
31	1.428571430	20	0
46	0.526315789	20	0
49	0.049019608	20	0
54	0.208333333	20	0
59	0.064516129	20	0
61	0.062500000	20	0
65	0.025575448	20	0
66	0.025510204	20	0
69	0.019364836	20	0
80	0.020964361	20	0
87	2.500000000	20	0
89	0.016474464	20	0
100	0.039682540	20	0
103	0.250000000	20	0
111	0.277777778	20	0

EK C: PSS/E Otomasyonu için Tez Kapsamında Oluşturulmuş Python Kodu

```
#psse initialization
psspy.psseinit(10000)

#network data
psspy.read(0,r'raw file directory')

#dynamic data
ierr=psspy.dyre_new(dyrefile='dyr file directory')

#power flow
psspy.fnsl()

#channel setup wizard
ierr=psspy.chsb(sid=0,all=1, status=[-1,-1,-1,1,1,0])

ierr=psspy.dynamics_solution_params([_i,_i,_i,_i,_i,_i,_i,_i],
[_f,_f,0.005,_f,_f,_f,_f,_f], 'out_file')

#concert load
psspy.conl(-1,1,1)
psspy.conl(-1,1,2,[0,0],[0,100,0,100])
psspy.conl(-1,1,3)

#convert generators
psspy.cong()

#start/perform dynamic simulation
psspy.strt(outfile="out_file.out")

psspy.run(0,0,1,1,1)

# 3-phase fault on bus 4
psspy.dist_bus_fault(ibus=4)

# Run to 0.2 sec
psspy.run(0,0.2,1,1,1)

#simulation data read
chnfobj = dyntools.CHNF("out_file.out")
short_title, chanid, chandata = chnfobj.get_data()
count = len(chandata[1]) - 1
print(count)
print(chandata[1][count])

# Clear fault and trip line
psspy.dist_clear_fault()
psspy.dist_branch_trip(ibus=4, jbus=5, id='1')
```

```
# Run to 0.28 sec
psspy.run(0,0.28,1,1,1)

# Run to 0.9 sec
psspy.run(0,0.9,1,1,1)
```

ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad **:** Alişan Ayvaz

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** **:** 2013, Ege Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü
- **Yükseklisans** **:** 2017, Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Programı

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- 2013 yılında Amasya Üniversitesi'nde Araştırma Görevlisi olarak çalışmaya başladı.

DOKTORA TEZİNDEN TÜRETİLEN YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- **Ayvaz, A.**, Genc, V. M. I. 2020. Information-gap decision theory based transient stability constrained optimal power flow considering the uncertainties of wind energy resources, *IET Renewable Power Generation*, 14(11), 1946-1955.
- **Ayvaz, A.**, Genc, V. M. I. 2019. Information Gap Decision Theory based Multi-objective OPF for a Power System with Wind Energy Resources. *ICSG 2019 – 7th International Istanbul Smart Grids and Cities Congress and Fair*, April 25-26, 2019 Istanbul, Turkey.

DİĞER YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- **Ayvaz, A.**, Ayvaz, B. B. 2018. Güç sistemlerinde meydana gelen kısa devre arızalarına karşı akım sınırlayıcı yapısının en uygun yerleşim yerinin belirlenmesi, *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 22(2), 613-621.
- **Ayvaz, A.**, Ozdemir, M. 2016. A combined usage of SDBR and SVC to improve transient stability performance of a PV/wind generation system. *National Conference on Electrical, Electronics and Biomedical Engineering*, December 1-3, 2016 Bursa, Turkey.
- **Ayvaz, A.**, Ozdemir, M. 2016. Wind Farm Stability Enhancement Using SDBR Combined with SVC. *4th International Symposium on Environment Friendly Energies and Applications*, September 14-16, 2016 Belgrade, Serbia.

- **Ayvaz, A.**, Ozgonenel, O., Ayvaz, B. B. 2015. Analysis of Electricity Price In The Turkish Domestic Energy Market. *9th International Conference on Electrical and Electronics Engineering*, November 26-28, 2015 Bursa, Turkey.