



New two level robust models for transmission expansion planning problem under uncertainty

Ercan Şenyiğit¹ , Selçuk Mutlu^{2*} 

¹Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Erciyes University, Kayseri, 38280, Turkey

²Graduate School of Natural and Applied Sciences, Erciyes University, Kayseri, 38280, Turkey

Highlights:

- Monte Carlo simulation technique for uncertainty
- Scenarios are generated for uncertainties such as change in demand, oil prices, environmental issues, renewable generation, and production failures.
- New 2-level robust models and linear transformation

Keywords:

- Transmission expansion planning
- Linear transformation
- Monte Carlo simulation technique
- Uncertainty
- Min-max regret model

Article Info:

Research Article
Received: 26.05.2020
Accepted: 30.10.2020

DOI:

10.17341/gazimmfd.742773

Correspondence:

Author: Ercan Şenyiğit
e-mail:
senyigit@erciyes.edu.tr
phone: +90 352 207 6666 /
32455

Graphical/Tabular Abstract

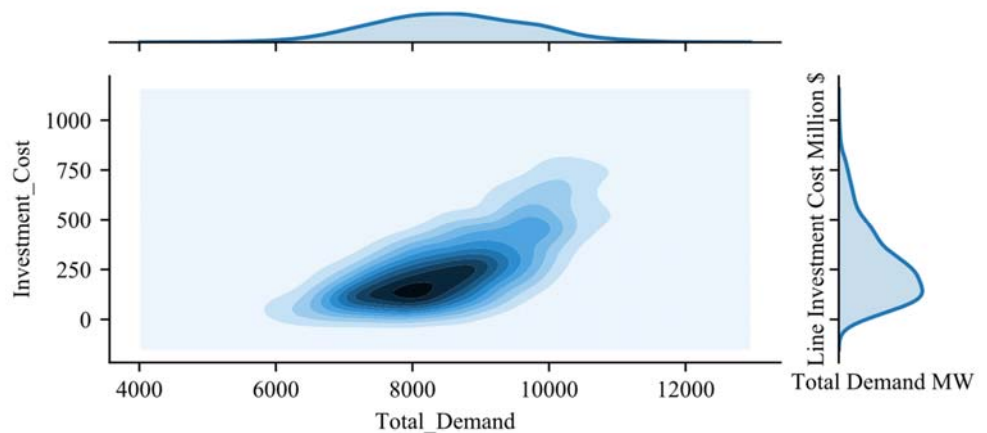


Figure A. Effect of total demand uncertainty level on solution

Purpose: The purpose of this research is to find optimum solutions for transmission expansion planning under uncertainty.

Theory and Methods:

Direct current (DC) model is used for the solution of the problem by taking the electrical transmission over long distances over DC lines and the less complex structure of the model. DC model transmission expansion planning problems under uncertainty were solved with the LINGO 18.0 program for originally created 2-level min-max value and min-max regret objective function values. The effects of uncertainty on demand have been analyzed using the Monte Carlo simulation technique by PYTHON 3.7 program.

Results:

It is observed that the proposed method finds the best solutions for IEEE-24 test problems under deterministic conditions. This research is a unique study that allows cost comparison and determines which lines addition will make system more robust under different uncertainties. In addition, it is obtained a robust global optimum solution for all possible scenarios with the least regret for IEEE-24 test problems.

Conclusion:

In this study, transmission expansion planning problem has been developed where demand and generation are uncertain considering current electricity transmission characteristics. The nonlinear mathematical model in the deterministic state has been transformed into linear form with linear transformation formulas. The effects of uncertainty on demand have been analyzed using the Monte Carlo simulation technique. The problem is modeled for min-max value and min-max regret objective function values taking uncertainty issues. In case of uncertainty, a solution method with linear modeling was developed by using binary decision variables of the mathematical model which was converted to linearity. The solutions and results are presented in the study show that the proposed 2-level robust method quickly produces the optimum solution under uncertainty.



Belirsizlik altında iletim genişleme planlama problemi için yeni iki seviyeli sağlam modeller

Ercan Şenyiğit¹ , Selçuk Mutlu^{2*} 

¹Erciyes Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, 38280 Talas Kayseri, Türkiye

²Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Endüstri Mühendisliği Bölümü, 38280 Talas Kayseri, Türkiye

Ö N E Ç İ K A N L A R

- Belirsizlik için Monte Carlo simülasyon tekniği
- Farklı belirsizlikler için senaryolar oluşturulur
- Yeni 2 seviyeli sağlam modeller ve doğrusal dönüşüm

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 26.05.2020

Kabul: 30.10.2020

DOI:

10.17341/gazimmfd.742773

Anahtar Kelimeler:

İletim genişleme planlaması problemi, belirsizlik, doğrusal dönüşüm, min-maks pişmanlık, Monte Carlo benzetimi

ÖZET

Elektrik üretimi ve tüketimi arasındaki iletimi sağlayan mevcut bir elektrik ağına eklenmesi gereken yeni iletim hatlarını belirleme sorunu olan İletim Genişleme Planlaması (İGP), elektrik sistemindeki ana stratejik kararlardan biridir. Belirsizlikler dikkate alındığında İGP probleminin çözümü, problemin doğrusal olmayan karma tamsayı niteliği nedeniyle oldukça zordur. Bu çalışmada, belirsizlik altında İGP probleminin çözümü için doğrusal dönüşüm teknikleri, sağlam (robust) optimizasyon ve benzetim modeli bir arada kullanılarak sonuçlar elde edilmiştir. Problemin doğrusal olmayan yapısı dönüşüm işlemleri kullanılarak bu çalışmada doğrusal hale getirilmiştir ve talebin sabit olduğu durumlarda literatürde en iyi çözümü bilinen IEEE-24 verileri kullanılarak test edilmiştir. Talepteki belirsizliğin sisteme etkileri Monte Carlo benzetim tekniği ile bu alanda nadir olarak kullanılan PYTHON programı ile analiz edilmiştir. Talep dışındaki diğer belirsizlik konuları için gerçek hayat durumlarına uygun senaryolar hazırlanmıştır. Senaryolar petrol fiyatları, doğalgaz fiyatları, değişen hat yatırım maliyetleri, karbondioksit salınım maliyeti ve üretim arızaları gibi diğer belirsizlik konuları için tanımlanmıştır. Belirsizlik senaryoları durumunda çözüm üretmek için bu çalışmada 2 seviyeli min-maks değer ve min-maks pişmanlık amaç fonksiyonları ile sağlam modeller oluşturulmuş ve önerilen 2 seviyeli sağlam modeller amaç fonksiyonu da dâhil tamamen doğrusal hale dönüştürülmüştür. Özgün olarak tamamen doğrusal hale dönüştürülen min-maks modelleri ve benzetim tekniği bir arada kullanılarak problem PYTHON programı kullanılarak çözülmüştür.

New two level robust models for transmission expansion planning problem under uncertainty

H I G H L I G H T S

- Monte Carlo simulation technique for uncertainty
- Scenarios are generated for different kind of uncertainties
- New 2-level robust models and linear transformation

Article Info

Research Article

Received: 26.05.2020

Accepted: 30.10.2020

DOI:

10.17341/gazimmfd.742773

Keywords:

Transmission expansion planning, linear transformation, uncertainty, min-max regret, Monte Carlo simulation technique

ABSTRACT

Transmission Expansion Planning (TEP), which is the problem of identifying new transmission lines that must be added to an existing electricity transmission network in order to effectively fulfill the system objectives, is one of the main strategic decisions in the electrical system. The solution of TEP by taking uncertainties is quite complicated due to the nonlinear mixed-integer nature of the problem. In this study, solutions are obtained by using linear transformation techniques, robust optimization and simulation model. The nonlinear structure of the problem has been made linear by using transformation processes and the effectiveness of proposed method is tested on IEEE-24 test problem in the literature. The effects of demand uncertainty are analyzed using Monte Carlo simulation technique by PYTHON program which is rarely used in TEP. Scenarios are prepared for other uncertainty issues rather than demand to create suitable conditions for real life situations. Scenarios are defined for other uncertainty issues such as oil prices, natural gas prices, changing line investment costs, carbon dioxide emission costs and production failures. To create a solution under uncertainty, two level min-max value and min-max regret robust models are originally created to this study and 2-level proposed robust models have been originally converted to linear including objective functions. The problem is solved using the PYTHON program with different scenarios using unique developed linear min-max models and simulation models.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

İlk elektrik enerjisi sisteminin 1882 yılında, New York şehrinde Thomas Edison tarafından kurulmasından bu yana güç sistemleri inanılmaz gelişim göstermiştir. Edison tarafından kurulan sistem başlangıçta 59 müşteriden oluşmaktaydı [1]. Günümüzde ise elektrik 4 temel operasyonun gerçekleşmesi ile kullanılabilir hale gelmektedir. Bu operasyonlar elektrik üretimi, elektrik iletimi, elektrik dağıtım ve elektrik tüketimidir [2]. Üretim, iletim, dağıtım ve en sonunda tüketim işlemi yapılarak kullanılan elektrik enerjisi sisteminde birçok belirsizlikler mevcuttur [3]. Üretim alanında belirsizlikler özellikle rüzgâr santralleri ve güneş enerjisi santralleri gibi yenilenebilir enerji üretim tesislerinin dâhil edilmesi ile son derece karmaşık bir hal kazanmıştır [4]. Ayrıca küresel iklim değişikliği, hammadde (petrol, doğalgaz, kömür vs.) fiyatları, yağış miktarı ve dağıtım üretim gibi konularda üretim alanındaki belirsizliği artırmaktadır [5]. Tüketim kısmı ise gayrisafi yurtiçi hâsıla, nüfus büyümesi ve şehirleşme oranı gibi tüketici tercihlerini değiştirerek talebi etkileyen faktörlere bağlı olarak belirsizlik içermektedir [6]. İletim ve dağıtım alandaki belirsizlikler kaçak, kayıp ve arıza olarak özetlenebilir [3].

Üretim ve tüketimin arasındaki işlemi sağladığı için elektrik iletiminin sürekliliği ve güvenilirliği son derece önemlidir. Elektrik sistemin sürekliliği ve güvenilirliği için, gelecekteki elektrik üretim projeksiyonu ve tüketim tahmini dikkate alınarak uzun vadeli iletim genişleme stratejileri oluşturulmalıdır. İletim genişleme planları genel olarak 5 yıl ya da 10 yıllık süreler için hazırlanır ve şartlar değiştiğinde revize edilir [7]. Elektrik iletim hatlarında yapılan yatırım kararları için belirsizlikler kapsamlı ve özenli bir şekilde belirlenmeli, uzun vadeli sistem oyuncularının görüşü alınmalı ve sorun büyük ölçekli bir optimizasyon problemi olarak değerlendirilmelidir. İletim genişleme planlaması (İGP) problemi genel olarak ne zaman, nerede ve kaç adet yeni iletim hattının yapılacağına karar vermektedir. Bu karar verilirken amacımız teknik, ekonomik ve politik kısıtları dikkate alarak toplam arz ve toplam talep arasındaki dengeyi kurmaktır [3].

İGP problemi planlama zamanı, belirsizlik düzeyi, elektrik akım modeli ve amaç fonksiyonu yapısına göre sınıflandırılabilir [8]. Planlama zamanına göre problem tek dönemli (static) ya da çok dönemli (dynamic) olarak sınıflandırılabilir. Tek dönemli planlamada sistem tek bir zaman dilimine göre planlanmaktadır [9]. Çok dönemli planlamada ise çoklu dönem için örneğin 10 yıl vadede her yılsonunda bir sonraki dönem için ayrı planlama yapıldığı için durum daha karmaşık hal kazanmaktadır [10]. Belirsizlik düzeyine göre sınıflandırma sabit (deterministic) durumlar ya da belirsiz (stochastic) durumlar olarak sınıflandırılabilir. Sabit durumlarda modelin talep, üretim miktarı ve ham madde fiyatları gibi parametreleri sabit kabul edilerek sistem basit hali ile çözülmektedir [11]. Belirsiz durumlarda ise model talebin, yenilenebilir enerji

kaynaklarındaki üretim miktarının ya da çevresel olayları belirsiz olarak kabul edilerek oluşturulmaktadır ve diğer sabit durum modeline göre oluşturulması ve çözümü daha zordur [12]. Belirsiz ortamlarda tek en iyi çözüm bulmanın mümkün olmadığı [13] dikkate alındığında, maliyet veya güvenilirliği ön plana çıkarılma durumuna göre çözüm değişikliği göstermektedir. Elektrik iletim modellerinde, en kötü koşulları dikkate alarak planlama yapmak yaygın bir davranıştır [14] fakat en kötü durumu hesap etmek son derece zordur. Çok tutucu bir şekilde en kötü durum genelde olduğundan daha kötü ele alınırsa, çok yüksek ekonomik maliyetli planlar yapmamıza neden olur. En kötü durumun olduğundan daha iyi hesaplanması ise elektrik tıkanıklıklarına ve elektrik kesintilerine neden olur. Belirsizliği dikkate alan İGP problemlerinde genel olarak stokastik programlama [15, 16] ve sağlam (robust) optimizasyon (RO) yöntemi [17, 18] ön plana çıkmaktadır. Sağlam optimizasyon yöntemindeki temel fikir belirsizliklerin belirli bir aralıkta olduğu durumlarda en sağlam çözümü bulmaktır. RO modelleri ilk avantajı, çok sayıda belirsizlik senaryosuna ihtiyaç duymadan çözüm elde etmek için kolay uygulanan bir yöntemdir [19]. RO modellerinin diğer avantajı ise yüksek miktarda senaryoya ihtiyaç duymadığı için stokastik modellere göre daha uygun boyuttadır [20]. İGP problemde belirsizlik ile yüzleşmek için, modelde yer alacak belirsiz parametrelerinin dikkatli bir şekilde tanımlanması gerekir [21]. Elektrik akım modeline göre sistem doğrusal akım (DC) modeli [22] ve alternatif akım (AC) modeli [1] olarak 2 çeşittir. AC modeli, DC modelden daha karmaşık yapıdadır ve reaktif güç hesaplamaları modele dâhil edilmiştir. Hem AC model hem DC model İGP problemi doğrusal olmayan karma tam sayılı bir problem türüdür. Problemin doğrusal olmayan yapısı özellikle büyük boyuttaki problem türleri için çözüme ulaşmayı çok zorlaştırmaktadır. Amaç fonksiyonu yapısına göre problem tek-amaçlı ya da çok amaçlı olarak sınıflandırılabilir. Tek-amaçlı modelleme sadece tek amaç için model optimize edilirken [23], çok amaçlı modelleme [2] de ise problem bazen birbiri ile çekişme içinde olan çok amaç ile modellenmektedir.

İGP problemi için kullanılan çözüm yöntemleri matematiksel optimizasyon modeli ve meta-sezgisel yöntemler olarak sınıflandırılabilir. Doğrusal programlama, doğrusal olmayan programlama, karma doğrusal programlama, Bender ayrışma algoritması [24], dal-sınır algoritması [25], oyun teorisi [26], dinamik programlama [27] bu alanda kullanılabilecek matematiksel modelleme yöntemlerindedir. Meta-Sezgisel yöntemlerden ise karınca kolonisi [28], parçacık sürüsü optimizasyonu [29], yapay sinir ağları [30], genetik algoritma [31], tavlama benzetimi [32], yasak arama [33] ve harmoni araması [34] problemin çözümü için kullanılan yöntemler arasındadır. Bu çözüm yöntemlerinden meta-sezgisel yöntemler özellikle büyük boyuttaki problemlerin çözümü için etkin ve hızlı yakınsama yapabilir fakat meta-sezgisel yöntemlerde en uygun çözüm garanti edilmez. Büyük boyuttaki problemleri matematiksel olarak modellemek ve çözmek çok zor olmasına rağmen çok

dikkatle ve özenle geliştirilecek doğrusal bir model en iyi çözümü garanti edecektir [12].

Bu çalışmada, elektrik enerjisi sistemlerindeki belirsizlikler kapsamlı şekilde ele alınarak iletim genişleme planı problemi incelenmiştir. Literatürde bulunan belirsizlik içeren sağlam modelleme çalışmaları üretim ve talep belirsizliği [35-40] konularında kısıtlı kalırken, bu çalışmada ise üretim ve talep belirsizliklerine ek olarak petrol fiyatları değişimi, kömür fiyatları artışı, doğalgaz fiyat değişimleri, radyoaktif belirsizlikler ve karbondioksit emisyon maliyetindeki değişim gibi birçok belirsizlik ele alınmıştır. Elektrik iletim genişleme planı problemi alanındaki belirsizliklerin çözümü için bu çalışma içerisinde önerilen yöntemde doğrusal dönüşüm işlemleri, sağlam modelleme ve benzetim tekniği bir arada kullanılmıştır. Bu çalışmanın literatürdeki diğer araştırmalardan farklılıkları şu şekilde özetlenebilir:

- Literatürde İGP alanında kullanılan sağlam modelleme çalışmalarında talep miktarı ve üretim miktarına ilişkin belirsizlikler ele alınmıştır [35-40]. Bu çalışmada ise talep ve üretim belirsizliğine ek olarak petrol fiyatlarındaki değişim, kömür fiyatlarındaki artış, doğalgaz fiyatlarındaki değişim, nükleer üretimden kaynaklı radyoaktif riskler ve karbondioksit salınım maliyetindeki değişim gibi konulara ilişkin belirsizlikler senaryolar ile kapsamlı şekilde ele alınmıştır.
- Amaç fonksiyonuna yeşil enerji konusu dikkate alınarak karbondioksit salınım maliyeti ve radyoaktif riskler dikkate alınarak nükleer üretim maliyeti eklenmiştir. Bu eklenen maliyet unsurları ile temiz enerjisi üretim istasyonlarına destek sağlanmaktadır.
- Araştırmalarda İGP problemi çözümü için doğrusal dönüşüm içeren [12] ve sabit durumlar için problemin doğrusal olmayan kısıtlar kısmı doğrusal hale dönüştüren çalışmalar mevcuttur [36]. Belirsizlik ele alan sağlam modelleme çalışmalarında hem amaç fonksiyonu hem de kısıtlar kısmı doğrusal halde değildir. Literatürde var olan çalışmalarda kısıtlar kısmını doğrusal hale dönüştüren çalışmalar olmasına rağmen [41] özellikle doğrusal olmayan amaç fonksiyonu yapısı için dönüşüm işlemleri uygulanmamıştır. Bu çalışmada ise önerilen doğrusal dönüşüm işlemleri ile problem hem amaç fonksiyonu hem de kısıtlar için tamamen doğrusal hale getirilmiştir.
- Literatürde sıklıkla kullanılan 3 seviyeli min-maks-min modellerinden [35,37-39,41-42] farklı olarak bu çalışmada talep belirsizliği sağlam modelin dışında benzetim modeli ile kontrol edilerek 2 seviyeli min-maks modeli önerilmektedir.
- Talep belirsizliği Monte Carlo benzetim modeli [43] ile kontrol edilirken amaç fonksiyonu değerine etki edecek belirsizlikler senaryolar ile tanımlanarak üretim, karşılanmayan elektrik miktarı gibi diğer operasyonel belirsizlikler için sağlam model ile karar verilmektedir.
- Literatürde kullanılan Bender ayrıştırma [39-42] gibi çözüm yöntemlerinden farklı olarak doğrusal olmayan modeller doğrusal dönüşüm işlemleri ile tamamen doğrusal hale getirilmiş sağlam model bu alanda nadir

olarak kullanılan PYTHON programı [44] kullanılarak çözümler elde edilmiştir.

Problemin çözümü için İGP literatüründe temel teşkil eden sıklıkla kullanılan IEEE-24 test verisi [35-40] kullanılmıştır. Bu çalışmanın elektrik piyasasındaki birçok belirsizlikleri ele alan İGP alanındaki özgün modelleme çalışması olması hedeflenmektedir. Bu çalışmanın İGP problemine ve bu alandaki çalışmalara katkısı şu şekilde özetlenebilir:

- IEEE-24 test problemi için talepteki değişiklik, petrol fiyatları, çevre sorunları, yağış miktarları ve üretim arızaları gibi senaryolar ile belirsizlikler tanımlanmıştır.
- 2 seviyeli min-maks değer ve min-maks pişmanlık sağlam optimizasyon modelleri amaç fonksiyonları kısmı da dâhil olmak üzere tamamen doğrusal hale getirilmiştir.
- İGP probleminin belirsizlik altında çözümü için talepteki belirsizliğin Monte Carlo benzetim tekniği ile kontrol edildiği, talep dışındaki diğer belirsizliklerin senaryolar ile ele alındığı ve üretim miktarı gibi diğer karar değişkenlerinin doğrusal model ile belirlendiği özgün bir çözüm yöntem geliştirilmiştir.

Bu çalışmanın arkasındaki motivasyonumuz, İGP probleminde yüksek belirsizlik durumunda karar vericilere hangi hatların eklenmesinin sistemi daha sağlam hale getireceği konusunda destek sağlamak ve belirsizlik ortamında doğru kararları vermelerine destek sağlamaktır. Çalışmamızın bir sonraki bölüm olan Bölüm 2'de İGP probleminin çözümünde bu çalışmada kullanılan yöntemler ve teknikler ile bunların uygulanış biçimleri açıklanmıştır. Bölüm 3'te test verileri kullanılarak elde edilen çözümler paylaşılmış ve geliştirilen yöntemin etkinliği yine bu kısımda test edilmiştir. Son bölüm olan Bölüm 4'te ise bu çalışma sonrası elde edilen bulgular, yapılan çalışmanın bu alana katkısı ve gelecekte bu alanda yapılabilecek çalışmalar anlatılmıştır.

2. MATEMATİKSEL MODELLER (MATHEMATICAL MODELS)

Bu bölümde öncelikle aşağıda sıralandığı şekilde matematiksel modele ilişkin notasyonlara yer verilmiştir:

- c_{ij} : i- j arasına yapılacak hattın maliyeti
- c_{ij}^k : her senaryosu için i- j arasına yapılacak hattın maliyeti
- s_{ij} : i- j hattının süseptansı
- n_{ij} : i- j arasına ilave edilecek hat sayısı
- n_{ij}^0 : i- j arasında var olan hat sayısı
- f_{ij} : i- j arası yük akışı
- f_{ij}^k : k senaryosunda i- j arası yük akışı
- f_{ij}^{max} : i- j hattının kapasitesi
- S : İnsidans matrisi
- S^k : k senaryosunda insidans matrisi
- f : j istasyonu için f_{ij} ve θ_j içeren vektör
- g : her istasyonundaki üretimi içeren üretim vektörü
- g^k : k senaryosunda her istasyonundaki üretimi içeren üretim vektörü

d : her istasyonundaki talebi içeren talep vektörü
 g^{max} : maksimum üretim kapasitesi
 n_{ij}^{max} : maksimum hat kapasitesi
 γ : Bütün olası hatlar kümesi
 U : Olası senaryolar
 α : Ceza maliyeti
 r : her istasyon için karşılanamayan talep miktarı
 r^k : k senaryosunda her istasyon için karşılanamayan talep miktarı
 θ : İstasyondaki voltaj açısı
 θ^k : k senaryosunda istasyondaki voltaj açısı
 m^k : k senaryosunda istasyonlardaki üretim maliyeti
 CO_2^k : CO_2 emisyon oranı
 p^k : CO_2 emisyon ceza maliyeti
 nuc^k : nükleer üretime ilişkin maliyet
 Val_k^* : k senaryosunun optimum çözümü

Elektrik iletiminin uzun mesafelerde DC hatları üzerinden yapıldığı ve DC modelin AC modeline göre daha az karmaşık yapıda olduğu dikkate alınarak problemin çözümü için DC model kullanılmıştır. İGP probleminin genel matematiksel modeli şu şekildedir [45]:

$$Min \sum_{(i,j) \in \gamma} c_{ij} n_{ij} + \sum_i \alpha_i r_i \quad (1)$$

s.t

$$S f + g + r = d \quad (2)$$

$$f_{ij} - s_{ij} (n_{ij}^0 + n_{ij}) (\theta_i - \theta_j) = 0 \quad (3)$$

$$|f_{ij}| \leq (n_{ij}^0 + n_{ij}) f_{ij}^{max} \quad (4)$$

$$0 \leq g \leq g^{max} \quad (5)$$

$$0 \leq n_{ij} \leq n_{ij}^{max} \quad (6)$$

$$n_{ij} \text{ Tamsayı; } \theta_j \text{ sınırsız} \quad (7)$$

$$(i, j) \in \gamma \quad (8)$$

Bu model, karma tam sayılı doğrusal olmayan bir modeldir. Bu modelde talep sabit ve deterministik olarak kabul edilmiştir. Eş. 1 numaralı denklem, amaç fonksiyonunu ifade etmektedir. Bu denklemin ilk kısmı, hat yatırım kararlarına ilişkin yatırım maliyetlerini temsil ederken, ikinci kısım karşılanmayan elektrik için ceza maliyetini temsil etmektedir. Eş. 2 yükün korunmasına ilişkin Kirchhoff'un akım kuralı ile ilgili bir kısıttır. Eş. 3 ise Ohm doğrusal akım kanunları ile ilgili bir kısıttır. Eş. 4, Eş. 5 ve Eş. 6 sırasıyla akış için kapasite kısıdı, üretim için kapasite kısıdı ve hat sayısı için kapasite kısıdıdır.

Eş. 3 Ohm akım kanunları kısıdı nedeniyle modelimiz doğrusal değildir. Eş. 3'te n_{ij} ve θ değişkenleri birbirleriyle çarpma halindedir, bu çarpım modeli doğrusal olmayan duruma getirmektedir. Model, Şenyiğit vd. çalışmasında [12]

anlatılan dönüşümler kullanılarak doğrusal hale getirilmiştir. Modelin doğrusal hale dönüştürülmüş son hali şu şekildedir:

$$Min \sum_{(i,j) \in \gamma} c_{ij} n_{ij} + \sum_i \alpha_i r_i \quad (9)$$

s.t

$$S f + g + r = d \quad (10)$$

$$f_{ij}^0 - s_{ij} * n_{ij}^0 (\theta_i - \theta_j) = 0 \quad (11)$$

$$- M * (1 - n_{ijk}) \leq f_{ijk} - s_{ij} * (\theta_i - \theta_j) \leq M * (1 - n_{ijk}) \quad (12)$$

$$- n_{ij}^0 * f_{ij}^{max} \leq f_{ij}^0 \leq n_{ij}^0 * f_{ij}^{max} \quad (13)$$

$$- n_{ijk} * f_{ij}^{max} \leq f_{ijk} \leq n_{ijk} * f_{ij}^{max} \quad (14)$$

$$f_{ij} = f_{ij}^0 + \sum_{k=1}^n f_{ijk} \quad (15)$$

$$0 \leq g \leq g^{max} \quad (16)$$

$$\sum_{k=1}^n n_{ijk} \leq n_{ij}^{max} \quad (17)$$

$$n_{ij2} \leq n_{ij1} \quad n_{ij3} \leq n_{ij2} \quad (18)$$

$$n_{ijn} \leq n_{ijn-1} \quad n_{ijk} \in (0,1); \theta_j \text{ sınırsız} \quad (19)$$

$$n = n_{ij}^{max} \quad (20)$$

$$k \in (0, 1, 2 \dots n_{ij}^{max}) \quad (21)$$

$$(i, j) \in \gamma \quad (22)$$

İlk olarak Eş. 3 mevcut hatlar ve aday hatlar için ayrı olarak ele alınmıştır. Mevcut hatlar için olan kısım Eş. 11 ile ifade edilmiştir. Eş. 12'de M çok büyük bir sayıdır. İkili karar değişkenimiz n_{ijn} 1 olduğu zaman eşitsizliğin iki tarafı 0 olur ve kısıt aktif hale gelmektedir. n_{ijn} 0 olduğunda ise M sayısı sayesinde kısıt bol durumdadır ve etkin değildir. Eş. 13 mevcut hatlar için Eş. 4'e benzer şekildedir. Eş. 14 ile ifade edilen denklemlerde ikili karar değişkenimiz n_{ijn} 1 olduğu zaman hat üzerinden yük akışı, hat kapasitesi ile sınırlı olmak üzere aktif haldedir. n_{ijn} 0 olduğunda ise eşitsizliğin iki tarafı da 0 olduğu için yük akışına izin verilmemektedir. Eş. 15 ile orijinal modele benzer olarak tüm olası eklemeler üzerinden f_{ij} tanımlanmıştır. Eş. 17 eklenecek hat sayısının n_{ij}^{max} ile sınırlı olduğunu temsil etmektedir. Eş. 18 ile ifade edilen eşitsizliklerde ise ikili karar değişkenlerinin sırası ile eklenmesi garanti altına alınmaktadır. Bu denklemler ile ilk hattı eklemeyen ikinci hattı eklemeye izin verilmemektedir. Son olarak ise, n_{ijk} 0 ve 1 ikili değişken olarak tanımlanmıştır. θ ise sınırsız değişken olarak tanımlanmıştır. Model bu hali ile ikili değişkenler n_{ijk} ve sınırsız değişkenler θ içeren doğrusal bir modeldir.

2.1. Sağlam Model (Robust Model)

Bu bölümde belirsizlik alanında kullanılan sağlam modelleme ile problem modellenmiştir. İGP probleminde sağlam modelleme alanında literatürde kullanılan temel yöntem, problemi 3 seviyeli min-maks-min olarak modellemektedir [35,37-39,41-42]. Literatürde nadir olarak 5 seviyeli sağlam model [46] ve 2 seviyeli sağlam model [36] kullanılmıştır. Geçmiş araştırmalarda sıklıkla kullanılan, 3 seviyeli sağlam modellerde birinci seviye olan en üst seviyede iletim yatırım kararları verilirken, ikinci seviyede talep ve üretim belirsizlik seti tanımlanır. Son seviye olan üçüncü seviyede ise her istasyondaki üretim, her istasyondaki karşılanmayan talep, hatlar üzerindeki yük akışı ve voltaj açısı gibi operasyon kararları belirlenmektedir [41]. 3 seviyeli sağlam modelleme çalışmalarında belirsizlik üretim ve talep miktarı için sağlam setler üzerinden belirli bir alt ve üst limit için tanımlanmakta ve modellerin çözümü için sıklıkla Bender Ayrıştırma yöntemi kullanılmaktadır [37-40,42-43]. Literatürde kullanılan Bender Ayrıştırma yönteminde en sağdaki minimizasyon problemi, problemin dual hali kullanılarak sağdaki maks-min problemi maks problemine dönüşür ve sonra kalan min-maks problemi ise ayrıştırma (decomposition) yöntemi ile çözülmektedir [41]. Literatürde kullanılan 2 seviyeli min-maks modelinde [36] IEEE-24 problemi için 17 adet talep istasyonu ve 3 adet rüzgâr üretimi için 0'dan 20'ye kadar belirsizlik seviyesi tanımlanmıştır. 2 seviyeli min-maks modeli çalışmasında belirsizlik Yu vd. [18] ile aynı belirsizlik seviyesinde sadece 17 adet tüketim istasyonu ve 3 rüzgâr üretim istasyonu için alt limit ve üst limit seviyeleri kullanılarak dar kapsamlı olarak tanımlanmıştır. Bu çalışmada ise talepteki belirsizlik Monte Carlo benzetim tekniği [43] kullanılarak sağlam modelin dışında tanımlanmış, talep dışındaki diğer belirsizlikler için ise senaryolar ile belirsizlikleri daha kapsamlı şekilde ele alan 2 seviyeli doğrusal model geliştirilmiştir. Literatürde talep belirsizliğini 3 seviyeli modelin ikinci seviyesinde ele alan sağlam modelleme çalışmalarında farklı olarak, talebin benzetim modeli kullanılarak dışarıda bırakılması ile 2 seviyeli min-maks belirsizlik modeli geliştirilmiştir. Birinci seviye olan en küçükleme kısmında iletim yatırımı kararları, her istasyondaki üretim, yük akışı ve voltaj açısı kararları verilirken, ikinci seviyede senaryolar ile belirsizlik tanımlanmıştır. Model sağlam modelleme literatüründe amaç fonksiyonu için kullanılan min-maks maliyet ve min-maks pişmanlık değerleri ile iki farklı tipte amaç fonksiyonu kullanılarak oluşturulmuştur [42]. Min-maks maliyet amaç fonksiyonu için herhangi bir çözümün tüm senaryolardaki en yüksek değeri hesaplanır ve her çözüm için hesaplanan maksimum değerler arasından en küçüğü seçilir. Min-maks pişmanlık yönteminde ise, herhangi bir çözümün tüm senaryoların en iyi değerine olan uzaklığı (pişmanlığı) hesaplanarak en yüksek değer bulunur ve her çözüm için hesaplanan maksimum değerler arasından en küçüğü seçilir [47]. Problemin kısıtlar kısmı daha önce literatürde kullanılan doğrusal dönüşüm teknikleri kullanılarak doğrusal hale getirilmiştir [12, 36]. Min-maks amaç fonksiyonu yapısı bu çalışmaya özgün olarak geliştirilen

amaç fonksiyonu dönüşümleri ile doğrusal hale getirilmiştir. Tamamen doğrusal hale dönüştürülen 2 seviyeli özgün model ile birçok farklı tipte belirsizlikler senaryolar ile ele alınırken farklı talep belirsizlikler seviyeleri ise benzetim modeli kullanılarak değerlendirilmiştir. Benzetim modeli ve tamamen doğrusal hale getirilen 2 seviyeli min-maks sağlam model yardımıyla belirsizlikler kapsamlı olarak ele alınmıştır. Bu çalışmaya özgün olarak geliştirilen 2 seviyeli min-maks pişmanlık modeli Eş. 23- Eş.30 ile ifade edilmiştir.

$$\text{Min Maks} \left\{ \sum_{(i,j) \in \mathcal{Y}} \left\{ \begin{aligned} &\sum_{k \in U} c_{ij}^k n_{ij} + \sum_{k \in U} \alpha_i^k r_i^k + \\ &\sum_{k \in U} m_i^k g_i^k + \sum_{k \in U} p_i^k CO_i^k g_i^k + \\ &\sum_{k \in U} nuc_i^k g_i^k - Val_k^* \end{aligned} \right\} \right\} \quad (23)$$

s.t

$$S^k f^k + g^k + r^k = d \quad (24)$$

$$f_{ij}^k - s_{ij} (n_{ij}^0 + n_{ij}) (\theta_i^k - \theta_i^k) = 0 \quad (25)$$

$$|f_{ij}^k| \leq (n_{ij}^0 + n_{ij}) f_{ij}^{max} \quad (26),$$

$$0 \leq g_i^k \leq g^{max} \quad (27)$$

$$0 \leq n_{ij} \leq n_{ij}^{max} \quad (28)$$

$$n_{ij} \text{ Tamsayı; } \theta_i^k \text{ sınırsız} \quad (29)$$

$$(i, j) \in \mathcal{Y} \quad (30)$$

Eş. 23- Eş. 30 arası ifade edilen denklemlerde model doğrusal halde değildir. Modelin kısıtlar kısmı olan Eş. 24- Eş. 30 arası denklemler, bir önceki bölümde anlatılan Eş. 10 – Eş.22 arası ifadeler kullanılarak doğrusal hale getirilir [15, 39]. Bu çalışma için farklı belirsizlik senaryoları ile geliştirilen amaç fonksiyonu için ise Maks $\left\{ \sum_{(i,j) \in \mathcal{Y}} \left\{ \sum_{k \in U} c_{ij}^k n_{ij} + \sum_{k \in U} \alpha_i^k r_i^k + \sum_{k \in U} m_i^k g_i^k + \sum_{k \in U} p_i^k CO_i^k g_i^k + \sum_{k \in U} nuc_i^k g_i^k - Val_k^* \right\} \right\} = T$ alınarak problemin amaç fonksiyonu kısmı Eş.31 ve Eş. 32 ifadesi ile doğrusal hale dönüştürülür.

$$\text{Min T} \quad (31)$$

s.t.

$$\left\{ \begin{aligned} &\sum_{k \in U} c_{ij}^k n_{ij} + \sum_{k \in U} \alpha_i^k r_i^k + \sum_{k \in U} m_i^k g_i^k + \\ &\sum_{k \in U} p_i^k CO_i^k g_i^k + \sum_{k \in U} nuc_i^k g_i^k - Val_k^* \end{aligned} \right\} \leq T \quad i, j \in \mathcal{Y} \quad (32)$$

2.2. Önerilen Yöntem (Proposed Method)

2 seviyeli geliştirilen min-maks modelinin amaç fonksiyonu dâhil tamamen doğrusal hale getirilmiş olması sayesinde birçok farklı belirsizlik senaryosu için problem doğrusal olarak modellenmektedir. Problemin sağ tarafını etkileyen talepteki belirsizliğin model dışında bırakılarak benzetim

tekniki kullanılarak ele almasının sağladığı fayda ile problem Bender Ayrıştırma yöntemi gibi tekniklere ihtiyaç duymadan doğrusal çözümler yardımıyla kolaylıkla çözülebilmektedir. Monte Carlo benzetim tekniği, sağlam modelleme ve doğrusal dönüşüm tekniklerinin birlikte kullanıldığı geliştirilen yöntemle ait sözde (pseudo) kod Şekil 1'de paylaşılmıştır. Probleme ait başlangıç değerleri, ağı yapısı ve belirsizlik senaryoları tanımlandıktan sonra ilk döngü ile her aşamada talep rastgele olarak oluşturulmaktadır. Her aşamada rastgele olarak oluşturulan talep değerleri için her senaryonun en iyi değeri hesaplandıktan sonra bu çalışmaya özgü tamamen doğrusal hale getirilen 2 seviyeli pişmanlık modelleri ile problem çözülmektedir. Bir başka ifadeyle, Monte Carlo benzetim tekniği ile kontrol edilen her iterasyonda talep rastgele olarak yeniden oluşturulmakta, her senaryonun en iyi değeri hesaplanmakta ve son olarak da tüm senaryoların en iyi değerine olan maksimum uzaklığı minimum yapacak çözüm üretilmektedir. Geliştirilen özgün yöntemde talep belirsizliği Monte Carlo benzetim modeli [43] ile kontrol edilirken amaç fonksiyonu değerine etki edecek belirsizlikler senaryolar ile tanımlanmış ve üretim, karşılanmayan elektrik miktarı gibi diğer operasyonel belirsizlikler için sağlam model ile karar verilmektedir.

3.SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR (RESULTS AND DISCUSSIONS)

Bu bölümde IEEE-24 test sistemi [48] verisi kullanılarak sonuçlar ve bulgular paylaşılmıştır. Bu bölüm 3 ana kısımda incelenmiştir. Birinci kısımda tamamen doğrusal hale getirilen modelin etkinliği test edilmiştir. İkinci kısımda, bu çalışmada Monte Carlo benzetim tekniği ile kontrol edilen talebin sisteme ve eklenmesi gereken hatlara etkisi araştırılmış ve sonuçlar paylaşılmıştır. Son kısımda ise daha önce Şekil 1'de sözde kodu paylaşılan ve bu çalışma için özgün olarak geliştirilen yöntem kullanılarak belirsizlikler kapsamlı şekilde incelenmiştir ve sonuçlar paylaşılmıştır.

3.1. Doğrusal Hale Dönüştürülen Modelin Test Edilmesi (Testing the Linear Transformed Model)

Bu kısımda statik durumda üretim planlama yapıldığında en iyi çözümü 152.000.000 \$ [49] olarak bilinen ve literatürde sıklıkla kullanılan IEEE-24 [50] test sistemi verisi kullanılarak doğrusal hale dönüştürülen modelin etkinliği test edilmiştir. IEEE-24 problemi [48], 8.550 MW yük miktarı ve 10.215 MW üretim kapasitesi olan 24 istasyonun bulunduğu bir elektrik ağı sistemidir. 34 adet hat koridorunda toplam 38 adet hat mevcuttur ve 7 adet alternatif hat vardır. IEEE-24 sistemine ait yapı Şekil 2'de paylaşılmıştır. IEEE-24 test sistemi verisi için doğrusal hale dönüştürülen model [12] LINGO 18 programı kullanılarak çözülmüştür.

Doğrusal hale dönüştürülen modelin çözümüne göre 6 ile 10 numaralı istasyon arasına 1 hat, 7 ile 8 numaralı istasyon arasına 2 hat, 10 ile 12 numaralı istasyon arasına 1 hat ve 14 ile 16 numaralı istasyon arasına 1 hat eklenmesi öngörülmüştür. Çözüm değeri literatürde statik durumda üretim planı yapıldığında en iyi amaç fonksiyonu değeri olduğu bilinen [51] çözümler ile aynı değere 152.000.000 \$ değerine sahiptir.

3.2. Talepteki Belirsizliğin Toplam Maliyete ve Hat Yatırımlarına Etkisi

(Effect of Demand Uncertainty on Line Investments and Total Cost)

Talebin sabit olduğu durumlar için doğrusal hale dönüştürülen modelin etkinliği LINGO 18 programı kullanılarak test edildikten sonra, talep belirsizlikleri için IEEE-24 test sistemi incelenmiştir. Belirsizlik altında etkin çözümler üretilmek için açık kaynak kodlu bir program olması, doğrusal model çözücü, istatistiksel araçlar ve veri madenciliği gibi birçok alana ait kütüphanesinin olması sebebiyle PYTHON 3,7 programı [46] tercih edilmiştir. Literatürde özellikle talepteki değişime bağlı olarak

Başla

Test sistemine ait başlangıç değerlerinin ve parametrelerinin tanımlanması

Senaryoların belirlenmesi

i=1

while i <= durdurma koşulu

istasyonlardaki talebin rastgele olarak belirlenmesi

j =1

while j <= senaryo sayısı

senaryo j'nin en iyi değerinin belirlenmesi

j=j+1

Her senaryonun en iyi değer dikkate alınarak 2 seviyeli pişmanlık modelinin kurulması

Her senaryonun en iyi değer dikkate alınarak 2 seviyeli pişmanlık modelinin çözülmesi

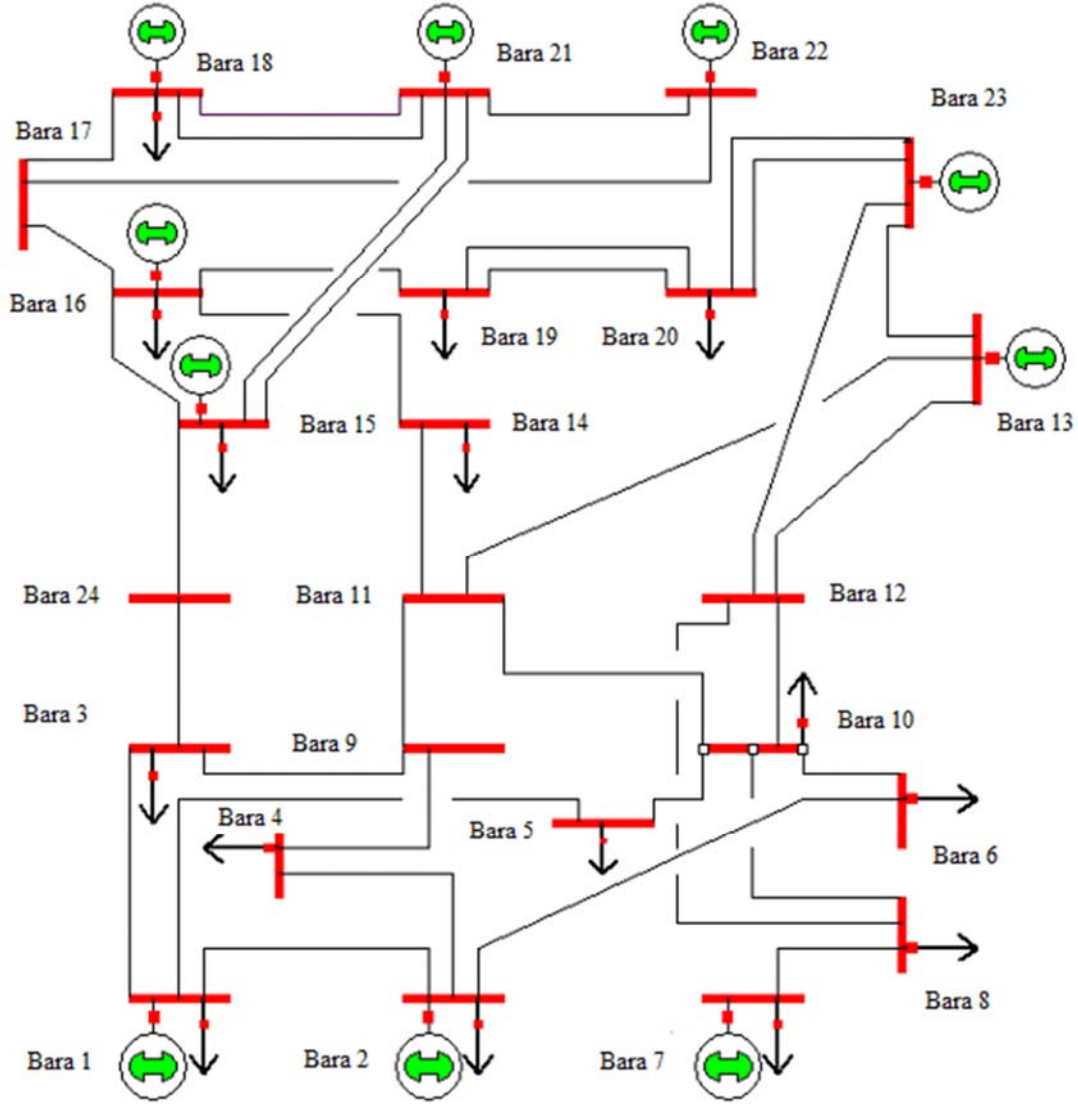
Her döngüdeki çözüme ilişkin değerlerin aktarılması

i=i+1

Sonuçlara ait görsellerin ve raporların oluşturulması

Bitir

Şekil 1. Önerilen yöntemle ait sözde kod (Pseudo code for proposed method)

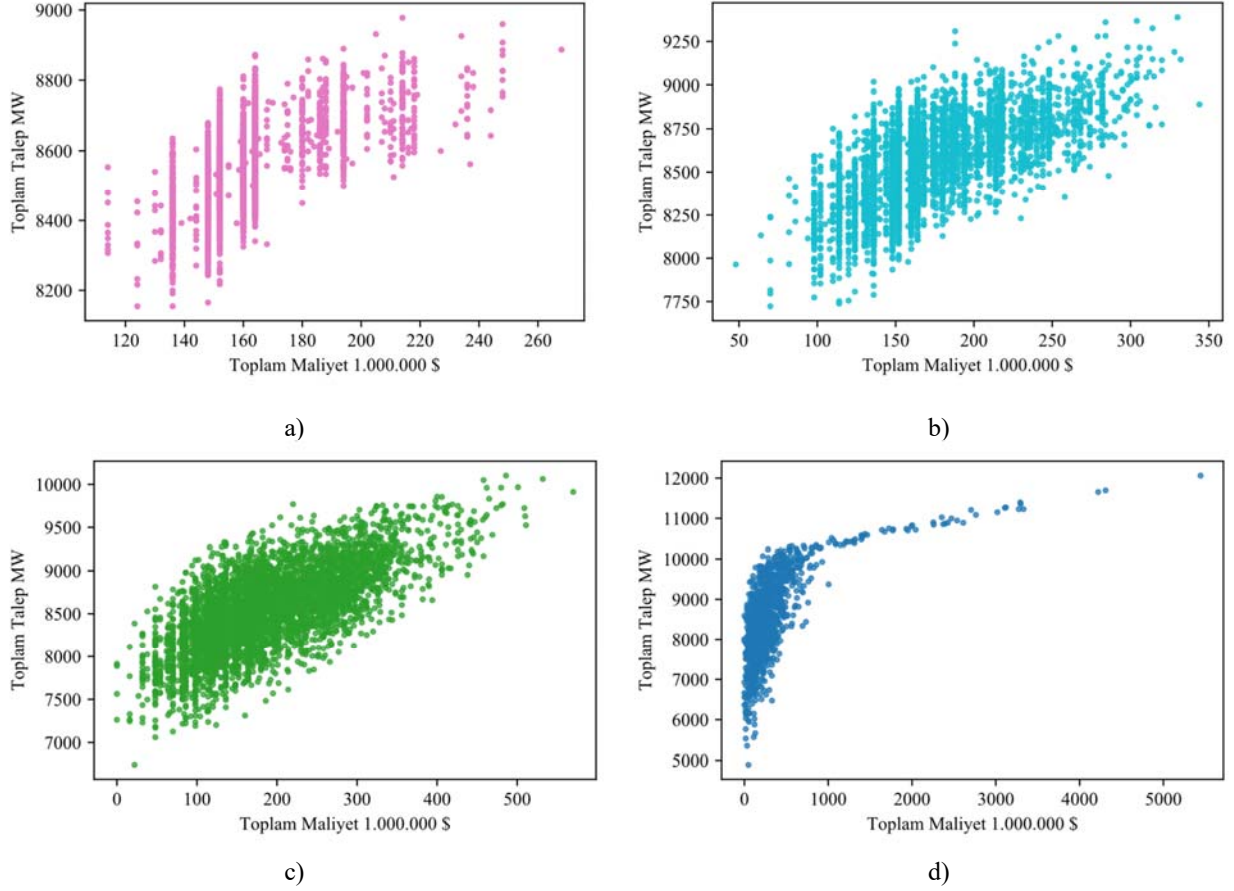


Şekil 2. IEEE-24 test sistemi (IEEE-24 test system)

belirsizliklerin [18, 38-40, 42-43, 52] incelendiği dikkate alınarak bu bölümde geçmiş araştırmalara benzer şekilde [38-41] İGP problemi için talepteki değişimin sisteme ve çözüme etkisi araştırılmıştır. Talebin sabit olduğu durumda toplam 8.550 MW talep, 10.215 MW üretim kapasitesi planlaması yapılarak hat yatırımları ile karşılanmaktadır ve karşılanmayan elektriğe bağlı ceza maliyeti oluşmamaktadır. Talebin sabit olmadığı durumlarda, özellikle toplam talebin 10.215 MW'ı geçtiği durumda karşılanmayan elektriğe bağlı olarak toplam maliyet artmaktadır. Bu çalışmada, her istasyondaki talebin normal dağıldığı varsayılmıştır. İstasyonlardaki talebin beklenen değer için test verisi sabit değerleri kullanırken, standart sapma için ise literatüre benzer şekilde ortalamanın %5'i [10, 17-18, 40, 42], ortalamanın %10'u [43], ortalamanın %20'si [35, 38, 43] ve ortalamanın %50'si olduğu 4 farklı belirsizlik seviyesi dikkate alınmıştır. Doğrusal hale dönüştürülen yöntemin avantajları ile 4 farklı belirsizlik seviyesi için PYTHON 3,7 kullanılarak 5.000 tekrar ile model çözülmüştür [7]. Test sistemine ait başlangıç parametreleri sisteme tanımlandıktan

sonra, her tekrarda istasyonlardaki talep yeniden rastgele olarak oluşturulmuştur ve talepteki değişim sistem üzerindeki etkileri doğrusal hale dönüştürülen model ile PYTHON 3,7 kullanılarak incelenmiştir.

Standart sapmanın beklenen değerinin %5 olduğu en düşük belirsizlik seviyesinde toplam maliyet ve talebe ilişkin veriler Şekil 3a'da, standart sapmanın beklenen değerinin %10 olduğu durumda toplam maliyet ve toplam talebe ilişkin veriler Şekil 3b'de, standart sapmanın beklenen değerinin %20 olduğu durumda toplam maliyet ve toplam talebe ilişkin veriler Şekil 3c'de ve standart sapmanın beklenen değerinin %50 olduğu en yüksek belirsizlik düzeyinde toplam maliyet ile toplam talebe ilişkin veriler Şekil 3d'de paylaşılmıştır. Şekil 3a'da ve kısmen Şekil 3b'de toplam maliyetin toplam talep eksenine paralel şekilde artan talep ile birlikte dar bir bantta artışı gözlemlenirken, Şekil 3c'de ise toplam maliyetin toplam talebe bağlı olarak çok geniş bir aralıkta doğrusal olarak artış yaptığı gözlemlenmiştir. Talepteki değişim muazzam etkisi standart sapmanın beklenen değerinin



Şekil 3. a) Standart sapmanın %5 olduğu durum için toplam talep – maliyet saçılım grafiği b. Standart sapmanın %10 olduğu durum için talep – maliyet saçılım grafiği c) Standart sapmanın %20 olduğu durum için talep – maliyet saçılım grafiği d) Standart sapmanın %50 olduğu durum için talep – maliyet saçılım grafiği
(a) Total demand – cost scatter plot for standard deviation %5 b) Total demand – cost scatter plot for standard deviation %10 c) Total demand – cost scatter plot for standard deviation %20 d) Total demand – cost scatter plot for standard deviation %50

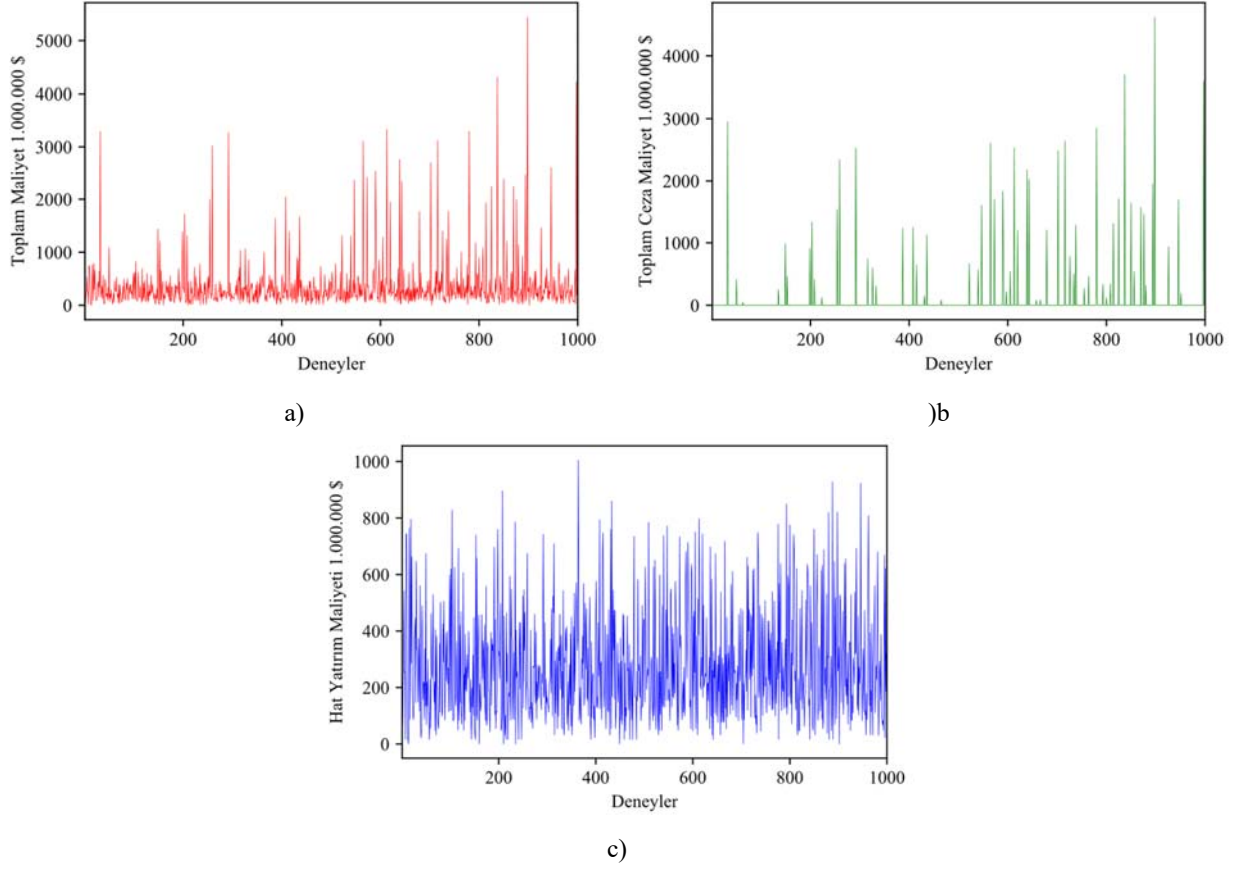
%50 olduğu en yüksek belirsizlik düzeyinde gözlemlenmiştir. Toplam maliyet ile toplam talebe ilişkin veriler Şekil 3d’de paylaşılmıştır. Şekil 3d incelendiğinde toplam maliyetin toplam talebe bağlı olarak 10.215 MW kadar doğrusal olarak arttığı görülmüştür. Toplam talebin 10.215 MW geçtiği durumda ise toplam üretim kapasitesi aşıldığı için karşılanmayan elektrik ceza maliyetine bağlı olarak çok daha yüksek bir oranda maliyet artışı olduğu görülmüştür. Standart sapmanın beklenen değer %50 olduğu en yüksek belirsizlik düzeyinde karşılanamayan elektriğe bağlı ceza maliyetinin toplam maliyet üzerinde etkisi araştırmak için model yeniden çalıştırılmıştır.

Şekil 4a’da toplam maliyete ilişkin değerlerde, karşılanamayan elektriğe bağlı maliyet sıçramaları olduğu gözlemlenmiştir. Tekrarlı deneylere ilişkin sadece karşılanmayan elektriğe bağlı ceza maliyeti Şekil 4b’de gösterilmiştir. Şekil 4b incelendiğinde ceza maliyetinin sisteme etkisi görülmektedir.

Karşılanmayan elektriğin sosyal ve ekonomik etkileri dikkate alınarak yüksek miktarda ceza maliyeti belirlendiği için ceza maliyeti toplam maliyete etki ettiği görülmüştür.

Şekil 4c’de ise bu tekrarlı deneylere ilişkin ceza maliyetinden arındırılmış toplam hat yatırım maliyeti paylaşılmıştır. Sadece hat yatırım maliyetini içeren Şekil 4c’de toplam maliyetin 10 milyon dolar ile 1 milyar dolar arasında çok yüksek bir aralıkta olduğu görülmüştür. Talepteki yüksek belirsizliğin iletim hattı yatırımlarına 50 kata kadar etki yaptığı görülmüştür. Talepteki değişimin çözüm üzerine etkisi araştırıldıktan sonra eklenmesi gereken hatlar için bu belirsizlik düzeyleri kullanılarak inceleme yapılmıştır. Talep belirsizliği durumunda eklenmesi gereken hatlara karar verebilmek için rastlantısal gelecekte talebin sisteme etkilerini incelemek, rastgele üretilen talep değerleri için çok tekrarlı deneyler içeren Monte Carlo benzetim tekniği [43] içeren bir yöntem kullanılmıştır. Bu bölümde kullanılan yöntemle ilişkin akış grafiği Şekil 5’te paylaşılmıştır. Şekil 5’te akış şemasında gösterilen yöntem talebin en yüksek belirsizlik seviyesi olan standart sapmanın ortalamasının %50’si olduğu durumda 5.000 olası farklı talep değerleri ile elektrik sistemi için kullanılmıştır.

IEEE-24 test sistemine ait başlangıç parametreleri ve sistem şekli sisteme tanımlandıktan sonra, her seferinde rastgele olarak oluşan farklı talep değerlerine sahip 5.000 tekrar için



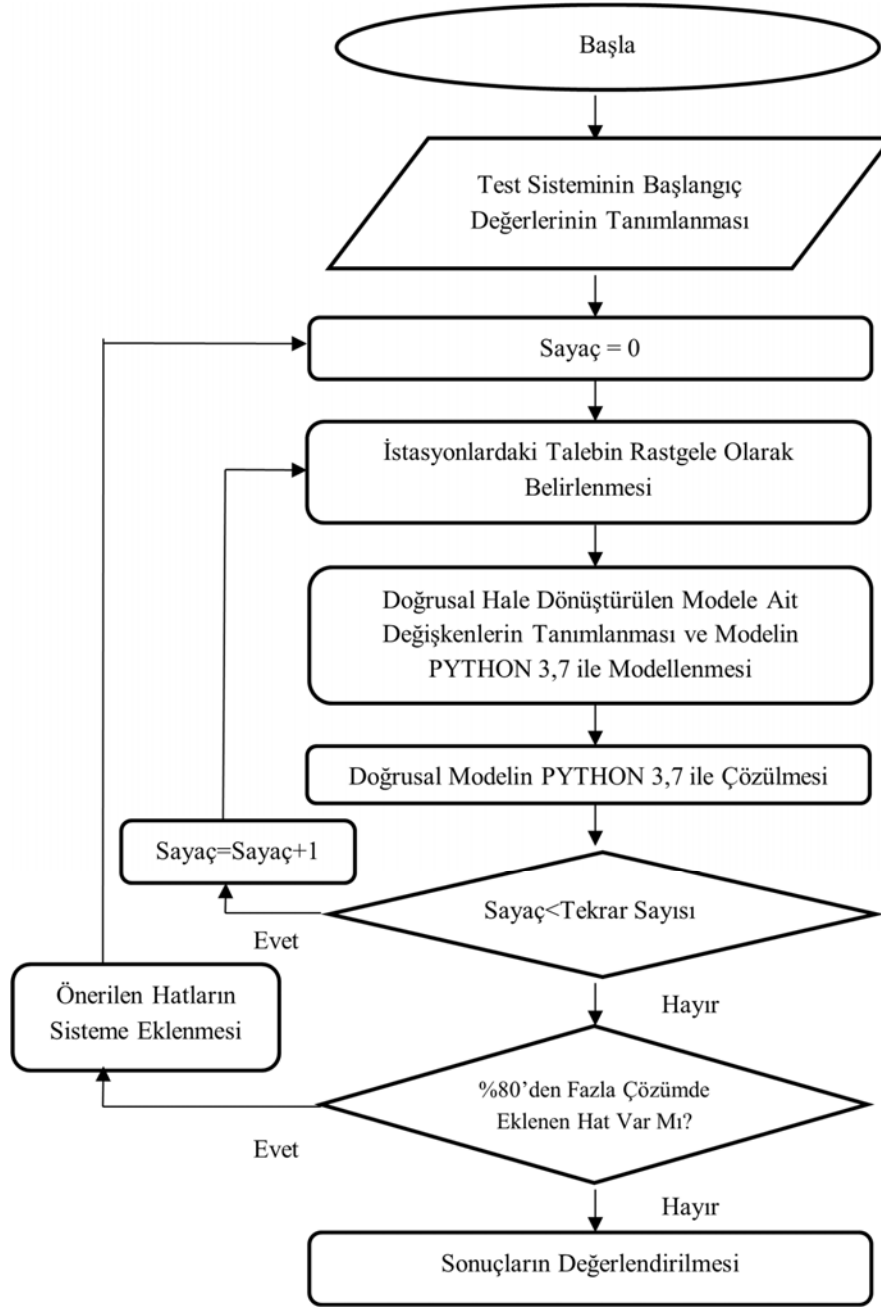
Şekil 4. a) Standart sapmanın %50 olduğu durum için toplam maliyet grafiği b) Standart sapmanın %50 olduğu durum için toplam ceza maliyeti grafiği c) Standart sapmanın %50 olduğu durum için toplam hat yatırım maliyeti grafiği
(a) Total cost plot for standard deviation %50 b) Total load shed penalty cost plot for standard deviation %50 c) Total line investment cost plot for standard deviation %50

ilk döngü başlatılmaktadır. 5.000 tekrar sonrası %80 ve üzeri durumda eklenmesi gereken hatlar şu şekildedir: 4.906 çözümde 7 ile 8 numaralı istasyon arasına 1 hat, 4.459 çözümde 6 ile 10 numaralı istasyon arasına 1 hat ve 4.072 çözümde 7 ile 8 numaralı istasyon arasına 2 hat yapılması öngörülmektedir. Bu hatların eklenmesi için gereken yatırım maliyeti 48.000.000 \$ olarak hesaplanmıştır. Birinci aşamada belirlenen hat çözümleri sisteme eklenerek sayaç değeri sıfırlanmış ve eklenen hatlar sonrası model yeniden 5.000 tekrar ile çalıştırılmıştır. İkinci döngüdeki 5.000 tekrar için, 4.637 çözümde 10 ile 12 numaralı istasyonlar arasına 1 hat eklenmesi planlanmıştır. Bu yatırım için gerekli maliyet 50.000.000\$ olarak belirlenmiştir. İkinci döngü sonrası öngörülen hat modele eklenmiş ve 5.000 tekrar ile model 3. kez yeniden çalıştırıldığında ise %80 üzerinde durumda eklenmesi gereken herhangi bir hat bulunamamıştır ve yöntem sonuçlandırılmıştır. Sonuçlar sayesinde yüksek belirsizlik ortamında 6 ile 10 numaralı istasyon arasına 1 hat, 7 ile 8 numaralı istasyon arasına 2 hat ve 10 ile 12 numaralı istasyon arasına 1 hat eklemenin toplam 98.000.000 \$ hat yatırım maliyeti değeri ile sistemi en dayanıklı ve en sağlam yapıya dönüştürdüğü görülmüştür. Bu çalışma, yüksek talep belirsizliği durumunda karar vericilere hangi hatların eklenmesinin sistemi daha sağlam hale getireceği konusunda destek sağlamaktadır.

3.3. Senaryolar ile Oluşturulan Belirsizliklerin Sisteme Etkisi (Effect of Scenario Uncertainties on the System)

Talepteki belirsizliğin sisteme ve eklenmesi gereken hatlara etkisi araştırıldıktan sonra, talep dışındaki diğer belirsizlikler IEEE-24 problemi için 10 farklı senaryo üzerinden tanımlanmıştır. Bu yeni senaryoların eklenmesinin amacı çalışmada daha fazla belirsizliği ele alarak, çalışmayı daha fazla gerçek hayata yaklaştırmaktır. Problemin amaç fonksiyonunda hat ekleme maliyeti ve karşılanmayan elektrik ceza maliyetine ek olarak karbondioksit salınımı dikkate alınarak yeni maliyet unsuru eklenmiştir. Ayrıca üretim tesislerinin MW/üretim cinsinden üretim maliyetleri de modele yeni maliyet türleri olarak dâhil edilmiştir. Daha önce Şekil 1'de gösterilen sözde kod ile anlatılan yöntem kullanılarak problem kesikli durum min-maks değer ve kesikli durum min-maks pişmanlık amaç fonksiyonuna göre geliştirilen 2 seviyeli sağlam model ve benzetim tekniği kullanılarak çözülmüştür [42, 53]. Çalışmaya özgü geliştirilen 10 farklı senaryo şu şekildedir.

Senaryo 1: Petrol fiyatlarındaki aşırı artışa bağlı olarak petrol ve doğal gaz fiyatlarının 2 katına çıktığı durum.
Senaryo 2: Petrol fiyatlarındaki düşüşe bağlı olarak petrol ve doğal gaz fiyatlarının yarıya düştüğü durum.



Şekil 5. Monte Carlo Benzetimi Akış Şeması (Flow chart for monte carlo simulation technique)

Senaryo 3: Yeşil enerji ve çevre kirliliği dikkate alınarak CO_2 salınım maliyetinin 10 katına çıkarıldığı durum.

Senaryo 4: Radyoaktif riskler dikkate alınarak nükleer enerji ile üretim yapan santrallere ürettikleri MW birim başına ek maliyet öngören durum.

Senaryo 5: İş güvenliği gibi durumların dikkate alınarak kömür fiyatlarının %20 artış gösterdiği durum.

Senaryo 6: 16 numaralı üretim tesisinin yenileme ve bakım çalışması için çalışamaz hale geldiği durum

Senaryo 7: 18 numaralı üretim tesisinin yenileme ve bakım çalışması için çalışamaz hale geldiği durum

Senaryo 8: İlk hat yatırımından sonra eklenecek yeni hatların %30 daha az maliyetle gerçekleştiği durum.

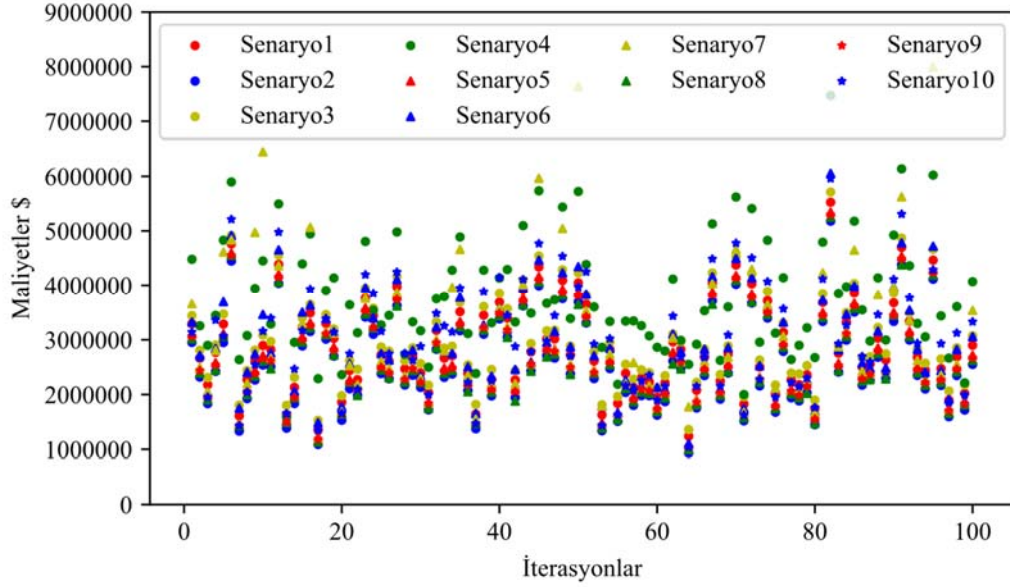
Senaryo 9: İstasyon 8 ve istasyon 9 da sosyal refah dikkate alınarak elektrik kesintisinin çok yüksek ceza maliyeti ile cezalandırıldığı durum.

Senaryo 10: Kültürel çalışmalar sebebiyle 10 nolu istasyona bağlanacak 10-12 ve 15-24 nolu hatların maliyetinin 2 katına çıktığı durum.

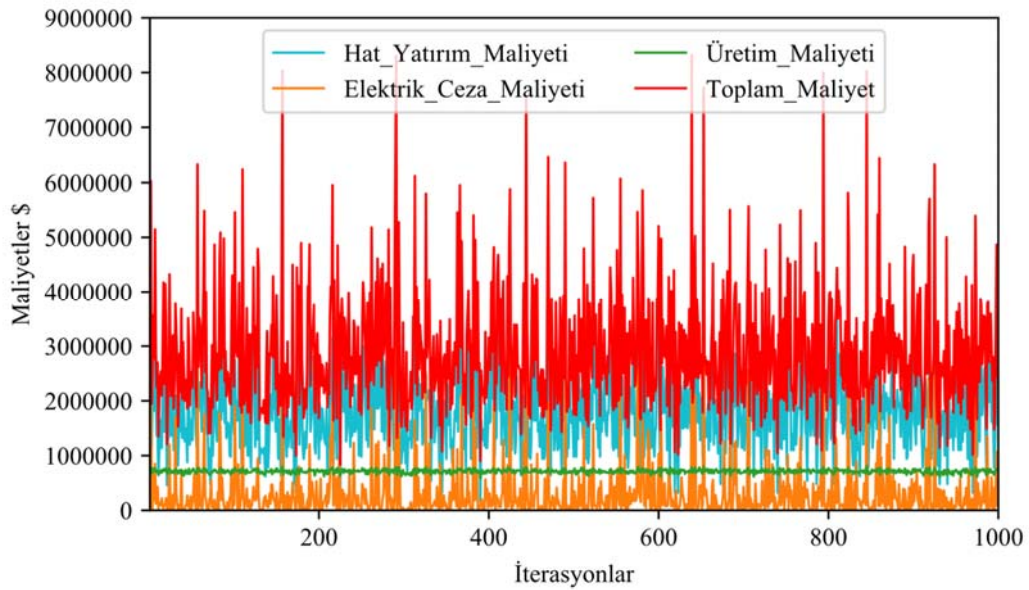
Doğrusal hale getirilerek min-maks değer amaç fonksiyonuna [46] göre elde edilen sadece bir iterasyondaki hat yatırım maliyetini, karşılanmayan elektrik için ceza maliyetini, karbondioksit salınımı ve üretim maliyetleri içeren toplam maliyet değeri 6.434.232.000 \$ ile en sağlam çözüm şu şekildedir: 6 ile 10 numaralı istasyon arasına 1 hat,

7 ile 8 numaralı istasyon arasına 2 hat, 10 ile 12 numaralı istasyon arasına 1 hat, 14 ile 16 numaralı istasyon arasına 1 hat ve 16 ile 17 numaralı istasyon arasına 1 hat eklemenin sistemi en dayanıklı ve en sağlam yapıya dönüştürdüğü görülmüştür. Min-maks pişmanlık durumunda ise senaryoların maksimum değerlerinden ziyade alternatif çözümlerin o senaryonun en iyi çözümüne olan uzaklığı hesaplandığı için durum daha karmaşık hal almaktadır. Bu pişmanlık modelinde önce her senaryonun en iyi değeri bulunur [53]. Amaç fonksiyonu her çözüm için bu senaryoların en iyi değerine olan uzaklığı hesaplanacak şekilde oluşturulur. Bu uzaklık (pişmanlık) değerini

minimize eden çözüm bütün çözümler arasından seçilir. 10 farklı senaryo için 100 farklı talep değerinde (iterasyonda) senaryoların en iyi sonuçları Şekil 6'da paylaşılmıştır. Şekil 6 incelendiğinde belirsizlik altında çözümün yaklaşık olarak 1.000.000 \$' dan 8.000.000 \$'ye muazzam derecede farklılık gösterdiği ve çözüm uzayının ne kadar geniş aralıkta olduğu görülmektedir. Bu çalışmada geliştirilen yöntemin kapsamlı belirsizlik ortamında farklı talep seviyelerinde bütün senaryoların en iyi değerine olan uzaklıkları en aza indiren çözüme ulaşmaktadır. Bu çalışmaya özgü olarak benzetim tekniği ve sağlam model kullanılarak geliştirilen yöntemle ait çözümlerin maliyeti Şekil 7'de paylaşılmıştır. Şekil 7



Şekil 6. 100 Farklı Talep İçin 10 Senaryonun En İyi Değeri (Best value of 10 scenarios for 100 different demands)



Şekil 7. Çözümlerin Maliyet Değerleri (Costs of solutions)

incelendiğinde toplam maliyeti etkileyen en önemli unsurun hat yatırım maliyeti olduğu görülmektedir. Şekil 1’de sözde kodu paylaşılan bu çalışmaya özgü benzetim tekniği ve sağlam model kullanılarak geliştirilen yöntem 5.000 tekrar ile çalıştırılmıştır. Birinci aşama sonrası %80 ve üzeri çözümde 7 ile 8 numaralı istasyon arasına 2 hat eklenmesi öngörülmektedir.

Bu hatların eklenmesinden sonra model yeniden 5.000 tekrar ile çalıştırılmıştır ve 6 ile 10 nolu istasyon arasına 1 hat eklenmesi öngörülmüştür. Bu hat eklendikten sonra model yeniden çalıştırıldığında ise yeni hat ekleme öngörülmemektedir. Bu bölümde geliştirilen yöntem ile elektrik iletim alanındaki belirsizlikler ele alınmıştır ve sayısal sonuçlar paylaşılmıştır. Özellikle farklı maliyet, fiyat ve iklim belirsizliklerinin olduğu ve hatların yatırım maliyetlerinin değişiklik gösterdiği durumların sisteme etkileri araştırılmıştır. Test verileri için sayısal sonuçlar paylaşılmıştır. Talep belirsizliği için Monte Carlo benzetim tekniği ile eklenmesi gereken sonuçlara benzer şekilde 6 ile 10 numaralı istasyon arasına 1 hat, 7 ile 8 numaralı istasyon arasına 2 hat eklemenin ortak çözümünü olduğu görülmüştür. Bu çalışma, elektrik iletim alanındaki karar vericiler için farklı belirsizlik durumlarında maliyet karşılaştırmasına izin veren ve hangi hatların öncelikli eklenmesi ile sistemin daha kararlı olacağını tespit eden özgün bir çalışmadır.

4. SONUÇLAR(CONCLUSIONS)

Bu çalışmada, mevcut elektrik iletim hatlarının özellikleri dikkate alınarak belirsizliğin olduğu durumlarda yeni bir iletim genişleme planı geliştirilmiştir. Talebin sabit olduğu durumda, doğrusal olmayan matematik modeli doğrusal dönüşüm formülleri ile doğrusal hale dönüştürülmüştür. IEEE-24 test sistemi kullanılarak doğrusal hale dönüştürülen model test edilmiştir. Önerilen yapının talebin sabit olduğu durumlarda en iyi çözümü bilinen test sistemi için en iyi çözüme ulaştığı görülmüştür. Belirsiz durumlarda ise doğrusal hale dönüştürülen matematiksel modelin ikili karar değişkenleri kullanılarak, amaç fonksiyonu da dâhil olmak üzere tamamen doğrusal modelleme içeren yeni bir çözüm yöntemi geliştirilmiştir. Talepteki belirsizliğin sisteme etkileri Monte Carlo benzetim tekniği ile PYTHON 3.7 programı kullanılarak analiz edilmiştir. Bu çalışmaya için geliştirilen min-maks değer ve min-maks pişmanlık amaç fonksiyonu değerleri için oluşturulan modeller özgün olarak tamamen doğrusal hale getirilmiş ve talep dışındaki belirsizlikler senaryolar ile kapsamlı şekilde ele alınmıştır. Elde edilen çözümler ve sonuçlar çalışmada sunulmuştur. Gelecek çalışmalarda Türkiye'nin güncel elektrik iletim verileri ile geliştirilen yöntem kullanılarak çözümler üretilmesi hedeflenmektedir. Bu kapsamda, Türkiye elektrik üretim ve yük tahminlerine yönelik güncel veriler ile kendini yenileyen bir stokastik iletim modeli geliştirilebilir. Böylece, Türkiye elektrik iletim alanındaki karar vericiler için farklı belirsizlik durumlarında maliyet karşılaştırmasına izin veren ve hangi hatların eklenmesi ile sistemin daha sağlam olacağını tespit edilmiş olması sağlanacaktır. Güncel veriler kullanılarak geliştirilmesi hedeflenen model ile ülkemizin

2030 yılına kadar olan elektrik iletim projeksiyonunun oluşturulması sağlanabilir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Conejo A. J., Baringo L., Kazempour S. J., Siddiqui A. S., Investment in Electricity Generation and Transmission Decision Making Under Uncertainty, Springer, Switzerland, 2016.
2. Gen M., Cheng R., Lin L., Transmission Expansion Planning, Network Model and Optimization: Multiobjective Genetic Algorithm Approach, Springer, London, UK, 2008.
3. Mutlu S., Belirsizlik altında iletim genişleme planı belirlenmesi, Doktora Tezi, Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri, 2019.
4. Tefek F.M., Uğuz H., Solution of economic dispatch problem for wind-thermal power systems by a modified hybrid optimization method, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 34 (4), 1871-1895, 2019.
5. Teke A., Yıldırım E., Distributed solar power application effects on short circuit protection in distributed generation - new techniques for short circuit protection in distributed generation, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 34 (4), 2141-2158, 2019.
6. Reşat H.G., Design and development of hybrid forecasting model using artificial neural networks and ARIMA methods for sustainable energy management systems: A case study in tobacco industry, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 35 (3), 1129-1140, 2020.
7. Naderi E., Kasmaei M.P., Lehtonen M., Transmission expansion planning integrated with wind farms: A review, comparative study, and a novel profound search approach, Electrical Power and Energy Systems, 115, 1-21, 2020.
8. Gomes P.V., Saraiva J. T., State-of-the-art of transmission expansion planning: A survey from restructuring to renewable and distributed electricity markets, Electrical Power and Energy Systems, 111, 411-424, 2019.
9. Hemmati R., Hooshmand R. A., Khodabakhshian A., State-of-the-art of transmission expansion planning: Comprehensive review, Renewable & Sustainable Energy Reviews, 23, 312-319, 2013.
10. Leou, R.C., A multi-year transmission planning under a deregulated market, International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 33 (3), 708-714, 2011.
11. Garver, L. L., Transmission network estimation using linear programming, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 89 (5), 1688-1697, 1970.
12. Senyigit E., Mutlu S., Babayigit B., Transmission expansion planning based on a hybrid genetic algorithm approach under uncertainty, Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences (4), 1-16, 2019.
13. Senyigit E., Mutlu S., Transmission expansion planning under different uncertainties, New Trends and Issues

- Proceedings on Humanities and Social Sciences, North Cyprus, 194-201, 4-6 Mayıs, 2017.
14. Velloso A., Pozo D., Street A., Distributionally robust transmission expansion planning: a multi-scale uncertainty approach, *IEEE Transactions on Power Systems*, 1-12, 2020.
 15. Roh J.H., Shahidehpour M., Wu L., Market-based generation and transmission planning with uncertainties, *IEEE Transactions on Power Systems*, 24 (3), 1587-1598, 2009.
 16. Carrion M., Arroyo J.M., Alguacil N., Vulnerability-constrained transmission expansion planning: A stochastic programming approach, *IEEE Transactions on Power Systems*, 22 (4), 1436-1445, 2007.
 17. Wu P., Cheng H.Z., Xing H., The interval minimum load cutting problem in the process of transmission network expansion planning considering uncertainty in demand, *IEEE Transactions on Power Systems*, 23 (3), 1497-1506, 2008.
 18. Yu H., Chung C.Y., Wong K.P., Robust transmission network expansion planning method with Taguchi's orthogonal array testing, *IEEE Transactions on Power Systems*, 26 (3), 1573-1580, 2011.
 19. Wen J.Y., Han X.N., Li J.M., Chen Y., Yi H.Q., Lu C., Transmission network expansion planning considering uncertainties in loads and renewable energy resources, *Csee Journal of Power and Energy Systems*, 1 (1), 78-85, 2015.
 20. Gabrel V., Murat C., Thiele A., Recent advances in robust optimization: An overview, *European Journal of Operational Research*, 235 (3), 471-483, 2014.
 21. Senyigit E., Mutlu S., Transmission expansion planning under different uncertainties: Case of KCETAS, 16th International Conference on Clean Energy, Gazimagusa, North Cyprus, 9-11 May, 2018, 1-6.
 22. Purchala K., Meeus L., Dommelen D. V., Belmans R., Usefulness of DC power flow for active power flow analysis, *IEEE Systems Journal*, 1-6, 2005.
 23. Romero R., Rider M.J., Silva I. D., A metaheuristic to solve the transmission expansion planning, *IEEE Transactions on Power Systems*, 22 (4), 2289-2291, 2007.
 24. MacRae C.A.G., Ernst A.T., Ozlen M., A benders decomposition approach to transmission expansion planning considering energy storage, *Energy*, 112, 795-803, 2016.
 25. Huang S., Dinavahi V., A branch-and-cut benders decomposition algorithm for transmission expansion planning, *IEEE System Journal*, 13 (1), 659-669, 2017.
 26. Hariyanto N., Haroen Y., Machbub C., Decentralized and simultaneous generation and transmission expansion planning through cooperative game theory. *International Journal on Electrical Engineering and Informatics*, 1 (2), 149-164, 2009.
 27. Alizadeh B., Jadid S., A dynamic model for coordination of generation and transmission expansion planning in power systems, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 65, 408-418, 2015.
 28. Da Silva A.M.L., Rezende L.S., Manso L.A.D., De Resende L.C., Reliability worth applied to transmission expansion planning based on ant colony system. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 32 (10), 1077-1084, 2010.
 29. Kamyab G.R., Firuzabadi M.F., Rashidinehad M., A PSO based approach for multi-stage transmission expansion planning in electricity markets, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 54, 91-100, 2014.
 30. Sousa A.S., Asada E.N., Combined heuristic with fuzzy system to transmission system expansion planning, *Electric Power Systems Research*, 81 (1), 123-128, 2011.
 31. Gallego L.A., Garces L.P., Rahmani M., Romero R.A., High-performance hybrid genetic algorithm to solve transmission network expansion planning. *IET Generation Transmission & Distribution*, 11 (5), 1111-1118, 2017.
 32. Romero R., Gallego R., Monticelli A., Transmission system expansion planning by simulated annealing. *IEEE Transactions on Power Systems*, 11 (1), 364-369, 1996.
 33. Escobar A.H., Gallego R.A., Romero R., Multistage and coordinated planning of the expansion of transmission systems, *IEEE Transactions on Power Systems*, 19 (2), 735-744, 2004.
 34. Rastgou A., Moshtagh J., Improved harmony search algorithm for transmission expansion planning with adequacy-security considerations in the deregulated power system, 60, 153-164, 2014.
 35. Minguez R., Garcia-Bertrand R., Arroyo J.M., Alguacil N., On the solution of large-scale robust transmission network expansion planning under uncertain demand and generation capacity. *IEEE Transactions on Power Systems*, 33 (2), 1242-1251, 2018.
 36. Dehghan S., Amjady N., Conejo A.J., Adaptive robust transmission expansion planning using linear decision rules, *IEEE Transactions on Power Systems*, 32 (5), 4024-4034, 2017.
 37. Moreira A., Street A., Arroyo J.M., An adjustable robust optimization approach for contingency-constrained transmission expansion planning, *IEEE Transactions on Power Systems*, 30 (4), 2013-2022, 2015.
 38. Garcia-Bertrand R., Minguez R., Dynamic robust transmission expansion planning, *IEEE Transactions on Power Systems*, 32 (4), 2618-2628, 2017.
 39. Garcia-Bertrand R., Minguez R., Robust transmission network expansion planning in energy systems: Improving computational performance, *European Journal of Operational Research*, 248 (1), 21-32, 2016.
 40. Jabr R.A., Robust transmission network expansion planning with uncertain renewable generation and loads, *IEEE Transactions on Power Systems*, 28 (4), 4558-4567, 2013.
 41. Ruiz C., Conejo A.J., Robust transmission expansion planning, *European Journal of Operational Research*, 242 (2), 390-401, 2015.

42. Chen B., Wang J., Wang L., He Y., Wang Z., Robust optimization for transmission expansion planning: minimax cost vs. minimax regret, *IEEE Transactions on Power Systems*, 29 (6), 3069-3077, 2014.
43. Zhao J.H., Dong Z.Y., Lindsay P., Wong K. P., Flexible transmission expansion planning with uncertainties in an electricity market, *IEEE Transactions on Power Systems*, 24 (1), 479-488, 2009.
44. Kim S., Lee H., Kim H., Jang D.H., Kim H.Y, Hur J., Cho Y.S., Hur K., Improvement in policy and proactive interconnection procedure for renewable energy expansion in South Korea, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 98, 150-162, 2018.
45. Romero R., Monticelli A., Garcia A., Haffner S., Test systems and mathematical models for transmission network expansion planning, *IEEE Proceedings-Generation Transmission and Distribution*, 149 (1), 27-36, 2002.
46. Moreira A., Strbac G., Moreno R., Street A., Konstantelos I., A Five-Level MILP Model for Flexible Transmission Network Planning Under Uncertainty: A Min–Max Regret Approach, *IEEE Transactions on Power Systems*, 33 (1), 486-501, 2018.
47. Şenyiğit E., Mutlu S., İletim genişleme probleminin min-max pişmanlık yöntemi ile çözülmesi, 6. Uluslararası Matematik, Mühendislik, Fen ve Sağlık Bilimleri Kongresi, Adana-Türkiye, 8-10 Mart 2019, 186-191.
48. Grigg C., Wong P., Albrecht P., Allan R., Bhavaraju M., The IEEE reliability test system 1996. *IEEE Transactions on Power Systems* A report prepared by the Reliability Test System Task Force, 14 (3), 1010-1020, 1999.
49. Khardenvis M.D., Pande V.N., Optimal static and dynamic transmission network expansion planning. *Evolving Systems*, 11, 1-14, 2020.
50. Fang R., Hill D.J., A new strategy for transmission expansion in competitive electricity markets. *IEEE Transactions on Power Systems*, 18 (1), 374-380, 2003.
51. Zhuo Z., Du E., Zhang N., Kang C., Xia Q., Wang Z., Incorporating Massive Scenarios in Transmission Expansion Planning with High Renewable Energy Penetration. *IEEE Transactions on Power Systems*, 35 (2), 1061-1074, 2020.
52. Han X., Zhao L., Wen J., Ai X., Liu J., Yang D., Transmission Network Expansion Planning Considering the Generators' Contribution to Uncertainty Accommodation, *CSEE Journal of Power and Energy Systems*, 2 (4), 450-460, 2017.
53. Conde E., Leal M., Puerto J., A Minmax Regret Version of the Time-Dependent Shortest Path Problem, *European Journal of Operational Research*, 270 (3), 968-981, 2018.

