

TOBB EKONOMİ VE TEKNOLOJİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**DOĞAL AFET ARDINDAN ETKİLİ BİR PLANLAMA YÖNTEMİ İÇİN YOL
TEMİZLEME VE YARDIM ARAÇLARININ EŞZAMANLI ROTALANMASI
PROBLEMİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Merve KADAN

Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Dr. Halenur ŞAHİN MAHMUTOĞULLARI

ARALIK 2022



TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, alıntı yapılan kaynaklara eksiksiz atıf yapıldığını, referansların tam olarak belirtildiğini ve ayrıca bu tezin TOBB ETÜ Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlandığını bildiririm.

MERVE KADAN

ÖZET

Yüksek Lisans/Doktora Tezi

DOĞAL AFET ARDINDAN ETKİLİ BİR PLANLAMA YÖNTEMİ İÇİN YOL TEMİZLEME VE YARDIM ARAÇLARININ EŞZAMANLI ROTALANMASI PROBLEMİ

Merve KADAN

TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Dr. Halenur ŞAHİN MAHMUTOĞULLARI

Tarih: Aralık 2022

Doğal afetler, meydana gelecekleri zaman öngörülemeyen, fiziksel, ekonomik ve sosyal kayıplar doğuran büyük çaplı doğa olaylarıdır. Afetler artlarında muhteviyatı değişebilen enkaz ismi verilen artıklar bırakmaktadır. Oluşan enkaz afet bölgesinde yolları kapatabilmekte ve ulaşım engel olabilmektedir. Ancak, afet ardından afet bölgesine olabildiğince hızlı ulaşmak gerekmektedir. Böylelikle afetzedelere yardım ulaştırılarak hayat kaliteleri yükseltilebilecektir.

Bu çalışmada afet ardından afet bölgesinde enkaz nedeniyle kapanan yolların açılması ve yardım malzemelerinin ihtiyaç duyulan düğümlere olabildiğince hızlı ulaştırılması süreçlerini senkronize bir şekilde ele alan bir problem ele alınmıştır. Problem kapsamında bir adet yol temizleme aracı ve birden fazla yardım malzemesi dağıtım aracı bulunduğu kabul edilmiştir. Problemin çözümüne yönelik karma tamsayılı doğrusal programlama modeli geliştirilmiştir. Geliştirilen model gerçekçi boyutlardaki problemler için kabul edilebilir sürede çözüm bulamadığından problemin çözümü için bir sezgisel algoritma geliştirilmiştir. Afet bölgesinde yer alan hastane ve okullar gibi ulaşılması önemli bölgeler kritik düğümler olarak kabul edilmiştir. Model kapsamında

kritik bölgelere yardım malzemesi ulaştırılmasına yönelik en hızlı rotalar belirlenmekte, rotada enkaz nedeniyle kapalı bir yol var ise söz konusu yol enkazdan temizlenmektedir. Araçlar turlarına eş zamanlı olarak başlamakta ve görevlerini senkronize icra etmektedir. Yol temizleme aracı bir yolu enkazdan tamamen temizlemeden yardım malzemesi dağıtım araçları o yolu kullanamamaktadır. Yolun temizlenme zamanı yardım malzemelerinin ulaşma zamanını etkilemektedir.

Geliştirilen karma tamsayılı doğrusal programlama modeli ve sezgisel algoritmanın farklı boyutlardaki veri setleri ile performanslarının test edilmesi bağlamında iki farklı veri seti ile çalışılmıştır. Buna ek olarak, tanımlanan problem kapsamında değişkenlik gösterebilecek olan enkaz nedeniyle yol kapanma oranı ve yardım malzemesi dağıtım aracı sayılarının geliştirilen çözümlere etkisinin anlaşılabilmesi amacıyla farklı yol kapanma oranları ve değişken yardım malzemesi araç sayıları ile çözümler denenmiştir. Ayrıca, farklı iterasyon sayılarının sezgisel algoritmanın performansına etkisi de analiz edilmiştir.

Bu çalışmanın literatüre temel katkısı yol temizleme ve yardım malzemesi dağıtım süreçlerini senkronize ele almasıdır. Bahse konu alanda literatürde sınırlı kaynak olması sebebiyle, geliştirilen modelin fayda sağlayabileceği değerlendirilmektedir.

Anahtar Kelimeler: İnsani yardım, Araç rotalama, Yardım malzemesi dağıtımı, Yol temizleme.

ABSTRACT

Master of Science/Doctor of Philosophy

**THE PROBLEM OF SIMULTANEOUS ROUTING OF ROAD CLEANING AND
RELIEF VEHICLES FOR AN EFFECTIVE PLANNING METHOD AFTER
NATURAL DISASTER**

Merve KADAN

TOBB University of Economics and Technology
Institute of Natural and Applied Sciences
Industrial Engineering Science Programme

Supervisor: Dr. Halenur ŞAHİN MAHMUTOĞULLARI

Date: December 2022

Natural disasters are large-scale natural events that are unpredictable and cause physical, economic and social losses. Disasters leave residues called debris, whose content can change. The debris can block roads and hinder transportation in the disaster area. However, it is necessary to reach the disaster area as quickly as possible after the disaster. Thus, the quality of life will be increased by delivering aid to the disaster victims.

In this study, a problem that deals with the processes of opening the roads closed due to debris in the disaster area and delivering the relief materials to the needed nodes as quickly as possible in a synchronized manner is discussed. It is assumed that there is one road cleaning vehicle and more than one aid delivery vehicle within the scope of the problem. A mixed integer linear programming model has been developed to solve the problem. Since the developed model could not find a solution in an acceptable time for realistic sized problems, a heuristic algorithm was developed to solve the problem. Nodes that are important to reach such as hospitals and schools in the disaster area are considered as critical nodes. Within the scope of the model, the fastest routes for the

delivery of relief materials to critical nodes are determined, and if there is a road closed due to debris on the route, the road in question is cleared of debris. Vehicles start their tours simultaneously and perform their tasks synchronously. Relief delivery vehicles cannot use that road until the road clearing vehicle completely clears a road of debris. The cleaning time of the road affects the arrival time of the relief materials.

In the context of testing the performance of the developed mixed integer linear programming model and the heuristic algorithm two different data sets were used. In addition, solutions with different road blockage rates and variable number of relief vehicles were considered in order to understand the effect of road closure rate and number of relief delivery vehicles on the solutions developed. In addition, the effect of different iteration numbers on the performance of the heuristic algorithm is also analyzed.

The main contribution of this study to the literature is the synchronization of road cleaning and relief material distribution processes. Due to the limited resources in the literature in the subject area, it is considered that the developed model can be beneficial.

Keywords: Humanitarian relief, Vehicle routing, Relief material distribution, Road cleaning.

TEŞEKKÜR

Desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen, her tür sorunumda yolumu aydınlatan, tüm yoğunluğuna rağmen bana vakit ayıran çok değerli tez danışmanım Sn. Halenur ŞAHİN MAHMUTOĞULLARI ile resmi olarak tez danışmanım olmasa da benim nezdimde eş danışmanım olan, bu çalışmada en az bizler kadar emeği bulunan Sn. Ali İrfan MAHMUTOĞULLARI'na kalpten teşekkürlerimi sunarım. Sizlerin sabrı, emekleri, disiplini, tecrübesi ve özverisi bu çalışmanın ortaya çıkmasını sağladı. Hem akademik danışmanlığınız hem de dostluğunuz için sonsuz minnettarım.

Tezime zaman ayıran, verdikleri görüşlerle tezimin olgunlaşmasına katkı sunan kıymetli hocalarım Sn. Eda YÜCEL ve Sn. Kamyar KARGAR MOHAMMADİNEZHAD'a çok teşekkür ederim.

Akademik çalışmamı destekleyen işyerim Türk Havacılık ve Uzay Sanayii'ne, iş-okul dengemi sağlayabilmem için elinden geleni yapan değerli yöneticim ve arkadaşım Kevser Sinem ŞİMŞEK TÜRELİ'ye ve mesaiyi keyifli kılan kıymetli iş arkadaşlarım Arda PEKER ve Fatih DURMUŞ'a teşekkür ederim.

Bütün hayatım boyunca en büyük destekçim olan canım annem, sana ayrıca teşekkür etmek istiyorum. En sıkışık zamanımda yetişip tezime odaklanabilmem için bana alan yarattın. Bu çalışma biraz da senin emeğindir. Biricik kız kardeşim Deniz, ablan olmak motivasyonu sayesinde başarabildiğim pek çok şey oldu hayatımda. Bu çalışma da onlardan birisidir. Ve babam, ihtiyacım olan her an yanımda olacağını bilmek ne büyük şans. İyi ki varsınız. Sizleri çok seviyorum.

Beraber büyüdüğüm sevgili dostlarım Tuğba ÇÖRTENLİOĞLU ve Şule Nur KAVUŞ HASÇELİK'e, manevi ablam, dostum Berat KILIÇ'a, bütün yüksek lisans eğitimim boyunca sonsuz yardımda bulunan dostlarım Cemre ERDOĞAN ve Ece İrem ÇORA'ya en başta varlıkları ardından da süreçteki destekleri için binlerce kez teşekkür ederim.

Son olarak, moralimin düştüğü, zorlandığım, yorulduğum her an yanımda bulduğum, bana sabretme gücü veren, beni motive eden sevgili Nurettin Bera YÜLEK'e ne kadar teşekkür etsem yetmeyecektir. Yanımda olduğun için çok şanslıyım. İyi ki varsın.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	iv
ABSTRACT	vi
TEŞEKKÜR	viii
ŞEKİL LİSTESİ	x
ÇİZELGE LİSTESİ	xi
KISALTMALAR	xii
SEMBOL LİSTESİ	xiii
1. GİRİŞ	1
2. PROBLEM TANIMI	7
3. LİTERATÜR TARAMASI	11
4. MATEMATİKSEL MODEL	19
5. SEZGİSEL ALGORİTMA	27
5.1 Sezgisel Algoritma Akış Grafiği.....	32
6. VERİ VE SONUÇLAR	33
6.1 Veri.....	33
6.2 Sonuçlar.....	36
7. SONUÇ VE GELECEK ÇALIŞMA ALANLARI	47
KAYNAKLAR	49
EKLER	53
ÖZGEÇMİŞ	Error! Bookmark not defined.

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1: Türkiye deprem haritası.....	3
Şekil 2.1: Örnek afet bölgesi ağ yapısı.....	8
Şekil 2.2:Yardım dağıtım araçları örnek rotası.....	9
Şekil 2.3: Yol temizleme aracı örnek rotası.	10
Şekil 3.1: Afet sonrası konu alan çalışmalara yönelik literatür taraması.	11
Şekil 5.1:Örnek yardım malzemesi dağıtım rotası.	27
Şekil 5.2:Yardım malzemesi dağıtım araçları rotası üzerinde gerçekleştirilebilecek operasyonlar.	29
Şekil 5.3:Yardım malzemesi dağıtım araçları rotaları.	30
Şekil 5.4:Yol temizleme aracı rotası.	30
Şekil 5.5:Yol temizleme aracı rotası üzerinde yapılan operasyonlar.....	31
Şekil 5.6:Yol temizleme aracı rotası üzerinde yapılan operasyonlar.....	32
Şekil 6.1: Kartal verisine ilişkin harita.....	35
Şekil 6.2: Turun Gantt şaması gösterimi.	45

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 1.1 :Tüm zamanların en fazla insan ölümüne sebep olan doğa olayları.....	2
Çizelge 1.2 :Tüm zamanların en fazla insan ölümüne sebep olan depremlerinde oluşan enkaz miktarları.....	4
Çizelge 3.1 : Bu çalışma ile benzerlik gösteren çalışmalar.	18
Çizelge 6.1 :CAD veri setine ilişkin bilgiler.	34
Çizelge 6.2 :Kartal veri setine ilişkin bilgiler.	34
Çizelge 6.3 :Geliştirilen model ve algoritmanın performansının analizine yönelik yapılan testlerde kullanılan konfigürasyonlar.	36
Çizelge 6.4 :CAD verisinin farklı konfigürasyonlarıyla elde edilen sonuçlar.....	37
Çizelge 6.5 :Kartal verisinin farklı konfigürasyonlarıyla elde edilen sonuçlar.	40

KISALTMALAR

AFAD	: T.C. İçişleri Bakanlığı Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı
CAD	: Caunhye ve diğ. (2020) alışmasında sunulan veri seti
GRASP	: Greedy Randomized Adaptive Search Procedure
VNS	: Variable Neighborhood Search
YDA	: Yardım Malzemesi Dağıtım Aracı
YTA	: Yol Temizleme Aracı



SEMBOL LİSTESİ

Bu çalışmada kullanılmış olan simgeler açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklama
d_{ij}	$(i, j) \in E$ ayrıtının uzunluğunu temsil eden parametre
U_{ij}	$(i, j) \in B$ ayrıtını enkazdan temizlemek için gereken süreyi temsil eden parametre
$x_{i,j}$	$(i, j) \in A$ yönlü ayrıtı yol temizleme aracı tarafından kullanıldıysa 1, diğer durumlarda 0
$z_{i,j}$	$(i, j) \in B$ ayrıtı yol temizleme aracı tarafından i 'den j 'ye giderken temizlendiyse 1, diğer durumlarda 0
$g_{i,j,l}$	Yol temizleme aracı $i, j, l \in N \cup \{s, t\}$ düğümlerini ardışık ziyaret ettiyse 1, diğer durumlarda 0
$f_{i,j}$	Yol temizleme aracı $(i, j) \in A$ ayrıtından geçerken tutulan akış değeri
y_i	Yol temizleme aracının $i \in N \cup \{s, t\}$ düğümünü ziyaret etme sayısı
$t_{i,j}$	Yol temizleme aracının $(i, j) \in E$ ayrıtından geçerek $j \in N$ düğümüne ulaşma zamanı
$o_{i,j}$	Yol temizleme aracının $(i, j) \in B$ ayrıtını temizleme zamanı
$yv_{v,i,j}$	$v \in V$ yardım malzemesi dağıtım aracı, $i \in N \cup \{s, t\}$ düğümü ardından $j \in N \cup \{s, t\}$ düğümünü ziyaret ettiyse 1, diğer durumlarda 0
$zv_{c,v}$	$v \in V$ yardım malzemesi dağıtım aracı, $c \in C$ kritik düğümünü ziyaret ettiyse 1, diğer durumlarda 0
$xv_{i,j,c,v}$	$v \in V$ yardım malzemesi dağıtım aracı, $c \in C \cup \{t\}$ kritik düğümüne $(i, j) \in A$ yönlü ayrıtını kullanarak gittiyse 1, diğer durumlarda 0
$tv_{i,c,v}$	$v \in V$ yardım malzemesi dağıtım aracının $c \in C \cup \{s, t\}$ kritik düğümüne giderken $i \in N$ düğümünden geçme zamanı
$uv_{i,v}$	$i \in C \cup \{s, t\}$ kritik düğümünün $v \in V$ aracının rotasındaki ziyaret sırası
$TT_{c,v}$	$v \in V$ yardım malzemesi dağıtım aracının $c \in C \cup \{s, t\}$ kritik düğümüne ulaşma zamanı

1. GİRİŞ

Doğal afetler, fiziksel, ekonomik ve sosyal kayıplar doğuran büyük çaplı doğa olaylarıdır. Doğal afetlerin bir bölümü dünyanın jeolojik yapısından kaynaklı meydana gelirken, bir kısmı ise insan etkileri ile ortaya çıkabilmektedir. Dünyanın yapısından kaynaklanan doğal afetler arasında deprem, volkanik olaylar, çığ, tsunami ve fırtınalar yer alırken; çarpık kentleşme, aşırı nüfus, çevre kirliliği, fosil yakıt kullanımı ve ormansızlaşma gibi insan kaynaklı faktörler ile tetiklenen doğal afetler arasında ise iklim değişimi ve toprak erozyonu yer almaktadır. İnsan kaynaklı faktörler arasında sayılan çevre kirliliği ve fosil yakıt kullanımı gibi etmenlerin sanayileşme ile artmış olması günümüzde meydana gelen doğal afet sayısını da artırmıştır. 1900 ile 2019 yılları arasında yaşanan doğal afetlere ilişkin veriler analiz edildiğinde, geçmişten bugüne doğal afetlerin iki kat arttığı görülmektedir (Our World in Data, 2022).

Doğal afetlerin başlıca sonuçları can ve mal kayıplarıdır. Tüm zamanların en fazla can kaybına sebep olan doğal afetleri Çizelge 1.1’de sunulmaktadır. Çizelgede görülebileceği üzere meydana gelen doğal afetlerde binlerce hatta milyonlarca can kaybı oluşabilmektedir. Çizelge 1.1’e ek olarak, yalnızca 2021 senesinde tüm dünyada meydana gelen 432 adet doğal afetin 10.492 kişinin hayatını kaybetmesine sebep olduğu bilinmektedir (Emergency Event Database,2021).

Çizelge 1.1.Tüm zamanların en fazla insan ölümüne sebep olan doğa olayları (Vikipedi, (2022)).

#	Doğal Afet	Ölü Sayısı	Tarih
1	Çin Seli	1.000.000-2.500.000	1931
2	Sarı Nehir Seli, Çin	900.000 – 2.000.000	1887
3	Şensi Depremi, Çin	830.000	1556
4	Bloha Kasırgası, Bangladeş	500.000	1970
5	Haiti Depremi, Haiti	316.000	2010
6	Hindistan Kasırgası, Hindistan	300.000	1839
7	Hint Okyanusu Depremi ve Tsunamisi	230.000 – 310.000	2004
8	Antakya Depremi, Türkiye	250.000 – 300.000	526
9	Tangshan Depremi, Çin	242.419	1976
10	Haiyuan Depremi, Çin	234.117	1920

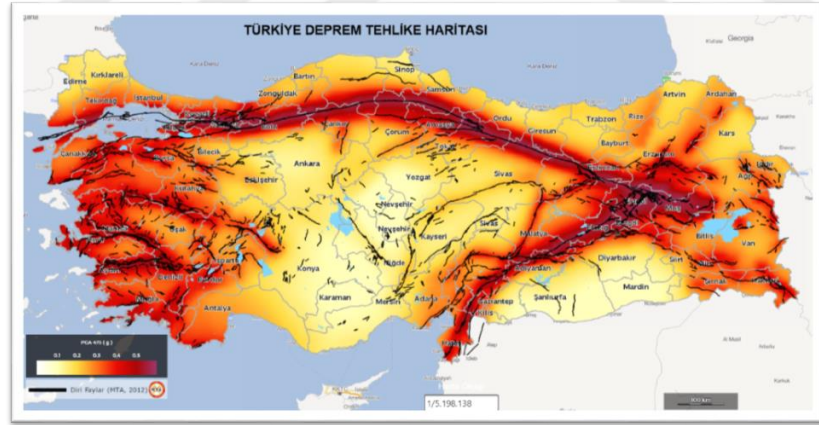
Doğal afetlerin bir başka yıkıcı sonucu ise mal kayıplarıdır. Bahse konu mal kayıpları, ev, okul, hastane gibi yapıların veya yollar, köprüler gibi ulaşım altyapılarının kullanılmayacak duruma gelmesi, ağaçlar, elektrik direkleri, arabalar, otobüsler gibi diğer tüm çevresel bileşenlerin afet nedeniyle hasar görmesini kapsamaktadır. Sayılan tüm mal kayıplarından doğan atıklar ise “enkaz” olarak ifade edilmektedir. Afet ardından oluşan enkaz, iletişim, ulaşım gibi süreçleri sekteye uğratmakta ve ilave can kayıpları doğurabilmektedir. Buna ek olarak, enkazın kaldırılması ve afet bölgesinin eski haline getirilmesi yüksek maliyetler ve insan kaynağı gerektirmektedir. Dünya Meteoroloji Örgütü tarafından sunulan rapora göre, 1970 ve 2019 yılları arasında tüm dünyada yaşanan 11.072 adet doğal afet toplamda 3,6 trilyon dolarlık maliyete yol açmıştır (World Meteorological Organization, 2020). Yalnızca 2021 senesinde tüm dünyada meydana gelen doğal afetlerin maliyeti ise toplam 252 milyar dolardır (Emergency Event Database, 2021). Verilerden de görülebileceği üzere, afetler gerek can kaybı gerekse maliyet anlamında oldukça yıkıcı sonuçlara sebep olmaktadır.

Doğal afetlerin meydana geleceği zaman öngörülemediğinden ve afetlerin oluşması engellenemediğinden, afet yönetim süreçlerinin verimli bir şekilde icra edilmesi önem arz etmektedir. Literatürde sunulan afet yönetim süreçleri temelde dört ana fazdan oluşmaktadır: hazırlık, müdahale, iyileşme ve yeniden inşa. Afet öncesinde yapılabilecek afet etkisi tahminleme çalışmaları ve buna yönelik planlamalar hazırlık fazında ele alınmaktadır. Afet meydana geldiğinde müdahale fazı başlatılmaktadır. Bu fazda afet bölgesine iletilmesi gereken her türlü yardım malzemesinin olabildiğince

hızlı bir şekilde afet bölgesine ulaştırılmasına ve enkazın temizlemesine yönelik işlemler yapılmaktadır. İyileşme fazında ise afet bölgesine iletişim, ulaşım ve barınma gibi temel ihtiyaçların ulaştırılması kapsamaktadır. Afet bölgesinin afet öncesinde olduğu hale geri dönüştürülmesine yönelik her türlü çalışma ise son faz olan yeniden inşada icra edilmektedir (Çelik ve diğ. (2013)).

Bu çalışmada ele alınan problem kapsamında deprem ardından afete müdahale sürecinde icra edilecek enkaz temizleme ve yardım ulaştırılması alanlarına odaklanılmaktadır.

Türkiye, önemli deprem kuşaklarından biri olan Alp-Himalaya kuşağı üzerinde yer almaktadır (Şekil 1.1). Söz konusu kuşak üzerinde bulunan Kuzey Anadolu Fayı ile Doğu Anadolu Fayı deprem riski en yüksek fay hatlarıdır. Deprem Bölgeleri Haritası'na göre, Türkiye'nin %92'si deprem bölgeleri içerisinde yer almakta ve nüfusun %95'i deprem riski yüksek bölgelerde yaşamaktadır. Buna ek olarak büyük sanayi merkezlerinin %98'i ve barajların %93'ü deprem bölgesinde bulunmaktadır (AFAD, (2019)).



Şekil 1.1: Türkiye deprem haritası (AFAD, (2019)).

Doğu Anadolu Fay hattı üzerinde meydana gelen başlıca büyük depremler ve meydana geldikleri yıllar şu şekildedir: Adıyaman-6 şiddetinde, 1968; Malatya-5.6 ve 5.8 şiddetlerinde, 1986; Elazığ-5.9 şiddetinde, 2004; Elazığ-5.9 şiddetinde, 2007 ve Diyarbakır- 5.9 şiddetinde, 2007 (KOERİ, (2022)).

Kuzey Anadolu Fayı ise Doğu Anadolu Fayına kıyasla daha aktiftir. Kuzey Anadolu Fayı üzerinde 1900 yılından bu yana 8 adet büyük deprem meydana gelmiştir. Bu depremler sırasıyla 1939 yılında 7.8 şiddetinde Erzincan, 1942 yılında 7 şiddetinde Tokat, 1943 yılında 7.2 şiddetinde Kastamonu, 1944 yılında 7.2 şiddetinde Bolu-Gerede, 1957 yılında 7.1 şiddetinde Bolu-Abant, 1967 yılında 7.1 şiddetinde Bolu-Mudurnu, 1999 yılında 7.6 şiddetinde Gölcük ve son olarak yine 1999 yılında 7.2 şiddetinde Düzce depremleridir (AFAD, (2022)). Kuzey Anadolu Fay hattının segmentleri boyunca düzenli olarak doğudan batıya ilerlemesi sebebiyle sıradaki kırılmanın İstanbul’da yaşanacağı öngörülmektedir (İBB, 2019).

Söz konusu aktif fay hatları sebebiyle Türkiye deprem riski yüksek bir ülkedir. Hacmi ve niteliği depremin şiddetine, afet bölgesindeki yerleşim biçimine, bina yapılarına bağlı olsa da deprem ardından çoğunlukla kısa sürede fazla miktarda enkaz oluşmaktadır. Başlıca büyük depremler ardından oluşmuş enkaz verileri Çizelge 1.2’de sunulmaktadır.

Çizelge 1.2:Tüm zamanların en fazla insan ölümüne sebep olan depremlerinde oluşan enkaz miktarları (Şahin, (2013)).

Yıl	Doğal Afet	Enkaz Miktarı
1995	Kobe Depremi, Japonya	15 milyon metreküp
1999	Marmara Depremi, Türkiye	13 milyon ton
2011	Büyük Doğu Japonya Depremi	250 milyon ton

Depremler ardından oluşan enkaz afet bölgesinde yolları kapatarak ulaşım engel olabilmektedir. Ancak, afet ardından hastane, okul ve sığınak gibi bölgelere olabildiğince hızlı ulaşılması ve insani yardım malzemelerinin iletilmesi insan canı bağlamında öneme sahiptir. Bahse konu hastane, okul, sığınak gibi bölgeler genel olarak “kritik düğümler” olarak, afet ardından kritik düğümlere ulaştırılması gereken ilkyardım malzemesi, battaniye, yiyecek, içecek gibi malzemelerin tümü ise “yardım malzemesi” olarak ifade edilmektedir. Bu kapsamda, bu çalışma ile kritik bölgelere olabildiğince hızlı bir şekilde yardım malzemelerinin iletilmesine yönelik bir problem ele alınmaktadır. Problem kapsamında, kritik bölgelere yardım malzemesi ulaştırılmasına yönelik en hızlı rotalar belirlenmekte, rotada enkaz nedeniyle kapalı bir yol var ise söz konusu yol enkazdan temizlenmektedir. Problem kapsamında yol

temizleme ve yardım dağıtım çalışmaları birlikte ele alınmaktadır. Afet bölgesini temsil eden ağ üzerinde yol temizleme ve yardım dağıtım çalışmaları eş zamanlı olarak yürütülmektedir. İkinci bölümde, çalışmaya konu problemin tanımı detaylı bir şekilde sunulmaktadır. Problemin afetzedelere sağlayacağı fayda ve çalışmanın önemi açıklanmaktadır.

Üçüncü bölümde, problem ile alakalı literatür taraması sunulmaktadır. Literatürde yer alan çalışmalar, afet ardından enkaz nedeniyle kapanan yolların temizlenmesi, afet ardından yardım araçlarının rotalanması ve bu iki süreci entegre olarak ele alan çalışmalar olmak üzere üç ana bölümde analiz edilmiştir.

Dördüncü bölümde, problemin çözümü kapsamında geliştirilen karma tamsayılı doğrusal programlama modeli sunulmaktadır. Model ile yardım malzemesi dağıtım araçlarının kritik düğümlere ulaşmak için kullanacakları rotalar tespit edilmekte, rotalarında enkaz nedeniyle kapalı bir yol var ise, yol temizleme aracının söz konusu yolu temizlemesine yönelik planlama oluşturulmaktadır. Matematiksel model ile küçük veri setleri için kabul edilebilir sürelerde sonuç elde edilebilmektedir. Matematiksel model ile çözüm bulunması kapsamında kabul edilebilir çözüm süresi olarak dört saat kabul edilmiştir. Ancak, veri büyüdükçe matematiksel model ile kabul edilebilir sürede çözüm bulunamamaktadır. Problemin doğası gereği, afet ardından yardım dağıtım ve yol temizleme gibi kararların hızlı bir şekilde verilmesi ve planlamaların ivedilikle yapılması gerekmektedir. Bu nedenle, problemin çözümüne yönelik bir sezgisel algoritma geliştirilmesi ihtiyacı doğmuştur.

Beşinci bölümde, büyük veri setleri ile hızlı sonuç bulmaya yönelik geliştirilen sezgisel algoritma sunulmaktadır. Sezgisel algoritma ile yol temizleme ve yardım malzemesi dağıtım araçları için bir olurlu başlangıç çözümü bulunmakta, ardından araç rotalarında düğüm ekleme, düğüm çıkarma, yer değiştirme gibi operasyonlar icra edilerek bu çözümler iyileştirilmeye çalışılmaktadır.

Altıncı bölümde, matematiksel model ve sezgisel algoritmanın denendiği veri setleri açıklanmakta ve elde edilen sonuçlar sunulmaktadır. Geliştirilen karma tamsayılı doğrusal programlama modeli ve sezgisel algoritmanın farklı büyüklüklerdeki veri setleri ile performansının analiz edilmesi amacıyla Caunhye ve diğ. (2020)

alışmasında sunulan veri setinin bir bölümünün alınmasıyla oluşturulan CAD (Caunhye, Aydın, Düzgün) veri seti ve İstanbul ili Kartal ilçesine ait veri setleri kullanılmıştır.

Yedinci bölümde ise, genel değerlendirme ve olası gelecek çalışmalar yer almaktadır.

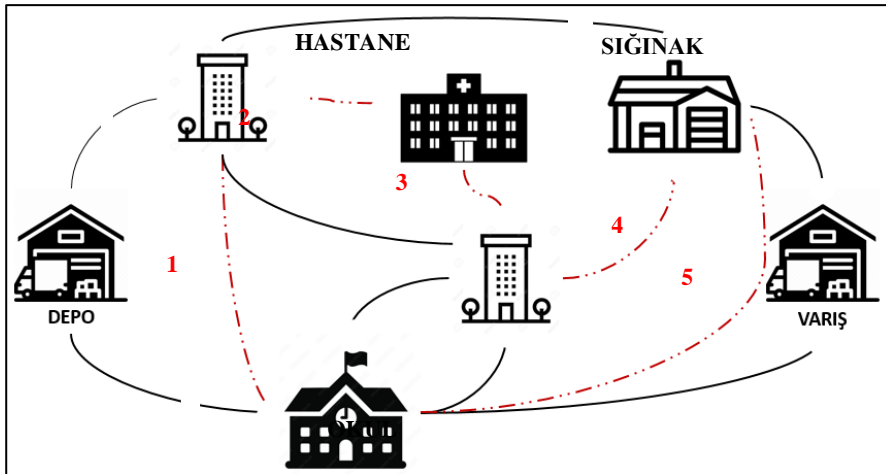


2. PROBLEM TANIMI

Türkiye üzerinde yer aldığı deprem kuşağı dikkate alındığında deprem riski yüksek bir ülke olarak değerlendirilmektedir. Özellikle Türkiye'yi doğudan batıya kesen Kuzey Anadolu Fay Hattı geçmişten bugüne yüksek şiddetli depremler oluşturmuştur. Kuzey Anadolu Fay hattının İstanbul segmentinde meydana gelebileceği değerlendirilen bir depreme yönelik İstanbul Büyükşehir Belediyesi tarafından “Olası Yıkıcı Bir İstanbul Depreminde Oluşabilecek Enkaz Dair Yönetim Planı” isimli rapor hazırlanmıştır. Söz konusu rapora göre 7.5 şiddetinde olması öngörülen bir depremde oluşacak enkaz miktarı 25 milyon tondur. Aynı raporda söz konusu enkazın temizlenmesi için tüm belediye envanterindeki araçlarla yaklaşık 1 milyon sefer yapılması gerektiği ve bunun 3 sene sürebileceği belirtilmektedir (İBB, 2019).

Hem afetzedelere maksimum fayda sağlanması hem de yanlış planlama kaynaklı maddi kayıpların azaltılması kapsamında afet ardından stratejik ve verimli bir planlama yapılması önemlidir. Bu maksatla, bu çalışmada “Yol Temizleme ve Yardım Malzemesi Dağıtım Araçlarının Eşzamanlı Rotalanması Problemi” sunulmaktadır. Problem kapsamında afet bölgesi bir ağ olarak ele alınmıştır. Bu ağda yer alan kimi düğümler “kritik düğümler” olarak isimlendirilmiştir. Kritik düğümler; okullar, sığınaklar gibi içerisinde çok sayıda insanın mahsur kalmış olabileceği yerler veya hastaneler gibi ulaşılması toplu fayda sağlayan alanları temsil etmektedir. Afet meydana geldikten sonra kritik düğümlere mümkün olan en kısa sürede ulaşıp yardım malzemelerinin iletilmesi gerekmektedir. Problem kapsamında yardım malzemelerinin iletilmesi görevi yardım malzemesi dağıtım araçlarına aittir. Probleme birden fazla yardım dağıtım aracı bulunmaktadır. Yardım malzemesi dağıtım araçlarının mümkün olan en kısa sürede kritik düğümlere ulaşması amaçlanmaktadır. Bu maksatla söz konusu yardım malzemesi dağıtım araçları için olabilecek en hızlı rotalar belirlenmektedir. Rotalarda enkazdan kapanmış yol varsa, yolun enkazdan temizlenmesi görevi yol temizleme aracına aittir. Yol temizleme aracının bir yolu enkazdan temizlemesi için harcaması gereken efor problem kapsamında bilinmektedir. Temizlenecek bir yol için harcanan efor yalnızca yol

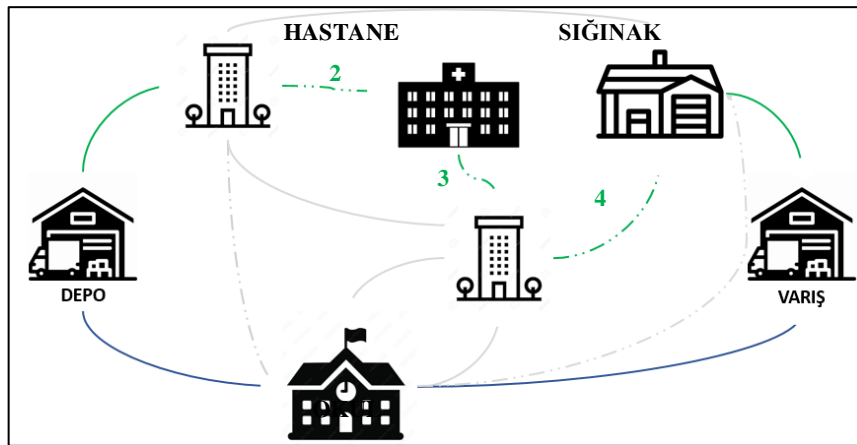
temizleme aracı tarafından karşılanan bir maliyettir. Temizlenen bir yolu kullanan diğer araçlar bu maliyetten muafır. Yol temizleme aracı bir yolu tam olarak temizlemeden önce diğer araçlar yolu kullanamayacaktır. Yol temizleme aracı ile yardım malzemesi dağıtım araçları senkronize hareket etmektedir. Diğer bir ifadeyle, yol temizleme aracı bir yolu temizlerken, yardım dağıtım araçları paralelde açık olan bir yolu kullanarak bazı kritik düğümlere ulaşabilirler. Yol temizlenme zamanı yardım malzemesi dağıtım araçlarının tur sürelerini etkilemektedir. Bahse konu operasyonların anlaşılabilirliğinin artırılması amacıyla oluşturulan örnek bir afet bölgesi ağ yapısı Şekil 2.1’de sunulmaktadır. Ağda yer alan hastane, okul ve sığınak kritik düğümlerdir. Bina ikonları kritik olmayan ara düğümleri temsil etmektedir. Problem kapsamında ağda yapay bir depo düğümü ve varış düğümü olduğu kabul edilmiştir. Başlangıçta bütün araçların (yol temizleme ve yardım dağıtım araçları) yapay depoda olduğu ve operasyon tamamlandığında yine bütün araçların varış düğümüne gideceği farz edilmiştir. Depo düğümünden bir düğüme ilerlemek ve bir düğümden varış düğümüne ulaşmak maliyetsizdir. Kırmızı kesikli çizgiler enkaz nedeniyle kapanmış yolları temsil etmektedir. Sunulan örnekte toplamda beş adet yol enkaz nedeniyle kapalıdır. Kapalı yollar: ara düğüm-okul (1 numaralı yol), ara düğüm-hastane (2 numaralı yol), hastane-ara düğüm (3 numaralı yol), ara düğüm-sığınak (4 numaralı yol) ve okul-sığınaktır (5 numaralı yol).



Şekil 2.1: Örnek afet bölgesi ağ yapısı.

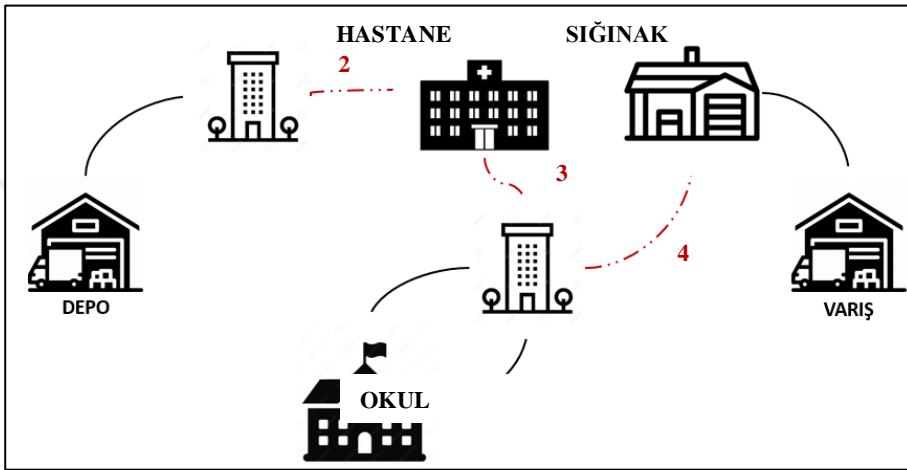
Problemin amacı kritik düğümlere yardım malzemesi ulaştırılması için gereken toplam sürenin minimize edilmesidir. Sunulan örnek kapsamında iki adet yardım dağıtım malzemesi aracı bulunduğu kabul edilmiştir. Bu kapsamda yardım malzemesi dağıtım araçları için mümkün olan en kısa rota model ile bulunmaktadır.

Şekil 2.2’de yardım malzemesi dağıtım araçlarının rotalarına ilişkin görsel sunulmaktadır. Afet bölgesinde bulunan bütün kritik düğümlerin yardım malzemesi dağıtım araçları tarafından ziyaret edilmesi sağlanmaktadır. Yeşil renk ile çizilen rota birinci yardım dağıtım aracını, mavi ile çizilen rota ise ikinci yardım dağıtım aracını temsil etmektedir. Şekil 2.2’de görülebileceği üzere, hastane ve sığınak ilk araca atanmışken, okul ise ikinci araca atanmıştır. İkinci yardım dağıtım aracının rotası incelendiğinde okul kritik düğümünü ziyaret etmek için depo-okul- varış düğümünü rotasını takip ettiği ve bu yolda kapalı bir yol olmadığı anlaşılmaktadır. Birinci yardım malzemesi dağıtım aracının rotası incelendiğinde ise hastane ve sığınak kritik düğümlerinin en hızlı şekilde ziyaret edilebilmesi için depo-ara düğüm-hastane-ara düğüm-sığınak-varış düğümü şeklinde olduğu görülmektedir. Ancak söz konusu rotada enkaz nedeniyle kapanmış yollar yer almaktadır. Kapanmış yollar sırasıyla; ara düğüm-hastane (2 numara), hastane-ara düğüm (3 numara) ve ara düğüm-sığınaktır (4 numara).



Şekil 2.2:Yardım dağıtım araçları örnek rotası.

Yardımlı malzemesi dağıtım araçlarının rotalarında yer alan enkaz nedeniyle kapalı yollar yol temizleme aracı tarafından temizlenecektir. Bu kapsamda model tarafından belirlenen örnek bir yol temizleme aracı rotası şu şekilde olacaktır: depo-ara düğüm-hastane (2 numaralı kapalı yol)-ara düğüm (3 numaralı kapalı yol)-sığınak (4 numaralı kapalı yol)-varış düğümü (Şekil 2.3). Diğer kapalı yollar (1 numaralı ve 5 numaralı kapalı yollar) ise kritik düğümlere ulaşma süresine bir fayda yaratmadığından açılmayacaktır.

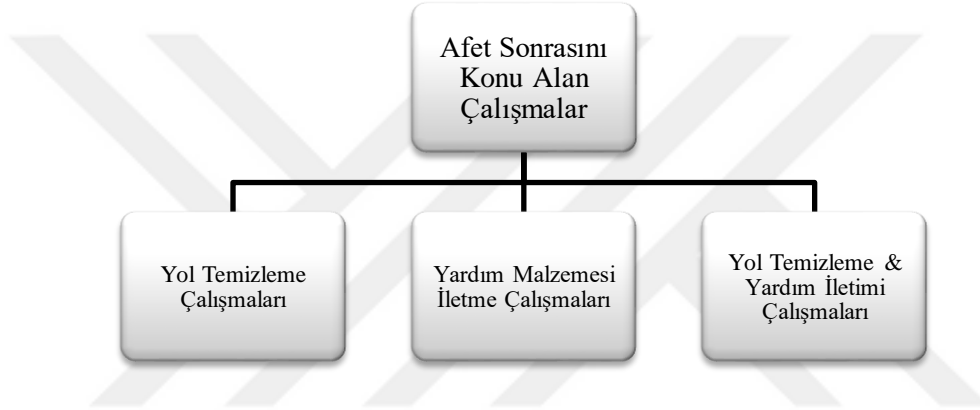


Şekil 2.3: Yol temizleme aracı örnek rotası.

Açılması gereken yollar yol temizleme aracı tarafından temizlenip kullanılabilir hale getirilene kadar yardımlı malzemesi dağıtım araçları tarafından kullanılamayacaktır. Bu kapsamda yol temizleme araçları ile yardımlı malzemesi dağıtım araçlarının rotaları birbirlerini etkilemektedir. Örneğin, yardımlı malzemesi dağıtım aracının rotasında enkaz nedeniyle kapalı bir yol yer aldığında, araç o noktaya ulaştığında yol henüz kullanılabilir durumda değilse araç işlem bitene kadar beklemek zorunda kalacaktır.

3. LİTERATÜR TARAMASI

Bu çalışma kapsamında yürütülen literatür taraması Şekil 3.1’de sunulduğu üzere üç ana kategoride gerçekleştirilmiştir. Söz konusu kategoriler: afet ardından enkazdan temizlenmesi gereken yolları belirlemeye odaklanan çalışmalar, afet ardından afet bölgesine yardım iletimini konu alan çalışmalar ve bu iki süreci entegre olarak ele alan çalışmalardır.



Şekil 3.1: Afet sonrası konu alan çalışmalara yönelik literatür taraması.

Literatürde yol temizleme ile alakalı kararlara odaklanan çok sayıda çalışma yer almaktadır. Çalışmalarda bir veya birden fazla yol temizlemeden sorumlu ekip bulunabilmektedir. Çalışmalar kapsamında farklı kararlara odaklanılabilmektedir. Bahse konu kararlara enkaz nedeniyle kapanan yollardan hangilerinin temizlenmesi gerektiğine karar verilmesi (herhangi bir rota oluşturulmadan) veya kapanan yolların temizlenmesine yönelik bir planlama yapılması olabilmektedir. Duque ve Sörensen (2011) tarafından yapılan çalışmada yalnızca temizlenmesi gereken yollar tespit edilmektedir. Çalışma kapsamında tanımlanan problemde bir afet meydana geldiği ve farklı önem ağırlıklarına sahip şehirler ile eyalet merkezleri arasındaki bazı yolların kullanılamaz halde olduğu kabul edilmektedir. Çalışmanın amaç fonksiyonu ise şehirlerin en yakın eyalet merkezine en kısa sürede bağlanmasıdır. Çalışmada problemin çözümüne yönelik VNS (Variable Neighborhood Search) ve GRASP (Greedy Randomized Adaptive Search Procedure) metasezgiselleri geliştirilmiştir. Yalnızca temizlenmesi gereken yolların seçildiği bir başka çalışma Özdamar ve diğ.

(2014) tarafından gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada iki amaç fonksiyonu yer almaktadır. Birinci amaç fonksiyonu yol temizleme operasyonlarının tamamlanma süresinin en küçüklenmesi, ikincisi ise ağın bağlantılılığının en büyüklenmesidir. Geliştirilen matematiksel model ve kural tabanlı sezgisel algoritma ile iki amaç fonksiyonu arasında dengeyi sağlayacak bir çözüm bulunmaktadır. Problem kapsamında birden fazla yol temizleme aracına kapalı yollar atanmaktadır. Özdamar ve diğ. (2014) tarafından tanımlanan birinci amaç fonksiyonu ile aynı amaç fonksiyonuna sahip bir çalışma ise Yan ve Shin (2007) tarafından gerçekleştirilmiştir. Ancak bu çalışmalarında geliştirdikleri model kabul edilebilir bir sürede çözüm bulamadığından, Yan ve Shin (2012) çalışmasında daha hızlı bir çözüm elde etmek amacıyla bir karınca kolonisi algoritması geliştirilmiştir. Liberatore ve diğ. (2014), Haiti'de meydana gelen kasırgaların ardından zaman, güvenlik ve maliyet kısıtlamaları altında hangi yolların temizlenmesi gerektiğine karar vermek için çok kriterli model geliştirmiştir. Aksu ve Özdamar (2014) ise hem zaman hem de kaynak kısıtları altında temizlenmesi gereken yolların belirlenmesine yönelik model geliştirmiştir.

Yukarıda sıralanan çalışmaların tümünde afet bölgesinde temizlenmesi gereken yollar tespit edilmekte, yol temizleme aracı için rota oluşturulmamaktadır. Ancak, afet sonrası temizlenmesi gereken yolların bir rotaya dönüştürülmesi etkili bir planlama yapılabilmesi için gereklidir. Duque ve diğ. (2014), tarafından yapılan çalışmada afet ardından yol temizlemeden sorumlu tek bir yol temizleme aracı için rota oluşturulmaktadır. Şahin ve diğ. (2016) tarafından yapılan çalışmada afetten etkilenen bölge bir ağ olarak kabul edilmiş olup, depodan başlayıp varış düğümünde sonlanacak ve ağda yer alan bütün kritik düğümler ziyaret edilecek şekilde bir rota oluşturulmaktadır. Problemin amaç fonksiyonu tüm kritik düğümlerin en geç ziyaret edilme zamanlarının en küçüklenmesidir. Berktaş ve diğ. (2016) de benzer şekilde afet bölgesini bir ağ olarak ele almış ve depodan başlayıp varış düğümünde sonlanan bir tur oluşturmuştur. Problemin iki amaç fonksiyonu bulunmaktadır: (i) tüm kritik düğümlerin en geç ziyaret edilme zamanlarının en küçüklenmesi, (ii) tüm kritik düğümlerin ziyaret edilme zamanlarının toplamının en küçüklenmesi. Araç turuna başlayıp kritik düğümleri ziyaret ederken enkaz nedeniyle kapanmış bir yola denk geldiğinde yolu açmaktadır. Ajam ve diğ. (2019) tarafından bu çalışmada geliştirilen sezgisel algoritmanın gevşek bir alt ve üst sınır kullandığını belirterek aynı problemin çözümüne yönelik daha güçlü bir sezgisel algoritma geliştirilmiştir. Kasaei ve Salman

(2016) tarafından tek bir yol temizleme aracı için (i) toplam yol temizleme süresinin en küçüklenmesi, (ii) belirli bir zaman içerisinde ağ bağlantılılığın en büyüklenmesi amaçlı bir çalışma yürütülmüştür. Bu çalışmada her bir bağlantısız komponenti bağlı hale getirmenin ödülü bulunmaktadır. Çalışmanın ikinci amaç fonksiyonu toplanan ödülü en büyüklemeyi amaçlamaktadır. Bu çalışmanın ilk amaç fonksiyonunun çok araçlı versiyonu Akbari ve Salman (2017b), ikinci amaç fonksiyonunun çok araçlı hali ise Akbari ve Salman (2017a) tarafından çalışılmıştır. Araçlar tarafından açılmamış bir yoldan başka bir aracın geçmesine izin verilmemektedir. Bu çalışmalarda yer alan araçların eşit kabiliyetlere sahip (homojen) olduğu kabul edilmektedir. Moreno ve diğ. (2020) tarafından yapılan çalışmada ise afet ardından birden fazla farklı kabiliyetlere sahip (heterojen) yol temizleme araçları için plan ve rota oluşturulmaktadır. Heterojen araçlar ile iş makineleri, buldozerler ya da daha küçük araçlardan oluşan bir küme kastedilmektedir. Problemin amaç fonksiyonu talep düğümlerinin kaynak düğümlerinden bağlantısız kaldığı sürenin minimize edilmesidir.

Bu bölüme kadar yer verilen çalışmalarda afet ardından zarar gören yolların kullanılabilir hale getirilmesi maksadıyla temizleme işlemlerini ele alınan çalışmalar sunulmuştur. Ancak, afet ardından afet bölgesine tıbbi yardım malzemeleri, battaniye, ısıtıcı, yiyecek, içecek, dezenfeksiyon malzemeleri gibi yardım materyallerinin de olabildiğince hızlı iletilmesi gerekmektedir. Lu ve diğ. (2016) tarafından yapılan çalışmada afetlerin ardından gerçek zamanlı yardım malzemesi dağıtımı için iki modülden oluşan bir çözüm geliştirilmiştir. İlk modül, yardım taleplerini ve teslimat sürelerini tahmin ederken, ikinci modül ise optimal yardım dağıtım akışlarını bulmaktadır. Amaç, yardım malzemelerinin teslim edilmesi için gereken toplam sürenin en küçüklenmesidir. Linet ve diğ. (2004) tarafından yapılan çalışmada turlarına depodan başlayan birden fazla homojen araç için talep sahibi düğümlere yardım malzemesi iletim rotaları bulunması amaçlanmaktadır. Problemin çözümü belirli bir zaman kesitini kapsamaktadır. Problemin amaç fonksiyonu karşılanmamış taleplerin en küçüklenmesidir. Yi ve Kumar (2007) tarafından yapılan çalışmada hem dağıtım merkezlerine yardım malzemesi dağıtımı hem de afetzedelerin hastane vb. hizmet alanlarına lojistiği ele alınmıştır. Problemin çözümüne yönelik karınca kolonisi algoritması geliştirilmiştir. Problemin amaç fonksiyonu, hizmetlerin sağlanmasındaki gecikmenin en aza indirilmesidir. Aynı amaç fonksiyonu Repoussis ve diğ. (2016)

çalışmasında da yer almaktadır. Çalışmada ambulans sevkiyatı, hastaların nakli ve tedavi düzeni planlamasını entegre etmek için karma tamsayılı bir model geliştirilmiştir. Li ve Chung (2018), ise kesin olmayan seyahat zamanları ve taleplerin yer aldığı bir ağda gürbüz optimizasyon yöntemi ile sıralanan beş adet amaç fonksiyonunu dengeleyen bir çözüm araştırmıştır: yardım dağıtım araç sayısının en küçüklenmesi, yardım dağıtım süre ve maliyetinin en küçüklenmesi, talep düğümlerine ulaşma zamanlarının toplamının en küçüklenmesi, talep ağırlıklandırılmış ulaşma zamanlarının toplamının en küçüklenmesi ve en geç varış süresinin en küçüklenmesi.

Yardım lojistiğini konu alan çalışmaların bir bölümü iki aşamalı kararlar alma odaklıdır. Söz konusu iki aşama yardım malzemelerinin dağıtımının yapılacağı depo veya tesislerin konum ve kapasitelerinin belirlenmesinin ardından araçların rotalanması olabilmektedir. Salman ve Gül (2014) tarafından yapılan çalışmada afet sonrası talep artışı ile başa çıkmak için kurulacak acil servis tesislerinin yerini ve kapasitesini belirleme ve yaralı taşıma kararlarını aynı anda optimize eden karma tamsayılı programlama (MIP) modeli geliştirilmiştir. Problemin amaç fonksiyonu, arama-kurtarma süresi boyunca toplam seyahat süresini ve yeni tesis kurma maliyetini en aza indirmektir. Benzer bir çalışma Wei ve diğ. (2020) tarafından gerçekleştirilmiştir. Çalışmada afet bölgesine yardım malzemelerinin ulaştırılması kapsamında depo açılması gereken konumun, kullanılması gereken araç sayısının ve her bir aracın rotasının bulunması amaçlanmaktadır. Problem kapsamında bir dizi aday depo konumu yer almaktadır. Her bir talep bölgesine yardım ulaştırılması için belirli bir zaman limiti olduğu varsayılmaktadır. Problemin amaç fonksiyonları: zaman limiti ihlali cezasının en küçüklenmesi ve toplam maliyetin (depo açılış maliyeti, araç sabit maliyeti ve nakliye maliyeti) en küçüklenmesidir. Problemin çözümüne yönelik karınca kolonisi algoritması geliştirilmiştir. İki aşamalı bir başka çalışma Caunhye ve diğ. (2016) tarafından gerçekleştirilmiştir. Tanımlanan problemin ilk aşamasında depo konumu ve depoda stoklanacak yardım malzemeleri, malzeme miktarları belirlenmekte ve ikinci aşamada ise talep miktarları ile ulaşım sürelerinin değişkenlik gösterdiği çok sayıda senaryo için dağıtım planları yapılmaktadır. Problem kapsamında birden fazla araç yer almaktadır. Tavakkoli-Moghaddam ve diğ. (2018) ise afet sonrası bir durum için geçici acil durum istasyonlarının konumu ve ambulans rotası için iki amaç fonksiyonuna sahip bir model önermiştir. Birinci amaç fonksiyonu

hizmetin tamamlanma süresini minimize etmek, ikinci amaç fonksiyonu ise geçici acil durum istasyonlarının kurulum maliyetini minimize etmektir. Öksüz ve Satoğlu (2020), geçici tıp merkezlerinin konumunu tanımlamak için matematiksel bir model geliştirmiştir. Bu, hem geçici tıp merkezlerinin toplam maliyetini hem de toplam ulaşım maliyetini en aza indirmeyi amaçlamaktadır. Shiri ve diğ. (2020) tarafından afet sonrası süreçte heterojen kapasitelere sahip arama kurtarma ekiplerinin bulunduğu bir problem ele alınmıştır. Problem kapsamında afet ardından arama kurtarma ekiplerinin planlamalarının nasıl olması gerektiğine odaklanılmıştır. Çalışmada ele alınan ekipler birbirleriyle senkronize olarak görev yapmaktadır.

Yukarıdaki bölümlerde literatürden örnekleri sunulan yol temizleme ve yardım dağıtımını çalışmalarının gerçek dünya ile daha uyumlu olabilmesi için entegre olması gerekmektedir. Briskorn ve diğ. (2020) tarafından yapılan çalışmada afet ardından talep sahibi düğümlerin ihtiyaç duyduğu malzeme miktarının tahmin edilmesi ve taleplerinin karşılanması için katı son tarihler ihlal edilmeden ulaşımlarına yönelik model geliştirilmiştir. Problem kapsamında depo düğümünden talep sahibi düğüme kapalı olmayan bir yol ile ulaşılamıyorsa kapalı yol temizlenmektedir. Çözümüne yönelik planlama alanı segmentlere bölünmüştür. Her bir kapalı yolun bir segmentte açılacağı kabul edilmiştir. Problemin amaç fonksiyonu yol temizleme ile geçen sürenin en küçüklenmesidir. Ayrıca, yol temizleme sürelerinin yanında yardım dağıtım sürelerinin ihmal edilebilir olduğu kabul edilmiştir. Problemin çözümüne yönelik dal ve sınır algoritması geliştirmiştir. Problem kapsamında herhangi bir yol temizleme veya yardım iletimi aracı için rota bulunmamaktadır. Çalışma teorik modeller ve genel bir planlama sunmaktadır. Çalışma ile elde edilen sonuçlar hangi periyotta hangi kapalı yolun açıldığı ve ne miktarda yardım malzemesinin hangi talep düğümüne atandığıdır. Akbari ve Sayarshad (2022) çalışmalarında bir adet yol temizleme ekibi, bir adet de yardım dağıtım ekibi için optimal rota ve planlama yapmak amacıyla matematiksel model geliştirmişlerdir. Problem ile afet bölgesinde araçların senkronize rotalanması ele alınmıştır. Problemin amaç fonksiyonu ise yol onarım zamanlarının stokastik olduğu durumda en son talep düğümünün yardım dağıtım aracı tarafından ziyaret edilme zamanının en küçüklenmesidir. Yan ve Shih (2009) tarafından yapılan çalışma ile yol temizleme ve yardım dağıtım süreleri ile maliyeti minimize eden bir karma tamsayılı, çok amaç fonksiyonlu model geliştirilmiştir. Problemin çözümü kapsamında yolların temizlenmesi ve yardımın dağıtılması amacıyla zaman-uzay ağı

kullanılmaktadır. Hazırlanan zaman-uzay ağında yatay eksen çalışma alanları (work sections) ile onarım noktaları (repair points), dikey eksen ise zaman olacak şekilde ekiplerin rotaları yer almaktadır. Yardım dağıtılması maksadıyla hazırlanan zaman-uzay ağında ise yatay eksen dağıtım merkezleri, talep düğümleri vb. alanları, dikey eksen ise zamanı temsil etmektedir. Yolların temizlenmelerine ve yardımın iletilmesine ilişkin rotalar bulunmaktadır. Ancak araç veya ekip yaklaşımı çalışmada yer almamaktadır. Buna ek olarak çalışmalarında kapanan yolların tümü açılmaktadır. Çalışmada kullanılan amaç fonksiyonu ise yol temizleme, yardım dağıtımı ve bağlantılı maliyetlerin en küçüklenmesidir. Shin ve diğ. (2019) çalışmalarında bir adet yol temizleme ve bir adet yardım dağıtımı aracı için model geliştirmişlerdir. Yol temizleme aracı tarafından bir yol onarılmadan yardım dağıtımı aracı yolu kullanamamaktadır. Problem kapsamında talep sahibi düğümler yer almaktadır. Problemin amaç fonksiyonu en son ziyaret edilen talep sahibi düğümün ziyaret edilme zamanının en küçüklenmesidir. Bu çalışma esasen Duque ve diğ. (2014) çalışmasına yardım dağıtımının entegre edilmiş halidir. Alviz ve diğ. (2020) tarafından yapılan çalışmada ise afet ardından yardıma muhtaç bölgelerin taleplerinin karşılanmasına yönelik bir problem geliştirilmiştir. Problem kapsamında söz konusu yardıma muhtaç düğümler farklı aciliyet skorlarına sahip olarak ele alınmıştır. Aciliyet skoru, düğümün talep miktarı, talebin karşılanması için gereken tur sayısı ve bir t anında kalan tur sayısı ile hesaplanmaktadır. Problemin amaç fonksiyonu ise yardıma muhtaç düğümlere ulaşamama kaynaklı cezanın en küçüklenmesidir. Problemden kısıtlı kapasiteye sahip yardım malzemesi dağıtım ve yol temizleme araçları senkronize bir şekilde rotalanmaktadır. Kapanan yolların açılması için bir maliyet olmadığı kabul edilmiştir. Li ve diğ. (2020) tarafından ise yolların açılma maliyetinin de planlamalara dahil edildiği bir çalışma yürütülmüştür. Çalışma kapsamında yol onarım araçlarının turlarına başlayacağı istasyon düğümleri, yardım malzemelerinin bulunduğu kaynak düğümleri ve talep düğümleri yer almaktadır. Talep düğümleri daha yoğun talebi bulunanlar öncelenecek şekilde bir sıralamaya sahiptir. Problemin amaç fonksiyonu ise kümülatif onarım faydasının maksimize edilmesidir.

Literatürde yer alan yol temizleme ve yardım dağıtımı süreçlerini entegre olarak ele alan çalışmalar ile bizim çalışmamız arasındaki temel farklar aşağıda sıralanmaktadır:

- Briskorn ve diğ. (2020) tarafından yapılan çalışmada her bir periyotta açılacak kapalı yol ile ne miktarda yardım malzemesinin hangi talep düğümüne atandığı

tespit edilmektedir. Bu çalışmada ise temizlenecek yollara ve yardım dağıtımına ilişkin birer rota oluşturulmaktadır.

- Akbari ve Sayarshad (2022) tarafından yapılan çalışmada bir adet yol temizleme ve bir adet yardım dağıtım aracı yer almaktadır. Çalışmada araçların senkron olması benzerlik göstermekte olup bizim çalışmamızda birden fazla yardım dağıtım aracı yer alması bu iki çalışmayı farklılaştırmaktadır. Ayrıca problemin çözümü matematiksel model ile yapılmış, herhangi bir sezgisel algoritma geliştirilmemiştir.
- Yan ve Shih (2009) tarafından yapılan çalışmada yol temizleme ve yardım dağıtım için rota bulunmakta ancak araç konsepti problemde yer almamaktadır. Problemin çözümü sezgisel algoritma ile yapılmaktadır. Çalışmada kapanan yolların tümü açılmaktadır. Buna ek olarak çalışmanın amaç fonksiyonu da bu çalışma ile farklılaşmaktadır.
- Shin ve diğ. (2019) tarafından yapılan çalışma Akbari ve Sayarshad (2022) çalışmasından yalnızca geliştirilen sezgisel ve diğer çözüm yöntemleri ile ayrılmaktadır. Bu çalışma ile onlar arasındaki en temel fark ise kullanılan yardım dağıtım aracı sayısıdır.
- Alviz ve diğ. (2020) tarafından yapılan çalışmada afet ardından ulaşılması gereken düğümlerin farklı önem seviyelerine sahip olduğu kabul edilmektedir. Problemin amaç fonksiyonu ise yardıma muhtaç düğümlerin önem seviyeleri ile paralel olarak hesaplanan ceza değerlerinin toplamının en küçüklenmesidir. Problem ile bizim çalışmamızın benzerlik gösteren yönü yardım malzemesi dağıtım ve yol temizleme işlemlerinin senkronize gerçekleştirilmesidir. Ancak, bizim çalışmamızla bu çalışma arasındaki en temel fark Alviz ve diğ. (2020) çalışmasında kapanan yolların açılması için bir maliyet olmamasıdır.
- Li ve diğ. (2020) tarafından yapılan çalışmada yolların temizlenmesine ilişkin rota bulunmakta, yardım dağıtımının ise bu rota aracılığıyla gerçekleştirilebileceği aktarılmaktadır. Problemde yardım dağıtım rotası oluşturulmamaktadır. Buna ek olarak matematiksel model geliştirilmemiş, yalnızca sezgisel algoritma geliştirilmiştir.

Söz konusu kıyaslar Çizelge 3.2’de sunulmaktadır.

Çizelge 3.1: Bu çalışma ile benzerlik gösteren çalışmalar.

#	Çalışma	Yol Temizleme Aracı (YTA)		Yardım Dağıtım Aracı (YDA)		Amaç Fonksiyonu	Matematiksel Model	Sezgisel Algoritma
		YTA Adedi	YTA Rotası	YDA Adedi	YDA Rotası			
1	Simultaneous planning for disaster road clearance and distribution of relief goods: A basic model and an exact solution method, Briskorn ve diğ. (2020)					Yol temizleme ile geçen sürenin en küçüklenmesi	√	√
2	Integrated and coordinated relief logistics and road recovery planning problem, Akbari ve Sayarshad (2022)	1	√	1	√	En son ziyaret edilen talep düğümünün ziyaret zamanının en küçüklenmesi	√	
3	Optimal scheduling of emergency roadway repair and subsequent relief distribution, Yan ve Shih (2009)		√		√	Yol temizlenmesi, yardım dağıtımı ve bağlantılı maliyetlerin en küçüklenmesi		√
4	Integrated optimal scheduling of repair crew and relief vehicle after disaster, Shin ve diğ. (2019)	1	√	1	√	En son ziyaret edilen talep sahibi düğümün ziyaret edilme zamanının en küçüklenmesi	√	√
5	A new model for road network repair after natural disasters: Integrating logistics support scheduling with repair crew scheduling and routing activities Li ve diğ. (2020)		√			Kümülatif onarım faydasının maksimize edilmesi		√
6	Planning road network restoration and relief distribution under heterogeneous road disruptions, Alviz ve diğ. (2020)* *Bu çalışma ile bizim çalışmamız arasındaki temel fark Alviz ve diğ. (2020)'de yol temizleme maliyetlerinin dahil edilmemesidir.	N	√	N	√	Yardıma muhtaç düğümlerin önem seviyeleri ile paralel hesaplanan ceza maliyetlerinin toplamının en küçüklenmesi	√	√
7	Bu çalışma	1	√	N	√	Kritik düğümlerin ziyaret edilme zamanlarının toplamının en küçüklenmesi	√	√

4. MATEMATİKSEL MODEL

Afet bölgesi yönsüz bir ağ olarak ele alınırsa; bölgedeki yerleşim alanları “düğümler”, yerleşim alanları arasındaki yollar ise “ayrıntlar” olarak kabul edilebilir. Afet ardından ulaşılması acil olan düğümler “kritik düğümler”dir. Söz konusu kritik düğümlere yardım malzemelerinin mümkün olan en kısa sürede ulaştırılması için kullanılması gereken bir ayrıt enkaz nedeniyle kapalıysa, söz konusu ayrıt enkazdan temizlenmelidir. Afetzedelere maksimum fayda sağlanabilmesi için yol temizleme ve yardım malzemesi iletimi görevleri senkronize icra edilmelidir.

Afet bölgesi $G = (N, E)$ ağı ile temsil edilmektedir. Burada N kümesi düğümleri, E kümesi ise yönsüz ayrıtları temsil etmektedir. Bir ayrıt üzerinden her iki yönde de hareket edilebilmektedir. Bu nedenle her bir (i, j) ayrıtı için (i, j) ve (j, i) ayrıtlarından oluşan bir yönlü A kümesi tanımlanmıştır. N kümesi içerisinde kritik düğümler, ara düğümler (kritik olmayan düğümler), depo düğümü ve varış düğümü yer almaktadır. Depo ve varış düğümleri modelleme açısından kolaylık olması maksadıyla eklenen yapay düğümlerdir. Depo ve varış düğümlerinden herhangi bir düğüme ulaşım maliyetsizdir. Modelin bundan sonraki kısımlarında depo düğüm “s” ile, varış düğümü ise “t” ile ifade edilecektir. $C \subset N$, kritik düğüm kümesi, $NC \subset N$, ise ara düğüm kümesini ifade etmektedir. Problemin çözümü esnasında indis sayısını azaltmak maksadıyla kritik düğümlerin ara düğüm gibi davranan kopyaları oluşturulmuştur. Bu kopya düğümler KC ile gösterilmektedir. KC kümesi NC kümesine dahil edilmiştir. Kopya düğümlerin eklenmesi sayesinde araçların turlarında kritik düğümlere ulaşırken ara düğümleri kullanmaları sağlanmıştır (Berktaş ve Kara, (2016)). Afet bölgesinde enkaz nedeniyle kapanan $(i, j) \in E$ ayrıtlarının bulunduğu küme ise $B \subset E$ kümesidir. Problem kapsamında bir adet yol temizleme aracı ve birden fazla yardım malzemesi dağıtım aracı bulunmaktadır. Yardım malzemesi dağıtımından sorumlu araç kümesi ise V ile temsil edilmektedir.

Çalışmaya konu problemin çözümü kapsamında karma tamsayılı matematiksel model geliştirilmiştir. Geliştirilen matematiksel modelde yer alan parametreler aşağıda sunulmaktadır.

d_{ij} : $(i, j) \in E$ ayrıtının uzunluğunu temsil eden parametre

U_{ij} : $(i, j) \in B$ ayrıtını enkazdan temizlemek için gereken süreyi temsil eden parametre

Modelde yer alan karar değişkenlerinin bir bölümü yol temizleme aracı ile alakalıyken, bir bölümü ise yardım malzemesi dağıtımını ile alakalıdır. Yol temizleme ile alakalı karar değişkenleri aşağıda sıralanmaktadır.

$x_{i,j} = (i, j) \in A$ yönlü ayrıtı yol temizleme aracı tarafından kullanıldıysa 1, diğer durumlarda 0

$z_{i,j} = (i, j) \in B$ ayrıtı yol temizleme aracı tarafından i 'den j 'ye giderken temizlendiyse 1, diğer durumlarda 0

$g_{i,j,l} =$ Yol temizleme aracı $i, j, l \in N \cup \{s, t\}$ düğümlerini ardışık ziyaret ettiyse 1, diğer durumlarda 0

$f_{i,j} =$ Yol temizleme aracı $(i, j) \in A$ yönlü ayrıtından geçerken tutulan akış değeri

$y_i =$ Yol temizleme aracının $i \in N \cup \{s, t\}$ düğümünü ziyaret etme sayısı

$t_{i,j} =$ Yol temizleme aracının $(i, j) \in E$ ayrıtından geçerek $j \in N$ düğümüne ulaşma zamanı

$o_{i,j} =$ Yol temizleme aracının $(i, j) \in B$ ayrıtını temizleme zamanı

Yardım malzemesi dağıtımını ile alakalı karar değişkenleri ise aşağıda sıralanmaktadır:

$yv_{v,i,j} = v \in V$ yardım malzemesi dağıtım aracı, $i \in C \cup \{s\}$ kritik düğümü ardından $j \in C \cup \{t\}$ kritik düğümünü ziyaret ettiyse 1, diğer durumlarda 0

$zv_{c,v} = v \in V$ yardım malzemesi dağıtım aracı, $c \in C$ kritik düğümünü ziyaret ettiyse 1, diğer durumlarda 0

$xv_{i,j,c,v} = v \in V$ yardım malzemesi dağıtım aracı, $c \in C \cup \{t\}$ kritik düğümüne $(i, j) \in A$ yönlü ayrıtını kullanarak gittiyse 1, diğer durumlarda 0

$tv_{i,c,v} = v \in V$ yardım malzemesi dağıtım aracının $c \in C \cup \{t\}$ kritik düğümüne giderken $i \in N$ düğümünden geçme zamanı

$uv_{i,v} = i \in C \cup \{s, t\}$ kritik düğümünün $v \in V$ yardım malzemesi dağıtım aracının rotasındaki ziyaret edilme sırası

$TT_{c,v} = v \in V$ yardım malzemesi dağıtım aracının $c \in C \cup \{s, t\}$ kritik düğümüne ulaşma zamanı

Matematiksel model kritik düğümlere yardım malzemelerinin iletilme zamanının toplamının en küçüklenmesini amaçlamaktadır.

$$\min \sum_{k \in C} \sum_{v \in V} TT_{k,v}$$

Model kısıtları ise aşağıda sıralanmaktadır.

$$\sum_{j \in N} x_{s,j} = 1 \quad (4.1)$$

$$\sum_{j \in N} x_{j,t} = 1 \quad (4.2)$$

$$\sum_{j \in NU\{t\}} x_{i,j} - \sum_{j \in NU\{s\}} x_{j,i} = 0 \quad \forall i \in N \quad (4.3)$$

$$\sum_{j \in NU\{s\}} x_{j,i} = y_i \quad \forall i \in N \cup \{t\} \quad (4.4)$$

$$\sum_{j \in N} f_{s,j} = \sum_{i \in NU\{t\}} y_i \quad (4.5)$$

$$\sum_{j \in N} f_{j,t} = 1 \quad (4.6)$$

$$x_{i,j} \leq z_{i,j} + z_{j,i} \quad \forall (i,j) \in B \quad (4.7)$$

$$x_{j,i} \leq z_{i,j} + z_{j,i} \quad \forall (i,j) \in B \quad (4.8)$$

$$z_{i,j} \leq x_{i,j} \quad \forall (i,j) \in B \quad (4.9)$$

$$z_{j,i} \leq x_{j,i} \quad \forall (i,j) \in B \quad (4.10)$$

$$z_{i,j} + z_{j,i} \leq 1 \quad \forall (i,j) \in B \quad (4.11)$$

$$\sum_{j \in NU\{t\}} f_{i,j} - \sum_{j \in NU\{s\}} f_{j,i} = -1 \cdot y_i \quad \forall i \in N \quad (4.12)$$

$$f_{i,j} \leq M \cdot x_{i,j} \quad \forall (i,j) \in A \quad (4.13)$$

$$f_{i,j} \geq x_{i,j} \quad \forall (i,j) \in A \quad (4.14)$$

$$2 \cdot g_{i,j,l} \leq x_{i,j} + x_{j,l} \quad \forall i,j,l \in N, \quad \forall (i,j), (j,l) \in A \quad (4.15)$$

$$x_{i,j} \leq \sum_{l \in NU\{t\}} g_{i,j,l} \quad \forall (i,j) \in A, j \neq t \quad (4.16)$$

$$x_{i,j} \leq \sum_{k \in NU\{s\}} g_{k,i,j} \quad \forall (i,j) \in A, i \neq s \quad (4.17)$$

$$\sum_{l \in NU\{t\}} g_{i,j,l} \leq 1 \quad \forall (i,j) \in A \quad (4.18)$$

$$t_{j,l} \geq t_{i,j} + d_{j,l} + z_{j,l} \cdot U_{j,l} - (1 - g_{i,j,l}) \cdot M \quad \forall (j,l) \in B, \forall (i,j) \in A \quad (4.19)$$

$$t_{j,l} \geq t_{i,j} + d_{j,l} - (1 - g_{i,j,l}) \cdot M \quad \forall (i,j), (j,l) \in A \quad (4.20)$$

$$t_{i,j} - (1 - z_{i,j}) \cdot M \leq o_{i,j} \quad \forall (i,j) \in B \quad (4.21)$$

$$t_{j,i} - (1 - z_{j,i}) \cdot M \leq o_{i,j} \quad \forall (i,j) \in B \quad (4.22)$$

$$xv_{i,j,c,v} \leq z_{i,j} + z_{j,i} \quad \forall (i,j) \in A, c \in C, \forall v \in V, \forall (i,j) \in B \quad (4.23)$$

$$\sum_{v \in V} zv_{k,v} = 1 \quad \forall k \in C \quad (4.24)$$

$$\sum_{k \in C} yv_{s,k,v} = 1 \quad \forall v \in V \quad (4.25)$$

$$\sum_{k \in C} yv_{k,t,v} = 1 \quad \forall v \in V \quad (4.26)$$

$$\sum_{l \in NU\{s\}} yv_{l,k,v} = zv_{k,v} \quad \forall v \in V, \forall k \in C \quad (4.27)$$

$$\sum_{l \in NU\{t\}} yv_{k,l,v} = zv_{k,v} \quad \forall v \in V, \forall k \in C \quad (4.28)$$

$$\sum_{\substack{(i,j) \in A \\ i \in NC}} xv_{i,j,l,v} = zv_{l,v} \quad \forall v \in V, \forall l \in C \quad (4.29)$$

$$\sum_{\substack{(i,j) \in A \\ i \in NC \\ j=l}} xv_{i,j,l,v} = yv_{k,l,v} \quad \forall v \in V, \forall k \in C, \forall l \in C \quad (4.30)$$

$$\sum_{\substack{(j,i) \in A \\ i=l}} xv_{j,i,k,v} = \sum_{\substack{(i,j) \in A \\ i=l}} xv_{i,j,k,v} \quad \forall v \in V, \forall k \in C, \forall l \in N \text{ e\u017e} \text{ } l \in NC \quad (4.31)$$

$$TT_{s,v} = 0 \quad \forall v \in V \quad (4.32)$$

$$TT_{lv} \geq tv_{ilv} + d_{il} - (1 - xv_{ilv}) \cdot M \quad \forall v \in V, \forall l \in C, \forall i \in N, \text{ e\u017e} \text{ } i \in NC, \text{ e\u017e} \text{ } (i,l) \in A \quad (4.33)$$

$$TT_{lv} \geq o_{il} + d_{il} - (1 - xv_{ilv}) \cdot M \quad \forall v \in V, \forall l \in C, \forall i \in N, \quad (4.34)$$

eğer $i \in NC$,
eğer $(i, l) \in A, \forall (i, l) \in B$

$$tv_{jlv} \geq tv_{ilv} + d_{ij} - (1 - xv_{ijlv}) \cdot M \quad \forall v \in V, \forall l \in C \cup \{t\} \cup \{s\}, \forall i \in N, \forall j \in N \text{ eğer } i \in NC, \text{ eğer } (i, l) \in A \quad (4.35)$$

$$tv_{jlv} \geq o_{il} + d_{ij} - (1 - xv_{ijlv}) \cdot M \quad \forall v \in V, \forall l \in C \cup \{t\} \cup \{s\}, \forall i \in N, \forall j \in N \text{ eğer } i \in NC, \text{ eğer } (i, l) \in A, \forall (i, l) \in B \quad (4.36)$$

$$tv_{jlv} \geq TT_{kv} + d_{kj} - (1 - xv_{kjl v}) \cdot M \quad \forall v \in V, \forall k \in C, \forall l \in C \cup \{s\} \cup \{t\}, k \neq l, \forall j \in C \cup \{s\} \cup \{t\}, \text{ eğer } j \in NC, \forall (k, j) \in B \quad (4.37)$$

$$tv_{jlv} \geq o_{kj} + d_{kj} - (1 - xv_{kjl v}) \cdot M \quad \forall v \in V, \forall k \in C \cup \{s\} \cup \{t\}, \forall k \in N \cup \{s\} \cup \{t\}, k \neq l, \forall j \in N \cup \{s\} \cup \{t\}, \text{ eğer } j \in NC, \forall (k, j) \in B \quad (4.38)$$

$$uv_{s,v} = 0 \quad \forall v \in V \quad (4.39)$$

$$uv_{l,v} - uv_{k,v} \geq 1 - (1 - yv_{k,l,v}) \cdot M \quad \forall v \in V, \forall k \in C \cup \{s\} \cup \{t\}, \forall l \in C \cup \{s\} \cup \{t\} \quad (4.40)$$

$$TT_{k,v} \geq 0 \quad \forall v \in V, \forall k \in C \quad (4.41)$$

$$t_{ilv} \geq 0 \quad \forall v \in V, i \in C, l \in N \quad (4.42)$$

$$o_{il} \geq 0 \quad (i,l) \in B \quad (4.43)$$

$$tv_{c,v} \geq 0 \quad \forall v \in V \quad (4.44)$$

$$C \in C$$

$$uv_{c,v} \geq 0 \quad \forall v \in V \quad (4.45)$$

$$c \in C$$

Problemin çözümü kapsamında geliştirilen karma tamsayılı matematiksel modelin kısıtlarının bir bölümü yol temizleme aracının bir kısmı ise yardım malzemesi dağıtım araçlarının hareketleriyle ilgilidir. Kısıt (4.1) ve Kısıt (4.22) arasındaki kısıtlar yol temizleme aracı ile, Kısıt (4.23) ve Kısıt (4.40) arasındakiler ise yardım malzemesi dağıtım aracı ile ilgili kısıtlardır.

Yol temizleme aracının turuna depo düğümünden başlaması Kısıt (4.1) ile, turunu varış düğümünde sonlandırması Kısıt (4.2) ile sağlanmaktadır. Kısıt (4.3), yol temizleme aracının ağ üzerinde hareket halinde olması, bir i düğümünü ziyaret ettiyse oradan ayrılmasını belirtir. Yol temizleme aracının bir i düğümünü ziyaret etme sayısının, (j,i) ayrıtını bahse konu i düğümüne ulaşmak için kullanma sayısına eşit olacağı Kısıt (4.4) ile gösterilmektedir. Buna ek olarak, yol temizleme aracının ziyaret sayısı bahse konu (i,j) ayrıtının akış değeri olacaktır (Kısıt (4.5)). İlk akış depodan başlamalıdır (Kısıt (4.6)).

Ağda yer alan ayrıtlar yönsüzdür. Bu sebeple yol temizleme aracı bir ayrıttan herhangi bir yönde geçiyorsa söz konusu ayrıtı temizlemiş olacaktır. Enkaz nedeniyle kapanan bir ayrıtın tek yönlü temizlenmesi her iki yönde de kullanılabilir hale gelmesi anlamı taşıyacaktır (Kısıt (4.7)-(4.11)).

Yol temizleme aracının turu boyunca tutulacak akış değerinin hesaplanmasına yönelik kısıtlar (4.12) ile (4.14) arasında sunulmaktadır. Kısıt (4.12) ile bir düğüme giren ayrıtlar ile çıkan ayrıtlardaki akış değerleri arasındaki farkın düğümün ziyaret edilme sayısına eşit olacağı belirtilmektedir. Kullanılan bir ayrıttaki akış değerinin hesaplanmasına yönelik diğer kısıtlar ise (4.13) ve (4.14) numaralıdır.

(4.15)-(4.18) arası kısıtlar yol temizleme aracı için akış kısıtlarıdır. Söz konusu kısıtlar, i,j ve l düğümleri ardışık ziyaret edildiye, yol temizleme aracının (i,j) ve (j,l) ayrıtlarını kullanmasını sağlamaktadırlar.

Afet ardından bazı yollar enkaz nedeniyle kapalı olacaktır. Yol temizleme aracı tarafından kapalı bir yolun açılması gerektiğinde ilgili maliyet yol temizleme aracı tarafından ödenecektir. Bir l düğümüne ulaşmak amaçlandığında, (j,l) ayrıtı kapalı ise

yol temizleme aracının l düğümüne ulaşma zamanı; aracın bir önceki j düğümüne ulaşma zamanı, (j,l) ayrıtının uzunluğu ve bu ayrıtın enkazdan temizlenmesi için gereken maliyetin toplamı olacaktır (Kısıt (4.19)). Bu ayrıt kapalı değilse; yol temizleme aracı l düğümüne bir önceki düğüme ulaşma zamanı ile (j,l) ayrıtının uzunluğu değerlerinin toplamı kadar sürede ulaşacaktır (Kısıt (4.20)). Yol temizleme aracının kapalı bir ayrıttan geçme zamanı söz konusu ayrıtın açılma zamanı ile eşit olacaktır (Kısıt (4.21)-(4.22)).

Yardım malzemesi dağıtım araçları ile alakalı kısıtlar ise takip eden bölümde açıklanmaktadır. Yardım malzemesi dağıtım aracı enkaz nedeniyle kapalı bir ayrıtı kullanılarak bir kritik düğüme ulaşıyorsa, söz konusu ayrıt öncesinde yol temizleme aracı tarafından temizlenmiş olmalıdır (Kısıt (4.23)). Tüm kritik düğümlerin bir yardım malzemesi dağıtım aracı tarafından ziyaret edilmesi gerekmektedir (Kısıt (4.24)). Depodan ayrılan yardım malzemesi araçları bir kritik düğüme ulaşmalıdır (Kısıt (4.25)). Yardım malzemesi dağıtım araçları turunu kritik düğümden ayrılıp varış düğüme ulaşarak tamamlamalıdır (Kısıt (4.26)). Yardım malzemesi dağıtım araçlarına atanan kritik düğümlerin ziyaret edilmesi ile alakalı diğer kısıtlar (4.27) ve (4.28) numaralıdır. Bir yardım malzemesi dağıtım aracına bir kritik düğüm atandıysa, söz konusu kritik düğüm ziyaret edilmelidir (Kısıt (4.29)-(4.30)).

Bir yardım malzemesi dağıtım aracı kritik olmayan bir düğüme geliyorsa oradan ayrılarak turunu sürdürmelidir (Kısıt (4.31)). Depo düğümünden diğer düğümlere ulaşmak maliyetsizdir (Kısıt (4.32)). Yardım malzemesi dağıtım araçlarının bir kritik düğüme ulaşma zamanları, rotalarında enkaz nedeniyle kapanmış bir yol olup olmamasına bağlıdır. Yardım malzemesi dağıtım araçlarının bir l kritik düğümüne ulaşma zamanı eğer kapalı bir ayrıt rotalarında yoksa bir önceki düğümden geçme zamanı ve uzaklık ile ilişkilidir (Kısıt (4.33)). Rotalarında kapalı bir ayrıt var ise, l kritik düğümüne ulaşma zamanı bahse konu kapalı yolun açılma zamanı ve uzaklığa bağlı olacaktır (Kısıt (4.34)). Yardım malzemesi dağıtım araçlarının ara düğümlerden geçme zamanları da benzer şekilde kullanıma açık bir ayrıt kullanılmaktaysa; uzaklık ve bir önceki düğümden geçme zamanına bağlı olacak, enkaz nedeniyle kapalı bir ayrıt kullanılmaktaysa ayrıtın temizlenme zamanına bağlı olacaktır (Kısıt (4.35)-(4.36)). Eğer kritik olmayan bir düğüme kritik bir düğümden ilerleniyorsa, kritik düğümden geçme zamanı ve uzaklığa bağlı olacak, kapalı bir ayrıttan geçiliyorsa ayrıtın temizlenme zamanı da dikkate alınacaktır (Kısıt (4.37)-(4.38)). Yardım malzemesi

dağıtım araçları ilk olarak depo düğümünden hareket ederler. Bu durumda depo düğümünün ziyaret edilme sırası sıfır olacaktır (Kısıt (4.39)). Diğer düğümlerin ziyaret edilme sıraları ise Kısıt 40'taki gibi olacaktır. Bir k düğümü ardından l düğümü ziyaret ediliyorsa, bu iki düğümün ziyaret edilme sıraları arasında bir fark olacaktır (Kısıt (4.40)). Matematiksel modelde kullanılan işaret kısıtları ise (4.41)-(4.45) arasında sunulmaktadır.

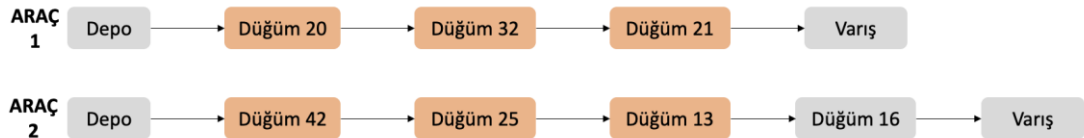


5. SEZGİSEL ALGORİTMA

Veri büyüdükçe ve kritik düğüm sayısı arttıkça önerilen karma tamsayılı doğrusal programlama modeli ile kabul edilebilir sürede çözüm bulmak zorlaşmaktadır. Ancak problemin doğası gereği mümkün olan en kısa sürede çözülmesi gerekmektedir. Bu nedenle optimal çözümden fedakârlık edilerek daha hızlı bir çözüm yöntemi olan sezgisel algoritma geliştirilmiştir. Geliştirilen sezgisel algoritma optimal sonuçtan çok sapmadan kısa sürelerde olurlu bir çözüm bulabilmektedir.

Bu çalışmada geliştirilen sezgisel algoritma kapsamında ilk olarak yardım dağıtım araçları için rastgele birer rota oluşturulmaktadır. Oluşturulan rotalarda kritik düğümler ziyaret edilmektedir. Ardından, oluşturulan rotalarda bazı değişiklikler yapılmaktadır. Bahsedilen değişiklikler arasında araçların birinin rotasından diğerine bir kritik düğüm eklenmesi, rotaların birinden bir düğüm silinmesi veya bir düğüm eklenmesi yer almaktadır. Değişiklikler ardından her bir yardım malzemesi dağıtım aracı için birer adet yardım malzemesi dağıtım rotası oluşturulmaktadır.

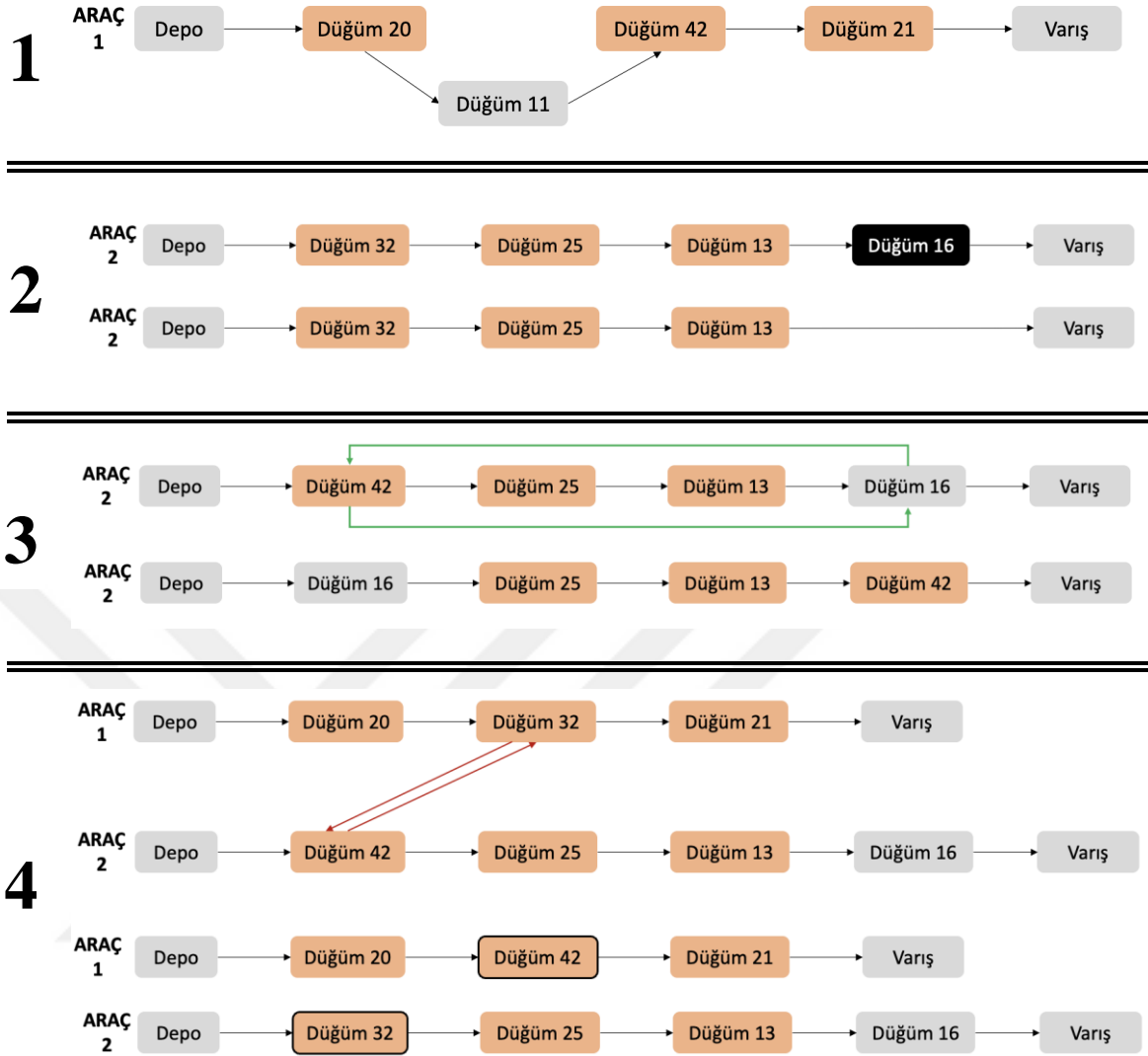
Örnek yardım malzemesi dağıtım rotaları Şekil 5.1’de sunulmaktadır. Burada yer alan yardım malzemesi dağıtım rotaları rastgele bir şekilde oluşturulmuş olup, tüm kritik düğümlerin ziyaret edildiği olurlu çözümlerdir. Turuncu renkli düğümler kritik düğümleri temsil etmektedir. Birinci yardım malzemesi dağıtım aracının rotasında üç adet kritik düğüm yer almaktadır. Bunlar sırasıyla düğüm 20, düğüm 32 ve düğüm 21’dir. İkinci aracın rotasında ise üç adet kritik düğüm ve bir adet ara düğüm yer almaktadır. Bu rotada yer alan kritik düğümler düğüm 42, düğüm 25 ve düğüm 13’tür. Rotada yer alan düğüm 16 ise bir ara düğümdür.



Şekil 5.1:Örnek yardım malzemesi dağıtım rotası.

Problemin çözümü kapsamında geliştirilen sezgisel algoritma ile Şekil 5.1’de sunulan rotalar üzerinde farklı operasyonlar gerçekleştirilerek en hızlı yardım dağıtım rotası elde edilmeye çalışılmaktadır. Operasyonlara ilişkin örnekler Şekil 5.2’de sunulmaktadır. Şekil 5.2 kısım 1’de sunulan operasyon yardım malzemesi dağıtım aracı rotasına bir düğüm eklenmesine örnek oluşturmaktadır. Burada birinci yardım malzemesi dağıtım aracının rotasına, düğüm 20 ile düğüm 42 arasına, 11 numaralı düğüm eklenmektedir. Şekil 5.2 bölüm 2’de sunulan operasyon rotadan bir düğüm çıkarılmasına örnek oluşturmaktadır. Burada ikinci yardım malzemesi dağıtım aracı rotasından 16 numaralı düğüm çıkarılmaktadır. Şekil 5.2 bölüm 3’te sunulan operasyon ise rotadaki iki düğümün yerlerinin değiştirilmesine örnek oluşturmaktadır. İkinci yardım malzemesi dağıtım aracı rotasındaki 42 numaralı düğüm ile 16 numaralı düğüm yeri değiştirilmektedir. Şekil 5.2 bölüm 4’te ise iki yardım malzemesi dağıtım aracının rotasındaki düğümler arası değiş tokuş işlemine örnek verilmektedir. Birinci yardım malzemesi dağıtım aracının rotasında yer alan 32 numaralı düğüm, ikinci yardım malzemesi dağıtım aracının rotasındaki 42 numaralı düğüm ile yer değiştirmektedir.

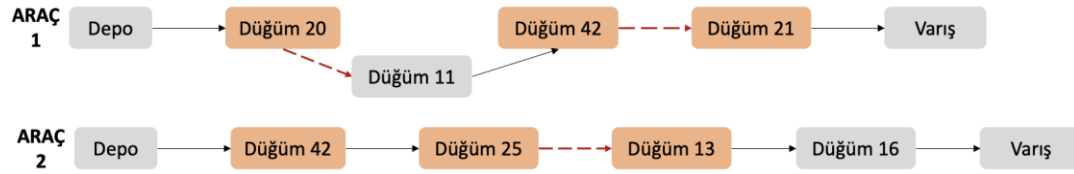
Geliştirilen sezgisel algoritma tarafından icra edilen tüm operasyonlar düğümler arasında yol olduğunu kontrol etmektedir. Örneğin, Şekil 5.2 bölüm 4’te yapılan operasyonda düğüm 32 ile düğüm 25, düğüm 20 ile düğüm 42 arasında yol bulunması sayesinde operasyon gerçekleştirilebilmiştir.



Şekil 5.2:Yardım malzemesi dağıtım araçları rotası üzerinde gerçekleştirilebilecek operasyonlar.

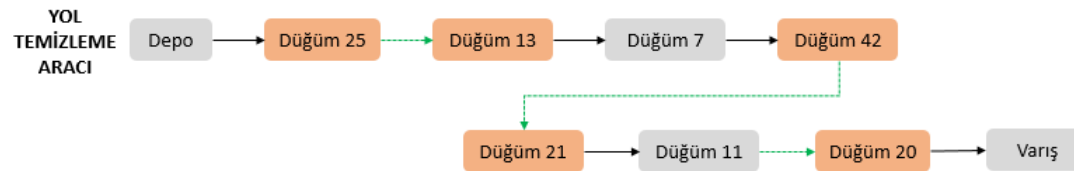
Şekil 5.2’de sunulan operasyonlar rassal olarak gerçekleştirilmektedir. Örneğin birinci yardım malzemesi dağıtım aracı rotasına bir düğüm eklendiği operasyon gerçekleştirilirse, yardım malzemesi dağıtım rotaları Şekil 5.3’teki gibi olabilecektir. Bu durumda, birinci yardım malzemesi dağıtım aracının rotası depo - düğüm 20 - düğüm 11 - düğüm 42 - düğüm 21 – varış düğümü, ikinci yardım malzemesi dağıtım aracının rotası ise depo - düğüm 42 - düğüm 25 - düğüm 13 - düğüm16 – varış düğümü olarak oluşturulabilecektir. Burada kritik bir düğüm olan Düğüm-13 ardından ara düğüm olan Düğüm-16’nın ziyaret edilmesinin amaç fonksiyonuna bir etkisi

bulunmamaktadır. Problemin amaç fonksiyonu kritik düğümlere ulaşılan toplam sürenin en küçüklenmesidir.



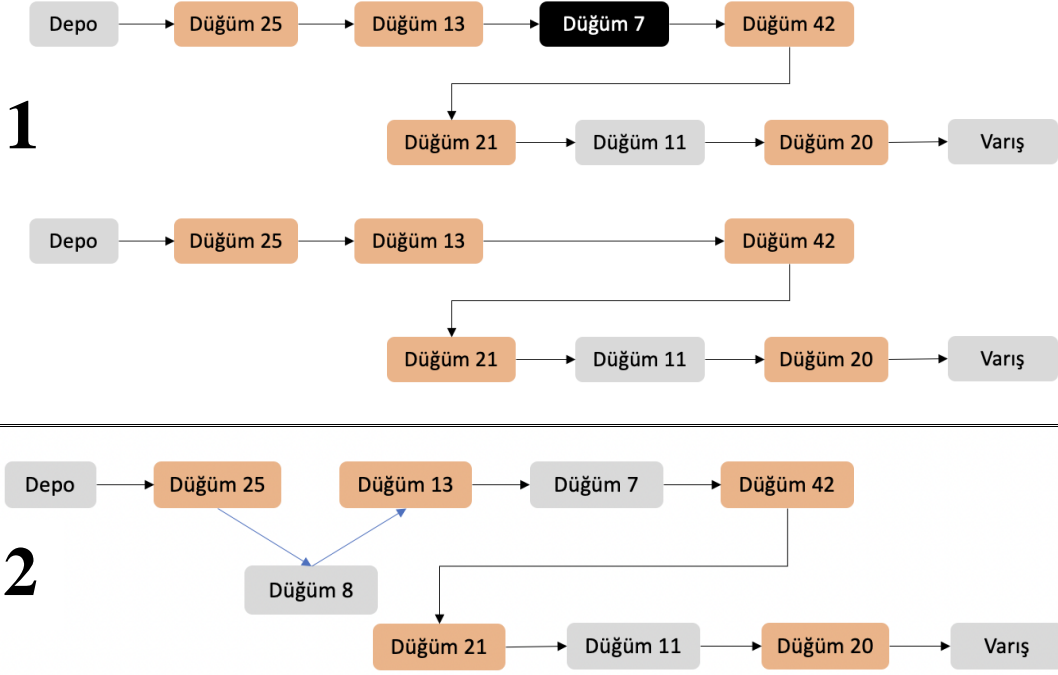
Şekil 5.3:Yardım malzemesi dağıtım araçları rotaları.

Yardım malzemesi dağıtım araçları rotalarında yer alan ve Şekil 5.3'te kırmızı kesikli çizgilerle gösterilen yollar enkaz nedeniyle kapalıdır. Ancak, sezgisel algoritma tarafından oluşturulan bu rotalar yardım malzemelerinin kritik düğümlere mümkün olan en hızlı şekilde ulaştırılmasına yöneliktir. Bu kapsamda, (düğüm 20-düğüm 11), (düğüm 42-düğüm 21) ve (düğüm 25-düğüm 13) yollarının temizlenmesi gerekmektedir. Geliştirilen algoritma ile söz konusu kapalı yollar yol temizleme aracı rotasına eklenerek bir yol temizleme aracı rotası oluşturulmaktadır. Yol temizleme aracı tarafından temizlenen yollar kesikli çizgiyle ve yeşil renk ile gösterilmektedir. Örnek bir olurlu yol temizleme aracı rotası Şekil 5.4'te sunulmaktadır.



Şekil 5.4:Yol temizleme aracı rotası.

Oluşturulan yol temizleme aracı rotası üzerinde de çeşitli operasyonlar yapılmaktadır. Bahse konu operasyonlar; yol temizleme aracı rotasına bir düğüm eklenmesi ve yol temizleme aracı rotasından bir düğüm çıkarılmasıdır. Operasyonlara ilişkin örnek Şekil 5.5'te sunulmaktadır. Şekil 5.5 bölüm 1'de yol temizleme aracı rotasından bir düğüm çıkarılmasına ilişkin örnek sunulmaktadır. Burada düğüm 7 rotadan çıkarılmıştır. Şekil 5.5 bölüm 2'de ise rotaya bir düğüm eklenmesine örnek verilmiştir. Burada ise düğüm 25 ile düğüm 13 arasına düğüm 8 eklenmektedir.

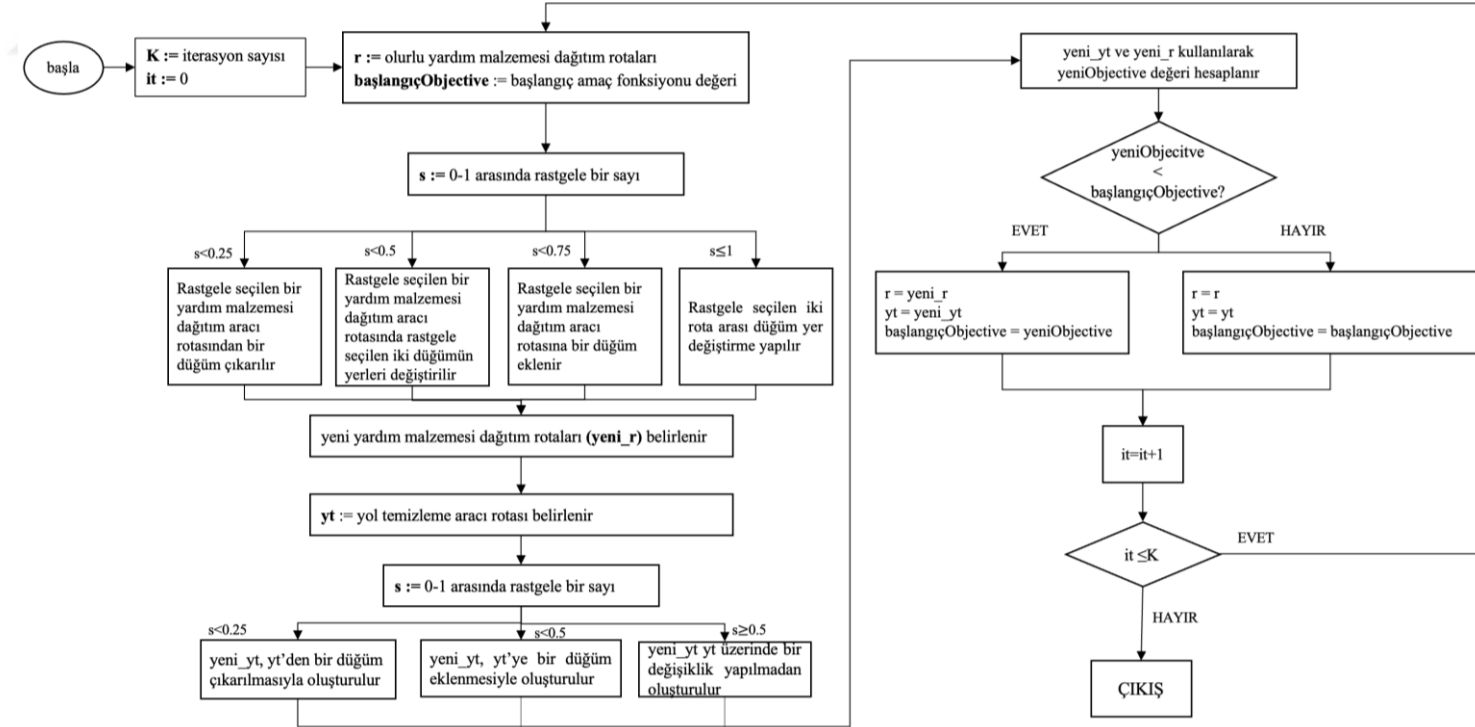


Şekil 5.5:Yol temizleme aracı rotası üzerinde yapılan operasyonlar.

Şekil 5.5'te sunulan operasyonlar sonucunda bir yol temizleme aracı rotası elde edilmektedir. Söz konusu yol temizleme aracı rotası kullanılarak ihtiyaç duyulan yolların temizlenme zamanları elde edilmektedir. Ardından her bir yardım malzemesinin kritik düğümlere ulaşma zamanı bulunarak amaç fonksiyonu hesaplanmaktadır. Eğer başlangıçtakinden daha iyi bir amaç fonksiyonu değeri bulunur ise amaç fonksiyonu değeri ve rotalar revize edilmektedir. Bu çözüm başlangıç çözümü olarak ele alınıp, aynı işlemler tekrarlanmaktadır. Sezgisel algoritma belirlenen sayıda iterasyon yaparak en iyi çözümü aramaktadır.

Takip eden bölümde geliştirilen sezgisel algoritmanın akış grafiği sunulmaktadır (Şekil 5.6).

5.1. Sezgisel Algoritma Akış Grafiği



Şekil 5.6:Yol temizleme aracı rotası üzerinde yapılan operasyonlar.

6. VERİ VE SONUÇLAR

Bu bölümde problemin çözümü kapsamında geliştirilen karma tamsayılı doğrusal programlama modeli ve sezgisel algoritma ile elde edilen sonuçlar sunulmaktadır. Model, teknik özellikleri aşağıda sıralanan sanal bilgisayara kurulu Python 3.8.8 ve Gurobi 9.5.1 kullanılarak çözdürülmüştür.

- İşlemci: Intel®Xeon®CPU E7-4870 v2 @ 2.30 GHz 2.29 GHz (12 Çekirdek)
- RAM: 64,0 GB
- Sistemin Türü: Windows Server 2012 R2 Standard
- Disk Alanı: 100 GB.

Sezgisel algoritma ise özellikleri aşağıda sıralanan bilgisayar kullanılarak çözdürülmüştür:

- İşlemci: Apple M1 çip 8 çekirdek CPU
- RAM: 8 GB
- Sistemin Türü: MacOS

6.1 Veri

Problem kapsamında geliştirilen karma tamsayılı doğrusal programlama modeli ve sezgisel algoritmanın performansının test edilebilmesi için iki ayrı veri seti kullanılmıştır. Bir numaralı veri seti Caunhye ve diğ. (2020) çalışmasında sunulan ve yazarların baş harfleri temel alınarak isimlendirilen CAD veri setidir. CAD veri setinde toplamda altı adet düğüm bulunmaktadır. Bu düğümlerden 4 adedi kritik düğüm olarak ele alınmıştır. Veri setine ilişkin detaylı bilgiler Çizelge 6.1’de sunulmaktadır.

Çizelge 6.1:CAD veri setine ilişkin bilgiler.

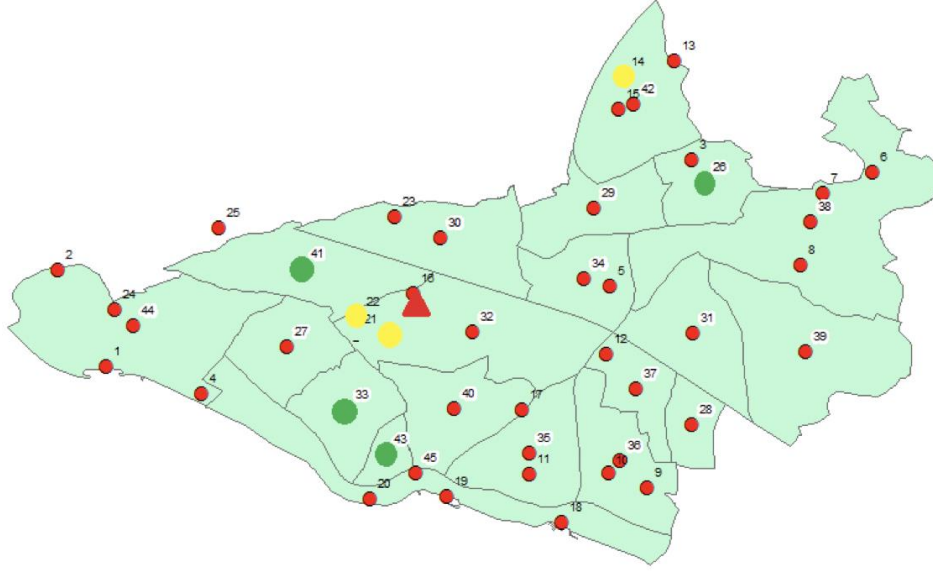
CAD Veri Seti	
Düğüm sayısı	6
Simetrik uzaklık matrisi ve üçgen eşitsizliği	Evet
Kritik düğüm sayısı (Düğüm numaraları)	4 0,1,2,4

İki numaralı veri seti ise İstanbul ili Kartal ilçesine aittir. Bahse konu veri setinde toplamda 45 adet düğüm yer almaktadır. Bu veri setinde okul ve hastane düğümleri kritik düğümler olarak kabul edilmiştir. Bahse konu veri seti hakkında detaylı bilgi Kılıcı (2012)'de sunulmaktadır. Kartal verisine ilişkin detaylar ise Çizelge 6.1.2'de sunulmaktadır.

Çizelge 6.2:Kartal veri setine ilişkin bilgiler.

Kartal Veri Seti	
Düğüm sayısı	45
Simetrik uzaklık matrisi ve üçgen eşitsizliği	Evet
Kritik düğüm sayısı (Düğüm numaraları)	7 14,21,22,26,33,41,43
Okul düğümleri sayısı (Düğüm numaraları)	3 14,21,22
Hastane düğümleri sayısı (Düğüm numaraları)	4 26,33,41,43

Kartal veri setinin haritası Şekil 6.1.1'de sunulmaktadır. Sarı ile işaretli düğümler okulları, yeşil renk ile işaretli düğümler hastaneleri temsil etmektedir. Bunun dışında kalan kırmızılar ise ara düğümlerdir.



Şekil 6.1: Kartal verisine ilişkin harita (Kılıcı (2012)).

Bir düğümden diğerine ulaşmak için gereken süre düğümler arası uzaklık matrisleri ile elde edilmektedir. CAD veri setinde düğümler arası mesafeler Caunhye ve diğ. (2020) tarafından, Kartal veri setinde de Kılıcı (2012) tarafından sunulduğu şekilde kullanılmıştır. Bahsedilen uzaklık matrisleri simetrik yapıdadır. Diğer bir deyişle, i düğümünden j düğümüne ulaşmak için gereken süre ile j düğümünden i düğümüne ulaşmak için gereken süre aynıdır.

Deprem şiddetine göre enkaz miktarının değişkenlik göstereceği değerlendirildiğinden, modele deprem şiddetine bağlı bir parametre eklenmiştir. Söz konusu parametre ile yolların belirli bir yüzdesinin kapalı olması durumu ele alınmaktadır. Ancak, hangi yolların kapalı olacağı rastgele olarak belirlenmektedir. Kapalı yolları açmak için gereken eforun model kapsamında bilindiği kabul edilmektedir.

Geliştirilen karma tamsayı doğrusal programlama modeli ve sezgisel algoritmanın test edilmesi bağlamında CAD ve Kartal veri setlerinin farklı konfigürasyonları oluşturulmuştur. Bahse konu konfigürasyonlar Çizelge 6.2.1’de sunulmaktadır.

Çizelge 6.3:Geliştirilen model ve algoritmanın performansının analizine yönelik yapılan testlerde kullanılan konfigürasyonlar.

Karma Tamsayılı Doğrusal Programlama Modeli		Sezgisel Algoritma	
CAD Veri Seti	Kartal Veri Seti	CAD Veri Seti	Kartal Veri Seti
<ul style="list-style-type: none">Farklı yol kapanma oranlarıFarklı kritik düğüm sayılarıFarklı yardım malzemesi dağıtım aracı sayıları		<ul style="list-style-type: none">Farklı yol kapanma oranlarıFarklı kritik düğüm sayılarıFarklı yardım malzemesi dağıtım aracı sayılarıFarklı iterasyon sayıları	

Takip eden bölümde ilk olarak CAD veri seti içerisindeki bahse konu konfigürasyonlarla elde edilen sonuçlar açıklanacak, ardından Kartal veri setiyle elde edilen bulgular sunulacaktır.

6.2 Sonuçlar

Problemin çözümü kapsamında geliştirilen karma tamsayılı doğrusal programlama modeli ve sezgisel algoritma CAD ve Kartal veri setlerinin çeşitli konfigürasyonlarıyla test edilmiştir. Yapılan testlerde değişkenlik göstermesi muhtemel parametreler temel alınmıştır. Bahse konu değişken parametreler sırasıyla ağda bulunan kritik düğüm sayısı, enkaz nedeniyle yol kapanma oranı, yardım malzemesi dağıtım aracı sayısı ve sezgisel algoritmada kullanılan iterasyon sayısıdır. Yol temizleme aracı sayısı ise bir adet olarak kabul edilmiştir. Takip eden bölümde ilk olarak CAD veri seti ile ardından ise Kartal veri seti ile icra edilen test sonuçları sunulmaktadır.

CAD veri seti içerisinde toplamda 6 adet düğüm bulunmaktadır. Bu düğümlerin bir kısmının kritik düğüm olduğu kabul edilmektedir. CAD veri setinin farklı konfigürasyonları kapsamında kritik düğüm sayısı 2 ile 5 arasında değişecek şekilde testler icra edilmiştir. Bu kapsamda icra edilen testlerin sonuçları Çizelge 6.2.1'de sunulmaktadır.

Çizelge 6.4:CAD verisinin farklı konfigürasyonlarıyla elde edilen sonuçlar.

Kritik düğüm sayısı	Yol kapalılık oranı	2 YDA		3 YDA		4 YDA		5 YDA		
		Amaç Fonksiyonu Değeri	Süre (sn)	Amaç Fonksiyonu Değeri	Süre (sn)	Amaç Fonksiyonu Değeri	Süre (sn)	Amaç Fonksiyonu Değeri	Süre (sn)	
MATEMATİKSEL MODEL	2	10%	0	0.9	0	-	0	-	0	-
		30%	0	0.12	0	-	0	-	0	-
		50%	0	0.14	0	-	0	-	0	-
		70%	0	0.15	0	-	0	-	0	-
		90%	0	0.16	0	-	0	-	0	-
	3	10%	10	0.20	0	0.89	0	-	0	-
		30%	10	0.64	0	1.02	0	-	0	-
		50%	47	6.2	0	1.12	0	-	0	-
		70%	47	8.56	0	1.7	0	-	0	-
		90%	47	13.09	0	1.9	0	-	0	-
	4	10%	34	0.65	10	0.42	0	0.09	0	-
		30%	34	18.65	10	0.23	0	0.1	0	-
		50%	61	69.67	14	3.32	0	0.12	0	-
		70%	161 %61 gap	14840	37	1124	0	0.14	0	-
		90%	161 %61 gap	15430	37	1084	0	1.2	0	-
	5	10%	49	2.46	34	3.27	10	0.65	0	-
		30%	49	7.46	34	3.66	10	4.05	0	-
		50%	198 %61 gap	17150	41	122.12	14	11.74	0	-
		70%	216 %61 gap	12900	47	2435	66	1200	0	-
		%90	216 %61 gap	13100	47	3500	66	1342	0	-
SEZGİSEL ALGORİTMA	1	10%	0	-	0	-	0	-	0	-
		30%	0	-	0	-	0	-	0	-
		50%	0	-	0	-	0	-	0	-
		70%	0	-	0	-	0	-	0	-
		90%	0	-	0	-	0	-	0	-
	2	10%	0	5.15	0	-	0	-	0	-
		30%	0	5.39	0	-	0	-	0	-
		50%	0	6.64	0	-	0	-	0	-
		70%	0	6.75	0	-	0	-	0	-
		90%	0	7.22	0	-	0	-	0	-
	3	10%	10	5.90	0	5.53	0	-	0	-
		30%	10	6.44	0	6.01	1	-	1	-

Kritik düğüm sayısı	Yol kapalılık oranı	2 YDA		3 YDA		4 YDA		5 YDA	
		Amaç Fonksiyonu Değeri	Süre (sn)	Amaç Fonksiyonu Değeri	Süre (sn)	Amaç Fonksiyonu Değeri	Süre (sn)	Amaç Fonksiyonu Değeri	Süre (sn)
	50%	47	11.00	0	6.23	2	-	2	-
	70%	47	10.93	0	7.01	3	-	3	-
	90%	47	10.22	0	7.54	4	-	4	-
4	10%	34	5.65	10	6.02	0	5.94	0	-
	30%	54	6.21	10	6.44	0	5.98	0	-
	50%	80	11.34	47	10.76	0	6.03	0	-
	70%	201	12.62	47	11.01	0	7.01	0	-
	90%	201	12.605	47	10.99	0	7.1	0	-
5	10%	86	6.71	34	6.68	10	6.91	0	6.58
	30%	86	7.05	34	7.30	10	7.45	0	7.12
	50%	323	17.04	57	11.41	14	8.18	0	7.31
	70%	361	13.96	201	14.38	92	11.77	0	7.66
	90%	361	14.02	201	14.36	92	11.75	0	8.41

CAD veri setinin Kartal veri setine göre daha az düğüm içermesi sebebiyle geliştirilen karma tamsayılı doğrusal programlama modeli ile CAD verisi konfigürasyonlarının çoğunda kabul edilebilir süre içerisinde çözüm bulunabilmiştir. Problemin çözümü kapsamında kabul edilebilir süre olarak 4 saat kullanılmaktadır. Kabul edilebilir süre içerisinde çözülemeyen örnekler için en iyileme boşluğu (gap) değeri de sunulmaktadır. Ağdaki kritik düğüm sayısının yardım malzemesi dağıtım aracı sayısından az olduğu durumlarda amaç fonksiyonu değerinin sıfır olduğu bilinmektedir. Bunun sebebi tüm kritik düğümlerin bir araç tarafından direkt olarak ziyaret edilebilmesidir. Ancak böyle durumlar yaratan araç ve kritik düğüm sayıları diğer örneklerde anlamlı olabildiğinden tabloya dahil edilmişlerdir. Bu durumun yaşandığı haller süre kısmında (-) işaretiyle belirtilmektedir.

CAD veri setinde yer alan kritik düğüm sayısının artmasının çözüm süresini uzattığı ve amaç fonksiyonu değerini kötüleştirdiği anlaşılmaktadır. Kritik düğüm sayısının arttığı durumda yardım malzemesi dağıtım aracı sayısının artmasının amaç fonksiyonu üzerinde dengeleyici etkisi olduğu testlerde anlaşılmaktadır. Örneğin, ağda 5 adet kritik düğüm yer aldığı ve yolların %50'sinin kapalı olduğu durum ele alındığında 2 adet yardım malzemesi dağıtım aracıyla elde edilen amaç fonksiyonu değerinin 98

olduğu, araç sayısının 1 artması ile bu değerin 61'e gerilediği, 1 araç daha olduğu durumda ise 14'e kadar düştüğu gözlemlenmektedir. Bu durumun yardım malzemelerinin kritik düğümlere ulaşmayı hızlandırdığı ve afetzedelere yüksek fayda sağlayacağı değerlendirilmektedir.

Ağda enkaz nedeniyle kapalı yol oranının artması da benzer şekilde amaç fonksiyonu değerini kötüleştirmekte ve çözüm süresini uzatmaktadır.

Ayrıca, CAD verisi ile icra edilen testlerde sezgisel algoritma da yer almaktadır. Bu durum sezgisel algoritma ile modelin sonuçlarının kıyaslanması ve sezgisel algoritmanın doğruluğunun test edilmesi için bir olanak yaratmaktadır. Sonuçlar analiz edildiğinde sezgisel algoritma ile elde edilen sonuçların model ile elde edilen sonuçlarla oldukça yakın olduğu tespit edilmektedir. Buna ek olarak, model ile uzun zaman alan çözüm işlemi sezgisel algoritma ile hızlı bir şekilde icra edilebilmektedir. Örneğin ağda 4 adet kritik düğüm ve 2 adet yardım malzemesi dağıtım aracı yer alan ve yolların %50'sinin kapalı olduğu durumda model ile çözüm bulmak 1484 sn. sürerken, sezgisel algoritma ile 11 sn. sürmektedir. Bulunan amaç fonksiyonları değerleri ise oldukça yakındır.

Kartal verisi içerisinde ise toplam 45 adet düğüm bulunmaktadır. Bu düğümler arasında yer alan hastane ve okullar kritik düğümler olarak kabul edilmiştir. Kartal verisi kullanıldığı durumda karma tamsayılı matematiksel model ile kabul edilebilir sürede çözüm bulunamadığından, Kartal veri seti kullanılarak sezgisel algoritma testleri icra edilmiştir. Yapılan testlerde değişken parametreler kritik düğüm kümeleri, enkaz nedeniyle yol kapanma oranı, yardım malzemesi dağıtım aracı sayısı ve kullanılan iterasyon sayısıdır. Teste ilişkin bulgular Çizelge 6.5'te sunulmaktadır.

Çizelge 6.5:Kartal verisinin farklı konfigürasyonlarıyla elde edilen sonuçlar.

YDA Sayısı	Kritik düğüm sayısı	Yol kapalılık oranı	500 İterasyon		1000 İterasyon		1500 İterasyon	
			Amaç Fonksiyonu Değeri	Süre (sn)	Amaç Fonksiyonu Değeri	Süre (sn)	Amaç Fonksiyonu Değeri	Süre (sn)
2	7 (Hastaneler ve okullar toplam)	10%	143	6.77	143	26.57	143	94.66
		30%	145	9.93	145	39.81	145	153.46
		50%	153	10.21	145	50.46	145	177.53
		70%	170	14.16	170	54.41	170	295.23
		90%	319	17.74	175	76.36	175	222.787
	3 (Yalnızca okullar)	10%	21	9.08	21	22.18	21	49.88
		30%	21	9.33	21	22.85	21	52.01
		50%	21	11.32	21	27.69	21	62.57
		70%	21	28.07	21	31.56	21	80.68
		90%	55	28.35	45	57.95	45	131.09
	4 (Yalnızca hastaneler)	10%	39	9.76	39	23.93	39	87.65
		30%	39	10.64	39	41.71	39	94.82
		50%	39	11.83	39	45.96	39	104.2
		70%	67	16.98	67	65.41	67	148.3
		90%	69	19.61	69	88.13	67	146.60
3	7 (Hastaneler ve okullar toplam)	10%	83	11.57	77	45.22	77	102.04
		30%	84	12.96	84	50.95	84	110.67
		50%	92	22.92	92	67.94	84	129.879
		70%	107	21.9	107	82.09	107	245.69
		90%	151	24.39	110	92.85	110	204.82
	3 (Yalnızca okullar)	10%	0	10.12	0	39.59	0	92.442
		30%	0	12.23	0	41.25	0	98.05
		50%	0	16.09	0	44.32	0	114.39
		70%	0	18.34	0	44.78	0	170.65
		90%	0	21.45	0	50.04	0	218.99
	4 (Yalnızca hastaneler)	10%	18	11.59	18	42.55	18	94.67
		30%	18	11.30	18	46.36	18	104.04
		50%	18	12.70	18	48.72	18	105.21
		70%	21	15.97	21	61.88	21	110.34
		90%	21	27.02	21	110.69	21	226.77

YDA Sayısı	Kritik düğüm sayısı	Yol kapalılık oranı	500 İterasyon		1000 İterasyon		1500 İterasyon	
			Amaç Fonksiyonu Değeri	Süre (sn)	Amaç Fonksiyonu Değeri	Süre (sn)	Amaç Fonksiyonu Değeri	Süre (sn)
4	7 (Hastaneler ve okullar toplam)	10%	45	11.75	45	47.27	45	103.61
		30%	58	12.92	58	50.36	50	114.30
		50%	51	18.00	51	62.19	51	142.72
		70%	96	26.94	65	80.52	65	225.32
		90%	65	17.62	65	72.66	65	147.34
	3 (Yalnızca okullar)	10%	0	-	0	-	0	-
		30%	0	-	0	-	0	-
		50%	0	-	0	-	0	-
		70%	0	-	0	-	0	-
		90%	0	-	0	-	0	-
	4 (Yalnızca hastaneler)	10%	0	10.97	0	48.95	0	75.05
		30%	0	12.19	0	48.99	0	77.09
		50%	0	13.09	0	50.03	0	78.4
		70%	0	14.02	0	51.07	0	79.98
		90%	0	17.01	0	75.05	0	90.32
5	7 (Hastaneler ve okullar toplam)	10%	33	11.97	26	47.86	26	107.04
		30%	26	13.24	26	52.20	26	116.00
		50%	26	18.27	26	58.71	26	132.98
		70%	33	18.78	33	61.30	33	143.12
		90%	43	17.08	34	67.346	34	151.91
	3 (Yalnızca okullar)	10%	0	-	0	-	0	-
		30%	0	-	0	-	0	-
		50%	0	-	0	-	0	-
		70%	0	-	0	-	0	-
		90%	0	-	0	-	0	-
	4 (Yalnızca hastaneler)	10%	0	-	0	-	0	-
		30%	0	-	0	-	0	-
		50%	0	-	0	-	0	-
		70%	0	-	0	-	0	-
		90%	0	-	0	-	0	-

YDA Sayısı	Kritik düğüm sayısı	Yol kapalılık oranı	500 İterasyon		1000 İterasyon		1500 İterasyon	
			Amaç Fonksiyonu Değeri	Süre (sn)	Amaç Fonksiyonu Değeri	Süre (sn)	Amaç Fonksiyonu Değeri	Süre (sn)
6	7 (Hastaneler ve okullar toplam)	10%	19	12.11	19	49.17	14	109.38
		30%	14	13.05	14	52.680	14	117.66
		50%	21	14.33	14	56.73	14	126.31
		70%	22	15.188	21	61.68	21	134.69
		90%	22	16.27	22	63.25	22	105.94
	3 (Yalnızca okullar)	10%	0	-	0	-	0	-
		30%	0	-	0	-	0	-
		50%	0	-	0	-	0	-
		70%	0	-	0	-	0	-
		90%	0	-	0	-	0	-
	4 (Yalnızca hastaneler)	10%	0	-	0	-	0	-
		30%	0	-	0	-	0	-
		50%	0	-	0	-	0	-
		70%	0	-	0	-	0	-
		90%	0	-	0	-	0	-

Kartal veri seti ile yapılan testler ile değişken kabul edilen her bir parametrenin algoritma performansına etkisi analiz edilmiştir. Ağda bulunan yardım malzemesi dağıtım aracı sayısı 2 ile 6 arasında değiştirilmiştir. Bunun sebebi Kartal veri setinde en fazla 7 adet kritik düğüm yer almasıdır. Yardım malzemesi dağıtım aracı sayısının 7 olduğu durumda her bir araç depodan doğrudan bir kritik düğüme ulaşacağından amaç fonksiyonu değerinin sıfır olacağı bilinmektedir. Benzer durumlar yalnızca okulların ve yalnızca hastanelerin kritik düğüm olarak ele alındığı durumda da mevcuttur. Ağda 3 adet okul, 4 adet hastane bulunmaktadır. Yardım malzemesi dağıtım aracı sayısının 3 ve 4 olduğu durumlarda amaç fonksiyonunun sıfır değeri aldığı görülmektedir. Ancak bu değerler tablo bütünlüğünün bozulmaması amacıyla tabloda tutulmuştur.

Kartal veri seti ve sezgisel algoritma ile yapılan testler sonucunda ağda bulunan yardım malzemesi dağıtım aracı sayısının artmasının amaç fonksiyonu değerini iyileştirdiği gözlemlenmiştir. Bu durumun gerçek hayatla uyumlu olduğu değerlendirilmektedir. Araç sayısının her bir artışı bir önceki araç sayısı ile üretilen değerlerden daha iyi sonuçlar üretmektedir. Örneğin ağda 2 yardım malzemesi dağıtım aracı ve 7 kritik

düğüm olduğu durumda yolların %90'ı kapalı ise 500 iterasyon ile elde edilen amaç fonksiyonu değeri 319 iken, araç sayısı 1 artırıldığında nerdeyse %100 iyileşme göstererek 151'e ulaşmaktadır. Bu kapsamda, kritik bölgelere yardım malzemelerinin hızlı iletimiyle afet ardından afetzedelerin yaşam kalitelerinin artırılmasına doğrudan katkısı olduğu değerlendirilmektedir.

Afetlerin şiddetleri ve sürelerine göre artlarında bıraktıkları enkaz miktarı değişkenlik göstermektedir. Bu kapsamda problemde yer alan bir diğer önemli değişken parametre enkaz miktarıdır. Enkaz miktarı kapanan yol oranı ile doğal olarak ilintilidir. Bu nedenle, testlerde farklı enkaz nedeniyle yol kapanma oranları ele alınmıştır. Testler sonucunda, enkaz nedeniyle kapanan yol oranının artmasının çözüm bulma süresini uzattığı ve amaç fonksiyonu değerini kötüleştirdiği anlaşılmıştır. Ağda enkaz nedeniyle kapanan yol sayısının artmasının negatif etkisinin yardım malzemesi dağıtım aracı sayısının artırılması ile dengelenebileceği tespit edilmiştir. Örneğin, ağda 7 kritik düğüm olduğu ve yolların %90'ının enkaz nedeniyle kapandığı durumlar analiz edildiğinde, 2 adet araç bulunan senaryoda amaç fonksiyonu değeri 319 iken, 6 adet araç bulunan durumda ise 22 olmaktadır. Bunun sebebi, ağdaki açık olan yollardan envanterde bulunan araçların hızlıca rotalanmasıdır.

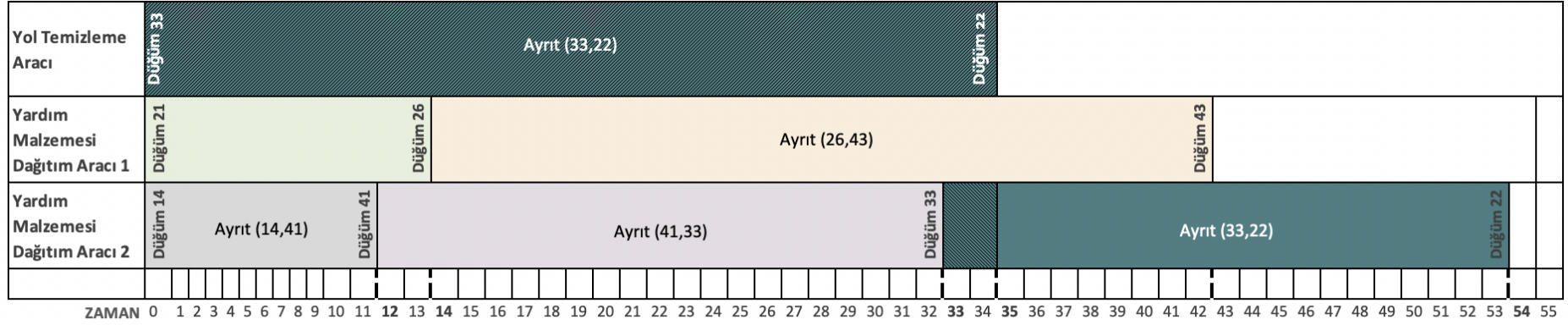
Ağda yer alan kritik düğüm sayısının algoritma performansına etkisi analiz edildiğinde ise kritik düğüm sayısının artmasının çözüm süresini uzattığı ve amaç fonksiyonu değerini kötüleştirdiği anlaşılmaktadır.

Geliştirilen sezgisel algoritma belirli iterasyonlarda tekrar yaparak ulaşabileceği en iyi çözümü araştırmaktadır. Bu nedenle testlerde farklı iterasyon sayılarına da yer verilmiştir. Sezgisel algoritma 500,1000 ve 1500 iterasyonla denenerek sonuçlar kayıt altına alınmıştır. Yapılan testler sonucunda iterasyon sayısının artmasının amaç fonksiyonu üzerinde iyileştirici etkisi olduğu anlaşılmıştır. Örneğin ağda 7 adet kritik düğüm, 2 adet yardım malzemesi dağıtım aracı olduğu ve yol kapanma oranının %90 olduğu senaryoda 500 iterasyonla elde edilen amaç fonksiyonu değeri 319 iken iterasyon sayısı 1000 yapıldığında bu sayı 175'e inmektedir. Başka bir örnek vermek gerekirse; ağda bulunan kritik düğümlerin yalnızca hastaneler olduğu, iki adet yardım malzemesi dağıtım aracı bulunan ve yolların %90'ının enkaz nedeniyle kapandığı durumda 500 ve 1000 iterasyonla elde edilen amaç fonksiyonu değeri 69'dur. İterasyon sayısı 1500 yapıldığında ise amaç fonksiyonunda iyileşme sağlanarak 67 elde edilmektedir. Benzer örnekler Çizelge 6.2.1'de yer almaktadır.

500, 1000 ve 1500 iterasyon ile elde edilen sezgisel algoritma sonuçları detaylarıyla EK-1, EK-2 ve EK-3'te sunulmaktadır.

Yol temizleme aracı ile yardım malzemesi dağıtım araçlarının turlarının birbirlerine etkisinin anlaşılabilirliğinin artırılması amacıyla Şekil 6.2.2'deki Gantt şeması hazırlanmıştır. Şemada ilk çizgi yol temizleme aracının rotasını temsil etmektedir. Yol temizleme aracı turuna Düğüm 33'den başlamakta ve Düğüm 22'ye ulaşmak için bu yolu temizlemektedir. Yol $t=35$ anında kullanılabilir hale gelmektedir. Bu durum 2 numaralı yardım malzemesi dağıtım aracının turunu etkilemektedir. Araç Düğüm 33'e $t=33$ anında ulaşmakta, oradan da Düğüm 22'ye gitmeyi hedeflemektedir. Ancak söz konusu (33,22) ayrıtı $t=35$ anına kadar kullanılamayacağından $t=2$ kadar bir süre araç beklemektedir. Buradan görüldüğü üzere araçlar turlarını senkronize icra etmektedir.





Yol temizleme aracı tarafından ayrıt (33,22) t=35'de kullanılabilir hale getirilmektedir.

İki numaralı yardım malzemesi dağıtım aracı bu yola t=33 anında ulaşmakta ancak t=2 kadar bir süre yolun kullanılabilir hale gelmesini beklemektedir.

Şekil 6.2: Turun Gantt şaması gösterimi.



7. SONUÇ VE GELECEK ÇALIŞMA ALANLARI

Afetler ardından kısa sürede büyük miktarlarda enkaz oluşmaktadır. Oluşan enkaz, afet bölgesinde kimi yolları kapatarak bölgede ulaşımı engelleyebilmektedir. Ancak doğal afetler ardından afet bölgesine mümkün olan en kısa sürede yardım malzemelerinin iletilmesi kritik öneme sahiptir. Bu kapsamda, bu çalışma ile, afet ardından bölgeye olabildiğince hızlı yardım malzemesi ulaştırılmasına yönelik bir problem ele alınmıştır. Çalışmaya konu problem kapsamında, ağda yer alan bazı yolların enkaz nedeniyle kapalı olacağı kabul edilmiştir. Problemin amaç fonksiyonu bölgedeki kritik düğümlere ulaşılan toplam sürenin en küçüklenmesidir.

Bu amaç doğrultusunda, problemde enkaz nedeniyle kapanan ve açılması gereken yolları açmakla sorumlu bir adet yol temizleme aracı ve afet bölgesine ihtiyaç duyulan çeşitli yardım malzemelerin iletilmesinden sorumlu birden fazla da yardım malzemesi dağıtım aracı yer almaktadır. Afetler ardından bahse konu yol temizleme ve yardım dağıtım işlemlerinin senkronize icra edilmesi süreci hızlandıracığından dolayı gerekliliktir. Bu sebeple, bu çalışmada yol temizleme ve yardım dağıtım işlemleri senkronize icra edilmektedir.

Literatür incelendiğinde afet sonrası süreçlerin optimizasyonuna odaklanan çok sayıda çalışmaya rastlanmıştır. Bu çalışmaların büyük çoğunluğunun yol temizleme ve yardım dağıtım süreçlerinden bir tanesine odaklandığı tespit edilmiştir. Bu iki süreci senkronize olarak ele alan az sayıda çalışma ise dikkatli bir analize tabi tutulmuştur. Bu çalışmanın literatüre temel katkısının, problemde sunulan eşzamanlılık yaklaşımı ile afetzedelerin yaşam kalitelerinin yükseltilmesi ve afet ardından sistematik bir planlama yapılabilmesi olduğu değerlendirilmektedir.

Bu problemin çözümü kapsamında ilk olarak karma tamsayı doğrusal programlama modeli geliştirilmiştir. Geliştirilen model küçük veri setleri ve düşük yol kapanma oranları ile oldukça hızlı sonuç elde edebilmektedir. Daha büyük veri setleri için ise kabul edilebilir süre olan 4 saat içerisinde sonuç bulunamamaktadır. Bu nedenle, bir sezgisel algoritma geliştirilmiştir. Sezgisel algoritma ile tüm yol kapalılık oranlarında saniyeler içerisinde sonuç elde edilebilmektedir.

Geliştirilen sezgisel algoritmanın doğruluk ve performansının test edilmesi amacıyla iki farklı veri setinden faydalanılmıştır. Bunlar detayları Bölüm 6'da sunulan CAD veri seti ve Kartal veri setidir. CAD veri seti Caunhye ve diğ. (2020) tarafından sunulan küçük bir veri setidir. İkinci veri seti ise Kılıcı (2012) tarafından sunulan İstanbul ili Kartal ilçesine ait verileri içermektedir. Söz konusu veri setlerinden CAD veri seti içerisinde 6 adet, Kartal veri setinde ise 45 adet düğüm yer almaktadır.

Geliştirilen sezgisel algoritma CAD ve Kartal veri setlerinin farklı konfigürasyonları ile denenmiştir. Bahse konu farklı konfigürasyonlar; değişken yol kapanma oranları, değişken yardım malzemesi araç sayıları, değişken kritik düğüm sayıları ve farklı iterasyon sayılarıdır. Yapılan test sonucunda sezgisel algoritmanın yüksek bir performansa sahip olduğu gözlemlenmiştir. Sezgisel algoritma ile optimal sonuçtan ortalama %24 uzaklaşarak bir dakika ve altı sürelerde sonuç elde edilebilmektedir.

Farklı konfigürasyonlarla yapılan denemeler sonucunda yol kapanma oranı arttıkça çözüm süresinin uzadığı, amaç fonksiyonu değerinin kötüleştiği tespit edilmiştir. Benzer bir etkinin kritik düğüm sayısının artmasıyla da ortaya çıktığı gözlemlenmiştir. Yardım malzemesi dağıtım sayısı ile iterasyon sayısının artması ise amaç fonksiyonu değerini iyileştirmektedir. Buna ek olarak, kritik düğüm sayısının artmasıyla oluşan negatif etkinin yardım malzemesi dağıtım aracı sayısının artırılmasıyla dengelenebileceği anlaşılmıştır.

Bu çalışmanın devamında birden fazla yol temizleme aracının dahil edildiği bir problem ele alınabileceği değerlendirilmektedir. Çalışmada geliştirilen model ve sezgisel algoritma birden fazla yol temizleme aracı bulunan bir versiyona dönüştürülmeye uygundur.

Problemin çözümü kapsamında geliştirilen sezgisel algoritmaya ek olarak metasezgisel algoritma geliştirilmesinin de çözüme katkı sağlayacağı değerlendirilmektedir.

Gelecekte yapılabilecek bir diğer çalışma ise farklı amaç fonksiyonlarının dahilidir. Problemin çözümü kapsamında geliştirilen modelin farklı amaç fonksiyonları ile çalışmaya müsait olması sebebiyle farklı amaç fonksiyonlarının potansiyel bir alan olduğu değerlendirilmektedir.

KAYNAKLAR

- Ajam, Meraj ve Akbari, Vahid ve Salman, Sibel.** Minimizing latency in post-disaster road clearance operations. *European Journal of Operational Research*, 277(3):1098-1112, 2019.
- Akbari, Vahid ve Salman, Fatma Sibel.** Multi-vehicle synchronized arc routing problem to restore post-disaster network connectivity. *European Journal of Operational Research*, 257(2):625–640, 2017b.
- Akbari, Vahid ve Salman, Fatma Sibel.** Multi-vehicle prize collecting arc routing for connectivity problem. *Computers & Operations Research*, 82:52–68., 2017a.
- Akbari, Vahid ve Sayarshad, Hamid R.** Integrated and coordinated relief logistics and road recovery planning problem, *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 111, 2022.
- Berktaş, Nihal ve Yetiş Kara, Bahar ve Kardeş, Oya.** Solution methodologies for debris removal in disaster response, *EURO Journal on Computational Optimization*, 4(3-4):403–445, 2016.
- Berktaş, Nihal ve Yetiş Kara, Bahar.** Solution methodologies for debris removal in disaster response. *EURO J Comput Optim*, 4:403–445, 2016.
- Briskorn, D., Kimms, A. & Olschok, D.** Simultaneous planning for disaster road clearance and distribution of relief goods: a basic model and an exact solution method. *OR Spectrum* 42, 591–619, 2020.
- Caunhye, Aakil ve Zhang, Yidong ve Li, Mingzhe ve Nie, Xiaofeng.** A Location-Routing Model for Prepositioning and Distributing Emergency Supplies. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review* 90: 161–176, 2016.
- Croes G. A.,** A method for solving traveling salesman problems. *Operations Res.* 6, pp., 791-812, 1958.
- Caunhye, Aakil M ve Aydin, Nazlı Yonca ve Düzgün, H. Şebnem.** Robust post-disaster route restoration, 2019.
- Çelik, Melih ve Ergun, Özlem ve Keskinocak, Pınar.** Post Disaster Debris Clearance with Incomplete Information. In 2013 International IIE Conference, 2013.
- Duque, Pablo A. Maya ve Dolinskaya, Irina ve Sörensen, Kenneth.** Network repair crew scheduling and routing for emergency relief distribution problem, *European Journal of Operational Research*, 248(1), 272-285, 2016.

- Garcia-Alviz, Juliette ve Galindo, Gina ve Arellana, Julian ve Yie-Pinedo, Ruben.** Planning road network restoration and relief distribution under heterogeneous road disruptions, *OR Spectrum*, 43, 941–981, 2021.
- Kasaei, Maziar ve Salman, Fatma Sibel.** Arc routing problems to restore connectivity of a road network. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 95:177 – 206, 2016.
- Kılıcı, Fırat.** A decision support system for shelter site selection with gis integration: Case for Turkey (M.S. Thesis, Bilkent University), 2012.
- Kılıcı, Fırat ve Bozkaya, Burçin ve; Kara Yetiş, Bahar. ve Oruc, Buse Eylül.** “Kartal District of Istanbul”, *Mendeley Data*, V1, doi: 10.17632/xhz8m74pp7.1, (2018).
- Li, Shuanglin ve Ma, Zujun ve Teo, Kok Lay.** A new model for road network repair after natural disasters: Integrating logistics support scheduling with repair crew scheduling and routing activities, *Computers and Industrial Engineering*, 145, 2020.
- Li, Yinglei ve Chung, Sung Hoon.** Disaster Relief Routing Under Uncertainty: A Robust Optimization Approach, *IIE Transactions*, 2018.
- Liberatore, Federico ve Ortuno, M. T ve Tirado, Gregori ve Vitoriano, B, ve Scaparra, M. P.** A hierarchical compromise model for the joint optimization of recovery operations and distribution of emergency goods in humanitarian logistics. *Computers & Operations Research*, 42, 3–13, 2014.
- Lu, Chung-Cheng ve Ying, Kuo-Ching ve Chen, Hui-Ju.** Real-time relief distribution in the aftermath of disasters – A rolling horizon approach, *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 93, 1-20, 2016.
- Maya Duque, Pablo ve Dolinskaya, Irina S. ve Sörensen Kenneth.** Network Repair Crew Scheduling and Routing for Emergency Relief Distribution Problem, *European Journal of Operational Research*, 2015.
- Moreno, Alfredo ve Alem, Douglas ve Gendreauc, Michel ve Munaria Pedro.** The heterogeneous multicrew scheduling and routing problem in road restoration, *Transportation Research Part B* 141, 24–58, 2020.
- Özdamar, Linet ve Ekinci, Ediz ve Küçük yazıcı, Beste.** Emergency Logistics Planning in Natural Disasters, *Annals of operations research*, 129(1), 217-245, 2004.
- Öksüz, M. K., and S. I. Satoglu.** “A Two-Stage Stochastic Model for Location Planning of Temporary Medical Centers for Disaster Response.” *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 44, 2020.
- Özdamar Linet ve Tüzün Aksu, Dilek ve Ergüneş, Biket.** Coordinating debris cleanup operations in post disaster road networks, *Socio-Economic Planning Sciences*, 48(4), 249-262, 2014.
- Repoussis, Panagiotis ve Paraskevopoulos, Dimitris ve Vazacopoulos, Alkviadis ve Hupert, Nathaniel.** Optimizing Emergency Preparedness and Resource Utilization in Mass-Casualty Incidents.” *European Journal of Operational Research* 255 (2): 531–544, 2016.

- Salman, Fatma Sibel ve Gül, Sezer.** Deployment of Field Hospitals in Mass Casualty Incidents.” *Computers & Industrial Engineering* 74: 37–51, 2014.
- Shiri, David ve Akbari, Vahid ve Salman, Fatma Sibel.** Online routing and scheduling of search-and-rescue teams. *OR Spectrum* 42, 755–784 (2020).
- Şahin, Halenur.** Debris Removal During Disaster Response Phase: A Case For Turkey, 2013.
- Şahin, Halenur, Kara Yetiş, Bahar, ve Karaşan, Oya.** Debris removal during disaster response: A case for turkey. *Socio-Economic Planning Sciences*, 53:49–59, 2016.
- Tavakkoli-Moghaddam, Reza ve Memari, Pedram ve Talebi, Ehsan.** A Bi-objective Location-Allocation Problem of Temporary Emergency Stations and Ambulance Routing in a Disaster Situation. *IEEE 4th International Conference on Optimization and Applications*, 1–4, 2018.
- Tüzün Aksu, Dilek ve Özdamar, Linet.** A mathematical model for post-disaster road restoration: Enabling accessibility and evacuation. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 61:56–67, 2014.
- Yan, Shangyao ve Shih, Yu Lin.** A time-space network model for work team scheduling after a major disaster. *Journal of the Chinese Institute of Engineers*, 30(1):63–75, 2007.
- Yan, Shangyao ve Shih, Yu Lin.** An ant colony system-based hybrid algorithm for an emergency roadway repair time-space network flow problem. *Transportmetrica*, 8(5):361–386, 2012.
- Yi, Wei ve Kumar, Arun.** Ant Colony Optimization for Disaster Relief Operations, *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review* 43 (6): 660–672, 2007.
- Yan Shangyao ve Shih, Yu-Lin.** Optimal scheduling of emergency roadway repair and subsequent relief distribution, *Computers & Operations Research*, 36(6), 2049-2065, 2009.
- Youngchul Shin, Sungwoo Kim, Ilkyeong Moon,** Integrated optimal scheduling of repair crew and relief vehicle after disaster, *Computers & Operations Research*, 105, 237-247, 2019.
- Wei, Xiaowen ve Qiu, Huaxin ve Wang, Dujuan ve Duan, Jiahui ve Wang, Yanzhang ve Cheng, T.C.E.** An integrated location-routing problem with post-disaster relief distribution, *Computers & Industrial Engineering*, Volume 147, 2020.
- World Meteorological Organization.** 2021 State of Climate Services Water, 2021.
- İstanbul Büyükşehir Belediyesi (İBB).** Olası Yıkıcı Bir İstanbul Depreminde Oluşabilecek Enkaza Dair Yönetim Planı, 2019.
- Emergency Event Database (EM-DAT),** 2021 Disasters in numbers, 2021.
- Our World in Data,** <https://ourworldindata.org/grapher/number-of-natural-disaster-events>, 2022.

Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı (AFAD), <https://www.afad.gov.tr/turkiye-deprem-tehlike-haritasi>, 2019.

Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı (AFAD), https://www.afad.gov.tr/kurumlar/afad.gov.tr/39503/xfiles/fayin_merk_ezi.pdf, 2022.

KOERİ BOUN, <http://www.koeri.boun.edu.tr/sismo/2//?s=Doğu+Anadolu+Fay>, 2022.

Wikipedi, List of natural disasters by death toll, https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_natural_disasters_by_death_toll, 2022.



EKLER

EK – 1: 500 iterasyon ve iki adet yardım malzemesi dağıtım aracı ile elde edilen sonuçlar.

EK – 2: 1000 iterasyon ve iki adet yardım malzemesi dağıtım aracı ile elde edilen sonuçlar.

EK – 3: 1500 iterasyon ve iki adet yardım malzemesi dağıtım aracı ile elde edilen sonuçlar.

EK-4: Yol temizleme ve yardım dağıtım araçlarının birbirlerine etkilerini temsil eden görseller

EK – 1: 1500 iterasyon ve iki adet yardım malzemesi dağıtım aracı ile elde edilen sonuçlar.

1500 İTERASYON										
Kritik düğüm sayısı	Yol kapalılık oranı	Amaç fonksiyonu değeri	Süre (sn)	Enkaz kaldırılan yollar	Enkazdan kapanan yol sayısı	Yol Temizleme Rotası	Yolların Temizlenme Zamanları	Yardım Malzemesi Dağıtım Rotaları		Yardım Ulaşma Zamanları
7 (Hastaneler ve okullar toplam)	%10	143	94.66	-	107	s→t	-	s→41→14→33→22 →t	s→21→26→43→t	s: 0, 41: 0, 14: 12.0, 33: 33.0, 22: 52.0, t: 32.0, 21: 0, 26: 14.0, 43: 32.0
	%20	143	103.99	-	202	s→t	-	s→41→14→33→22 →t	s→21→26→43→t	s: 0, 41: 0, 14: 12.0, 33: 33.0, 22: 52.0, t: 32.0, 21: 0, 26: 14.0, 43: 32.0
	%30	145	153.46	(33,22)	289	s→33→22→t	33, 22): 35.0	s→21→26→43→t	s→14→41→33→22 →t	s: 0, 26: 0, 21: 14.0, 43: 34.0, t: 54.0, 14: 0, 41: 12.0, 33: 33.0, 22: 54.0

1500 İTERASYON

Kritik düğüm sayısı	Yol kapalılık oranı	Amaç fonksiyonu değeri	Süre (sn)	Enkaz kaldırılan yollar	Enkazdan kapanan yol sayısı	Yol Temizleme Rotası	Yolların Temizlenme Zamanları	Yardımlı Malzemesi Dağıtım Rotaları		Yardımlı Ulaşma Zamanları
	%40	153	143.906	-	387	s→t	-	s, 41, 14, 33, t	s, 26, 21, 22, 43, t	41: 0, 14: 12.0, 33: 33.0, t: 59.0, 26: 0, 21: 14.0, 22: 35.0, 43: 59.0
	%50	145	177.53	-	478	s→t	-	s→14→41→33→22 →t	s→21→26→43→t	14: 0, 41: 12.0, 33: 33.0, 21: 66.0, 22: 87.0, t: 18.0, 26: 0, 43: 18.0
	%60	153	144.80	-	478	s→t	-	s→14→41→33→t	s→26→21→22→43 →t	14: 0, 41: 12.0, 33: 33.0, t: 59.0, 26: 0, 21: 14.0, 22: 35.0, 43: 59.0
	%70	170	295.23	26, 43	687	s→26→43→t	(26, 43): 30.0	s→14→41→33→t	s→21→22→26→43 →t	s: 0, 14: 0, 41: 12.0, 33: 33.0, t: 61.0, 21: 0, 22: 21.0, 26: 43.0, 43: 61.0

1500 İTERASYON

Kritik düğüm sayısı	Yol kapalılık oranı	Amaç fonksiyonu değeri	Süre (sn)	Enkaz kaldırılan yollar	Enkazdan kapanan yol sayısı	Yol Temizleme Rotası	Yolların Temizlenme Zamanları	Yardım Malzemesi Dağıtım Rotaları	Yardım Ulaşma Zamanları
	%80	179	245.02	-	792	-	-	s→33→41→14→25→40→t s→21→22→26→43→t	2000: 0, 33: 0, 41: 21.0, 14: 33.0, 25: 50.0, 40: 81.0, 26: 96.0, 3000: 45.0, 21: 0, 22: 21.0, 43: 45.0
	%90	175	222.787	(21,26)	894	s→21→26→t	(21,26):31	s→14, 41→33→t s→43→22→26→21→6→t	s:0 14:0 41:12 33:33 43:0 22:24 26:46 21:60 t:93
	%100	1096	332.15	(14,43) (21,15) (15,22) (22,26) (26,41) (41,33)	990	s→ 14→43→21 → 15→22→26, 41→33→t	(14, 43): 55.0, (43, 21): 95.0, (21, 15): 123.0, (15, 22):166.0, (22, 26): 204.0, (26, 41): 248.0,	s→14→43→t s→21→22→26→41→33→t	14: 0, 43: 91.0, 21: 0, 22: 189.0, 26: 226.0, 41: 282.0, 33: 308.0

1500 İTERASYON										
Kritik düğüm sayısı	Yol kapalılık oranı	Amaç fonksiyonu değeri	Süre (sn)	Enkaz kaldırılan yollar	Enkazdan kapanan yol sayısı	Yol Temizleme Rotası	Yolların Temizlenme Zamanları	Yardımlı Malzemesi Dağıtım Rotaları		Yardımlı Ulaşma Zamanları
							(41, 33): 287.0,			
Yalnızca Okullar	%10	21	49.88	-	107	s→t	-	s→14→t	s→22→21→t	14: 0, 22: 0, 21: 21.0
	%20	21	50.62	-	202	s→t	-	s→14→t	s→22→21→t	14: 0, 22: 0, 21: 21.0
	%30	21	52.01	-	289	s→t	-	s→14→t	s→22→21→t	14: 0, 22: 0, 21: 21.0
	%40	21	60.55	-	387	s→t	-	s→14→t	s→22→21→t	14: 0, 22: 0, 21: 21.0
	%50	21	62.57	-	478	s→t	-	s→14→t	s→22→21→t	14: 0, 22: 0, 21: 21.0
	%60	21	63.65	-	580	s→t	-	s→14→t	s→22→21→t	14: 0, 22: 0, 21: 21.0
	%70	21	80.68	-	687	s→t	-	s→14→t	s→22→21→t	14: 0, 22: 0, 21: 21.0
	%80	21	81.81	-	792	s→t	-	s→14→t	s→22→21→t	14: 0, 22: 0, 21: 21.0
	%90	45	131.09	(21,26)	894	s→26→21→t	(26, 21): 31.0	s→14→t	s→22→26→21→t	14:0 22:0 26:22: 21:23
	%100	55	106.79	(21,22)	990	s→21→22→t	(21,22):34	s→14→t	s→21→22→t	14:0 21:0

1500 İTERASYON										
Kritik düğüm sayısı	Yol kapalılık oranı	Amaç fonksiyonu değeri	Süre (sn)	Enkaz kaldırılan yollar	Enkazdan kapanan yol sayısı	Yol Temizleme Rotası	Yolların Temizlenme Zamanları	Yardımlı Malzemesi Dağıtım Rotaları		Yardımlı Ulaşma Zamanları
										22:55
Yalnızca Hastaneler	%10	65	87.65	-	107	s→t	-	s→33→43→t	s→26→41→t	33:0 43:31 26:0 41:34
	%20	65	90.09	-	202	s→t	-	s→33→43→t	s→26→41→t	33:0 43:31 26:0 41:34
	%30	65	94.82	-	289	s→t	-	s→33→43→t	s→26→41→t	33:0 43:31 26:0 41:34
	%40	39	101.71	-	387	s→t	-	s→41→33→t	s→26→43→t	41:0 33:21 26:0 43:18
	%50	39	104.2	-	478	s→t	-	s→41→33→t	s→26→43→t	41:0 33:21 26:0 43:18
	%60	67	135.65	-	580	s→t	-	s→41→33→t	s→26→22→43→t	41:0, 33:21.0, 26:0, 22:22.0, 6:69.0, 43:107.0
	%70	67	148.30	-	687	s→t	-	s→41→33→t	s→26→22→43→t	41:0, 33:21.0, 26:0, 22:22.0, 6:69.0,

1500 İTERASYON

Kritik düğüm sayısı	Yol kapalılık oranı	Amaç fonksiyonu değeri	Süre (sn)	Enkaz kaldırılan yollar	Enkazdan kapanan yol sayısı	Yol Temizleme Rotası	Yolların Temizlenme Zamanları	Yardımlı Malzemesi Dağıtım Rotaları		Yardımlı Ulaşma Zamanları
										43: 107.0
	%80	67	147.29	-	792	s→t	-	s→41→33→t	s→26→22→43→t	41: 0, 33: 21.0, 26: 0, 22: 22.0, 6: 69.0, 43: 107.0
	%90	67	146.60	-	894	s→t	-	s→41→33→t	s→26→22→43→t	41: 0, 33: 21.0, 26: 0, 22: 22.0, 6: 69.0, 43: 107.0
	%100	191	240.82	-	990	s→41→33→2 6→43→t	(41,33): (33,26):	s→33→41→t	s→26→43→t	41: 0, 33: 60.0, 26: 0, 43: 134.0

EK – 2: 1000 iterasyon ve iki adet yardım malzemesi dağıtım aracı ile elde edilen sonuçlar.

1000 İTERASYON										
Kritik düğüm sayısı	Yol kapalılık oranı	Amaç fonksiyonu değeri	Süre (sn)	Enkaz kaldırılan yollar	Enkazdan kapanan yol sayısı	Yol Temizleme Rotası	Yolların Temizlenme Zamanları	Yardım Malzemesi Dağıtım Rotaları		Yardım Ulaşma Zamanları
7 (Hastaneler ve okullar toplam)	%10	143	26.57	-	107	s→t	-	s→41→14→33→22 →t	s→21→26→43→t	s: 0, 41: 0, 14: 12.0, 33: 33.0, 22: 52.0, t: 32.0, 21: 0, 26: 14.0, 43: 32.0
	%20	143	30.01	-	202	s→18→ 21→t	-	s→21→26→43→t	s→14→41→33→22 →t	s: 0, 41: 0, 14: 12.0, 33: 33.0, 22: 52.0, t: 32.0, 21: 0, 26: 14.0, 43: 32.0
	%30	145	39.81	(33,22)	289	s→33→ 22→t	33, 22): 35.0	s→21→26→43→t	s→14→41→33→22 →t	s: 0, 26: 0, 21: 14.0, 43: 34.0, t: 54.0, 14: 0, 41: 12.0, 33: 33.0, 22: 54.0
	%40	145	40.01	(33,22)	387	s→33→ 22→t	33, 22): 35.0	s→21→26→43→t	s→14→41→33→22 →t	s: 0, 26: 0, 21: 14.0, 43: 34.0,

1000 İTERASYON

Kritik düğüm sayısı	Yol kapalılık oranı	Amaç fonksiyonu değeri	Süre (sn)	Enkaz kaldırılan yollar	Enkazdan kapanan yol sayısı	Yol Temizleme Rotası	Yolların Temizlenme Zamanları	Yardımlı Malzemesi Dağıtım Rotaları		Yardımlı Ulaşma Zamanları
										t: 54.0, 14: 0, 41: 12.0, 33: 33.0, 22: 54.0
	%50	145	50.46	(33,22)	478	s→33→ 22→t	33, 22): 35.0	s→21→ 26→43→ t	s→14→41→33→22 → t	s: 0, 26: 0, 21: 14.0, 43: 34.0, t: 54.0, 14: 0, 41: 12.0, 33: 33.0, 22: 54.0
	%60	174	53.79	-	580	s→t	-	s→41→ 14→7→ 33→ t	s→26→21→22→43 →5→ t	s:0 41:0 14:12 33:54 26:0 21:14 22:35 43:59 t:99
	%70	170.0	54.41	26, 43	687	s→26→ 43→t	(26, 43): 30.0	s→14→ 41→33→ t	s→21→22→26→43 → t	s: 0, 14: 0, 41: 12.0, 33: 33.0, t: 61.0, 21: 0, 22: 21.0, 26: 43.0, 43: 61.0
	%80	173	68.30	21,26	792	s→21→ 26→t	(21,26):31	s→14→ 41→33→ t	s→43→22→21→26 →25→t	s:0 14:0

1000 İTERASYON

Kritik düğüm sayısı	Yol kapalılık oranı	Amaç fonksiyonu değeri	Süre (sn)	Enkaz kaldırılan yollar	Enkazdan kapanan yol sayısı	Yol Temizleme Rotası	Yolların Temizlenme Zamanları	Yardım Malzemesi Dağıtım Rotaları		Yardım Ulaşma Zamanları
										41:12 33:33 43:0 22:24 21:45 26:59 t:92
	%90	175	76.36	(21,26)	894	s→21→ 26→t	(21,26):31	s→14, 41→33→ t	s→43→22→26→21 →6→ t	s:0 14:0 41:12 33:33 43:0 22:24 26:46 21:60 t:93
	%100	1096	92.29	(14,43) (21,15) (15,22) (22,26) (26,41) (41,33)	990	s→ 14→43→21 → 15→22→26 , 41→33→t	(14, 43): 55.0, (43, 21): 95.0, (21, 15): 123.0, (15, 22):166.0, (22, 26): 204.0, (26, 41): 248.0, (41, 33): 287.0,	s→14→ 43→ t	s→21→22→26→41 →33→t	14: 0, 43: 91.0, 21: 0, 22: 189.0, 26: 226.0, 41: 282.0, 33: 308.0
Yalnızca okullar	%10	21	22.18	-	107	s→t	-	s→14→ t	s→22→ 21→t	14: 0, 22: 0, 21: 21.0
	%20	21	22.18	-	202	s→t	-	s→14→ t	s→22→ 21→t	14: 0, 22: 0, 21: 21.0

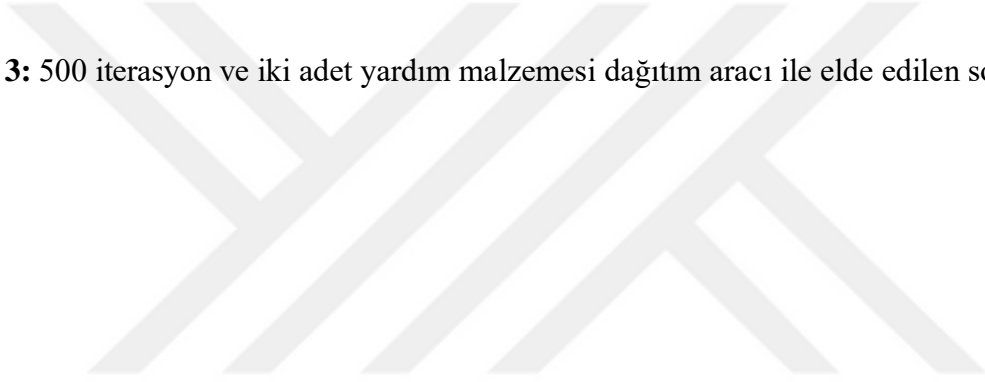
1000 İTERASYON

Kritik düğüm sayısı	Yol kapalılık oranı	Amaç fonksiyonu değeri	Süre (sn)	Enkaz kaldırılan yollar	Enkazdan kapanan yol sayısı	Yol Temizleme Rotası	Yolların Temizlenme Zamanları	Yardım Malzemesi Dağıtım Rotaları		Yardım Ulaşma Zamanları
	%30	21	22.85	-	289	s→t	-	s→14→t	s→22→21→t	14: 0, 22: 0, 21: 21.0
	%40	21	22.85	-	387	s→t	-	s→14→t	s→22→21→t	14: 0, 22: 0, 21: 21.0
	%50	21	27.69	-	478	s→t	-	s→14→t	s→22→21→t	14: 0, 22: 0, 21: 21.0
	%60	21	27.79	-	580	s→t	-	s→14→t	s→22→21→t	14: 0, 22: 0, 21: 21.0
	%70	21	31.56	-	687	s→t	-	s→14→t	s→22→21→t	14: 0, 22: 0, 21: 21.0
	%80	21	31.98	-	792	s→t	-	s→14→t	s→22→21→t	14: 0, 22: 0, 21: 21.0
	%90	45	57.95	(21,26)	894	s→26→21 →t	(26, 21): 31.0	s→14→t	s→22→26→21→t	14:0 22:0 26:22: 21:23
	%100	55	46.49	(21,22)	990	s→21→22 →t	(21,22):34	s→14→t	s→21→22→t	14:0 21:0 22:55
Yalnızca Hastaneler	%10	65	23.93	-	107	s→t	-	s→33→43→t	s→26→41→t	33:0 43:31 26:0 41:34
	%20	39	41.64	-	202	s→t	-	s→41→33→t	s→26→43→t	41:0 33:21 26:0 43:18
	%30	39	41.71	-	289	s→t	-	s→41→33→t	s→26→43→t	41:0

1000 İTERASYON

Kritik düğüm sayısı	Yol kapalılık oranı	Amaç fonksiyonu değeri	Süre (sn)	Enkaz kaldırılan yollar	Enkazdan kapanan yol sayısı	Yol Temizleme Rotası	Yolların Temizlenme Zamanları	Yardımlı Malzemesi Dağıtım Rotaları		Yardımlı Ulaşma Zamanları
										33:21 26:0 43:18
	%40	39	46.09	-	387	s→t	-	s→41→33→t	s→26→43→t	41:0 33:21 26:0 43:18
	%50	39	45.96	-	478	s→t	-	s→41→33→t	s→26→43→t	41:0 33:21 26:0 43:18
	%60	63	70.19	-	580	s→t	-	s→41→33→4→t	s→43→39→26→t	41:0 33:21 43:0 26:42
	%70	100	104.86	(17,33)	687	s→17→33→t	(17,33):35	s→26→4→33→17→t	s→43→35→41→t	26:0 33:41 43:0 41:59
	%80	69	87.89	(26,43)	792	s→26→43→t	(26,43):30	s→41→33→4→t	s→26→43→t	41:0 33:21 26:0 43:48
	%90	69	88.13	(26,43)	894	s→26→43→t	(26,43):30	s→41→33→4→t	s→26→43→t	41:0 33:21 26:0 43:48
	%100	194	106.96	(33,41) (41,43) (43,26)	990	s→33→41→43→26→t	(33, 41): 39.0, (41, 43): 87.0, (43, 26): 117.0,	s→41→33→t	s→43→26→t	41:0 33:60 43:0 26:134

EK – 3: 500 iterasyon ve iki adet yardım malzemesi dağıtım aracı ile elde edilen sonuçlar.



500 İTERASYON

Kritik düğüm sayısı	Yol kapalılık oranı	Amaç fonksiyonu değeri	Süre (sn)	Enkaz kaldırılan yollar	Enkazdan kapanan yol sayısı	Yol Temizleme Rotası	Yolların Temizlenme Zamanları	Yardımlı Malzemesi Dağıtım Rotaları		Yardımlı Ulaşma Zamanları
7 (Hastaneler ve okullar toplam)	%10	143	6.77	-	107	s→t	-	s→41→14→33 →22→t	s→21→26→43→t	41: 0, 14: 12.0, 33: 33.0, 22: 52.0, t: 32.0, 21: 0, 26: 14.0, 43: 32.0
	%20	143	7.03	-	202	s→t	-	s→41→14→33 →22→t	s→21→26→43→t	41: 0, 14: 12.0, 33: 33.0, 22: 52.0, t: 32.0, 21: 0, 26: 14.0, 43: 32.0
	%30	145	9.93	(33,22)	289	s→33→ 22→t	33, 22): 35.0	s→21→ 26→43→t	s→14→41→33→22→t	s: 0, 26: 0, 21: 14.0, 43: 34.0, t: 54.0, 14: 0, 41: 12.0, 33: 33.0, 22: 54.0
	%40	145	10	(33,22)	387	s→33→ 22→t	33, 22): 35.0	s→21→ 26→43→t	s→14→41→33→22→t	s: 0, 26: 0, 21: 14.0, 43: 34.0, t: 54.0, 14: 0, 41: 12.0, 33: 33.0, 22: 54.0

	%50	153	10.21	-	478	s→t	-	s→14→41→33 → t	s→26→21→22→43→ t	14: 0, 41: 12.0, 33: 33.0, t: 59.0, 26: 0, 21: 14.0, 22: 35.0, 43: 59.0
	%60	153	10.30	-	580	s→t	-	s→14→41→33 → t	s→26→21→22→43→ t	14: 0, 41: 12.0, 33: 33.0, t: 59.0, 26: 0, 21: 14.0, 22: 35.0, 43: 59.0
	%70	170	14.16	(26,43)	687	s→26→ 43→t	(26,43):30	s→14→41→33 → t	s→21→22→26→43→10→t	14: 0, 41: 12.0, 33: 33.0, 21: 0, 22: 21.0, 26: 43.0, 43: 61.0, 28: 111.0, 10: 137.0
	%80	170	14.47	(26,43)	792	s→26→ 43→t	(26,43):30	s→14→41→33 → t	s→21→22→26→43→10→t	14: 0, 41: 12.0, 33: 33.0, 21: 0, 22: 21.0, 26: 43.0, 43: 61.0, 28: 111.0, 10: 137.0

	%90	319	17.76	(22,41) (41,21)	894	s→22→41 → 41→21→t	(22,41):34 (41,21):83	s→14→4→33 →43→t	s→26→22→41→21→t	14: 0, 4: 21.0, 33: 34.0, 43: 65.0, 26: 0, 22: 22.0, 41: 58.0, 21:116.0
	%100	1096	37.78	(14,43) (21,15) (15,22) (22,26) (26,41) (41,33)	990	s→ 14→43→21 → 15→22→26 , 41→33→t	(14, 43): 55.0, (43, 21): 95.0, (21, 15): 123.0, (15, 22):166.0, (22, 26): 204.0, (26, 41): 248.0, (41, 33): 287.0,	s→14→43→t	s→21→22→26→41→33→t	14: 0, 43: 91.0, 21: 0, 22: 189.0, 26: 226.0, 41: 282.0, 33: 308.0
Yalnızca okullar	%10	21	9.08	-	107	s→t	-	s→22→21→t	s→14→t	22:0 21:21 14:0
	%20	21	9.21	-	202	s→t	-	s→22→21→t	s→14→t	22:0 21:21 14:0
	%30	21	9.33	-	289	s→t	-	s→22→21→t	s→14→t	22:0 21:21 14:0
	%40	21	10.91	-	387	s→t	-	s→22→21→t	s→14→t	22:0 21:21 14:0
	%50	21	11.32	-	478	s→t	-	s→22→21→t	s→14→t	22:0 21:21 14:0
	%60	21	11.26	-	580	s→t	-	s→22→21→t	s→14→t	22:0 21:21 14:0

	%70	21	28.07	-	687	s→t	-	s→22→21→t	s→14→t	22:0 21:21 14:0
	%80	21	18.92	-	792	s→t	-	s→22→21→t	s→14→t	22:0 21:21 14:0
	%90	55	28.35	(21,22)	894	s→21→22 →t	(21,22):34	s→14→t	s→21→22→t	14:0 21:0 22:55
	%100	55	28.0	(21,22)	990	s→21→22 →t	(21,22):34	s→14→t	s→21→22→t	14:0 21:0 22:55



Yalnızca Hastaneler	%10	39	9.76	-	107	s→t	-	s, 33, 41, t	s, 26, 43, t	33:0 41:21 26:0 43:18
	%20	39	10.35	-	202	s→t	-	s, 33, 41, t	s, 26, 43, t	33:0 41:21 26:0 43:18
	%30	39	10.64	-	289	s→t	-	s, 33, 41, t	s, 26, 43, t	33:0 41:21 26:0 43:18
	%40	39	11.18	-	387	s→t	-	s, 33, 41, t	s, 26, 43, t	33:0 41:21 26:0 43:18
	%50	39	11.83	-	478	s→t	-	s, 33, 41, t	s, 26, 43, t	33:0 41:21 26:0 43:18
	%60	63	16.2	-	580	s→t	-	s, 41, 33, t	s, 26, 39, 43, t	41:0 33:21 26:0 39:18 43:42
	%70	67	16.98	-	687	s→t	-	s, 41, 33, t	s, 26, 22, 43, t	41:0 33:21 26:0 43:46
	%80	82	24.00	(25,41)		s, 25, 41, t	(25,41):32	s, 43, 33, t	s, 26, 25, 41, t	43:0 33:31 26:0 41:51
	%90	69	19.61	(26,43)	894	s→26→ 43→t	(26,43):30	s→41→33→4 →t	s→26→43→t	41:0 33:21 26:0 43:48

	%100	191	26.77	(41,33) (26,43)	990	s, 41, 33, 26, 43, t	(41, 33): 39.0, (33, 26): 86.0, (26, 43): 116.0,	s, 33, 41, t	s, 26, 43, t	3: 60.0, 26: 0, 43: 131.0
--	-------------	-----	-------	--------------------	-----	-------------------------	---	--------------	--------------	------------------------------

EK-4

EK-4'te ise, sezgisel algoritma kullanılarak Kartal veri setinden elde edilen bir çözüm görselleştirilmektedir. Görselde yol temizleme aracı ile yardım malzemesi dağıtım araçlarının senkron hareketleri temsil edilmektedir.

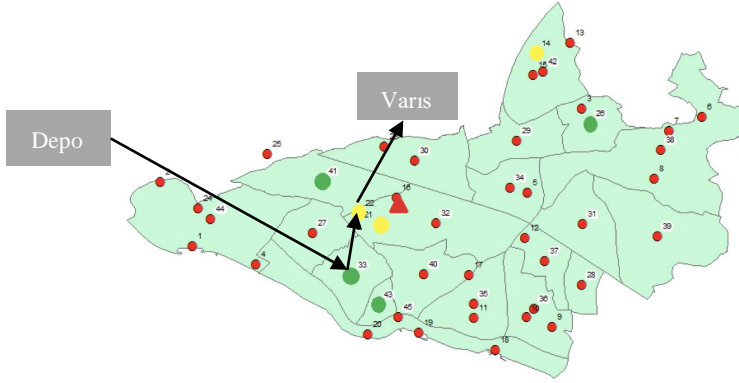


Şekil 1 YTA ve YDA rotalarının birbirlerine etkilerini temsil eden örnek rota.

Kritik Düğüm Sayısı:7

Yol Kapalılık Oranı:%30

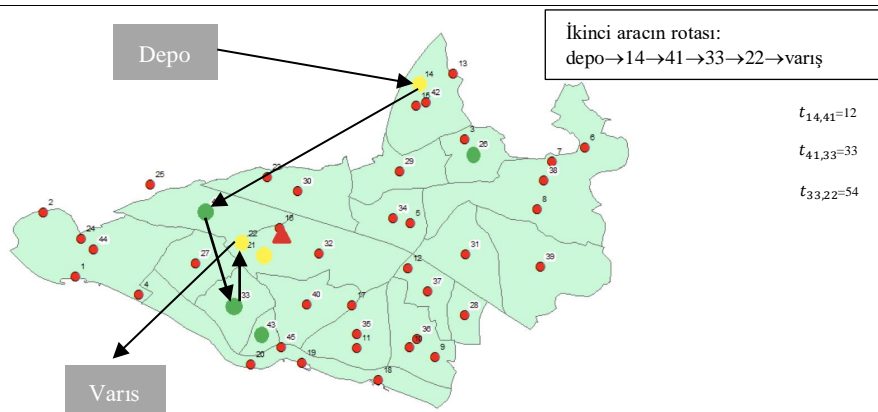
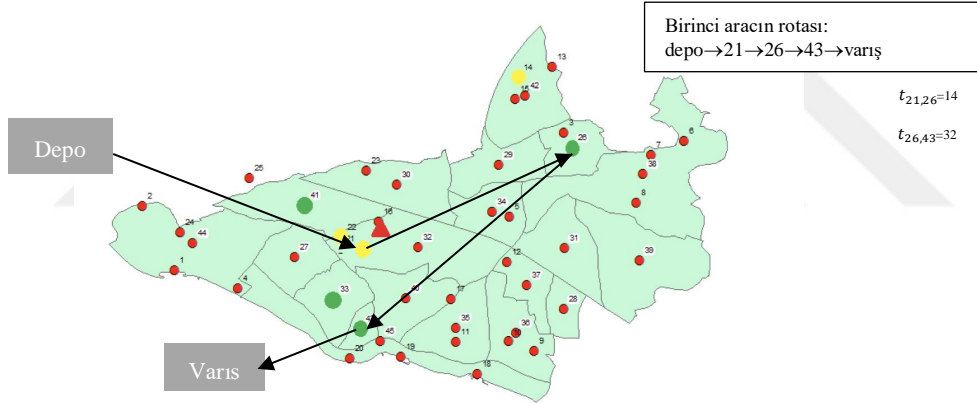
Yol temizleme aracı rotası:



Yolların Temizlenme Zamanları:

$0_{(33,22)}:35$

Yardım malzemesi dağıtım araçları rotaları:



Şekil 1’de sunulan örnek ağ, yolların %30’unun enkaz nedeniyle kapandığı bir örnekleme temsil etmektedir. Örnek ağda toplamda yedi adet kritik düğüm yer almaktadır. Bu düğümler hastaneler ve okullardır (Düğüm numaraları: 41, 33, 22, 26, 43, 21, 14). Bahse konu durumda yardım malzemesi dağıtım araçlarının kritik düğümlere en hızlı şekilde yardım malzemesi ulaştırabilmeleri için takip etmeleri gereken rotalar algoritma tarafından belirlenmiştir. Örneklem kapsamında ağda iki adet yardım malzemesi dağıtım aracı bulunduğu kabul edilmiştir. Birinci yardım malzemesi dağıtım aracı için elde edilen rota; depo→Düğüm 21→Düğüm 26→Düğüm 43→varış, ikinci yardım malzemesi dağıtım aracı için elde edilen rota ise; depo→Düğüm 14→Düğüm 41→Düğüm 33→Düğüm 22→ varış şeklindedir. Rotalar belirlendikten sonra her bir rotada enkaz nedeniyle kapalı bir yol olup olmadığı algoritma tarafından kontrol edilmektedir. Algoritma tarafından yapılan kontrol sonucunda ilk aracın rotasında enkaz nedeniyle kapalı bir yol yer almadığı, ancak, ikinci aracın rotasında yer alan (33,22) yolunun enkaz nedeniyle kapalı olduğu tespit edilmiştir. Bu nedenle (33,22) yolu, yol temizleme aracının rotasına eklenmiştir.

$t=0$ anında araçlar turlarına yapay depo düğümünden başlarlar. Depo düğümünden herhangi bir düğüme ulaşmak maliyetsizdir. Bu nedenle araçların başlangıç düğümlerinin neresi olacağına da model tarafından karar verildiği söylenebilir.

Yol temizleme aracı turuna Düğüm 33 ile Düğüm 22 arasındaki yolu temizleyerek başlar. Burada yol temizleme maliyeti ve uzaklık maliyetini öder. (33,22) yolu $t=35$ anında kullanılabilir duruma ulaşır. Yol temizleme aracı turunu yapay varış düğümünde sonlandırır.

Yol temizleme aracı ile paralel olarak, $t=0$ anında birinci yardım malzemesi dağıtım aracı turuna Düğüm 21’den başlar. Uzaklık maliyetini ödeyerek $t=14$ anında Düğüm 26’ya ulaşır. Ardından $t=32$ anında Düğüm 43’ü ziyaret eder ve oradan varış düğümüne ulaşarak turunu tamamlar.

İkinci yardım malzemesi dağıtım aracı ise, $t=0$ anında turuna Düğüm 14’ten başlar. Uzaklık maliyetini ödeyerek $t=12$ anında Düğüm 41’i ziyaret eder. Ardından $t=33$ anında Düğüm 33’e varır. Aracın rotasında yer alan sonraki Düğüm 22’dir. Ancak (33,22) yolu $t=33$ anında hala yol temizleme aracı tarafından temizlenmektedir. Yol temizleme aracının yolu temizlemesini $t=35$ ’e kadar beklemelidir. Hali hazırda zaman $t=33$ olduğundan araç $t=2$ kadar süre bekleyecektir. Araç $t=2$ bekleme maliyetine ek

olarak uzaklık maliyetini de ödeyerek $t=54$ anında Düğüm 22'ye ulaşır. Oradan varış düğümüne geçerek turunu tamamlar.

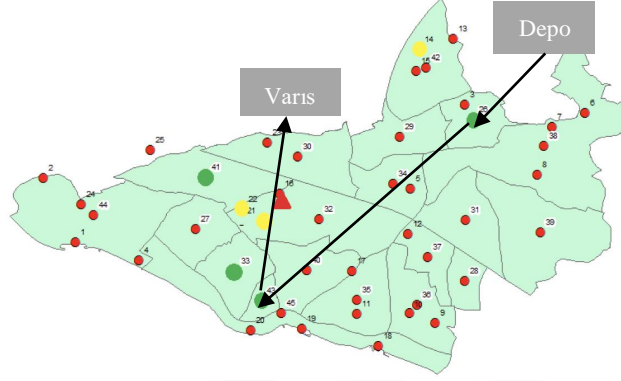
Şekil 1'de sunulan örneklerde yardım malzemesi dağıtım aracı turu esnasında temizlenmesi tamamlanmamış bir yolu kullanmak istemekte ve bu sebeple de beklemek durumunda kalmaktadır. Yol temizleme aracı bazı durumlarda ise turda kullanılacak bir yolu araç henüz oraya ulaşmadan temizlemiş olabilmekte ve turun hızlı sonlanmasına destek olabilmektedir. Bu kapsamdaki bir örnek Şekil 2'de sunulmaktadır.



Şekil 0.2 Sezgisel algoritma ile elde edilen tur örneği.

Kritik Düğüm Sayısı:7
Yol Kapalılık Oranı:%70

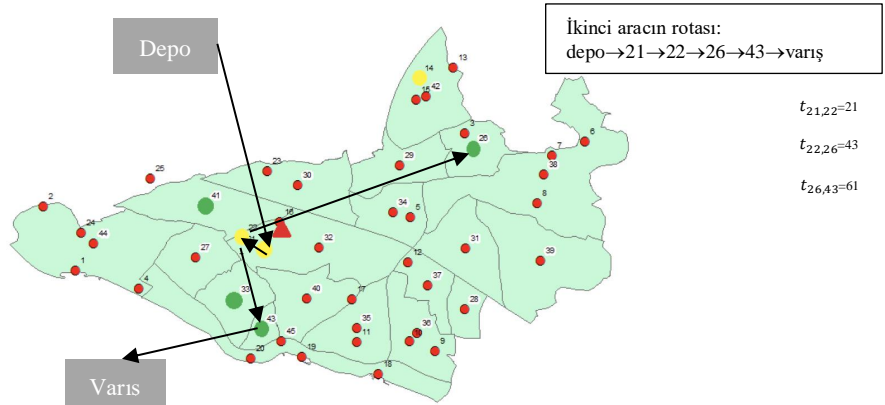
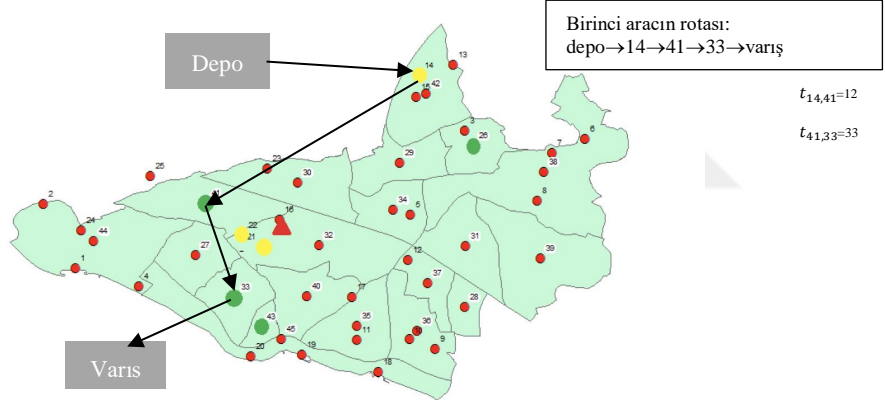
Yol temizleme aracı rotası:



Yolların Temizlenme Zamanları:

$o_{(26,43)}:30$

Yardım malzemesi dağıtım araçları rotaları:



Bu örnekte ikinci yardım malzemesi dağıtım aracının rotasında yer alan (26,43) yolu enkaz nedeniyle kapalıdır. Bu yol yol temizleme aracı tarafından (26,43) $t=30$ anında kullanılabilir hale getirilmiştir. İkinci yardım malzemesi dağıtım aracı ise turuna 21 numaralı düğümden başlayıp $t=21$ anında 22 numaralı düğüme ulaşmakta, oradan da $t=43$ anında 26 numaralı düğüme ulaşmaktadır. Buradan sonra enkaz nedeniyle kapalı olan (26,43) yolunu kullanarak 43 numaralı düğümü ziyaret edecektir. Bahse konu yol $t=30$ anında açılmıştır. Yardım malzemesi dağıtım aracı $t=43$ anında bu yola ulaştığından yolun temizlenmesini beklememiş, yolu yalnızca uzaklık maliyetini ödeyerek kullanabilmiştir. Araç turunu $t=61$ anında Düğüm 43'e ulaşır oradan da varış düğümüne ilerleyerek tamamlamaktadır. Bu örnekte yol temizleme aracı tarafından erken açılmış bir yol kullanılarak turun hızlıca sonlanması sağlanmıştır.

