



A two-stage stochastic programming model for the electricity distribution network design problem

Tuğba Özdamar^{ID}, Mehmet Alegöz*^{ID}

Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Eskişehir Technical University, 26555, Eskişehir, Türkiye

Highlights:

- An electricity distribution network design model is proposed
- The model considers demand uncertainty
- The model is tested on a real-life problem.

Keywords:

- Supply chain network design
- Electricity distribution network
- Stochastic programming

Article Info:

Research Article
Received: 26.09.2023
Accepted: 04.08.2024

DOI:

10.17341/gazimmfd.1366691

Correspondence:

Author: Mehmet Alegöz
e-mail: mehmetalegoz@eskisehir.edu.tr
phone: +90 222 213 8247

Graphical/Tabular Abstract

The network that ensures the delivery of electricity to end customers, and consists of actors such as transformer centers, distribution centers, distribution transformers, and field distribution boxes. The proposed model is tested on a real-life case study regarding Eskişehir, which on one hand shows the applicability of the proposed model on real-life instances, and on the other hand brings important managerial insights. As an example, computational results reveal that ignoring the uncertainties in the electricity distribution networks may bring substantial additional costs.

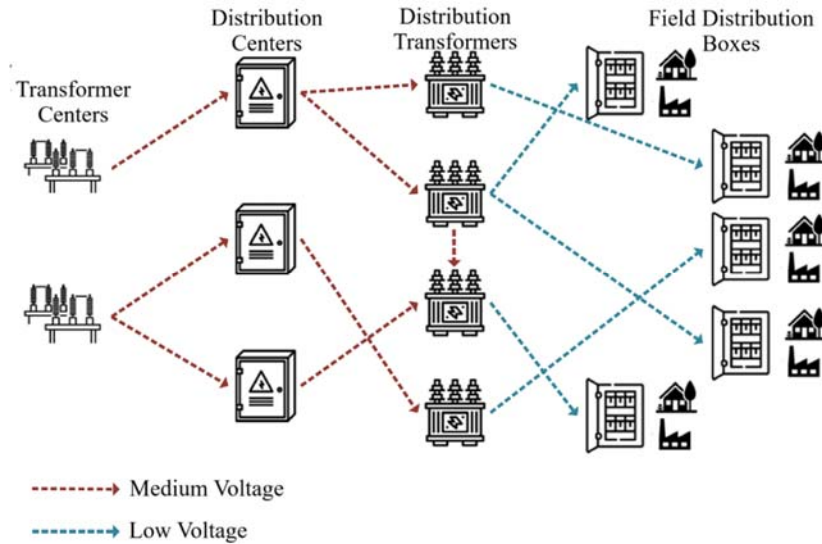


Figure A. The Electricity Distribution Network Considered in This Study

Purpose:

Proposing a solution approach for the electricity distribution network design problem that can be used by the electricity distribution companies.

Theory and Methods:

A scenario-based two-stage stochastic programming model is proposed to design the electricity distribution networks under electricity demand uncertainty.

Results:

Ignoring the uncertainties in the system may bring significant additional costs (about 40% in our case). Hence, it is important to use a solution approach that handles the uncertainties in the system.

Conclusion:

Proposed solution approach can be used by the electricity distribution companies in the initial design phase. Moreover, by fixing the existing facilities in the model, the model can be used in extension decisions of the firms as well.



Elektrik dağıtım ağı tasarımı problemi için iki aşamalı bir stokastik programlama modeli

Tuğba Özdamar¹, Mehmet Alegöz*²

Eskişehir Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, 26555, Tepebaşı, Eskişehir, Türkiye

ÖNEÇIKANLAR

- Bir elektrik dağıtım ağı tasarımı modeli öne sürülmüştür
- Öne sürülen model talep belirsizliğini dikkate almaktadır
- Öne sürülen model bir gerçek hayat probleminde test edilmiştir

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi
Geliş: 26.09.2023
Kabul: 04.08.2024

DOI:

10.17341/gazimmfd.1366691

Anahtar Kelimeler:

Tedarik zinciri ağı tasarımı,
elektrik dağıtım ağı,
stokastik programlama

ÖZ

Elektrik enerjisinin son kullanıcılara ulaştırılmasını sağlayan ve trafo merkezleri, dağıtım merkezleri, dağıtım transformatörleri ve saha dağıtım kutuları gibi elemanlardan oluşan ağa elektrik dağıtım ağı adı verilmektedir. Elektrik dağıtım ağlarının etkin bir şekilde tasarlanması, elektrik enerjisi arzının kesintisiz devam etmesi ve elektrik dağıtım firmalarının maliyetlerinin azaltılması açısından büyük öneme sahiptir. Bu motivasyonla, bu çalışmada, trafo merkezleri, dağıtım merkezleri, dağıtım transformatörleri ve saha dağıtım kutularından oluşan bir elektrik dağıtım ağına odaklanılmış, talep belirsizliği altında lokasyon, kablo ve akış kararları için iki aşamalı bir stokastik programlama modeli öne sürülmüştür. Öne sürülen model Eskişehir iline yönelik bir gerçek hayat uygulaması üzerinde test edilmiş, bir yandan modelin gerçek hayat problemlerinde uygulanabilirliği kanıtlanırken, bir yandan da önemli yönetimsel çıkarımlar elde edilmiştir. Örnek olarak, sayısal sonuçlar, elektrik dağıtım ağlarında belirsizliği göz ardı etmenin ciddi ek maliyetleri beraberinde getirebileceğini göstermiştir.

A two-stage stochastic programming model for the electricity distribution network design problem

HIGHLIGHTS

- An electricity distribution network design model is proposed
- The model considers demand uncertainty
- The model is tested on a real-life problem

Article Info

Research Article
Received: 26.09.2023
Accepted: 04.08.2024

DOI:

10.17341/gazimmfd.1366691

Keywords:

Supply chain network
design,
electricity distribution
network,
stochastic programming

ABSTRACT

The network that ensures the delivery of electricity to end customers, and consists of actors such as transformer centers, distribution centers, distribution transformers and field distribution boxes is called electricity distribution network. Effective design of electricity distribution networks plays an important role in terms of ensuring the continuous supply of electricity and decreasing the costs of electricity distribution companies. Motivated by this fact, in this study, we focus on an electricity distribution network consisting of transformer centers, distribution centers, distribution transformers and field distribution boxes, and propose a two-stage stochastic programming model for the location, cable and flow decisions under demand uncertainty. The proposed model is tested on a real-life case study regarding Eskişehir, which on one hand shows the applicability of the proposed model on real-life instances, and on the other hand brings important managerial insights. As an example, computational results reveal that ignoring the uncertainties in the electricity distribution networks may bring substantial additional costs.

*Sorumlu Yazar/Yazarlar / Corresponding Author/Authors : tugbaozdamar@ogr.eskisehir.edu.tr, *mehmetalegoz@eskisehir.edu.tr /
Tel: +90 222 213 8247

1. Giriş (Introduction)

Transformatör merkezleri (trafo merkezleri), dağıtım merkezleri, dağıtım transformatörleri ve saha dağıtım kutularından oluşan ve elektrik enerjisinin son kullanıcıya ulaştırılmasını sağlayan ağı elektrik dağıtım ağı adı verilmektedir. Elektrik dağıtım ağlarının etkin bir şekilde tasarlanması bir yandan dağıtım şirketlerinin karşılaştığı maliyetleri en aza indirip operasyonlarının ekonomik açıdan sürdürülebilirliğini sağlamaktayken, bir yandan da son kullanıcılara enerji arzının güvenilir ve sorunsuz bir şekilde gerçekleşmesini sağlamaktadır.

Literatür taraması bölümünde detayları ile bahsedildiği üzere elektrik dağıtım ağları klasik tedarik zincirlerinden bazı farklılıklara sahip olduğu için, bu ağların tasarımı için özel olarak geliştirilmiş çözüm yaklaşımları gerekmektedir. Bu motivasyonla, bu çalışmada, trafo merkezleri, dağıtım merkezleri, dağıtım transformatörleri ve saha dağıtım kutularından oluşan bir elektrik dağıtım ağına odaklanılmış; talep belirsizliği altında lokasyon, kablo ve akış kararları için iki aşamalı bir stokastik programlama modeli öne sürülmüştür. Öne sürülen modelin uygulanabilirliğini gösterebilmek amacıyla çalışma kapsamında bir gerçek hayat problemine odaklanılmış, hesaplama sonuçları ve elde edilen bulgular detaylı olarak tartışılmıştır.

Çalışma kapsamında öne sürülen matematiksel model elektrik dağıtım firmaları tarafından sıfırdan ağı tasarımı kararları için kullanılabilirliği gibi, mevcut ağı yapısına yönelik kararlar sabitlenerek ağı genişletilmesine yönelik kararlar için de kullanılabilir. Bu bağlamda, öne sürülen modelin hem yeni bir dağıtım ağı kurmak isteyen hem de mevcut dağıtım ağına genişletmek isteyen elektrik dağıtım firmaları için yararlı bir çözüm yaklaşımı olacağı savunulabilir.

Bu makale şu şekilde organize edilmiştir. İzleyen bölümde literatür taramasına yer verilmiş, bu çalışmanın literatürdeki çalışmalarından farkları detaylı bir biçimde tartışılmıştır. Üçüncü bölüm problem tanımına, dördüncü bölüm ise modele ayrılmıştır. Beşinci bölümde örnek problem ve sayısal sonuçlara yer verilmiş, çalışma altıncı bölümdeki değerlendirmeler ve geleceğe dönük çalışma önerileri ile sonlandırılmıştır.

2. Literatür Taraması (Literature Review)

Çalışmanın içeriği ve kapsamı göz önünde bulundurulduğunda bu çalışmanın literatürdeki elektrik dağıtım ağı tasarımı odaklanan çalışmalar ve klasik tedarik zinciri ağı tasarımı odaklanan çalışmalar ile ilişkili olduğu söylenebilir. Bu bağlamda, bu bölümde öncelikle elektrik dağıtım ağı tasarımı, sonrasında ise klasik tedarik zinciri ağı tasarımı odaklanan çalışmalar değerlendirilmiş, bu çalışmanın literatürdeki çalışmalarından farkları detaylı olarak tartışılmıştır.

Literatürde elektrik dağıtım ağı tasarımı problemini optimizasyon bakış açısıyla ele alan ve kesin ya da sezgisel çözüm yaklaşımları öne süren görece az sayıda çalışma mevcuttur. Örnek olarak, Ganguly vd. [1], elektrik dağıtım ağlarının tasarımı için matematiksel model ve parçacık sürü optimizasyonu temelli çözüm yaklaşımları öne sürmüştür; öne sürülen metasezgisel yaklaşımın etkinliğini çeşitli test problemleri aracılığıyla irdelemiştir. Rafique vd. [2], kömür madenleri, üretim tesisleri ve şehirlerden (talep noktaları) oluşan bir enerji üretim ve dağıtım ağının tasarımı için bir matematiksel model öne sürmüştür; öne sürülen modelin uygulanabilirliğini Pakistan'a yönelik bir gerçek hayat uygulamasında göstermiştir. Murele vd. [3], enerji tedarik zincirlerinde yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımının önemini vurgulamış; bir enerji kaynağı olan biyokütle enerji tedarik zincirlerinde kullanılmasının etkilerini

irdelemek üzere bir matematiksel model öne sürmüştür. Zhong vd. [4], elektrik iletim ve dağıtım ağlarında genişleme (kapasite artırımı) kararlarının bütünlük bir şekilde verilmesinin önemini vurgulamış; sınırlı bütçe altında iletim ve dağıtım ağlarında bütünlük biçimde genişleme kararları veren matematiksel model temelli bir çözüm yaklaşımı öne sürmüştür. Rafique vd. [5] biyoenerji tedarik zinciri ağlarının tasarımı için çok periyotlu bir matematiksel model öne sürmüştür; öne sürülen modelin gerçek hayat problemlerinde kullanılabilirliğini Pakistan'a yönelik bir örnek problem aracılığıyla göstermiştir.

Bu çalışma yukarıdaki çalışmalardan şu yönleriyle ayrılmaktadır:

- Bu çalışmada, yukarıdaki çalışmalardan farklı olarak trafo merkezleri, dağıtım merkezleri, dağıtım transformatörleri ve saha dağıtım kutularından oluşan bir elektrik dağıtım ağının tasarımına odaklanılmıştır.
- Bu çalışmada, enerji talebindeki belirsizlik göz önünde bulundurulmuş ve iki aşamalı stokastik programlama temelli bir çözüm yaklaşımı öne sürülmüştür.
- Tesis kurulumu kararlarına ek olarak bu çalışmada tesisler arasında kullanılacak kablo kararlarına da odaklanılmıştır.

Elektrik dağıtım ağı tasarımı problemini optimizasyon bakış açısıyla ele alan ve kesin ya da sezgisel çözüm yaklaşımları öne süren çalışmalar görece az olsa da ticari ürünlere yönelik tedarik zinciri ağı tasarımı problemi literatürde geniş bir yer bulmuştur. Örnek olarak, Santos vd. [6], belirsizlik altında tedarik zinciri ağı tasarımı problemi için bir stokastik programlama modeli ve bir algoritma öne sürmüştür; gerçek hayat problemleri üzerinde yaptığı çalışmalarla model ve algoritmanın başarılı sonuçlar verdiğini göstermiştir. Bidhandi vd. [7], stratejik ve taktik kararların birlikte ele alındığı tek periyotlu, çok ürünlü, deterministik bir tedarik zinciri ağı tasarımı problemine odaklanmıştır; bu problem için bir karma tamsayılı programlama modeli öne sürmüştür. Alumur vd. [8], tersine tedarik zincirlerinin tasarımı için çok ürünlü, çok periyotlu bir ağı tasarımı modeli öne sürmüştür; öne sürülen modelin uygulanabilirliğini çamaşır makinesi üretimine yönelik bir örnek problem üzerinde test etmiştir. Correia vd. [9], bir tanesi toplam kazancı enbüyükleyen, bir tanesi ise toplam maliyeti enküçükleyen çok periyotlu iki tedarik zinciri ağı tasarımı modeli öne sürmüştür; öne sürülen modelleri karşılaştırarak hangi durumlarda hangi modelin kullanılması gerektiğine dair çıkarımlarda bulunmuştur. Yıldız vd. [10], tedarik zincirlerinde risk konusuna odaklanmış, bir yandan maliyeti enküçüklerken bir yandan da güvenilirliği enbüyükleyen çok amaçlı bir tedarik zinciri ağı tasarımı modeli öne sürmüştür.

Savadkoohi vd. [11], bozulabilir ecza ürünlerine yönelik çok periyotlu bir tedarik zinciri ağı tasarımı modeli öne sürmüştür; öne sürülen modelin etkinliğini bir gerçek hayat problemini ele alarak kanıtlamıştır. Wang vd. [12], tedarik zincirlerinde fiyat rekabetine odaklanmış, fiyat rekabeti altında çok ürünlü, çok periyotlu bir tedarik zinciri ağı tasarımı modeli ve metasezgisel algoritmalar öne sürmüştür. Govindan vd. [13], bütünlük tedarikçi seçimi ve tedarik zinciri ağı tasarımı problemi için çok ölçütlü karar verme ve karma tamsayılı programlama temelli bir çözüm yaklaşımı öne sürmüştür; öne sürülen çözüm yaklaşımının uygulanabilirliğini bir otomotiv yan sanayi firmasının verileri aracılığıyla test etmiştir. Hasani vd. [14], maliyetin yanı sıra çevresel faktörleri de göz önünde bulunduran çok amaçlı bir tedarik zinciri ağı tasarımı modeli öne sürmüştür; öne sürülen modelin çözümü için ayrıca bir sezgisel algoritma geliştirmiştir. Kazancoglu vd. [15] yeşil tedarik zinciri ağı tasarımı problemi için maliyet ve çevresel etkiyi göz önünde bulunduran çok amaçlı bir karma tamsayılı programlama modeli öne sürmüştür; öne sürülen modelin uygulanabilirliğini ev aletlerine yönelik bir örnek problemde

test etmiştir. Alegöz vd. [16], kapalı döngü bir tedarik zincirine sahip olmanın ekonomik ve çevresel etkilerini irdelemek amacıyla ileri yönlü ve kapalı döngü tedarik zincirlerine yönelik iki aşamalı stokastik programlama modelleri öne sürmüştür; yapılan sayısal analizlerle hangi durumlarda tedarik zincirlerinde döngüyü kapatmanın ekonomik veya çevresel açıdan yararlı olduğunu tartışmıştır.

Tedarik zinciri ağı tasarımına yönelik son birkaç yılda yayınlanmış çalışmalara ise şu çalışmalar örnek verilebilir. Abbasi vd. [17], COVID-19 sürecinde yeşil tedarik zinciri ağlarının tasarımı için çok amaçlı karma tam sayılı bir matematiksel model öne sürmüştür; öne sürülen modelin etkinliğini otomotiv sektörüne yönelik bir gerçek hayat uygulamasında test etmiştir. Kumar vd. [18], tedarik zinciri ağlarının tasarımında sürdürülebilirliğin tüm boyutlarını birlikte ele almanın önemini vurgulamış; belirsizlik altında tedarik zinciri ağı tasarımı problemi için ekonomik, çevresel ve sosyal amaçları göz önünde bulunduran bir matematiksel model ve büyük boyutlu problemlerin çözümü için bir sezgisel algoritma öne sürmüştür. Tirkolae vd. [19], COVID-19 sürecinde kan tedarik zincirlerinin tasarımı için iki amaçlı karma tamsayı bir doğrusal programlama modeli öne sürmüştür, öne sürülen modelin etkinliğini bir gerçek hayat problemi aracılığıyla test etmiştir. Hu vd. [20], miktar indirimi ve fiyata bağlı talep durumlarının dikkate alan karma tamsayı bir tedarik zinciri ağı tasarımı modeli öne sürmüştür; yapılan analizler doğrultusunda miktar indirimlerini göz önünde bulundurmanın tedarik zinciri karlılığını belirgin bir biçimde etkilediğini vurgulamıştır. Farzan vd. [21], tedarik zinciri ağı tasarımı ve montaj hattı dengeleme problemlerini birlikte ele almış, bu iki problemin ortak çözümünü için ekonomik, çevresel ve sosyal amaçları göz önünde bulunduran bir çok amaçlı matematiksel model öne sürmüştür. Dündar vd. [22] buğday tedarik zinciri ağlarının tasarımı için çok periyotlu ve çok ürünli bir tedarik zinciri ağı tasarımı modeli öne sürmüştür, öne sürülen modeli bir un fabrikasının gerçek verileri ile test etmiştir.

Yukarıda bahsi geçen çalışmalardan farklı olarak bu çalışma elektrik dağıtım ağlarının tasarımına odaklanmaktadır. Özünde bir tedarik zinciri ağı olsa da elektrik dağıtım ağları klasik tedarik zinciri ağlarından bazı farklılıklara sahiptir. Bu farklar şöyle sıralanabilir:

- Elektrik dağıtım ağlarındaki aktörler klasik tedarik zinciri ağlarındaki aktörlerden farklıdır.
- Elektrik dağıtım ağlarında enerji gerilimi belli noktalarda düşürülmektedir ve bu sebeple enerji akışı farklı tedarik zinciri aktörleri arasında farklı gerilimlerde gerçekleşmektedir, yani klasik tedarik zincirlerindeki gibi bir ürünün üretim tesisinden müşterilere kadar iletiildiği standart ürün akışı söz konusu değildir.
- Klasik tedarik zinciri ağlarından farklı olarak elektrik dağıtım ağlarında enerji iletimi esnasında bir enerji kaybı olmaktadır.
- Klasik tedarik zinciri ağlarından farklı olarak elektrik dağıtım ağlarında bazı durumlarda bazı aktörler en fazla bir veya iki kaynaktan beslenebilmektedir.

Yukarıda bahsi geçen farklılıklar dikkate alındığında, klasik tedarik zinciri ağlarının tasarımı için öne sürülen matematiksel modellerin ve geliştirilen çözüm yaklaşımlarının elektrik dağıtım ağlarının tasarımında doğrudan kullanılamayacağı ve elektrik dağıtım ağlarının tasarımı için probleme özgü çözüm yaklaşımları geliştirmek gerektiği sonucuna varılmaktadır. Bu gerçekten hareketle, bu çalışmada yukarıdaki çalışmalardan farklı olarak elektrik dağıtım ağlarının tasarımı için stokastik programlama temelli bir çözüm yaklaşımı öne sürülmüştür.

3. Problem Tanımı (Problem Definition)

Bu çalışmada, trafo merkezleri, dağıtım merkezleri, dağıtım transformatörleri ve saha dağıtım kutularından oluşan bir elektrik

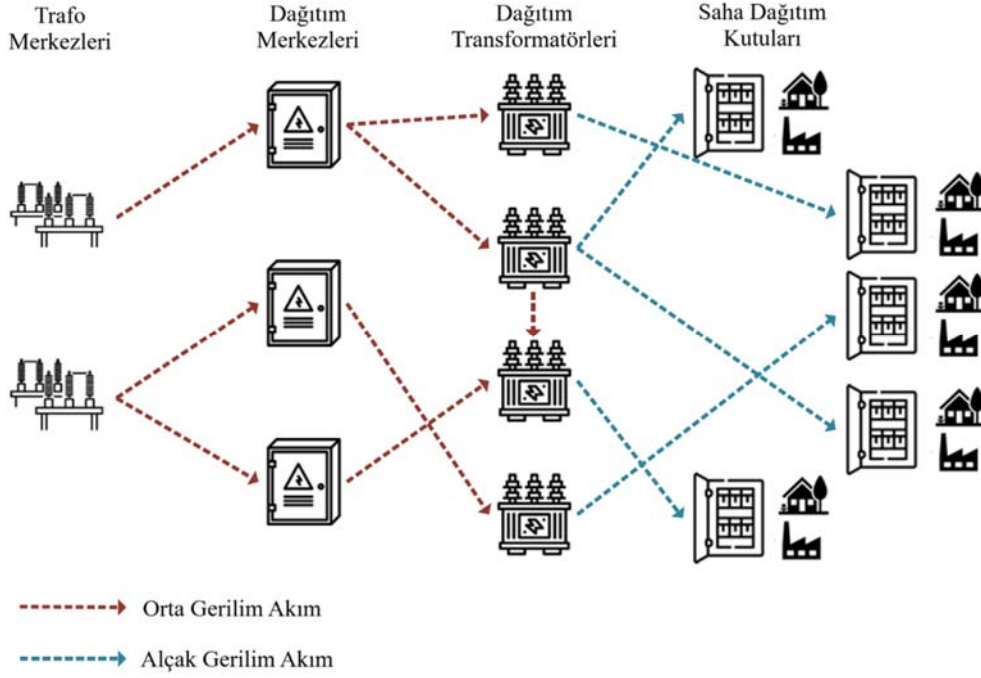
dağıtım ağının tasarımı problemine odaklanılmıştır. Ele alınan dağıtım ağı, trafo merkezlerinde yüksek gerilimli enerjinin orta gerilime düşürülmesi ile başlamakta; dağıtım merkezlerine orta gerilim enerjinin iletilmesi ve dağıtım transformatörlerinde alçak gerilime düşürülmesi ile devam etmektedir; alçak gerilim enerjinin saha dağıtım kutularından son kullanıcılara iletilmesi ile ise son bulmaktadır. Trafo merkezlerinin, dağıtım transformatörlerinin ve saha dağıtım kutularının kendi aralarında bir enerji akışı gerçekleşmemektedir. Ancak, gerekli olması halinde bir dağıtım merkezinden başka bir dağıtım merkezine enerji akışı olabilmektedir. Örnek bir dağıtım ağı Şekil 1’de görselleştirilmiştir.

Ele alınan dağıtım ağında, trafo merkezlerinin ve saha dağıtım kutularının yerlerinin sabit ve biliniyor olduğu varsayılmıştır. Diğer taraftan, dağıtım merkezleri ve dağıtım transformatörlerinin yerleri çalışma kapsamında öne sürülen matematiksel model tarafından belirlenecektir. Bu tesislerin her birinin kurulumu sabit bir kurulum maliyetini beraberinde getirmektedir ve bu sabit maliyet bölgeden bölgeye değişkenlik gösterebilmektedir. Her bir tesisin kurulumu durumunda sabit bir kapasitesi olduğu ve söz konusu tesise giren akımın bu kapasiteyi aşamayacağı varsayılmıştır. Öne sürülen matematiksel model, kapasite ve kurulum maliyetlerini göz önünde bulundurarak hangi aday noktalarda hangi tesislerin açılacağına karar vermektedir.

Tesisler arasında elektrik iletimi kablolar aracılığıyla gerçekleşmektedir. Kablolar aracılığıyla enerjinin taşınması sırasında az miktarda da olsa bir enerji kaybı olmaktadır. Bu enerji kaybı kablounun uzunluğuna (kablo ile bağlanan iki tesis arasındaki mesafeye) göre değişmektedir. Bu çalışma kapsamında, bu enerji kaybının kablounun uzunluğuna göre doğrusal olarak artan bir parametre olduğu varsayılmıştır.

Elektrik iletiminde kullanılan kablolar birbirinden kesitleri, kilometre başına birim satın alma maliyetleri, birim iletim maliyetleri ve kilometre başına enerji kaybı oranı değerleriyle ayrılmaktadır. Dağıtım şirketleri, hangi tesisler arasında hangi tip kablo kullanacaklarına söz konusu tesisler arasında taşınacak enerjiyi de dikkate alarak mevzuat çerçevesinde karar vermektedir. Bu gerçekten hareketle, bu çalışma kapsamında trafo merkezleri ile dağıtım merkezleri, dağıtım merkezleri ile dağıtım merkezleri, dağıtım merkezleri ile dağıtım transformatörleri ve dağıtım transformatörleri ile saha dağıtım kutuları arasında kullanılacak farklı kablo alternatifleri olduğu varsayılmıştır. Öne sürülen model, kilometre başına birim satın alma maliyetleri, birim iletim maliyetleri ve kilometre başına enerji kaybı oranı parametrelerini dikkate alarak kurulumu yapılan iki tesis arasında kullanılacak kabloyu uygun olan kablo alternatifleri arasından belirlemektedir.

Diğer enerji kaynaklarında olduğu gibi elektrik enerjisine duyulan ihtiyaç da farklı zamanlarda farklılık gösterebilmektedir. Bu farklılığın bazı sebepleri şöyle sıralanabilir: İlk olarak, mevsimsel değişiklikler, hava koşulları, tatiller veya hafta sonları gibi farklı zamanlarda tüketici davranışları sebebiyle elektrik enerjisi kullanımı değişebilmektedir. Endüstriyel üretim süreçlerinde karşılaşılan beklenmedik arızalar, bakım çalışmaları veya üretim talebindeki değişiklikler de elektrik tüketiminde ani artış veya azalışlara yol açabilmektedir. Son olarak, enerji piyasasındaki değişiklikler de enerji talebinde değişikliklere yol açabilmektedir. Tüm bu faktörler göz önüne alındığında, elektrik enerjisi talebinin önceden kesin olarak bilinen bir parametre olmadığı, belirsiz bir nitelik taşıdığı sonucuna varılabilir. Bu gerçekten hareketle bu çalışmada, enerji talebinin belirsiz olduğu varsayılmış ve saha dağıtım kutularının talepleri senaryolarla ifade edilmiştir. Yukarıda bahsi geçen detaylar doğrultusunda, bu çalışmada belirsiz enerji talebi altında elektrik dağıtım ağı tasarımı problemine yönelik iki aşamalı bir stokastik



Şekil 1. Elektrik dağıtım ağı (Electricity distribution network)

programlama modeli öne sürülmüştür. Öne sürülen model ilk aşamada hangi yerlere dağıtım merkezi ve dağıtım transformatörü kurulacağına ve hangi tesisler arasında hangi tip kablo kullanılacağına karar vermektedir. İkinci aşamada ise talep belirsizliği çözüldükten sonra tesisler arasındaki enerji akışı miktarlarına karar verilmektedir. Öne sürülen matematiksel modelin amacı ise tesislerin kurulum maliyetleri, tesisler arasında bağlanan kabloların maliyetleri ve tesisler arasındaki enerji iletimi maliyetlerinden oluşan toplam tedarik zinciri maliyetinin beklenen değerini enküçükleme olarak belirlenmiştir.

4. Matematiksel Model (Mathematical Model)

Bu bölümde çalışma kapsamında öne sürülen model sunulacaktır. Modelde kullanılan kümeler, parametreler ve karar değişkenleri aşağıdaki gibidir.

Kümeler:

- I : Trafo merkezleri kümesi, i ile gösterilir.
- J, K : Dağıtım merkezleri kümesi, j, k ile gösterilir
- L : Dağıtım transformatörleri ve AG panoları kümesi, l ile gösterilir.
- M : Saha dağıtım kutuları kümesi, m ile gösterilir.
- S : Senaryolar kümesi, s ile gösterilir.
- T : Trafo merkezlerinden veya dağıtım merkezlerinden dağıtım merkezlerine akım iletiminde kullanılacak kablolar kümesi, t ile gösterilir.
- U : Dağıtım merkezlerinden dağıtım transformatörlerine akım iletiminde kullanılacak kablolar kümesi, u ile gösterilir.
- V : Dağıtım transformatörlerinden saha dağıtım kutularına akım iletiminde kullanılacak kablolar kümesi, v ile gösterilir.

Deterministik Parametreler:

- dt_{ij} : i trafo merkezi ve j dağıtım merkezi arası mesafe

- dm_{jk} : j dağıtım merkezi ve k dağıtım merkezi arası mesafe
- dd_{jl} : j dağıtım merkezi ve l dağıtım transformatörü arası mesafe
- da_{lm} : l dağıtım transformatörü ve m saha dağıtım kutusu arası mesafe
- fd_j : j dağıtım merkezinin kurulum maliyeti
- fa_l : l dağıtım transformatörünün kurulum maliyeti
- bt_t : t kablusunun birim maliyeti
- bd_u : u kablusunun birim maliyeti
- ba_v : v kablusunun birim maliyeti
- ct_t : t kablusuyla akım iletiminin birim maliyeti
- cd_u : u kablusuyla akım iletiminin birim maliyeti
- ca_v : v kablusuyla akım iletiminin birim maliyeti
- kt_i : i trafo merkezinin giriş kapasitesi
- kd_j : j dağıtım merkezinin giriş kapasitesi
- ka_l : l dağıtım transformatörünün giriş kapasitesi
- vt_t : t kablusunda kilometre başına enerji kaybı oranı ($0 < vt_t \leq 1$)
- vd_u : u kablusunda kilometre başına enerji kaybı oranı ($0 < vd_u \leq 1$)
- va_v : v kablusunda kilometre başına enerji kaybı oranı ($0 < va_v \leq 1$)
- qt_i : i trafo merkezindeki akım yükselme oranı ($qt_i > 1$)
- qa_l : l dağıtım transformatöründeki akım yükselme oranı ($qa_l > 1$)
- p^s : s senaryosunun gerçekleşme olasılığı

Belirsiz Parametreler:

- RD_m^s : s senaryosu altında m saha dağıtım kutusunun talebi

Birinci Aşama Kararları:

- χ_j : j dağıtım merkezi kurulursa 1, kurulmazsa 0 değerini alan ikili değişken.
- η_l : l dağıtım transformatörü kurulursa 1, kurulmazsa 0 değerini alan ikili değişken.

ω_{ijt} : i trafo merkezi ile j dağıtım merkezi arasında t kablosu bağlanıyorsa 1, bağlanmıyorsa 0 değerini alan ikili değişken.
 θ_{jkt} : j dağıtım merkezi ile k dağıtım merkezi arasında t kablosu bağlanıyorsa 1, bağlanmıyorsa 0 değerini alan ikili değişken.
 ϕ_{jlu} : j dağıtım merkezi ile l dağıtım transformatörü arasında u kablosu bağlanıyorsa 1, bağlanmıyorsa 0 değerini alan ikili değişken.
 ρ_{lmv} : l dağıtım transformatörü ile m saha dağıtım kutusu arasında v kablosu bağlanıyorsa 1, bağlanmıyorsa 0 değerini alan ikili değişken.

İkinci Aşama Kararları:

α_{ijt}^s : s senaryosu altında i trafo merkezinden j dağıtım merkezine t kablosu ile iletilen akım miktarı
 λ_{jkt}^s : s senaryosu altında j dağıtım merkezinden k dağıtım merkezine t kablosu ile iletilen akım miktarı
 β_{jlu}^s : s senaryosu altında j dağıtım merkezinden l dağıtım transformatörüne u kablosu ile iletilen akım miktarı
 δ_{lmv}^s : s senaryosu altında l dağıtım transformatöründen m saha dağıtım kutusuna v kablosu ile iletilen akım miktarı

Bu notasyona göre, öne sürülen modelin amaç fonksiyonu aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$\begin{aligned} \min z = & \sum_{j=1}^J f d_j \chi_j + \sum_{l=1}^L f a_l \eta_l + \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J b_t dt_{ij} \omega_{ijt} \\ & + \sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K b_t dm_{jk} \theta_{jkt} \\ & + \sum_{u=1}^U \sum_{j=1}^J \sum_{l=1}^L b d_u dd_{jl} \phi_{jlu} \\ & + \sum_{v=1}^V \sum_{l=1}^L \sum_{m=1}^M b a_v da_{lm} \rho_{lmv} \\ & + \sum_{s=1}^S p^s \left(\sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J c_t dt_{ij} \alpha_{ijt}^s \right. \\ & + \sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K c_t dm_{jk} \lambda_{jkt}^s \\ & + \sum_{u=1}^U \sum_{j=1}^J \sum_{l=1}^L c d_u dd_{jl} \beta_{jlu}^s \\ & \left. + \sum_{v=1}^V \sum_{l=1}^L \sum_{m=1}^M c a_v da_{lm} \delta_{lmv}^s \right) \end{aligned} \quad (1)$$

Eş. 1’de verilen amaç fonksiyonu beklenen toplam maliyeti enküçülemektedir. Toplam maliyet sırasıyla tesis kurulum maliyetleri, kablolar maliyetleri ve akım ileme maliyetlerinden oluşmaktadır. Modelin kısıtları ise aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$\sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^J \alpha_{ijt}^s \leq q t_i k t_i \quad \forall i, s \quad (2)$$

Eş. 2’deki kısıt bir trafo merkezinden çıkan tüm akımın o trafo merkezinin çıkış kapasitesini aşamayacağını ifade etmektedir. Trafo

merkezinin çıkış kapasitesi, giriş kapasitesiyle o trafo merkezindeki akım yükseltme oranının çarpılmasıyla elde edilmektedir.

$$\sum_{t=1}^T \sum_{k=1}^K \lambda_{jkt}^s + \sum_{u=1}^U \sum_{l=1}^L \beta_{jlu}^s \leq k d_j \chi_j \quad \forall j, s \quad (3)$$

Eş. 3’teki kısıt bir dağıtım merkezi kurulması durumunda o dağıtım merkezinden tüm diğer dağıtım merkezlerine ve dağıtım transformatörlerine giden akımın o dağıtım merkezinin çıkış kapasitesini aşamayacağını ifade etmektedir.

$$\sum_{v=1}^V \sum_{m=1}^M \delta_{lmv}^s \leq q a_l k a_l \eta_l \quad \forall l, s \quad (4)$$

Eş. 4’teki kısıt bir dağıtım transformatörü kurulması durumunda, o dağıtım transformatöründen çıkan tüm akımın dağıtım transformatörünün çıkış kapasitesini aşamayacağını ifade etmektedir. Dağıtım transformatörünün çıkış kapasitesi, giriş kapasitesiyle, akım yükseltme oranının çarpılmasıyla elde edilmektedir.

$$\begin{aligned} & \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^I \alpha_{ijt}^s (1 - dt_{ij} vt_t) + \sum_{t=1}^T \sum_{k=1}^K \lambda_{jkt}^s (1 - dm_{jk} vt_t) \\ & \geq \sum_{u=1}^U \sum_{l=1}^L \beta_{jlu}^s + \sum_{t=1}^T \sum_{k=1}^K \lambda_{jkt}^s \quad \forall j, s \end{aligned} \quad (5)$$

Eş. 5’teki kısıt dağıtım merkezleri için denge kısıtıdır. Bir dağıtım merkezinden çıkan akım ile o dağıtım merkezine giren akım arasındaki ilişkiyi kurmaktadır. Burada, $(dt_{ij} vt_t)$ ve $(dm_{jk} vt_t)$ ifadeleri akımın söz konusu dağıtım merkezine gelişi sırasında uğradığı enerji kaybı oranını ifade etmektedir.

$$\sum_{u=1}^U \sum_{j=1}^J \beta_{jlu}^s (1 - dd_{jl} vd_u) q a_l \geq \sum_{v=1}^V \sum_{m=1}^M \delta_{lmv}^s \quad \forall l, s \quad (6)$$

Eş. 6’da sunulan kısıt dağıtım transformatörleri için denge kısıtıdır. Bir dağıtım transformatöründen çıkan tüm akım, o dağıtım transformatörüne gelen enerji kaybına uğramış akımın (giriş akımının) yükseltilmesi ile elde edilen değeri aşmamalıdır.

$$\sum_{v=1}^V \sum_{l=1}^L \delta_{lmv}^s (1 - da_{lm} va_v) \geq R D_m^s \quad \forall m, s \quad (7)$$

Eş. 7 kısıtı talep karşılama kısıtıdır. Dağıtım transformatörlerinden bir saha dağıtım kutusuna gelen enerji kaybına uğramış akım, o saha dağıtım kutusunun talebinden büyük ya da talebe eşit olmalıdır.

$$\sum_{i=1}^I \sum_{t=1}^T \omega_{ijt} + \sum_{k=1}^K \sum_{t=1}^T \theta_{kjt} \leq 2, \quad \forall j \quad (8)$$

Eş. 8’de yer alan kısıt bir dağıtım merkezinin en fazla 2 tesisten (en fazla iki trafo merkezinden veya bir trafo merkezi, bir dağıtım merkezinden veya iki dağıtım merkezinden) beslenebileceğini ifade etmektedir. Bu kısıt mevcut gerçek hayat uygulamaları dikkate alınarak eklenmiş olup, böyle bir zorunluluğun olmadığı durumlarda kaldırılabilir.

$$\sum_{t=1}^T \omega_{ijt} \leq 1, \quad \forall i, j \quad (9)$$

Eş. 9 kısıtı bir trafo merkezi ile bir dağıtım merkezinin kabloyla bağlanması durumunda tek bir tip kablo kullanılabileceğini ifade etmektedir.

$$\sum_{t=1}^T \theta_{jkt} \leq 1, \quad \forall j, k \quad (10)$$

Eş. 10'da sunulan kısıt bir dağıtım merkezi ile başka bir dağıtım merkezinin kabloyla bağlanması durumunda tek bir tip kablo kullanılabileceğini ifade etmektedir.

$$\sum_{j=1}^J \sum_{u=1}^U \phi_{jlu} \leq 2, \quad \forall l \quad (11)$$

Eş. 11 kısıtı bir dağıtım transformatörünün en fazla 2 dağıtım merkezinden beslenebileceğini ifade etmektedir. Bu kısıt mevcut gerçek hayat uygulamaları dikkate alınarak eklenmiş olup, böyle bir zorunluluğun olmadığı durumlarda kaldırılabilir.

$$\sum_{u=1}^U \phi_{jlu} \leq 1, \quad \forall j, l \quad (12)$$

Eş. 12'de yer alan kısıt bir dağıtım merkezi ile bir dağıtım transformatörünün kabloyla bağlanması durumunda tek bir tip kablo kullanılabileceğini ifade etmektedir.

$$\sum_{l=1}^L \sum_{v=1}^V \rho_{lmv} \leq 1, \quad \forall m \quad (13)$$

Eş. 13'te sağlanan kısıt bir saha dağıtım kutusunun en fazla 1 dağıtım transformatöründen beslenebileceğini ifade etmektedir. Bu kısıt mevcut gerçek hayat uygulamaları dikkate alınarak eklenmiş olup, böyle bir zorunluluğun olmadığı durumlarda kaldırılabilir.

$$\sum_{v=1}^V \rho_{lmv} \leq 1 \quad \forall l, m \quad (14)$$

Eş. 14 kısıtı bir dağıtım transformatörü ile bir saha dağıtım kutusunun kabloyla bağlanması durumunda tek bir tip kablo kullanılabileceğini ifade etmektedir.

$$\alpha_{ijt}^s \leq M \omega_{ijt} \quad \forall i, j, t, s \quad (15)$$

$$\lambda_{jkt}^s \leq M \theta_{jkt} \quad \forall j, k, t, s \quad (16)$$

$$\beta_{jlu}^s \leq M \phi_{jlu} \quad \forall j, l, u, s \quad (17)$$

$$\delta_{lmv}^s \leq M \rho_{lmv} \quad \forall l, m, v, s \quad (18)$$

Eş. 15-Eş. 18'de yer alan kısıtlar iki tesis arasında akım iletiminin olması için o iki tesis arasında kablo bağlantısının yapılmış olmasını sağlamaktadır.

$$\alpha_{ijt}^s, \lambda_{jkt}^s, \beta_{jlu}^s, \delta_{lmv}^s \geq 0; \quad \chi_j, \eta_l, \omega_{ijt}, \theta_{jkt}, \phi_{jlu}, \rho_{lmv} \in \{0, 1\} \quad (19)$$

Eş. 19 kısıtı değişkenlerin tiplerini ve işaretlerini belirlemektedir.

5. Örnek Problem ve Sayısal Sonuçlar (Case Study and Computational Results)

Bu bölümde öncelikle ele alınan örnek problemde ve verilerin elde edilmesi sürecinden bahsedilmiştir. Daha sonra ise sayısal sonuçlara yer verilmiştir.

5.1. Ele Alınan Örnek Problem (Considered Case Study)

Bu çalışma kapsamında öne sürülen modelin uygulanabilirliğini test etmek amacıyla Eskişehir iline yönelik bir örnek problem şu şekilde oluşturulmuştur:

- Aday lokasyon belirleme kriterleri tesisler bazında farklılık göstermektedir. Bu kriterler şöyle özetlenebilir. Trafo merkezleri şehrin dışına, zemini sağlam bölgelere kurulmalıdır. Ayrıca yüksek gerilim hatlarına uzak olmamalı ve iletim hattının kurulumu zor olmamalıdır. Dağıtım merkezleri yerleşim içi ya da dışında bulunan endüstriyel tesisler, oteller, alışveriş merkezleri, iş merkezleri, hastaneler, havaalanları gibi yapıların yakınlıklarına kurulabilir. Dağıtım transformatörleri yerleşim alanları içine ya da dışına, zemini dayanıklı, güvenlik tedbirleri alınmış alanlara şehir estetiğini bozmayacak şekilde kurulabilir. Son olarak, saha dağıtım kutuları bina, fabrika, atölye gibi yerleşim merkezleri yakınlıklarına konumlandırılabilir. Ele alınan örnek problemde, yukarıda bahsedilen kriterlere göre Eskişehir ilinde 2 trafo merkezi yeri, 10 aday dağıtım merkezi yeri, 30 aday dağıtım transformatörü yeri ve 100 saha dağıtım kutusu yeri belirlenmiştir. Daha önce bahsedildiği üzere, trafo merkezleri ve saha dağıtım kutularının yerleri sabit olup, model kapsamında dağıtım merkezlerinin ve dağıtım transformatörlerinin yerleri belirlenecektir.
- Tesisler arasındaki akış kablolar aracılığıyla olacağı için mesafeler belirlenirken Google Haritalar gibi uygulamalardan elde edilen yol mesafeleri değil, kuş uçuşu mesafeler dikkate alınmıştır.
- Kurulum maliyetlerinin belirlenmesinde tesisler bazında hesaplamalar yapılmıştır. Trafo merkezi ve dağıtım merkezi kurulum maliyetleri, merkez elemanlarının güncel katalog fiyatları, kurulum, montaj ve işçilik maliyetlerinden oluşmaktadır. Örnek olarak, bir trafo merkezinin kurulumu için maliyetler aşağıdaki gibi hesaplanmıştır:

1. 2500 KVA Kuru Tip Transformator: \$50.268,25
 2. 36KV 1250 A Çift Baralı Kesicili Giriş Çıkış Hücresi: \$35.182,73
 3. 36 KV 2500 A Porselen Ayırıcı: \$631,16
 4. 36 KV 10 KA Parafudr: \$94,53
 5. Akü Redresör Grubu: \$751,23
 6. Tehlike Levhası: \$2,90
 7. İzolasyon Malzemeleri: \$92,27
 8. OG Kurulum Panosu ve Scada Yazılımı: \$3.278,77
- Toplam Maliyet: \$90.301,84

- Farklı tip kablolarla ilişkin kablo maliyetleri farklı tedarikçilerden elde edilen katalog fiyatlarından alınmıştır.
- Kabloların kilometre başına enerji kaybı oranları bir dağıtım şirketi tedarikçilerinin test, sertifika ve raporlarından yaklaşık olarak elde edilmiştir. Enerji kaybı oranları kullanılan kablo yapısına, iletkenin cinsine ve dış koşullara göre değişkenlik göstermektedir.
- Trafo merkezlerindeki ve dağıtım transformatörlerindeki akım yükseltme oranları gerilim değişiklikleri dikkate alınarak hesaplanmıştır.
- Son olarak, senaryo olasılıkları ortalama senaryo olasılığı biraz yüksek olacak şekilde, düşük orta ve yüksek talep için sırasıyla (0,30, 0,40, 0,30) olarak belirlenmiştir.

5.2. Hesaplama Sonuçları (Computational Results)

Öne sürülen matematiksel model önceki bölümde bahsedilen veriler kullanılarak GAMS paket programında CPLEX çözücüsü ile çalıştırılmıştır. Hesaplama sonuçları Tablo 1'de özetlenmiştir.

Hesaplama sonuçlarına göre şu değerlendirmeler yapılabilir. Tablo 1'den modelin çok sayıda dağıtım merkezi ve dağıtım transformatörü açılmasına karar verildiği görülmektedir. Problem kapasite açısından incelendiğinde bu kadar tesise gerek olmadığı, daha az sayıda tesisin en yoğun talebe bile karşılık vermekte yeterli olabileceği görülmektedir. Kapasite açısından bir sorun olmamasına rağmen bu kadar çok tesis açılmasının iki gerekçesi olduğu savunulabilir. Birincisi, tesis maliyeti ile kablo maliyeti arasındaki ilişkidir. Tesis sayısı arttıkça bir yandan ek bir tesis açma maliyetiyle karşılaşılırken bir yandan ise kablo maliyetinin azalması muhtemeldir. Model, tesis maliyeti ile kablo maliyeti arasında bir ödünleşme noktası bulacak şekilde tesis sayısına karar vermektedir. Ele alınan problemde kilometre başına kablo maliyetleri ile tesis kurulum maliyetleri birbirine yakın değerlere sahip olduğu için model çok sayıda tesisin açılmasına karar vermiştir. Çok sayıda tesis açılmasının bir diğer sebebi ise kablolarda birim mesafe başına bir enerji kaybının söz konusu olmasıdır. Bu enerji kaybını en aza indirmek için model kablo boyutlarını olabildiğince küçük tutmaya çalışmaktadır. Bu da fazla sayıda tesis açılmasına sebep olmaktadır.

Optimal çözümdeki tesis açma ve kablolama kararları sonucunda oluşan tedarik zinciri ağı bir bütün olarak Şekil 2'de sunulmuştur.

Hesaplama sonuçları irdelendiğinde seçilen kabloların büyük bölümünün, maliyet açısından daha avantajlı olan ancak kilometre başına enerji kaybı nispeten daha yüksek olan birinci tip kablo olduğu görülmektedir. Bu kararın sebebi şu şekilde açıklanabilir. Model kablo seçimi yaparken yüksek maliyetli kablolu seçilmesi durumunda katlanılacak ek maliyet ile verim artışının getirdiği kazancı karşılaştırmaktadır. Eğer ek maliyet verim artışının getirdiği kazançtan değer olarak daha düşükse yüksek maliyetli kabloyu seçmekte, aksi durumda düşük maliyetli kabloyu seçmektedir. Bu doğrultuda, model bazı dağıtım transformatörleri ile saha dağıtım kutuları arasında daha verimli ancak daha maliyetli olan Kablo 2'yi tercih ederken pek çok durumda Kablo 1'i tercih etmiştir.

5.3. Belirsizliğin Etkisi (Effect of Uncertainty)

Bu çalışma kapsamında öne sürülen model talep belirsizliğini dikkate alan iki aşamalı bir stokastik programlama modelidir. Bu bölümde, problemdeki belirsizliği ele almanın etkisi irdelenecektir. Bu amaçla, talep değişkeninin ortalaması sabit tutularak varyansı azaltılmıştır. Örnek olarak, mevcut problemde (yüksek varyans) talep varyansı 3750 iken, orta düzeyde varyansın olması durumunda 1667, düşük düzeyde varyansın olması durumunda ise 417 olarak belirlenmiştir. Deterministik modelde ise varyans 0 olarak alınmıştır, yani tüm senaryolardaki talep değerleri ortalama talep değerine eşittir. Hesaplama sonuçları Şekil 3'te özetlenmiştir.

Hesaplama sonuçlarından belirsizlik seviyesinin (varyansın) artmasıyla beklenen toplam maliyetin de arttığı görülmektedir. Bunun sebebi, modelin tesis kurulumu ve kablolama kararlarını verirken tüm senaryoları göz önünde bulundurmasıdır. Talebin en yüksek olduğu senaryo da dikkate alınarak tesis kurulumu ve kablolama kararları verildiği için varyansın yüksek olduğu durumlarda beklenen maliyet de yüksek çıkmaktadır. Varyans azaldıkça ise dikkate alınan en yüksek senaryo talebi azaldığı için kurulum ve kablolama maliyetleri azalmaktadır. Bu tartışmadan hareketle, dağıtım şirketlerinin birinci önceliğinin belirsizliği olabildiğince azaltacak çalışmalarda bulunmak olduğu söylenebilir. Bu noktada ayrıca, enerji talebi tahminlemesine yönelik çalışmaların önemi de ortaya çıkmaktadır. Literatürde farklı enerji kaynaklarına yönelik talep tahminlemesine odaklanan pek çok çalışma mevcuttur (örnek olarak, Hamzaçebi ve Kutay [23], Bilici ve Özdemir [24] ve Balıkcı vd. [25] incelenebilir).

Belirsizlik seviyesinin etkisine ek olarak belirsizliğin göz önünde bulundurulmamasının etkisi de irdelenmiştir. Bu amaçla deterministik modelden elde edilen tesis kurulumu ve kablolama kararları yüksek varyanslı problemde (mevcut durumda ele alınan problem) sabitlenmiş ve söz konusu belirsizlik ortamında, deterministik model

Tablo 1. Hesaplama sonuçları (computational results)

| Optimal Maliyet | Kurulan Dağıtım Merkezleri | Kurulan Dağıtım Transformatörleri |
|-----------------|-------------------------------|---|
| \$15.543.754,39 | DM1, DM2, DM3, DM4, DM7, DM10 | DT1, DT3, DT5, DT8, DT9, DT10, DT13, DT15, DT16, DT18, DT20, DT21, DT23, DT24, DT25, DT26, DT27, DT28, DT29 |



Şekil 2. Elde edilen tedarik zinciri ağı (Obtained supply chain network)

kararlarını uygulamanın etkileri tartışılmıştır. Hesaplama sonuçları Tablo 2’de sunulmaktadır.

Tablo 2. Belirsizliği göz ardı etmenin getirdiği ek maliyet
(Additional cost of ignoring the uncertainty)

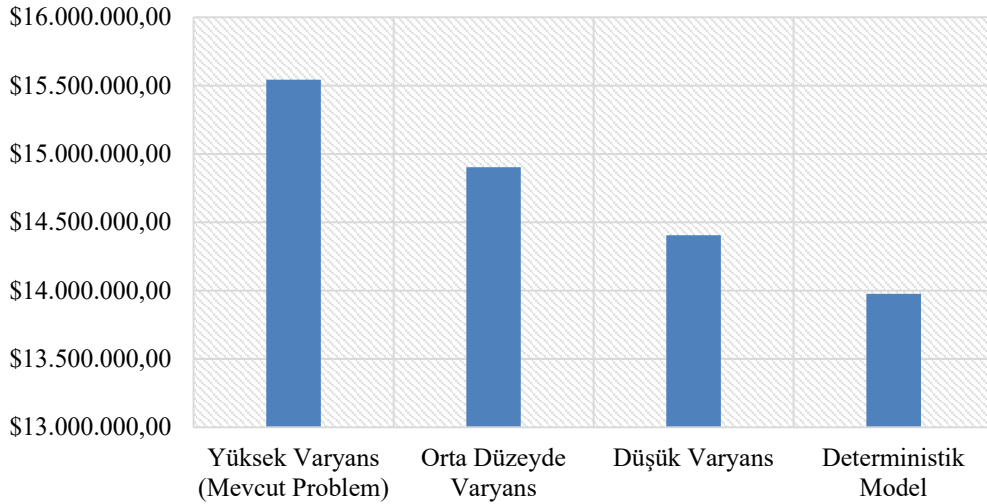
| | |
|--|-----------------|
| İki Aşamalı Stokastik Programlama Modelinin Çözümü Sonucu Elde Edilen Beklenen Maliyet | \$15.543.754,39 |
| Deterministik Modelden Elde edilen Kurulum ve Kablolama Kararlarının İki Aşamalı Stokastik Programlama Modelinde Sabitlemesi Sonucu Elde Edilen Beklenen Maliyet | \$21.716.381,44 |
| Belirsizliği Göz Ardı Etmenin Maliyeti | \$6.172.627,05 |
| Belirsizliği Göz Ardı Etmenin Maliyeti (%) | %39,71 |

Tablo 2’de görüldüğü üzere, deterministik modelden elde edilen kararların belirsiz ortamda kullanılması bu örnek problem özelinde yaklaşık %40’lık bir ek maliyet getirmektedir. Ayrıca, bu problemde öyle bir durumda karşılaşılsa da belirsizliğin dikkate alınmamasının zaman zaman kapasite yetersizliklerine ve uygun olmayan (infeasible) çözümlere sebep olduğu da bilinmektedir. Bu gerçekten hareketle, tüm tedarik zinciri ağı tasarımı problemlerinde olduğu gibi elektrik dağıtım ağlarının tasarımı probleminde de belirsizlikleri dikkate alan bir çözüm yaklaşımı kullanmanın büyük önem taşıdığı sonucuna varılabilir.

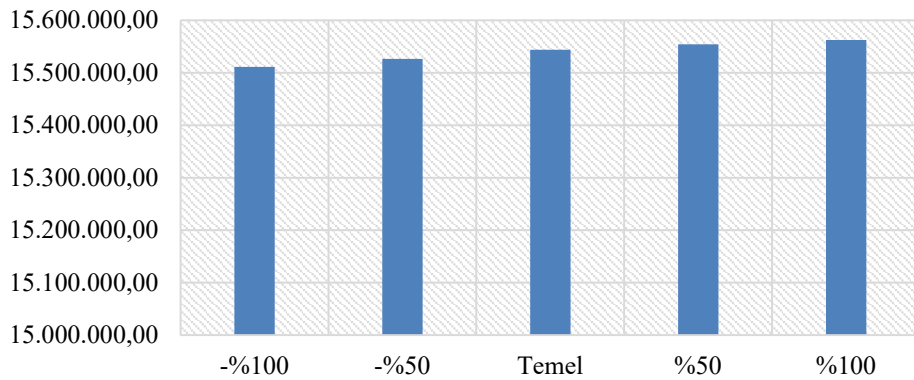
5.4. Enerji Kaybının Etkisi (Effect of Energy Loss)

Daha önce bahsedildiği üzere elektrik dağıtım ağlarında enerji iletimi sırasında belli bir miktarda enerji kaybı olabilmektedir. Bu bölümde, söz konusu enerji kaybının ağ tasarımı üzerindeki etkisi irdelenecektir. Bu amaçla, problem kabloları için farklı enerji kaybı oranı değerleri ile test edilmiş, hesaplama sonuçları Şekil 4’te özetlenmiştir. Şekil 4’te “Temel” ifadesi mevcut durumda kullanılan enerji kaybı oranlarını ifade etmektedir. -%50 ve +%100 ifadeleri enerji kaybı oranlarının mevcut duruma göre %50 ve %100 azaltıldığı durumlara karşılık gelmektedir. Benzer şekilde, %50 ve %100 ifadeleri ise enerji kaybı oranlarının mevcut duruma göre %50 ve %100 artırıldığı durumlara karşılık gelmektedir.

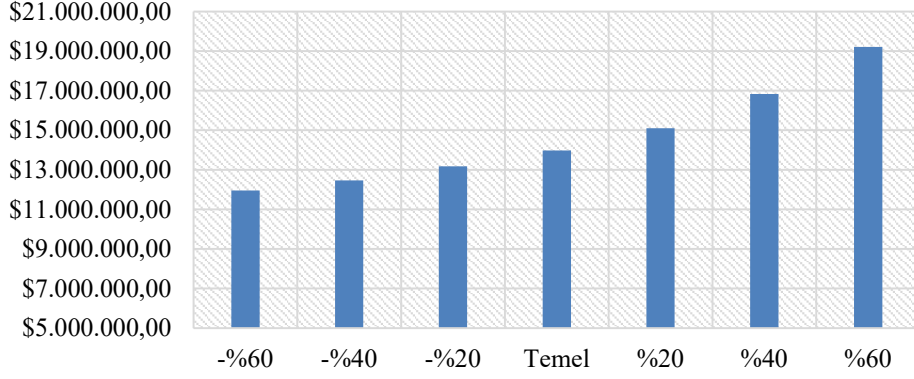
Şekil 4’teki hesaplama sonuçları, ele alınan örnek problemde enerji kaybı oranlarındaki değişimin toplam tedarik zinciri maliyeti üzerinde görece az bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir. Bu durumun bir sebebi olarak ele alınan örnek problemde tesisler arası uzaklıkların nispeten düşük olması gösterilebilir. Tesisler arasındaki uzaklıkların daha fazla olduğu büyük boyutlu ağlarda, enerji kaybı oranlarındaki değişimin daha belirgin bir maliyet farkı ortaya çıkaracağı açıktır. Bu örnek problemde nispeten az da olsa sonuçta enerji kaybındaki artışın ek bir maliyet getirdiği görülmektedir. Hem söz konusu maliyetten kaçınmak hem de tedarik zincirinin çevresel etkisini azaltmak için dağıtım firmalarının enerji kaybı konusuna odaklanması ve bu kaybı en aza indirecek çözümler araması büyük önem taşımaktadır.



Şekil 3. Belirsizliğin etkisi (Effect of uncertainty)



Şekil 4. Enerji kaybının etkisi (Effect of energy loss)



Şekil 5. Enerji talebinin etkisi (Effect of energy demand)

5.5. Enerji Talebinin Etkisi (Effect of Energy Demand)

Bu bölümde enerji talebinin ağ tasarımına etkisi irdelenecektir. Talebin etkisini daha iyi analiz edebilmek için bu bölümde talebin her türlü etkiden arındırılmış ve kesin olarak biliniyor olduğu varsayılmıştır. Farklı talep değerlerine dair hesaplama sonuçları Şekil 5'te özetlenmiştir. Şekil 5'te "Temel" ifadesi iki aşamalı stokastik modelde ortalama talep senaryosuna (Senaryo 2) karşılık gelen talebi ifade etmektedir. -%20, -%40 ve -%60 ifadeleri temel durumdaki taleplerin %20, %40 ve %60 oranında azaltıldığı durumlara karşılık gelmektedir. Benzer şekilde, %20, %40 ve %60 ifadeleri ise temel durumdaki taleplerin %20, %40 ve %60 artırıldığı durumlara karşılık gelmektedir.

Şekil 5'te görüldüğü üzere enerji talebinin artması toplam tedarik zinciri maliyetini belirgin bir biçimde artırmaktadır. Hesaplama sonuçlarına göre bu etki iki nedenle açıklanabilir. Birincisi, enerji talebinin fazla olması sebebiyle taşınan elektrik enerjisi miktarı fazla olmaktadır. Bu da iletim maliyetlerinde bir artışa sebep olmaktadır. İkincisi ise, enerji talebi arttıkça söz konusu enerjinin dağıtımını sağlayan tesislerin (dağıtım merkezi ve dağıtım transformatörü) sayısı artmaktadır. Bu da ek tesis kurulum maliyetlerini beraberinde getirmektedir. Örnek olarak, model -%60 talep durumunda 4 dağıtım merkezinin açılmasına karar verirken, +%60 talep durumunda 8 dağıtım merkezinin açılmasına karar vermiştir.

Hesaplama sonuçları ayrıca farklı talep durumlarında tesisler arasındaki akışların da değişkenlik gösterdiğini, yani enerji talebindeki değişimin tesis açma kararlarına ek olarak tesisler arasındaki akış kararlarını da etkilediğini göstermektedir. Bu bağlamda, enerji talebinin hem toplam tedarik zinciri maliyetini hem de tedarik zinciri ağı tasarımı kararlarını belirgin bir biçimde etkilediği sonucuna varılabilir.

6. Sonuçlar ve Değerlendirme (Conclusions)

Elektrik dağıtım ağlarının en iyi şekilde tasarlanması, dağıtım şirketlerinin maliyetlerinin azaltılması ve kullanıcılara kesintisiz enerji arzı sağlanması açısından büyük öneme sahiptir. Bu çalışmada trafo merkezleri, dağıtım merkezleri, dağıtım transformatörleri ve saha dağıtım kutularından oluşan bir elektrik dağıtım ağına odaklanılmış, bu ağa yönelik lokasyon, akış ve kablo kararları için iki aşamalı bir stokastik programlama modeli öne sürülmüştür. Öne sürülen modelin test edilmesi için Eskişehir iline yönelik bir örnek problem oluşturulmuştur. Söz konusu örnek probleme dair sayısal sonuçlar bir yandan modelin gerçek hayat problemlerinde uygulanabilirliğini kanıtlayan bir yandan da bazı yönetimsel çıkarımları beraberinde getirmiştir.

İlk olarak, 2 trafo merkezi, 10 dağıtım merkezi, 30 dağıtım transformatörü ve 100 saha dağıtım kutusundan oluşan bir problemin öne sürülen matematiksel model ile kesin olarak çözülebildiği görülmüş; öne sürülen çözüm yaklaşımının küçük ve orta boyutlu gerçek hayat uygulamalarında kullanılabileceği sonucuna varılmıştır. İkinci olarak, modelin tesis açma kararlarını verirken kapasite gereksinimlerine ek olarak kablo maliyetlerini ve kablo boyutuna bağlı olarak değişen enerji kaybını da dikkate aldığı görülmüştür. Üçüncü olarak, talep parametresinin hem toplam tedarik zinciri maliyeti hem de tesis açma, kablolama ve akış kararları gibi ağ tasarımı kararları üzerinde belirgin bir etkisinin olduğu sonucuna varılmıştır. Son olarak, belirsizliğin etkisine dair yapılan analizlerden, belirsizlik seviyesi (varyans) arttıkça beklenen maliyetin arttığı, bu bağlamda sistemdeki belirsizlikleri azaltmaya yönelik çalışmaların dağıtım şirketlerinin başlıca öncelikleri arasında olması gerektiği sonucuna varılmıştır. Ayrıca, sayısal sonuçlar sistemdeki belirsizliği göz ardı etmenin ciddi ek maliyetler getirebileceğini de göstermiştir.

Bu çalışma gelecekte pek çok yönüyle geliştirilebilir. İlk olarak, bu çalışmada problem, endüstri mühendisliği bakış açısıyla ve çeşitli varsayımlarla, genel bir biçimde ele alınmıştır. Elektrik dağıtım ağlarındaki tesislere, kablolar ve enerji iletimine dair daha fazla teknik detayın göz önünde bulundurulması ve modelin bu doğrultuda düzenlenmesi önemli yönetimsel çıkarımları beraberinde getirebilir. İkinci olarak, her ne kadar küçük ve orta boyutlu problemlerde model çözüm verse de tedarik zinciri ağı tasarımı problemlerinin NP-Zor sınıfından problemler olduğu ve belli bir problem boyutundan sonra modelin çözüm vermeyeceği bilinen bir gerçektir. Bu bağlamda, büyük boyutlu problemler için iyi çalışan bir sezgisel/metasezgisel algoritma geliştirilmesi de geleceğe dönük bir diğer çalışma önerisi olarak sunulabilir. Son olarak, bu çalışmada senaryolar bağlamında ele alınan talep parametresi üzerinde ek analizlerin yapılması ve talep parametresinin uygun bir dağılımla ifade edilmesi de talepteki belirsizliğin etkisi konusunda farklı çıkarımlar sağlayabilir.

Kaynaklar (References)

1. Ganguly, S., Sahoo, N. C., Das, D., Mono-and multi-objective planning of electrical distribution networks using particle swarm optimization, *Applied Soft Computing*, 11 (2), 2391-2405, 2011.
2. Rafique, R., Mun, K. G., Zhao, Y., Designing energy supply chains: Dynamic models for energy security and economic prosperity, *Production and Operations Management*, 26 (6), 1120-1141, 2017.
3. Murele, O. C., Zulkafli, N. I., Kopanos, G., Hart, P., Hanak, D. P., Integrating biomass into energy supply chain networks, *Journal of Cleaner Production*, 248, 119246, 2020.
4. Zhong, H., Zhang, G., Tan, Z., Ruan, G., Wang, X., Hierarchical collaborative expansion planning for transmission and distribution networks considering transmission cost allocation, *Applied Energy*, 307, 118147, 2022.

5. Rafique, R., Jat, M., Chudhery, M. A. Z., Bioenergy supply chain optimization for addressing energy deficiency: A dynamic model for large-scale network designs, *Journal of Cleaner Production*, 318, 128495, 2021.
6. Santoso, T., Ahmed, S., Goetschalckx, M., Shapiro, A., A stochastic programming approach for supply chain network design under uncertainty, *European Journal of Operational Research*, 167 (1), 96-115, 2005.
7. Bidhandi, H. M., Yusuff, R. M., Ahmad, M. M. H. M., Bakar, M. R. A., Development of a new approach for deterministic supply chain network design, *European Journal of Operational Research*, 198 (1), 121-128, 2009.
8. Alumur, S. A., Nickel, S., Saldanha-da-Gama, F., Verter, V., Multi-period reverse logistics network design. *European Journal of Operational Research*, 220 (1), 67-78, 2012.
9. Correia, I., Melo, T., Saldanha-da-Gama, F., Comparing classical performance measures for a multi-period, two-echelon supply chain network design problem with sizing decisions, *Computers & Industrial Engineering*, 64 (1), 366-380, 2013.
10. Yildiz, H., Yoon, J., Talluri, S., Ho, W., Reliable supply chain network design, *Decision Sciences*, 47 (4), 661-698, 2016.
11. Savadkoobi, E., Mousazadeh, M., Torabi, S. A., A possibilistic location-inventory model for multi-period perishable pharmaceutical supply chain network design, *Chemical Engineering Research and Design*, 138, 490-505, 2018.
12. Wang, J., Wang, X., Yu, M., Multi-period multi-product supply chain network design in the competitive environment. *Mathematical Problems in Engineering*, 2020, 1-15, 2020.
13. Govindan, K., Mina, H., Esmacili, A., Gholami-Zanjani, S. M., An integrated hybrid approach for circular supplier selection and closed loop supply chain network design under uncertainty, *Journal of Cleaner Production*, 242, 118317, 2020.
14. Hasani, A., Mokhtari, H., Fattahi, M., A multi-objective optimization approach for green and resilient supply chain network design: a real-life case study, *Journal of Cleaner Production*, 278, 123199, 2021.
15. Kazancoglu, Y., Yuksel, D., Sezer, M. D., Mangla, S. K., Hua, L., A green dual-channel closed-loop supply chain network design model, *Journal of Cleaner Production*, 332, 130062, 2022.
16. Alegoz, M., Kaya, O., Bayindir, Z. P., Closing the loop in supply chains: Economic and environmental effects, *Computers & Industrial Engineering*, 142, 106366, 2020.
17. Abbasi, S., Daneshmand-Mehr, M., Ghane Kanafi, A., Green closed-loop supply chain network design during the coronavirus (COVID-19) pandemic: A case study in the Iranian automotive industry, *Environmental Modeling & Assessment*, 28 (1), 69-103, 2023.
18. Kumar, A., Kumar, K., An uncertain sustainable supply chain network design for regulating greenhouse gas emission and supply chain cost, *Cleaner Logistics and Supply Chain*, 10, 100142, 2024.
19. Tirkolae, E. B., Golpira, H., Javanmardan, A., Maihami, R., A socio-economic optimization model for blood supply chain network design during the COVID-19 pandemic: An interactive possibilistic programming approach for a real case study, *Socio-Economic Planning Sciences*, 85, 101439, 2023.
20. Hu, H., Guo, S., Zhen, L., Wang, S., Bian, Y., A multi-product and multi-period supply chain network design problem with price-sensitive demand and incremental quantity discount, *Expert Systems with Applications*, 238, 122005, 2024.
21. Farzan, N., Mahmoodirad, A., Niroomand, S., Molla-Alizadeh-Zavardehi, S., A sustainable uncertain integrated supply chain network design and assembly line balancing problem with U-shaped assembly lines and multi-mode demand, *Soft Computing*, 28 (4), 2967-2986, 2024.
22. Dündar A.O., Tekin M., Peker K., Şahman M.A, Karaoğlan İ., A mathematical model for multi-period multi-stage multi-mode multi-product capacitated wheat supply network design problem and a case study, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 37 (1), 265-282, 2022.
23. Hamzaçebi C., Kutay F., Electric consumption forecasting of Turkey using artificial neural networks up to year 2010, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 19 (3), 227-233, 2004.
24. Bilici Z., Özdemir D., Comparative analysis of metaheuristic optimization algorithms for natural gas demand forecast with meteorological parameters, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 38 (2), 1153-1167, 2023.
25. Balıkcı V., Gemici Z., Taner T., Dalkılıç A.S., Forecasting natural gas demand in Istanbul by artificial neural networks method and planning of city gate stations, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 39 (2), 1017-1027, 2024.

