



Multi-period location-routing models for the replenishment of products in neighborhood disaster stations

Naz Şengüler*^{ID}, Mehmet Alegöz^{ID}

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

Highlights:

- We consider the replenishment of perishable products in neighborhood disaster stations.
- We propose multi-period location-routing models.
- We test the models on a real-life case study

Keywords:

- Neighborhood disaster station
- Location-routing problem
- Stochastic programming
- Mixed-integer linear programming

Article Info:

Research Article

Received: 12.09.2024

Accepted: 07.03.2025

DOI:

10.17341/gazimmfd.1549003

Correspondence:

Author: Naz Şengüler

e-mail:

nazsenguler@eskisehir.edu.tr

phone: +90 222 213 8217

Graphical/Tabular Abstract

Neighborhood disaster stations, which are considered among the disaster preparedness activities, are containers that are established to meet the urgent needs of a neighborhood after a disaster until an organized relief aid arrives. These containers contain perishable products such as food and health products and considering that the time of the disaster is uncertain, it becomes necessary to replenish the products whose expiration dates are approaching. Motivated by this fact, in this study, we consider a network as presented in Figure A, and propose multi-period location-routing models which determines the routes to replenish the perishable products in neighborhood disaster stations and determines the locations of the warehouses that serves the neighborhood disaster stations. Performances of the proposed models in real life instances are tested on a case study regarding the Tepebaşı district of Eskişehir. Computational results demonstrate the applicability of the models on real-life instances and bring important managerial insights.

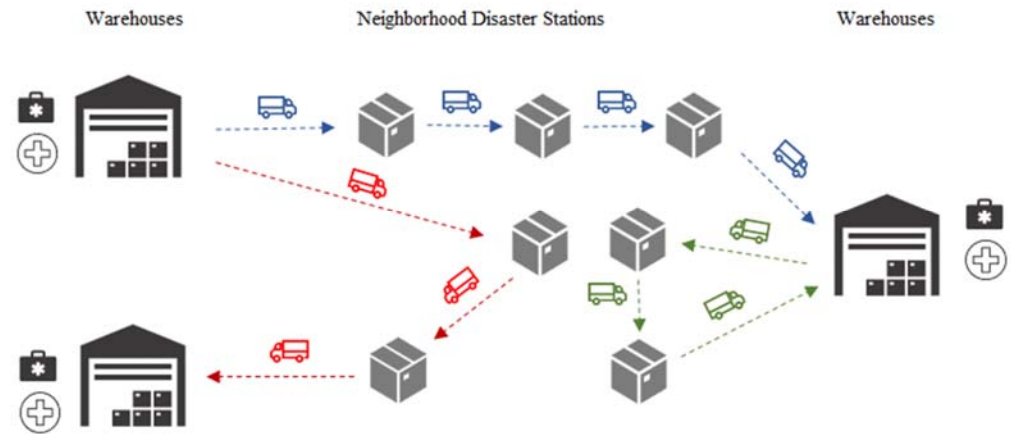


Figure A. Distribution Network

Purpose: Proposing solution approaches for the replenishment decisions of the perishable products in the neighborhood disaster stations (NDSs) and location decisions of the warehouses that serves the NDSs.

Theory and Methods: Three models are proposed for three different cases. In the first case, it is assumed that the vehicles used to replenish the neighborhood disaster stations are identical, and a homogeneous-fleet, multi-period location routing model is proposed. In the second case, the homogeneity assumption is relaxed, and a heterogeneous-fleet, multi-period location routing model is proposed. Finally, in the last case, the replenishment times of the neighborhood disaster stations are assumed to be uncertain, and a stochastic heterogeneous-fleet, multi-period location routing model is proposed.

Results: Computational results reveal that small changes in the model such as relaxing the homogenous fleet assumption and allowing a heterogenous fleet significantly increase the solution time (from 6 minutes to 90 minutes in our case). Moreover, we observe that using a heterogenous fleet may be beneficial in terms of decreasing the total cost since it allows using small vehicles in the low-demand periods.

Conclusion: Proposed solution approaches can be used in small and medium size real-life problems. However, a heuristic/metaheuristic approach is necessary for the large size instances of the problem.



Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi

Journal of The Faculty of Engineering
and Architecture of Gazi University

Elektronik / Online ISSN : 1304 - 4915
Basılı / Printed ISSN : 1300 - 1884

Mahalle afet istasyonlarındaki ürünlerin yenilenmesi için çok periyotlu lokasyon-rotalama modelleri

Naz Şengüler*, Mehmet Alegöz

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

ÖNEÇIKANLAR

- Mahalle afet istasyonlarındaki bozulabilir ürünlerin yenilenmesine odaklanılmıştır
- Çok periyotlu lokasyon-rotalama modelleri öne sürülmüştür
- Öne sürülen modeller bir gerçek hayat uygulamasında test edilmiştir

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 12.09.2024

Kabul: 07.03.2025

DOI:

10.17341/gazimmfd.1549003

Anahtar Kelimeler:

Mahalle afet istasyonu,
lokasyon-rotalama problemi,
stokastik programlama,
karma tamsayılı doğrusal
programlama

ÖZ

Afet öncesi gerçekleştirilen hazırlık çalışmaları kapsamında değerlendirilen mahalle afet istasyonları, olası bir afet durumunda organize yardım gelene kadar yerleşim alanının ihtiyaçlarını karşılamak amacıyla kurulan, içerisinde gıda ve sağlık ürünleri gibi ürünlerin bulunduğu konteyner yapılarıdır. Mahalle afet istasyonlarında depolanan ürünlerin bozulabilir olduğu ve afetin gerçekleşme zamanının belirsiz olduğu göz önünde bulundugunda son kullanma tarihi yaklaşan ürünlerin yenilenmesi gerekliliği ortaya çıkmaktadır. Bu gerçekten hareketle, bu çalışmada mahalle afet istasyonlarında bulunan bozulabilir ürünlerin stoklarının yenilenmesi sürecinde kullanılacak rotaların ve söz konusu istasyonlara ürünlerin gönderildiği depoların yerlerinin belirlenmesi için çok periyotlu lokasyon-rotalama modelleri öne sürülmüştür. Öne sürülen modellerin gerçek hayat uygulamalarında kullanılabilirliği Eskişehir ili Tepebaşı ilçesine yönelik bir örnek problem ile test edilmiştir. Hesaplama sonuçları bir yandan öne sürülen modellerin gerçek hayat problemlerinde uygulanabilirliğini ortaya koyarken, diğer yandan önemli bazı yönetimsel çıkarımları da beraberinde getirmiştir.

Multi-period location-routing models for the replenishment of products in neighborhood disaster stations

HIGHLIGHTS

- We consider the replenishment of perishable products in neighborhood disaster stations
- We propose multi-period location-routing models
- We test the models on a real-life case study

Article Info

Research Article

Received: 12.09.2024

Accepted: 07.03.2025

DOI:

10.17341/gazimmfd.1549003

Keywords:

Neighborhood disaster
station, Location-routing
problem, Stochastic
programming, Mixed-integer
linear programming

ABSTRACT

Neighborhood disaster stations, which are considered among the disaster preparedness activities, are containers that are established to meet the urgent needs of a neighborhood after a disaster until an organized relief aid arrives. These containers contain perishable products such as food and health products and considering that the time of the disaster is uncertain, it becomes necessary to replenish the products whose expiration dates are approaching. Motivated by this fact, in this study, we propose multi-period location-routing models which determines the routes to replenish the perishable products in neighborhood disaster stations and determines the locations of the warehouses that serves the neighborhood disaster stations. Performances of the proposed models in real life instances are tested on a case study regarding the Tepebaşı district of Eskişehir. On one hand, computational results demonstrate the applicability of the models on real-life instances, on the other hand, they bring important managerial insights.

1. Giriş (Introduction)

Türkiye, bulunduğu coğrafya ve özellikleri nedeni ile depremler başta olmak üzere heyelan, sel, kaya düşmesi ve çığ gibi çeşitli afetlerin gerçekleşmesine açık durumdadır. 1980–2017 yılları arasında meydana gelen afetler incelendiğinde, Türkiye’de bir milyon kişi başına yılda ortalama 6-25 kişinin doğa kaynaklı afetler nedeniyle hayatını kaybettiği görülmektedir [1]. Afetlerin yol açtığı beşerî ve ekonomik kayıplar açısından Türkiye, Ekonomik Kalkınma ve İşbirliği Örgütü (OECD) ülkeleri arasında ilk sıralarda yer almaktadır [2].

Afet öncesi hazırlık yapma ve zararını en aza indirme çalışmaları olası bir afet durumunda süreçlerin etkinliğini artırılması adına büyük önem teşkil etmektedir. Mahalle afet istasyonları, afet öncesi hazırlık çalışmaları kapsamında değerlendirilen özel olarak tasarlanmış konteynerlerdir. Bu konteynerlerde ilaçlar, antiseptikler, temiz su, kurutulmuş ve konserve ürünler gibi birçok farklı ürün depolanabilir. Bu ürünler bir afetten hemen sonra, organize bir yardım gelene kadar kullanılabilir. Mahalle afet istasyonunun bir örneği Şekil 1’de verilmiştir [3]. Mahalle afet istasyonlarının doğal afet riski taşıyan bölgelere yerleştirilmesi konusu üzerinde durulması gereken önemli bir konu olarak öne çıkmaktadır [4].



Şekil 1. Mahalle afet istasyonu (Neighborhood disaster stations) [5]

Bu çalışmada mahalle afet istasyonu olarak ifade edilen konteynerlerin içerisindeki ürünlerin yenilenmesi ve bu istasyonlara ürün sağlayan depoların yerlerinin seçimi probleminin odaklanılmış; bu problem için çok periyotlu lokasyon-rotalama modelleri öne sürülmüştür. Öne sürülen modeller üç durumda ele alınmıştır. İlk durumda, mahalle afet istasyonlarını yenilemek için kullanılan araçların aynı olduğunu varsayılmış ve homojen filolu, çok periyotlu bir lokasyon-rotalama modeli önerilmiştir. İkinci durumda, homojenlik varsayımı gevşetilmiş ve heterojen filolu, çok periyotlu bir lokasyon-rotalama modeli önerilmiştir. Son olarak, mahalle afet istasyonlarının yenileme zamanlarının belirsiz olduğunu varsayılmış ve belirsizlik altında heterojen filolu, çok periyotlu bir lokasyon-rotalama modeli önerilmiştir. Öne sürülen modellerin gerçek hayat uygulamalarında kullanılabilirliği Eskişehir ili Tepebaşı ilçesine yönelik bir örnek problem ile test edilmiştir. Hesaplama sonuçları ve elde edilen bulgular detaylı olarak tartışılmış ve önemli bazı yönetimsel çıkarımlar elde edilmiştir.

Bu makale şu şekilde organize edilmiştir. Sonraki bölümde literatür taramasına yer verilmiş, bu çalışmanın literatürdeki çalışmalarından farkları detaylı bir biçimde tartışılmıştır. Üçüncü bölüm problem tanımına, dördüncü bölüm ise problem tanımı çerçevesinde geliştirilen çok periyotlu lokasyon-rotalama modellerine ayrılmıştır. Beşinci bölümde örnek problem ve sayısal sonuçlara yer verilmiş, elde edilen hesaplama sonuçları doğrultusunda altıncı bölümdeki değerlendirmeler ve geleceğe dönük çalışma önerileri ile makale sonlandırılmıştır.

2. Literatür Taraması (Literature Review)

Literatürde insani yardım lojistiği kapsamında afet türleri ve afet evrelerine göre farklı çözüm yaklaşımları öne süren çalışmalar mevcuttur. Literatür irdelendiğinde yavaş gelişen afetlere odaklanan çalışmaların hızlı gelişen afetlere odaklanan çalışmalara kıyasla görece daha az olduğu dikkat çekmektedir. Bu çalışmalara örnek olarak, Ferreira vd. [6] yavaş gerçekleşen afetlere yönelik insani yardım operasyonlarında bozulabilir ürünlerin envanter yönetimi için bağış ve talep belirsizliğini dikkate alan Markov Karar Süreçleri bazlı bir model öne sürmüştür. Öne sürülen model ile insani yardım kuruluşlarının müdahale kabiliyetinin artırılması ve siyasi krizler, kuraklıklar gibi yavaş gerçekleşen afetlerin savunmasız bir toplum üzerindeki etkilerinin azaltılması amaçlamıştır. Bir diğer çalışmada ise Jiang vd. [7] büyük ölçekli salgın hastalık durumlarında taze gıdaların paketlenmesi ve araç rotalama problemi için çok amaçlı, çok ürünlü bir matematiksel model ve genetik algoritma temelli bir çözüm yaklaşımı öne sürmüştür. Öne sürülen model COVID-19’a yönelik Wuhan temelli bir gerçek hayat uygulamasında test edilmiş ve modelin gerçek hayat uygulamalarında kullanılabilirliği tartışılmıştır.

Hızlı gerçekleşen afetlere yönelik literatürdeki çalışmalar incelendiğinde bu çalışmalardan bazılarının afet öncesi hazırlık aşamasına odaklandığı görülmektedir. Örnek olarak, Rawls ve Turnquist [8] afet öncesinde acil durum tesislerin yeri ve kapasitesi ile envanterin bu tesislere atanmasına odaklanan karma tamsayılı bir stokastik programlama modeli öne sürmüştür. Sonrasında Rawls ve Turnquist [9] bu çalışmayı hizmet kalitesi kısıtları ekleyerek geliştirmiştir. Görmez vd. [10] İstanbul Büyükşehir Belediyesi’nin yardım malzemelerini yerleştirebileceği ve olası bir afetten sonra operasyonları yürütmekte kullanabileceği afet tesisleri kurmayı planladığını belirtmiş; bu amaçla mevcut tesisleri göz önünde bulunduran ve yeni tesislerin nerede açılacağına karar veren modeller öne sürmüştür. Rezaei-Malek vd. [11] afet öncesi aşamada bozulabilir ürün stoklarının yenilenmesine odaklanan bir matematiksel model öne sürmüştür. Öne sürülen modelin uygulanabilirliği İran’a yönelik bir gerçek hayat uygulamasında test edilmiş ve başarılı sonuçlar elde edildiği görülmüştür.

Yukarıdakilerden farklı olarak literatürdeki bazı çalışmalar afet sonrası müdahale aşamasına odaklanmaktadır. Örnek olarak, Özdamar vd. [12] acil durumlarda her zaman olduğu gibi araçların depolara dönmeyeceğini çünkü mevcut depolardaki sınırlı kaynakların tükenebileceğini ve yeni kaynakların farklı noktalara gelebileceğini belirtmiş, problemin bu karakteristiği doğrultusunda bir araç rotalama modeli öne sürmüştür. Hsueh vd. [13] insani yardım operasyonlarında ilk anda karar vericilerin araç rotalama için gerekli olan tüm bilgilere sahip olmadığını; talep, ulaşım süresi gibi bilgilerin dinamik bir şekilde değiştiğini belirtmiş ve bahsi geçen problem için bir dinamik araç rotalama modeli öne sürmüştür. Yi ve Özdamar [14] afet sonrasında lojistik ve tahliye operasyonlarını birlikte ele alan karma tam sayılı programlama temelli bir lokasyon-dağıtım modeli öne sürmüştür. Akbari vd. [15] afet sonrasında yolların onarılması problemi için kesin ve sezgisel çözüm yaklaşımları öne sürmüş, öne sürülen çözüm yaklaşımlarını İstanbul’a yönelik bir gerçek hayat probleminde test etmiştir. Fragkos vd. [16] acil bir durumdan etkilenen sivilere ve acil durum sonrası yardım sağlayan müdahale gruplarına erzak tedarik etme problemi için bir karma tamsayılı programlama modeli ve bir sezgisel yaklaşım öne sürmüştür. Wang vd. [17] afet sonrası tedarik ve tahsis probleminin odaklanmış bu problemin çözümü için iki seviyeli çok amaçlı bir model öne sürmüştür.

Son olarak literatürdeki bazı çalışmalar hem afet öncesi hazırlık hem de afet sonrasında müdahale aşamasına odaklanmaktadır. Örnek

olarak, Tavana vd. [18] afet öncesi aşamada merkezi depoların yerlerine ve bozulabilir ürünlerin envanterlerinin yönetimine; afet sonrası aşamada ise yardım araçlarının rotalamasına odaklanan bir model öne sürmüştür, öne sürülen modelin çözümü için metasezgisel yaklaşımlar geliştirilmiştir. Qezelbash-Chamak vd. [19], afet öncesi hazırlık operasyonları kapsamında depoların konumlarının ve envanter seviyelerinin belirlenmesine; afet sonrası müdahale sürecinde ise araçların rotalanmasına yönelik iki aşamalı bir stokastik programlama modeli öne sürmüştür. Wang [20] afet öncesi aşamada dağıtım merkezlerine ilişkin lokasyon kararlarına, afet sonrası aşamada ise envanter seviyesi ve dağıtım kararlarına yönelik iki aşamalı bir stokastik programlama modeli öne sürmüştür. Aliakbari vd. [21] talep ve taşıma süresi belirsizliği altında afet öncesi ve afet sonrası operasyonlarını göz önünde bulunduran çok periyotlu, çok ürünli bir stokastik araç rotalama modeli ve genetik algoritma temelli bir çözüm yaklaşımı öne sürmüştür. Barzinpour ve Esmali [22] acil durum yönetim üslerinin yerini belirleme ve afetten etkilenen insanları bu üslere atamaya odaklanan çok amaçlı bir karma tam sayılı programlama modeli öne sürmüştür; öne sürülen modeli bir gerçek hayat uygulamasında test etmiştir.

Bu çalışmada sadece afete hazırlık aşamasına odaklanılmış; mahalle afet istasyonlarındaki bozulabilir ürün envanterinin yenilenmesi ve bu mahalle afet istasyonlarına hizmet verecek depo ya da depoların seçimi problemi için planlama ufku boyunca oluşan toplam tedarik zinciri maliyetini enküçükleyen çok periyotlu lokasyon-rotalama modelleri öne sürülmüştür. Bu yönüyle çalışma yukarıdaki çalışmalardan ayrılmaktadır. Bu çalışmaya yakın çalışmalar olarak Gökçe ve Ercan [3] ve Yoruk vd. [23] ele alınabilir. Gökçe ve Ercan [3] mahalle afet istasyonlarındaki ilaç, ağrı kesici, antiseptik ve konserve gibi acil yardım malzemelerinin yenilenmesi problemine odaklanmıştır. Yoruk vd. [23] ise mahalle afet istasyonlarının yerlerine ve mahalle afet istasyonlarını ziyaret etmek için oluşturulacak rotaya karar veren bir karma tam sayılı programlama modeli öne sürmüştür.

Bu çalışmanın söz konusu çalışmalardan temel farkları şöyle sıralanabilir: Gökçe ve Ercan [3] ve Yoruk vd.'den [23] farklı olarak bu çalışmada mahalle afet istasyonlarındaki ürünlerin bozulma zamanının belirsiz olduğu durum da ele alınmış ve bu duruma yönelik iki aşamalı bir stokastik programlama modeli öne sürülmüştür. Gökçe ve Ercan'dan [3] farklı olarak bu çalışmada sadece rotalama problemine odaklanılmamış, aynı zamanda mahalle afet istasyonlarına hizmet verecek depoların seçimi problemi de rotalama problemi ile bütünleşik şekilde ele alınmıştır. Bu bağlamda problem bir lokasyon-rotalama problemi olarak modellenmiştir. Yoruk vd.'den [23] farklı olarak bu çalışmada mahalle afet istasyonlarının yerlerine değil mahalle afet istasyonlarına hizmet veren depoların yerlerine karar verilmesi amaçlanmıştır. Gökçe ve Ercan [3] geleceğe dönük çalışma önerilerinde bu probleme dair bir gerçek hayat uygulaması yapılmasının öneminden söz etmiştir. Bu bağlamda, bu çalışmada Eskişehir Tepebaşı ilçesine yönelik bir gerçek hayat uygulamasına odaklanılmıştır.

3. Problem Tanımı (Problem Definition)

Daha önce bahsedildiği üzere afet öncesi süreç dahilinde afete hazırlık çalışmaları gerçekleştirmek büyük önem arz etmektedir. Afete hazırlık çalışmaları kapsamında değerlendirilebilecek alternatiflerden biri de mahalle afet istasyonları olarak adlandırılan, bir afetten sonra organize bir yardım gelene kadar kullanılabilir ürünlerin depolandığı konteyner yapılarıdır. Bu istasyonlarda depolanan ürünler arama kurtarma malzemeleri, battaniye vb. yenilemeye ihtiyaç duyulmayan ürünler olabileceği gibi ilaç, gıda maddeleri vb. zamanla bozulabilir ürünler de olabilmektedir. Bu sebeple söz konusu

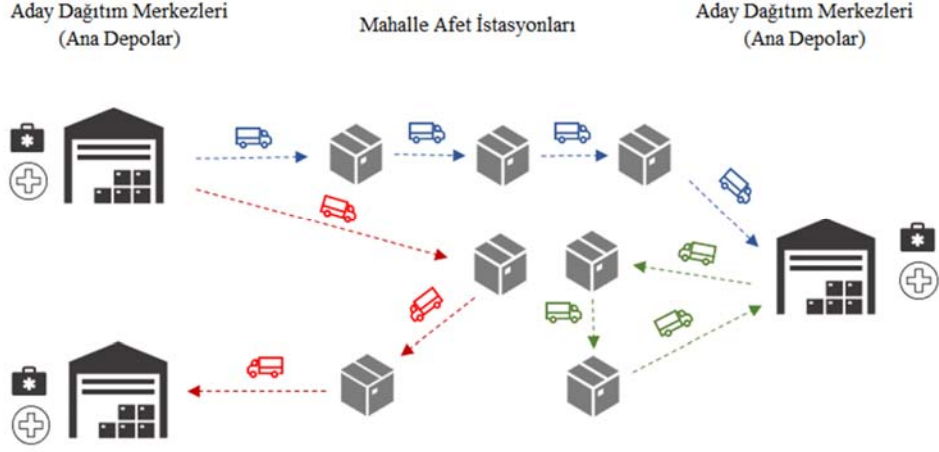
istasyonlardaki ürünlerin son kullanma tarihi yaklaştığında yenileri ile değiştirilmesi ve son kullanma tarihi yaklaşan ürünlerin başka yerlerde kullanıma sunulması (satılması, dağıtılması vs.) gerekmektedir.

Yukarıdaki açıklamalar doğrultusunda bu çalışmada mahalle afet istasyonlarındaki bozulabilir ürünlerin yenilenmesi ve söz konusu mahalle afet istasyonlarına hizmet verecek depoların belirlenmesi problemine odaklanılmıştır. Problem kapsamında mahalle afet istasyonlarının yerlerinin sabit ve biliniyor olduğu, bu istasyonların her bir mahallede mahalle muhtarlığının bulunduğu konumda olduğu varsayılmıştır. Her bir periyotta söz konusu mahalle afet istasyonlarının hangisinde yenilenmesi gereken bir ürün varsa o istasyona uğranması gerekmektedir.

Mahalle afet istasyonlarına ürünler depolardan gönderilmektedir. Bu çalışma kapsamında bu depoların açılacağı belli sayıda aday depo lokasyonu olduğu göz önünde bulundurulmuştur. Her bir lokasyonda depo açmanın planlama ufku boyunca oluşacak bir sabit maliyeti vardır, bu maliyet doğrultusunda öne sürülen çözüm yaklaşımı gerekli gördüğü sayıda depo açabilir. Depo yerlerinin bir kere belirlendikten sonra planlama ufku boyunca değiştirilemeyeceği, yani her bir periyotta farklı depoların açılmayacağı göz önünde bulundurulmuştur.

Taşıma işlemleri için farklı tiplerde araçlar olduğu varsayılmıştır. Araçlar birbirlerinden taşıma kapasitesi, periyodik sabit maliyet ve periyodik değişken maliyet bağlamında farklılık göstermektedir, örnek olarak küçük bir aracın sabit ve değişken taşıma maliyeti düşüktür ancak buna karşın kapasitesi de düşüktür. Büyük bir aracın ise sabit ve değişken maliyetleri görece fazladır ancak kapasitesi de fazladır. Bu doğrultuda, öne sürülen çözüm yaklaşımının her bir periyotta yenilenmesi gereken ürün miktarını dikkate alarak uygun araç seçimi yapması beklenmektedir. Her bir aracın depodan çıktıktan sonra uğranması gereken mahalle afet istasyonlarına uğradıktan sonra depoya geri dönmesi beklenmektedir. Bu kapalı turda alt turların oluşmaması (uğranılan bir mahalle afet istasyonuna tekrar uğranmaması) istenmektedir. Ancak, gerekli görülürse her bir periyotta birden fazla araçla birden fazla tur oluşturulabilir. Örnek olarak, uğranması gereken 45 mahalle afet istasyonu olduğunu varsayalım. İki araçtan ilki bir depodan başlayıp bu istasyonlardan 25 tanesine uğrayabilir ve sonrasında aynı veya farklı bir depoya dönebilir, diğer araç ise yine bir depodan başlayıp kalan 20 istasyona uğrayabilir ve tekrar depoya dönebilir. Problem Şekil 2'de görselleştirilmiştir.

Yukarıdaki açıklamalar doğrultusunda bu problem için farklı durumlarda kullanılacak üç farklı model öne sürülmüştür. Birinci modelde, mahalle afet istasyonlarına ürünleri taşıyacak tek tip araç olduğu varsayılmış ve açılacak depoların yerleri ile her bir periyottaki rotalara karar veren çok periyotlu homojen filolu bir lokasyon-rotalama modeli öne sürülmüştür. Sonrasında bu model, farklı tip araçların olması durumuna göre güncellenmiş ve ikinci model olarak çok periyotlu heterojen filolu lokasyon-rotalama modeli öne sürülmüştür. Öne sürülen son matematiksel model ise her bir periyotta toplanacak ürünlerin neler olduğunun önceden bilinmediği, yani her bir periyotta uğranacak mahalle afet istasyonlarının belirsiz olduğu duruma odaklanmaktadır. Bu durum için, birinci aşamada açılacak depoların yerlerinin belirlendiği, ikinci aşamada ise her bir periyotta kullanılacak araçların belirlendiği ve rotaların oluşturulduğu belirsizlik altında çok periyotlu heterojen filolu lokasyon-rotalama modeli öne sürülmüştür. Öne sürülen modellerin tümü planlama ufku boyunca depoları açmanın sabit maliyeti, araçların periyodik sabit maliyeti ve araçların değişken maliyetinin toplamından oluşan toplam tedarik zinciri maliyetini enküçükmektedir.



Şekil 2. Örnek dağıtım ağı (Sample distribution network)

4. Matematiksel Model (Mathematical Model)

Bu bölümde, ele alınan problem için geliştirilen matematiksel modeller sunulmuştur.

4.1. Model 1-Çok Periyotlu Homojen Filolu Lokasyon-Rotalama Modeli

(Model 1-Homogenous-fleet, Multi-period Location-routing Model)

Bu alt bölümde, mahalle afet istasyonlarını ziyaret edebilecek tek tip aracın olduğu (homojen filolu) ve her bir periyotta ziyaret edilmesi gereken mahalle afet istasyonlarının önceden bilindiği durum için bir matematiksel model öne sürülmüştür. Öne sürülen modele yönelik kümeler, parametreler ve karar değişkenleri şöyle ifade edilebilir:

Kümeler

I : Aday depolar kümesi, i indisi ile gösterilir.

J, K : Aynı mahalle afet istasyonlarını ifade eden kümeler, j, k indisleri ile gösterilir

T : Periyotlar kümesi t indisi ile gösterilir.

Parametreler

a_{ij} : i . depo ve j . mahalle afet istasyonu arası mesafe (km)

b_{jk} : j . mahalle afet istasyonu ve k . mahalle afet istasyonu arası mesafe (km)

d_{jt} : j . mahalle istasyonunda t . periyotta yenilenmesi gereken ürün varsa 1, diğer durumda 0 değerini alan ikili parametre (bu parametre sadece 0 veya 1 değerini almaktadır.)

f_i : i . deponun açılma maliyeti (\$)

e : aracın birim taşıma maliyeti (\$/km)

g : aracın periyodik sabit maliyeti (\$)

q : aracın bir turda ziyaret etmesi gereken minimum mahalle afet istasyonu sayısı

r : aracın uğrayabileceği maksimum istasyon sayısı (araç kapasitesi)

M : Yeterince büyük bir sayı (r 'den büyük herhangi bir değer kullanılabilir.)

Karar Değişkenleri

δ_{ijt} : t . periyotta i . dağıtım merkezinden j . mahalle afet istasyonuna gidilecek ise 1, diğer durumda 0 değerini alan ikili (binary) değişken.

γ_{jkt} : t . periyotta j . mahalle afet istasyonundan k . mahalle afet istasyonuna gidilecek ise 1, diğer durumda 0 değerini alan ikili (binary) değişken.

ϕ_{kit} : t . periyotta k . mahalle afet istasyonundan i . dağıtım merkezine gidilecek ise 1, diğer durumda 0 değerini alan ikili (binary) değişken.

ω_i : i . dağıtım merkezi açılacak ise 1, diğer durumda 0 değerini alan ikili (binary) değişken.

ϑ_{jt} : t . periyotta j . mahalle afet istasyonunun turdaki ziyaret edilme sırası

Bu notasyona göre, öne sürülen modelin amaç fonksiyonu Eş. 1'de ve kısıtları ise Eş. 2 – Eş. 12'de sunulmuştur.

$$\min z = \left[\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{t=1}^T \delta_{ijt} a_{ij} e + \sum_{j=1}^J \sum_{k \neq j}^K \sum_{t=1}^T \gamma_{jkt} b_{jk} e + \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^I \sum_{t=1}^T \phi_{kit} a_{ik} e + \sum_{i=1}^I \omega_i f_i + \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{t=1}^T \delta_{ijt} g \right] \quad (1)$$

$$\sum_{i=1}^I \delta_{ijt} + \sum_{k \neq j}^K \gamma_{kjt} = d_{jt} \quad \forall j, t \quad (2)$$

$$\sum_{k \neq j}^K \gamma_{jkt} + \sum_{i=1}^I \phi_{jit} = d_{jt} \quad \forall j, t \quad (3)$$

$$\sum_{j=1}^J \sum_{k \neq j}^K \gamma_{jkt} \leq M \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \delta_{ijt} \quad \forall t \quad (4)$$

$$\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \delta_{ijt} = \sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^I \phi_{jit} \quad \forall t \quad (5)$$

$$\sum_{j=1}^J \delta_{ijt} \leq M \omega_i \quad \forall i, t \quad (6)$$

$$\sum_{k=1}^K \phi_{kit} \leq M \omega_i \quad \forall i, t \quad (7)$$

$$\vartheta_{jt} \leq M d_{jt} \quad \forall j, t \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \vartheta_{jt} + (r-2) \sum_{i=1}^I \delta_{ijt} - \sum_{i=1}^I \phi_{jit} \\ \leq (r-1) \\ + M(1-d_{jt}) \quad \forall j, t \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \vartheta_{jt} + \sum_{i=1}^I \delta_{ijt} + (2-q) \sum_{i=1}^I \phi_{jit} \\ \geq 2 - M(1-d_{jt}) \quad \forall j, t \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \vartheta_{jt} - \vartheta_{kt} + r\gamma_{jkt} + (r-2)\gamma_{kjt} \\ \leq (r-1) + M(1-d_{jt}) \\ + M(1-d_{kt}) \quad \forall j, k \neq j, t \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \delta_{ijt}, \gamma_{jkt}, \phi_{kit}, \omega_i \in \{0, 1\}; \\ \vartheta_{jt} \geq 0 \text{ ve tamsayı} \end{aligned} \quad (12)$$

(1) numaralı eşitlikte verilen amaç fonksiyonu planlama ufku boyunca oluşan toplam maliyeti enküçükleme. Bu maliyet sırasıyla taşıma maliyetleri, depo açma maliyetleri ve sabit araç maliyetlerinden oluşmaktadır. (2) numaralı kısıt kümesi eğer t periyodunda j mahalle istasyonunda yenilenmesi gereken ürün varsa, yani söz konusu mahalle istasyonuna uğranması gerekiyorsa, söz konusu istasyona ya bir depodan ya da başka bir istasyondan gidilebileceğini ifade etmektedir. (3) numaralı kısıt kümesi eğer t periyodunda j mahalle istasyonunda yenilenmesi gereken ürün varsa, söz konusu istasyona uğrandıktan sonra ya bir depoya ya da başka bir istasyona gidilebileceğini garanti altına almaktadır. (4) numaralı kısıt kümesi herhangi bir periyotta bir aracın mahalle afet istasyonları arasında dolaşabilmesi için öncelikle o aracın bir depodan çıkması gerektiğini ifade etmektedir. (5) numaralı kısıt kümesi herhangi bir periyotta depodan çıkan bir aracın yine depoya dönmesi gerektiğini ifade etmektedir. Burada, söz konusu aracın aynı depoya dönmek zorunluluğu bulunmamaktadır. (6) numaralı kısıt kümesi herhangi bir depodan bir mahalle afet istasyonuna taşıma yapılabilmesi için öncelikle söz konusu deponun açılmış olması gerektiğini ifade etmektedir. (7) numaralı kısıt kümesi herhangi bir mahalle afet istasyonundan bir depoya taşıma yapılabilmesi için öncelikle söz konusu deponun açılmış olması gerektiğini ifade etmektedir. (8) numaralı kısıt kümesi eğer bir mahalle afet istasyonunda bir periyotta yenilenmesi gereken ürün varsa ϑ_{jt} değişkeninin pozitif değer alabileceğini yani söz konusu mahalle afet istasyonunun herhangi bir aracın turunda olabileceğini ifade etmektedir. (9)-(11) numaralı kısıt kümeleri alt tur engelleme kısıtlarıdır. Bu kısıtlar Kara ve Bektaş [24] kısıtlarının revize edilmiş halidir. Eğer herhangi bir periyotta bir mahalle afet istasyonunda yenilenmesi gereken bir ürün yoksa söz konusu mahalle afet istasyonu hiçbir aracın turunda yer alamayacağı için (ϑ_{jt} değişkeni 0 değeri alacağı için) bu mahalle afet istasyonu için alt tur engelleme kısıtlarının olmaması gerekmektedir. Bu durum kısıtlara $M(1-d_{jt})$ ifadesi eklenerek gerçekleştirilmiştir. Yukarıdaki kısıtlardan, (9) numaralı kısıt kümesi aynı zamanda araç kapasitesi kısıtı olarak da düşünülebilir. Bu kısıta göre, uğranılacak olan mahalle afet istasyonu sayısı en fazla r kadar olabilmektedir. Son olarak, (12) kısıtı değişkenlerin türünü ve işaretini ifade belirlemektedir.

4.2. Model 2-Çok Periyotlu Heterojen Filolu Lokasyon-Rotalama Modeli

(Model 2-Heterogeneous-fleet, Multi-period Location-routing Model)

Önceki bölümden farklı olarak bu alt bölümde, mahalle afet istasyonlarını ziyaret edebilecek birden fazla tipte aracın olduğu (heterojen filo) varsayılmıştır çok periyotlu, heterojen filolu bir lokasyon rotalama modeli öne sürülmüştür. Öne sürülen modele yönelik kümeler, parametreler ve karar değişkenleri şöyle ifade edilebilir:

1942

Kümeler

I : Aday depolar kümesi, i indisi ile gösterilir.

J, K : Aynı mahalle afet istasyonlarını ifade eden kümeler, j, k indisleri ile gösterilir

L : Araçlar kümesi, l indisi ile gösterilir.

T : Periyotlar kümesi t indisi ile gösterilir.

Parametreler

a_{ij} : i . depo ve j . mahalle afet istasyonu arası mesafe (km)

b_{jk} : j . mahalle afet istasyonu ve k . mahalle afet istasyonu arası mesafe (km)

d_{jt} : j . mahalle istasyonunda t . periyotta yenilenmesi gereken ürün varsa 1, diğer durumda 0 değerini alan ikili parametre (bu parametre sadece 0 veya 1 değerini almaktadır.)

f_i : i . deponun açılma maliyeti (\$)

e_l : l . aracın birim taşıma maliyeti (\$/km)

g_l : l . aracın periyodik sabit maliyeti (\$)

q : aracın bir turda ziyaret etmesi gereken minimum mahalle afet istasyonu sayısı

r_l : l aracının uğrayabileceği maksimum istasyon sayısı (araç kapasitesi)

M : Yeterince büyük bir sayı (r 'den büyük herhangi bir değer kullanılabilir.)

Karar Değişkenleri

δ_{ijlt} : l aracı ile t . periyotta i . depodan j . mahalle afet istasyonuna gidilecek ise 1, diğer durumda 0 değerini alan ikili (binary) değişken.

γ_{jkl} : l aracı ile t . periyotta j . mahalle afet istasyonundan k . mahalle afet istasyonuna gidilecek ise 1, diğer durumda 0 değerini alan ikili (binary) değişken.

ϕ_{kilt} : l aracı ile t . periyotta k . mahalle afet istasyonundan i . depoya gidilecek ise 1, diğer durumda 0 değerini alan ikili (binary) değişken.

ω_i : i . dağıtım merkezi açılacak ise 1, diğer durumda 0 değerini alan ikili (binary) değişken.

θ_{jlt} : l aracı t . periyotta j . mahalle afet istasyonuna uğruyorsa 1, diğer durumda 0 değerini alan ikili (binary) değişken.

ϑ_{jt} : t . periyotta j . mahalle afet istasyonunun turdaki ziyaret edilme sırası

Bu notasyona göre, öne sürülen modelin amaç fonksiyonu Eş. 13'de ve kısıtları ise Eş. 14 – Eş. 26'da sunulmuştur.

$$\begin{aligned} \min z = & \left[\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{l=1}^L \sum_{t=1}^T \delta_{ijlt} a_{ij} e_l \right. \\ & + \sum_{j=1}^J \sum_{k \neq j}^K \sum_{l=1}^L \sum_{t=1}^T \gamma_{jkl} b_{jk} e_l \\ & + \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^I \sum_{l=1}^L \sum_{t=1}^T \phi_{kilt} a_{ik} e_l \\ & \left. + \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{l=1}^L \sum_{t=1}^T \delta_{ijlt} g_l + \sum_{i=1}^I \omega_i f_i \right] \end{aligned} \quad (13)$$

$$\sum_{i=1}^I \sum_{l=1}^L \delta_{ijlt} + \sum_{k \neq j}^K \sum_{l=1}^L \gamma_{jkl} = d_{jt} \quad \forall j, t \quad (14)$$

$$\sum_{k \neq j}^K \sum_{l=1}^L \gamma_{jkl} + \sum_{i=1}^I \sum_{l=1}^L \phi_{jilt} = d_{jt} \quad \forall j, t \quad (15)$$

$$\sum_{j=1}^J \sum_{k \neq j}^K \gamma_{jkl} \leq M \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \delta_{ijlt} \quad \forall l, t \quad (16)$$

$$\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \delta_{ijlt} = \sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^I \phi_{jilt} \quad \forall l, t \quad (17)$$

$$\sum_{i=1}^I \delta_{ijlt} + \sum_{k \neq j}^K \gamma_{kjlt} = \sum_{k \neq j}^K \gamma_{kjlt} + \sum_{i=1}^I \phi_{jilt} \quad \forall j, l, t \quad (18)$$

$$\sum_{j=1}^J \sum_{l=1}^L \delta_{ijlt} \leq M \omega_i \quad \forall i, t \quad (19)$$

$$\sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^L \phi_{kilt} \leq M \omega_i \quad \forall i, t \quad (20)$$

$$\theta_{jlt} = \sum_{i=1}^I \delta_{ijlt} + \sum_{k \neq j}^K \gamma_{kjlt} \quad \forall j, l, t \quad (21)$$

$$\theta_{jt} \leq M d_{jt} \quad \forall j, l, t \quad (22)$$

$$\begin{aligned} \theta_{jt} + (r_l - 2) \sum_{i=1}^I \delta_{ijlt} - \sum_{i=1}^I \phi_{jilt} \\ \leq (r_l - 1) + M(1 - d_{jt}) \\ + M(1 - \theta_{jlt}) \quad \forall j, l, t \end{aligned} \quad (23)$$

$$\begin{aligned} \theta_{jt} + \sum_{i=1}^I \delta_{ijlt} + (2 - q) \sum_{i=1}^I \phi_{jilt} \\ \geq 2 - M(1 - d_{jt}) \\ - M(1 - \theta_{jlt}) \quad \forall j, l, t \end{aligned} \quad (24)$$

$$\begin{aligned} \theta_{jt} - \theta_{kt} + r_l \gamma_{jklt} + (r_t - 2) \gamma_{kjlt} \\ \leq (r_l - 1) + M(1 - d_{jt}) \\ + M(1 - d_{kt}) + M(1 - \theta_{jlt}) \\ + M(1 - \theta_{klt}) \quad \forall j, k \neq j, l, t \end{aligned} \quad (25)$$

$$\begin{aligned} \delta_{ijlt}, \gamma_{jklt}, \phi_{kilt}, \omega_i, \theta_{jlt} \in \{0, 1\}; \\ \theta_{jt} \geq 0 \text{ ve tamsayı} \end{aligned} \quad (26)$$

(13) numaralı eşitlikte verilen amaç fonksiyonu planlama ufku boyunca (T periyot) oluşan toplam maliyeti enküçükmektedir. Önceki modelden farklı olarak bu modelde maliyet değerleri kullanılan araçlara bağlı olarak değişmektedir. (14) numaralı kısıt kümesi eğer t periyodunda j mahalle istasyonunda yenilenmesi gereken ürün varsa, yani söz konusu mahalle istasyonuna uğranması gerekiyorsa, söz konusu istasyona bir l aracıyla ya bir depodan ya da başka bir istasyondan gelinebileceğini ifade etmektedir. (15) numaralı kısıt kümesi eğer t periyodunda j mahalle istasyonunda yenilenmesi gereken ürün varsa, yani söz konusu mahalle istasyonuna uğranması gerekiyorsa, söz konusu istasyona bir l aracıyla uğrandıktan sonra ya bir depoya ya da başka bir istasyona gidilebileceğini ifade etmektedir. (16) numaralı kısıt kümesi herhangi bir periyotta bir l aracının mahalle afet istasyonları arasında dolaşabilmesi için öncelikle o aracın bir depodan çıkması gerektiğini ifade etmektedir. (17) numaralı kısıt kümesi herhangi bir periyotta bir l aracı depodan çıktıysa yine depoya dönmesi gerektiğini ifade etmektedir. Burada, söz konusu aracın aynı depoya dönme zorunluluğu bulunmamaktadır. (18) numaralı kısıt kümesi mahalle afet istasyonlarına giriş ve çıkışları dengeleyen kısıttır. (19) numaralı kısıt kümesi herhangi bir depodan bir mahalle

afet istasyonuna taşıma yapılabilmesi için öncelikle söz konusu deponun açılmış olması gerektiğini ifade etmektedir. (20) numaralı kısıt kümesi herhangi bir mahalle afet istasyonundan bir depoya taşıma yapılabilmesi için öncelikle söz konusu deponun açılmış olması gerektiğini ifade etmektedir. (21) numaralı kısıt kümesi j istasyonuna t periyodunda uğrayan aracın türünü belirlemektedir. (22) numaralı kısıt kümesi eğer bir mahalle afet istasyonunda bir periyotta yenilenmesi gereken ürün varsa θ_{jt} değişkeninin pozitif değer alabileceğini yani söz konusu mahalle afet istasyonunun herhangi bir aracın turunda olabileceğini ifade etmektedir. (23)-(25) numaralı kısıt kümeleri alt tur engelleme kısıtlarıdır. Bu kısıtlar Kara ve Bektaş [24] kısıtlarının revize edilmiş halidir. Eğer herhangi bir periyotta bir mahalle afet istasyonunda yenilenmesi gereken bir ürün yoksa söz konusu mahalle afet istasyonu turda yer alamayacağı için (θ_{jt} değişkeni 0 değeri alacağı için) bu mahalle afet istasyonu için alt tur engelleme kısıtlarının olmaması gerekmektedir. Bu durum kısıtlara $M(1 - d_{jt})$ ifadesi eklenerek gerçekleştirilmiştir. Benzer şekilde, eğer t periyodunda j noktasına l aracı uğramıyorsa (θ_{jlt} değişkeni 0 değerini alıyorsa) söz konusu j, l, t değerlerinde alt tur engelleme kısıtlarının olmaması gerekmektedir. Diğer bir ifadeyle, alt tur engelleme kısıtlarının sadece doğru araç türünde çalışması gerekmektedir. Bu durum modele $M(1 - \theta_{jlt})$ ifadesi eklenerek sağlanmıştır. Yukarıdaki kısıtlardan, (23) numaralı kısıt kümesi aynı zamanda araç kapasitesi kısıtı olarak da düşünülebilir. Bu kısıta göre, uğranılacak olan mahalle afet istasyonu sayısı en fazla r_l kadar olabilmektedir. (26) numaralı kısıt kümesi değişkenlerin türünü ve işaretini belirlemektedir.

4.3. Model 3-Belirsizlik Altında Çok Periyotlu Heterojen Filolu Lokasyon-Rotalama Modeli (Model 3 – Stochastic Heterogenous-fleet, Multi-period Location-routing Model)

Model 2'den farklı olarak bu alt bölümde, her bir periyotta ziyaret edilmesi gereken mahalle afet istasyonlarının belirsiz olduğu varsayılmış, bu varsayımı altında, ele alınan problem için iki aşamalı bir stokastik programlama modeli öne sürmüştür. Öne sürülen modele yönelik kümeler, parametreler ve karar değişkenleri şöyle ifade edilebilir:

Kümeler

I : Aday depolar kümesi, i indisi ile gösterilir.

J, K : Aynı mahalle afet istasyonlarını ifade eden kümeler, j, k indisleri ile gösterilir

L : Araçlar kümesi, l indisi ile gösterilir.

T : Periyotlar kümesi, t indisi ile gösterilir.

S : Senaryolar kümesi, s indisi ile gösterilir.

Parametreler

a_{ij} : i . depo ve j . mahalle afet istasyonu arası mesafe (km)

b_{jk} : j . mahalle afet istasyonu ve k . mahalle afet istasyonu arası mesafe (km)

d_{jt}^s : s senaryosunda j . mahalle istasyonunda t . periyotta yenilenmesi gereken ürün varsa 1, diğer durumda 0 değerini alan ikili değişken (bu parametre sadece 0 veya 1 değerini almaktadır.)

f_i : i . deponun açılma maliyeti (\$)

e_l : l . aracın birim taşıma maliyeti (\$/km)

g_l : l . aracın periyodik sabit maliyeti (\$)

q : bir aracın bir turda ziyaret etmesi gereken minimum mahalle afet istasyonu sayısı

r_l : l aracının uğrayabileceği maksimum istasyon sayısı (araç kapasitesi)

p^s : s senaryosunun gerçekleşme olasılığı

M : Yeterince büyük bir sayı (r 'den büyük herhangi bir değer kullanılabilir.)

Karar Değişkenleri

δ_{ijlt}^s : s senaryosunda l aracı ile t . periyotta i . depodan j . mahalle afet istasyonuna gidilecek ise 1, diğer durumda 0 değerini alan ikili (binary) değişken.

γ_{jklt}^s : s senaryosunda l aracı ile t . periyotta j . mahalle afet istasyonundan k . mahalle afet istasyonuna gidilecek ise 1, diğer durumda 0 değerini alan ikili (binary) değişken.

ϕ_{kilt}^s : s senaryosunda l aracı ile t . periyotta k . mahalle afet istasyonundan i . depoya gidilecek ise 1, diğer durumda 0 değerini alan ikili (binary) değişken.

ω_i : i . depo açılacak ise 1, diğer durumda 0 değerini alan ikili (binary) değişken.

θ_{jlt}^s : s senaryosunda, l aracı t . periyotta j . mahalle afet istasyonuna uğruyorsa 1, diğer durumda 0 değerini alan ikili (binary) değişken.

ϑ_{jt}^s : s senaryosunda t . periyotta j . afet istasyonunun turdaki ziyaret edilme sırası

Bu notasyona göre, öne sürülen modelin amaç fonksiyonu Eş. 27'de ve kısıtları ise Eş. 28 – Eş. 40'da sunulmuştur.

$$\begin{aligned} \min z = & \sum_{s=1}^S p^s \left[\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{l=1}^L \sum_{t=1}^T \delta_{ijlt}^s a_{ij} e_l \right. \\ & + \sum_{j=1}^J \sum_{k \neq j}^K \sum_{l=1}^L \sum_{t=1}^T \gamma_{jklt}^s b_{jk} e_l \\ & + \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^I \sum_{l=1}^L \sum_{t=1}^T \phi_{kilt}^s a_{ik} e_l \\ & \left. + \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{l=1}^L \sum_{t=1}^T \delta_{ijlt}^s g_l \right] + \sum_{i=1}^I \omega_i f_i \end{aligned} \quad (27)$$

$$\sum_{i=1}^I \sum_{l=1}^L \delta_{ijlt}^s + \sum_{k \neq j}^K \sum_{l=1}^L \gamma_{jklt}^s = d_{jt}^s \quad \forall j, t, s \quad (28)$$

$$\sum_{k \neq j}^K \sum_{l=1}^L \gamma_{jklt}^s + \sum_{i=1}^I \sum_{l=1}^L \phi_{jilt}^s = d_{jt}^s \quad \forall j, t, s \quad (29)$$

$$\sum_{j=1}^J \sum_{k \neq j}^K \gamma_{jklt}^s \leq M \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \delta_{ijlt}^s \quad \forall l, t, s \quad (30)$$

$$\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \delta_{ijlt}^s = \sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^I \phi_{jilt}^s \quad \forall l, t, s \quad (31)$$

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^I \delta_{ijlt}^s + \sum_{k \neq j}^K \gamma_{jklt}^s &= \sum_{k \neq j}^K \gamma_{jklt}^s \\ &+ \sum_{i=1}^I \phi_{jilt}^s \quad \forall j, l, t, s \end{aligned} \quad (32)$$

$$\sum_{j=1}^J \sum_{l=1}^L \delta_{ijlt}^s \leq \omega_i \quad \forall i, t, s \quad (33)$$

$$\sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^L \phi_{kilt}^s \leq \omega_i \quad \forall i, t, s \quad (34)$$

$$\theta_{jlt}^s = \sum_{i=1}^I \delta_{ijlt}^s + \sum_{k \neq j}^K \gamma_{jklt}^s \quad \forall j, l, t, s \quad (35)$$

$$\vartheta_{jt}^s \leq M d_{jt}^s \quad \forall j, l, t, s \quad (36)$$

$$\begin{aligned} \vartheta_{jt}^s + (r_l - 2) \sum_{i=1}^I \delta_{ijlt}^s - \sum_{i=1}^I \phi_{jilt}^s \\ \leq (r_l - 1) + M(1 - d_{jt}^s) \\ + M(1 - \theta_{jlt}^s) \quad \forall j, l, t, s \end{aligned} \quad (37)$$

$$\begin{aligned} \vartheta_{jt}^s + \sum_{i=1}^I \delta_{ijlt}^s + (2 - q) \sum_{i=1}^I \phi_{jilt}^s \\ \geq 2 - M(1 - d_{jt}^s) \\ + M(1 - \theta_{jlt}^s) \quad \forall j, l, t, s \end{aligned} \quad (38)$$

$$\begin{aligned} \vartheta_{jt}^s - \vartheta_{kt}^s + r_l \gamma_{jklt}^s + (r_l - 2) \gamma_{jklt}^s \\ \leq (r_l - 1) + M(1 - d_{jt}^s) \\ + M(1 - d_{kt}^s) + M(1 - \theta_{jlt}^s) \\ + M(1 - \theta_{klt}^s) \quad \forall j, k \neq j, l, t, s \end{aligned} \quad (39)$$

$$\begin{aligned} \delta_{ijlt}^s, \gamma_{jklt}^s, \phi_{kilt}^s, \omega_i, \theta_{jlt}^s \in \{0, 1\}; \\ \vartheta_{jt}^s \geq 0 \text{ ve tamsayı} \end{aligned} \quad (40)$$

(27) numaralı eşitlikte verilen amaç fonksiyonu planlama ufku boyunca beklenen toplam maliyeti enküçülemektedir. (28) numaralı kısıt kümesi eğer s senaryosunda, t periyodunda j mahalle istasyonunda yenilenmesi gereken ürün varsa, yani o senaryoda söz konusu mahalle istasyonuna uğranması gerekiyorsa, söz konusu istasyona ya bir depodan ya da başka bir istasyondan gelinebileceğini ifade etmektedir. (29) numaralı kısıt kümesi eğer s senaryosunda, t periyodunda j mahalle istasyonunda yenilenmesi gereken ürün varsa, yani söz konusu mahalle istasyonuna uğranması gerekiyorsa, söz konusu istasyona uğrandıktan sonra ya bir depoya ya da başka bir istasyona gidilebileceğini ifade etmektedir. (30) numaralı kısıt kümesi s senaryosunda, t periyodunda bir aracın mahalle afet istasyonları arasında dolaşabilmesi için öncelikle o aracın bir depodan çıkması gerektiğini ifade etmektedir. (31) numaralı kısıt kümesi s senaryosunda, t periyodunda bir l aracı depodan çıktıysa yine depoya dönmesi gerektiğini ifade etmektedir. Burada, söz konusu araç aynı depoya dönebileceği gibi farklı bir depoya da dönebilir. (32) numaralı kısıt kümesi mahalle afet istasyonlarına giriş ve çıkışları dengeleyen kısıttır. (33) numaralı kısıt kümesi bir s senaryosunda herhangi bir depodan bir mahalle afet istasyonuna taşıma yapılabilmesi için öncelikle söz konusu deponun açılmış olması gerektiğini ifade etmektedir. (34) numaralı kısıt kümesi bir s senaryosunda herhangi bir mahalle afet istasyonundan bir depoya taşıma yapılabilmesi için öncelikle söz konusu deponun açılmış olması gerektiğini ifade etmektedir. (35) numaralı kısıt kümesi, s senaryosunda, j istasyonuna t periyodunda uğrayan aracın türünü belirlemektedir. (36) numaralı kısıt kümesi eğer s senaryosunda t periyodunda bir mahalle afet istasyonunda yenilenmesi gereken ürün varsa ϑ_{jt}^s değişkeninin pozitif değer alabileceğini yani söz konusu mahalle afet istasyonunun herhangi bir aracın turunda olabileceğini ifade etmektedir. (37)-(39) numaralı kısıt kümeleri alt tur engelleme kısıtlarıdır. Bu kısıtlar Kara ve Bektaş [24] kısıtlarının revize edilmiş halidir. Eğer, s senaryosunda t periyodunda bir mahalle afet istasyonunda yenilenmesi gereken bir ürün yoksa söz konusu mahalle afet istasyonu turda yer alamayacağı için (ϑ_{jt}^s değişkeni 0 değerini alacağı için) bu mahalle afet istasyonu için alt tur engelleme kısıtlarının olmaması gerekmektedir. Bu durum kısıtlara $M(1 - d_{jt}^s)$ ifadesi eklenerek gerçekleştirilmiştir. Benzer şekilde, eğer s senaryosunda t periyodunda j noktasına l aracı

uğramıyorsa (θ_{jt}^s değişkeni 0 değerini alıyorsa) söz konusu j, l, t, s değerlerinde alt tur engelleme kısıtlarının olmaması gerekmektedir. Diğer bir ifadeyle, alt tur engelleme kısıtlarının sadece doğru araç türünde çalışması gerekmektedir. Bu durum modele $M(1 - \theta_{jt}^s)$ ifadesi eklenerek sağlanmıştır. Burada, (37) numaralı kısıt kümesi aynı zamanda araç kapasitesi kısıtı olarak da düşünülebilir. Bu kısıta göre, herhangi bir s senaryosunda uğranılacak olan mahalle afet istasyonu sayısı en fazla r_l kadar olabilmektedir. Son olarak (40) numaralı kısıt değişkenlerin türlerini ve işaretlerini belirlemektedir.

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

Bu çalışma kapsamında öne sürülen matematiksel modellerin uygulanabilirliğini test etmek amacı ile bir örnek problem oluşturulmuştur: Ele alınan örnek problemde, Eskişehir ili, Tepebaşı ilçesine odaklanılmış; bu ilçedeki 91 mahallenin her birinde tam olarak mahalle muhtarlığının bulunduğu konumda bir adet mahalle afet istasyonu olduğu varsayılmıştır. Her bir ay, herhangi bir mahalle afet istasyonunda yenilenmesi gereken ürün olup olmayacağı rassal olarak türetilmiştir. Örnek olarak, birinci ayda 35 istasyonda yenilenmesi gereken ürün varken, ikinci ayda 52 istasyonda yenilenmesi gereken ürün bulunmaktadır. Stokastik modelde (Model 3), ziyaret edilmesi gereken istasyonlar da düşük ve yüksek senaryolarda, ortalama senaryodan düşük ve yüksek olacak şekilde rassal olarak belirlenmiştir. Mahalleler arası karayolu uzaklıkları harita yazılımlarından elde edilmiştir. Mahalle afet istasyonlarına ürünlerin gönderileceği aday depo yerleri belirlenirken lojistik operasyonların kolayca yapılabilmesi, yeterli genişliğe sahip, ana yollara ve çevre yollarına kolayca ulaşım sağlanabilecek, şehrin nispeten dışında kalan 4 aday nokta belirlenmiştir. Depoların mahalle afet istasyonlarına uzaklıkları da harita yazılımlarından elde edilmiştir. Planlama ufku olarak 6 aylık bir zaman dilimi seçilmiştir. Aylık araç kiralama maliyetleri, birim taşıma maliyetleri ve 6 aylık depo kiralama maliyetleri açık kaynaklardan elde edilen bilgilerle yaklaşık olarak Tablo 1'deki gibi belirlenmiştir. Bu parametrelere göre üç model de GAMS paket programı CPLEX çözücüsünde çözdürülmüş, hesaplama sonuçları Tablo 2'de özetlenmiştir.

Hesaplama sonuçları birçok çıkarımı beraberinde getirmiştir. İlk olarak, modellerde yapılan değişikliklerin çözüm süresini belirgin bir

biçimde etkilediği görülmektedir. Nitekim, homojen filolu model 6 dakika gibi kısa bir sürede çözüm verirken, modele farklı özelliklerde (kapasite, sabit maliyet, değişken maliyet vs.) araçların eklenmesi çözüm süresini 15 kat artırarak 90 dakikaya çıkarmıştır. Benzer şekilde, modele rassallık eklenmesi ve 3 senaryonun dahil edilmesi çözüm süresini yaklaşık 13 kat artırarak 1,5 saatten 20 saate çıkarmıştır. Burada belirtilen süreler problemin çözdürüldüğü bilgisayarın özelliklerine ve ele alınan problemin yapısına göre değişebilecektir ancak genel anlamda lokasyon-rotalama problemlerinin yapılacak küçük değişikliklerden sonra bile çözülmesi çok zaman alan ya da çözülmesi mümkün olmayan problemler halini alabileceği sonucuna varılabilir.

Hesaplama sonuçlarında dikkat çeken bir diğer detay da heterojen filolu modelin homojen filolu modele göre daha düşük bir toplam maliyet vermesidir. Bunun sebebi, heterojen filolu modelde hem yüksek hem de düşük kapasiteli araçların olmasıdır. Bu sayede, ziyaret edilmesi gereken mahalle afet istasyonu sayısının az olduğu periyotlarda küçük araçlar kullanılırken, ziyaret edilmesi gereken mahalle afet istasyonu sayısının fazla olduğu periyotlarda büyük araçlar tercih edilmektedir. Homojen filolu modelde ise sadece tek tip ve yüksek kapasiteli araçlar vardır. Ziyaret edilmesi gereken istasyon sayısı az olduğunda da bu yüksek kapasiteli araçlar kullanılmakta, bu da gereksiz ek maliyet getirmektedir. Buradan, talep dalgalanmaları yaşayan lojistik firmalarının heterojen filolar kurmalarının maliyetleri azaltmada önemli bir rol oynayabileceği sonucuna varılabilir. Son olarak, Model 3'te yani belirsizlik durumunda beklenen maliyetin Model 1 ve Model 2'den daha az olduğu da görülmektedir ancak belirsizlik durumunda maliyetteki bu azalma anlamlı bir azalma değildir, Model 3 için ziyaret edilmesi gereken istasyon sayısı verileri düşük orta ve yüksek senaryoya göre rassal olarak üretilmiştir ve Model 3'teki beklenen maliyet değeri de bu yeni parametre değerleri ile açıklanabilir. Tablo 2'deki hesaplama sonuçları ayrıca, her üç modelin de bir depo açılmasına karar verdiğini göstermektedir. Aslında öne sürülen her üç modelde de birden fazla depo açılmasına ve araçların çıkış yaptığı depolardan farklı bir depoya dönmeye izin verilmektedir fakat bu problem özelinde her üç modelde de tek depo (Depo 1) açılmasına karar verilmiştir. Ele alınan problemde mesafelerin görece az, depo açma maliyetinin ise görece fazla olması bu durumun bir sebebi olarak gösterilebilir. Hesaplama sonuçlarına göre, her bir periyotta o periyotta ziyaret edilmesi gereken mahalle afet istasyonlarına göre farklı rotalar oluşabilmektedir. Ayrıca rassal

Tablo 1. Maliyet değerleri (Cost parameters)

Depo Maliyet	Depoların 6 Aylık Sabit Maliyetleri			
	Depo 1 \$2000	Depo 2 \$3500	Depo 3 \$2500	Depo 4 \$3000
Araç Maliyet	Araçların Aylık Sabit Maliyetleri			
	Araç 1 \$500	Araç 2 \$600	Araç 3 \$700	
Araç Maliyet	Araçların Kilometre Başına Birim Taşıma Maliyetleri			
	Araç 1 \$0,40	Araç 2 \$0,45	Araç 3 \$0,50	
Araç Kapasite	Araçların Kapasiteleri (Uğrayabilecekleri İstasyon Sayıları)			
	Araç 1 40	Araç 2 50	Araç 3 60	

Tablo 2. Hesaplama Sonuçları (Computational results)

Model	Karar Değişkeni Sayısı	Kısıt Sayısı	Optimal Maliyet	Açılan Depolar	Çözüm Süresi
Model 1 - Çok Periyotlu Homojen Filolu Araç Rotalama Modeli	54.604	53.027	\$7.081	Depo 1	6 dakika
Model 2 - Çok Periyotlu Heterojen Filolu Lokasyon-Rotalama Modeli	164.350	158.430	\$6.285	Depo 1	1,5 saat
Model 3 - Belirsizlik Altında Çok Periyotlu Heterojen Filolu Lokasyon-Rotalama Modeli	493.042	475.278	\$6.175	Depo 1	20 saat

modelde, rotalar senaryolara bağlı olarak da değişebilmektedir. Örnek olarak, her üç modelde de 6. aya yönelik rotalar Şekil 3, Şekil 4 ve Şekil 5'te sunulmuştur.

Hesaplama sonuçları incelendiğinde ayrıca her üç modelin de tüm periyotlarda tek bir araç ile tek bir tur oluşturduğu sonucuna varılabilir. Öne sürülen modellerin tümünde taleplerin birden fazla araç ile de karşılanabilmesi mümkündür. Örnek olarak, öne sürülen çok periyotlu homojen filolu araç rotalama modelinde (Model 1) aynı tip araç olması şartıyla mahalle afet istasyonlarının bazılarını bir araç ile bazılarını başka bir araç ile ziyaret etmek mümkün kılınmıştır. Model 2 ve Model 3'te aynı tip araç olması şartı da kaldırılmış; istenen sayıda ve türde araç kullanımı mümkün kılınmıştır. Buna rağmen tüm modellerde tek tip araç kullanılmasının sebebi araçların sabit maliyeti ile açıklanabilir.

Rotalar incelendiğinde göze çarpan bir diğer detay da Model 1 ve Model 2 tarafından oluşturulan rotaların aynı olmasıdır. Model 2'nin Model 1'in heterojen filolu hali olduğu göz önünde bulundurulduğunda bu durum makul görünmektedir. Diğer taraftan hesaplama sonuçları, rotalar aynı olmasına rağmen Model 1 ve Model 2'deki araç tercihlerinin yani aynı rotayı izleyecek araçların bazı periyotlarda farklılık gösterdiğini ortaya koymaktadır. Ziyaret edilmesi gereken istasyon sayısının az olduğu aylarda Model 2'de daha düşük kapasiteli araçlar tercih edilerek ekonomik bir avantaj sağlanırken, Model 1'de tek tip araç olduğu için söz konusu periyotlarda da yüksek kapasiteli araçlar tercih edilmektedir.

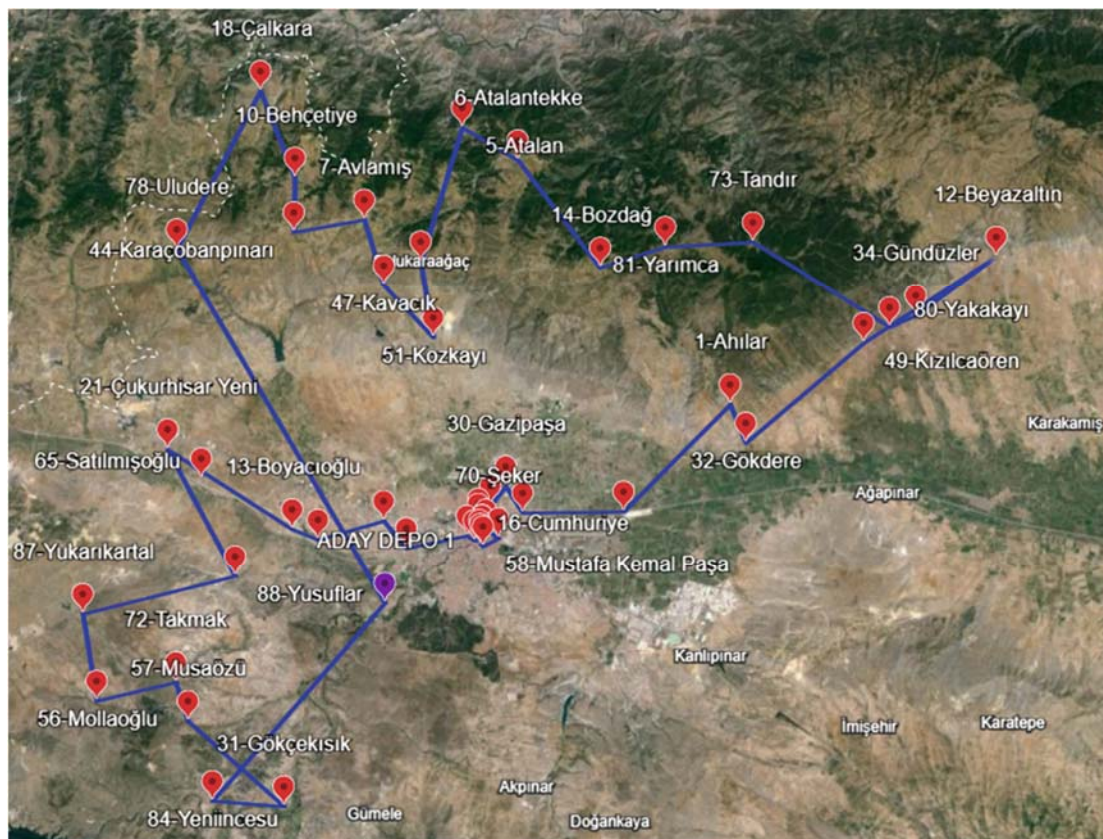
5.1. Maliyet Parametrelerinin Etkisi (Sensitivity analysis)

Bu bölümde maliyet parametrelerinin performans ölçütleri (toplam maliyet, açılan depolar, kullanılan araç sayısı vs.) üzerindeki etkisi

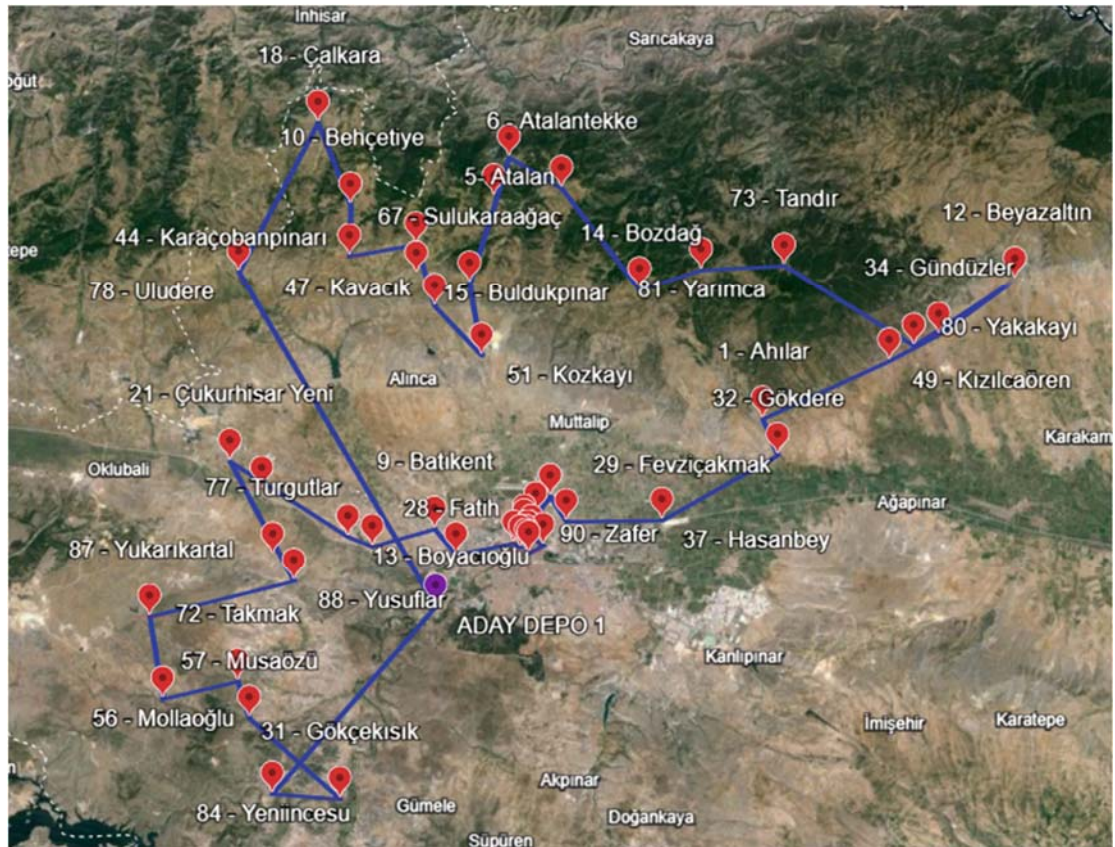
incelenmiştir. Bu amaçla her defasında bir parametrenin değeri temel problemdeki değerine kıyasla %50 ve %100 oranlarında artırılmış ve azaltılmış diğer parametrelerin değerleri sabit tutulmuştur. Hesaplama sonuçlarına göre parametre değişikliklerinde oluşan toplam maliyet değişiklikleri modeller bazında Şekil 6'da sunulmuştur. Burada, örnek olarak en baştaki mavi çubuk depoların altı aylık sabit maliyetleri %100 azaltıldığında toplam maliyetin Model 1'de yaklaşık %30 azaldığını ifade etmektedir.

Şekil 6 incelendiğinde, toplam tedarik zinciri maliyetine en çok etki eden maliyetin araçların 6 aylık sabit maliyetleri olduğu gözlemlenmektedir. Nitekim, her üç modelde de toplam tedarik zinciri maliyeti bu maliyetin arttığı durumlarda belirgin bir biçimde artarken, bu maliyetin azaltıldığı durumlarda da belirgin bir biçimde azalmaktadır. Bu gerçekten hareketle, karar vericilerin periyodik sabit maliyeti düşük araçları tercih etmesinin ya da periyodik sabit maliyeti düşük taşıyıcı firmalarla çalışmasının toplam tedarik zinciri maliyetini enküçükleme açısından çok önemli olduğu sonucuna varılabilir. Diğer taraftan, hesaplama sonuçları araçların birim maliyetinin ise toplam maliyet üzerinde görece daha az bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir.

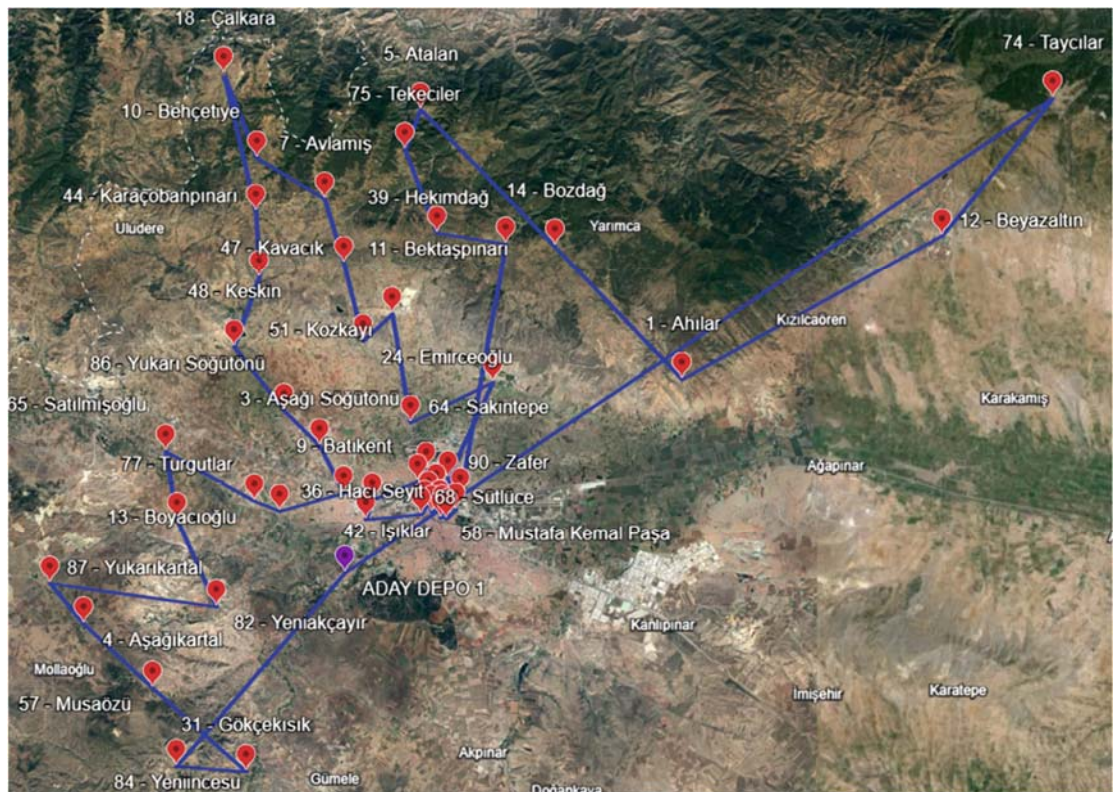
Açılan depolar incelendiğinde ise bir durum hariç diğer tüm durumlarda tek bir deponun (Depo 1) açıldığı gözlemlenmiştir. Sadece depoların 6 aylık sabit maliyetlerinin %100 azaltıldığı yani 0 olduğu durumda beklenildiği üzere tüm modellerde tüm depoların açılmasına karar verilmiştir. Son olarak, farklı durumlarda kullanılan araç sayıları incelendiğinde sadece araçların sabit maliyetlerinin %100 azaltıldığı durumda bir periyotta birden fazla araç kullanıldığı, diğer tüm durumlarda tüm periyotlarda tek bir aracın kullanıldığı sonucuna varılmıştır.



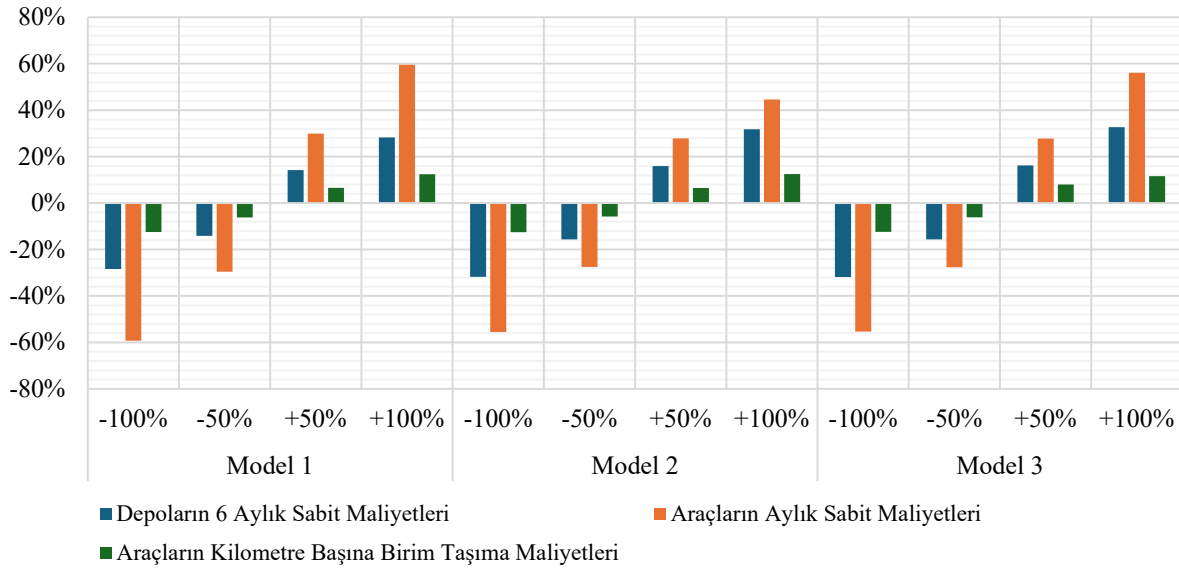
Şekil 3. 6. Ay İçin Oluşturulan Rota – Model 1 (Route for Month 6 – Model 1)



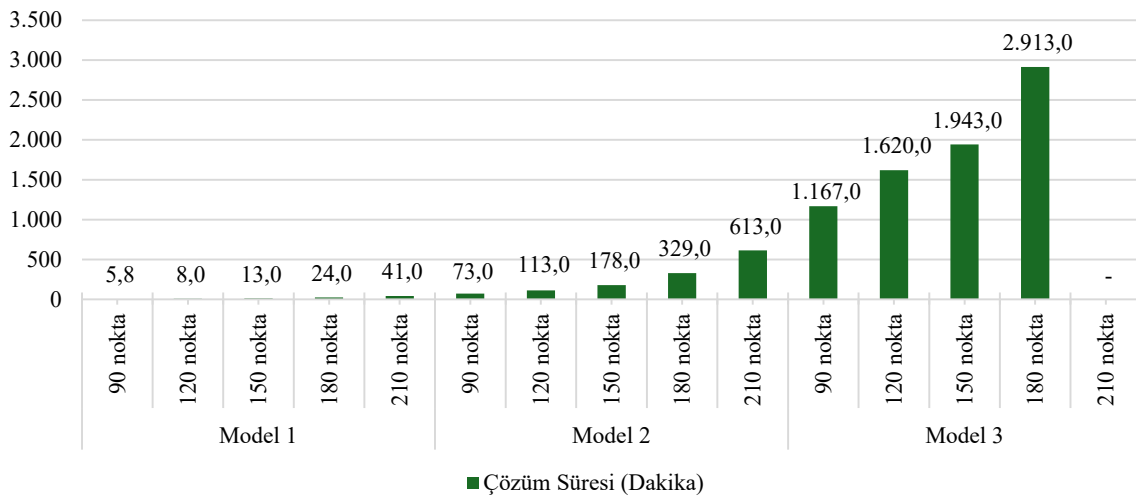
Şekil 4. 6. Ay İçin Oluşturulan Rota – Model 2 (Route for Month 6 – Model 2)



Şekil 5. 6. Ay İçin Oluşturulan Rota – Model 3, Senaryo 3 (Route for Month 6 – Model 3, Scenario 3)



Şekil 6. Maliyet Parametrelerinin Toplam Maliyete Etkisi (Effect of Cost Parameters on Total Cost)



Şekil 7. Farklı istasyon sayılarına sahip problemlerin çözüm süreleri (Solution times of the problems that have different stations)

5.2. İstasyon Sayısının Etkisi (Solving large-scale problems)

Önceki bölümdeki hesaplama sonuçları öne sürülen çözüm yaklaşımlarının 91 mahalle afet istasyonundan oluşan bir gerçek hayat probleminde uygulanabileceğini göstermektedir. Buna karşın, giriş bölümünde bahsedildiği üzere rotalama problemleri NP-Zor sınıfından problemlerdir. Bu sebeple, problem boyutu büyüdükçe çözüm süresinin belirgin bir biçimde artacağı ve belli bir boyutun üzerindeki problemlerde kesin çözüm yaklaşımlarıyla çözüm alınamayacağı bilinen bir gerçektir. Bu gerçekten hareketle bu bölümde modeller farklı istasyon sayıları ile test edilmiş, çözüm süreleri Şekil 7’de sunulmuştur. Şekil 7’deki istasyon sayıları ele alınan problemdeki toplam mahalle afet istasyonu sayılarını ifade etmektedir. Her bir periyotta ve senaryoda, bu mahalle afet istasyonlarının sadece belli bir kısmında yenilenmesi gereken ürün bulunmaktadır.

Şekil 7 incelendiğinde, beklendiği üzere istasyon sayısı arttıkça çözüm süresinin belirgin bir biçimde arttığı görülmektedir. Model 3’te

(heterojen filolu stokastik araç rotalama modeli) 180 istasyondan oluşan bir problemin çözüm süresi 48 saati geçmektedir. 48 saat uzun bir süre olsa da bu problemin bir tasarım problemi olduğu ve bir kere çözüldükten sonra planlama ufku boyunca kullanılacağı düşünüldüğünde bu sürenin kabul edilebilir bir süre olduğu söylenebilir. Ayrıca, 180 mahalle afet istasyonunun pek çok gerçek hayat uygulaması için yeterli bir boyut olduğu da düşünülebilir. Bu doğrultuda, öne sürülen çözüm yaklaşımlarının pek çok gerçek hayat uygulamasında kullanılabileceği sonucuna varılabilir. Diğer taraftan, hesaplama sonuçları belli bir problem boyutundan sonra çözüm alınmadığını da göstermiştir, bu tür problemler için ise kesin çözüm yaklaşımları yerine sezgisel ya da metasezgisel çözüm yaklaşımlarından yararlanmak mümkündür.

6. Sonuçlar ve Değerlendirmeler (Results and Discussions)

Bu çalışmada mahalle afet istasyonu ismi verilen, içerisinde gıda, tıbbi malzeme gibi ürünlerin depolandığı, afet sonrasında organize bir yardım gelene kadar mahallenin ihtiyaçlarını karşılaması beklenen

konteynerlerin içerisindeki ürünlerin yenilenmesi ve bu istasyonlara ürün sağlayan depoların yerlerinin seçimi problemine odaklanılmış, bu problem için (i) çok periyotlu homojen filolu lokasyon-rotalama modeli, (ii) çok periyotlu heterojen filolu lokasyon-rotalama modeli ve (iii) belirsizlik altında çok periyotlu heterojen filolu lokasyon-rotalama modeli olmak üzere 3 farklı model öne sürülmüştür. Öne sürülen modellerin gerçek hayat uygulamalarında kullanılabilirliğinin test edilmesi amacıyla Eskişehir ili Tepebaşı ilçesine yönelik örnek bir uygulama oluşturulmuş, modeller bu örnek problemde denenmiştir. Hesaplama sonuçları birçok yönetsel çıkarımı beraberinde getirmiştir.

Hesaplama sonuçları incelendiğinde homojen filolu modelin 6 dakikada, heterojen filolu modelin 1.5 saatte, belirsizlik altında heterojen filolu modelin ise 20 saatte çözüm verdiği görülmektedir. Ele alınan problemin bir tasarım problemi olduğu ve bir kere çözüm alındıktan sonra planlama ufku boyunca kullanılacağı düşünüldüğünde, bu sürelerin tümünün kabul edilebilir süreler olduğu sonucuna varılabilir ve öne sürülen modellerin gerçek hayat uygulamalarında kullanılabilir çözüm yaklaşımları olduğu değerlendirilebilir. Diğer taraftan, bu süreler lokasyon-rotalama modellerinde modele yapılacak eklemelerin çözüm süresini belirgin bir biçimde artırabileceğini ya da kesin çözüm yaklaşımları ile çözüm alınamamasına sebep olabileceğini de ortaya koymaktadır. İkinci olarak, hesaplama sonuçlarında heterojen filolu modelin toplam maliyet değerinin homojen filolu modelin toplam maliyet değerine kıyasla daha az olduğu gözlemlenmektedir. Bunun sebebi, heterojen filolu modelde az sayıda mahale afet istasyonuna uğranması gereken periyotlarda daha küçük ve daha az maliyetli araçların tercih edilmesidir. Bu tercihin maliyete ek olarak çevresel etki bağlamında da bir avantaj sağladığı açıktır. Bu gerçekten hareketle, talep dalgalanması yaşayan firmalarda araç çeşitliliğinin artırılmasının taşıma süreçlerinin etkinliğini artırmaya ve taşımadan kaynaklı maliyeti ve çevresel etkiyi azaltmaya katkı sağladığı savunulabilir.

Bu çalışma gelecekte pek çok farklı şekilde geliştirilebilir. İlk olarak, araç rotalama problemlerinin NP-Zor sınıfı problemlerden olduğu bilinmektedir. Hesaplama sonuçları da belli bir problem boyutundan sonra öne sürülen çözüm yaklaşımları ile çözüm alınamayacağını göstermektedir. Bu gerçekten hareketle, büyük boyutlu problemlerin çözümü için bir sezgisel/metasezgisel yaklaşımın geliştirilmesi yararlı olabilir. İkinci olarak, bu problemde sadece afet öncesi hazırlık aşaması dikkate alınmıştır. Problemin afet sonrası müdahale aşamasındaki bazı kararlar da dahil edilecek şekilde genişletilmesi, afet öncesinde ve afet sonrasında verilen kararların koordine edilmesi ve süreçlerin etkinliğinin artırılması açısından yararlı olabilir. Üçüncü olarak, çalışma kapsamında mahalle afet istasyonlarının yerlerinin sabit ve biliniyor olduğu varsayılmıştır. Problemin, mahalle afet istasyonlarının yerlerine de karar verilecek şekilde revize edilmesi geleceğe dönük bir çalışma önerisi olarak sunulabilir. Son olarak, istasyonlar bazında talep edilecek ürün tiplerinin ve miktarlarının da farklılık gösterdiği bir modelin kurulumu da geleceğe dönük önemli bir çalışma önerisi olarak değerlendirilebilir.

Kaynaklar (References)

1. AFAD Türkiye'de Afet Yönetimi ve Doğa Kaynaklı Afet İstatistikleri (2018). https://afad.gov.tr/kurumlar/afad.gov.tr/35429/xfiles/Turkiye_de_Afetler.pdf. Erişim tarihi Haziran 1, 2024.
2. AFAD Türkiye Afet Risk Azaltma Planı (2022). <https://www.afad.gov.tr/turkiye-afet-risk-azaltma-planı-tarap>. Erişim tarihi Haziran 1, 2024.
3. Gökçe, M. A., & Ercan, E., Multi-Period Vehicle Routing & Replenishment Problem of Neighbourhood Disaster Stations for Pre-Disaster Humanitarian Relief Logistics. IFAC-Papersonline, 52 (13), 2614-2619, 2019.
4. Yoruk, E., & Baykasoğlu, A. Research on Employing Containers as Pre-Disaster Storage Units to Enhance the Effectiveness of Post-Disaster Operations. Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University 40 (2), 815-828, 2025.
5. Hürriyet (2018). <https://www.hurriyet.com.tr/yerel-haberler/izmir/deprem-konteynerleri-yerlestirildi-40760594>. Erişim tarihi Haziran 1, 2024.
6. Ferreira, G. O., Arruda, E. F., & Marujo, L. G., Inventory Management Of Perishable Items In Long-Term Humanitarian Operations Using Markov Decision Processes. International Journal of Disaster Risk Reduction, 31, 460-469, 2018.
7. Jiang, Y., Bian, B., & Liu, Y., Integrated Multi-Item Packaging and Vehicle Routing with Split Delivery Problem for Fresh Agri-Product Emergency Supply at Large-Scale Epidemic Disease Context. Journal Of Traffic and Transportation Engineering (English Edition), 8 (2), 196-208, 2021.
8. Rawls, C. G., & Turnquist, M. A., Pre-Positioning Of Emergency Supplies for Disaster Response. Transportation Research Part B: Methodological, 44 (4), 521-534, 2010.
9. Rawls, C. G., & Turnquist, M. A., Pre-Positioning Planning for Emergency Response with Service Quality Constraints. OR Spectrum, 33, 481-498, 2011.
10. Görmez, N., Köksalan, M., & Salman, F. S., Locating disaster response facilities in Istanbul. Journal of the operational research society, 62 (7), 1239-1252, 2011.
11. Rezaei-Malek, M., Tavakkoli-Moghaddam, R., Zahiri, B., & Bozorgi-Amiri, A., An Interactive Approach for Designing a Robust Disaster Relief Logistics Network with Perishable Commodities. Computers & Industrial Engineering, 94, 201-215, 2016.
12. Özdamar, L., Ekinci, E., & Küçükyazıcı, B., Emergency Logistics Planning in Natural Disasters. Annals of Operations Research, 129, 217-245, 2004.
13. Hsueh, C. F., Chen, H. K., & Chou, H. W., Dynamic Vehicle Routing for Relief Logistics in Natural Disasters. Vehicle Routing Problem, 1, 71-84, 2008.
14. Yi, W., & Özdamar, L., A Dynamic Logistics Coordination Model for Evacuation And Support In Disaster Response Activities. European Journal of Operational Research, 179 (3), 1177-1193, 2007.
15. Akbari, V., Shiri, D., & Salman, F. S., An Online Optimization Approach to Post-Disaster Road Restoration. Transportation Research Part B: Methodological, 150, 1-25, 2021.
16. Fragkos, M. E., Zaimpekis, V., Koutras, V., & Minis, I., Supply Planning for Shelters and Emergency Management Crews. Operational Research, 1-37, 2022.
17. Wang, Q., Liu, Y., & Pei, H., Modelling A Bi-Level Multi-Objective Post-Disaster Humanitarian Relief Logistics Network Design Problem Under Uncertainty. Engineering Optimization, 56 (8), 1220-1254, 2024.
18. Tavana, M., Abtahi, A. R., Di Caprio, D., Hashemi, R., & Yousefi-Zenouz, R., An Integrated Location-Inventory-Routing Humanitarian Supply Chain Network with Pre- and Post-Disaster Management Considerations. Socio Economic Planning Sciences, 64, 21-37, 2018.
19. Qezelbash-Chamak, J., Badamchizadeh, S., & Seifi, A., A Fast-Response Mathematical Programming Approach for Delivering Disaster Relief Goods: An Earthquake Case Study. Transportation Letters, 16 (9), 1091-1114, 2024.
20. Wang, G., Disaster Relief Supply Chain Network Planning Under Uncertainty. Annals of Operations Research, 1-30, 2024.
21. Aliakbari, A., Rashidi Komijan, A., Tavakkoli-Moghaddam, R., & Najafi, E., A New Robust Optimization Model for Relief Logistics Planning Under Uncertainty: A Real-Case Study. Soft Computing, 26 (8), 3883-3901, 2022.
22. Barzinpour, F., & Esmaceli, V., A Multi-Objective Relief Chain Location Distribution Model for Urban Disaster Management. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 70, 1291-1302, 2014.
23. Yoruk, E., Baykasoğlu, A., & Avci, M. G., Location and Replenishment Problems of Disaster Stations for Humanitarian Relief Logistics Along with An Application. Natural Hazards, 119 (3), 1713-1734, 2023.
24. Kara, I., & Bektas, T., Integer Linear Programming Formulations of Multiple Salesman Problems and its Variations. European Journal of Operational Research, 174 (3), 1449-1458, 2006.

