

TOBB EKONOMİ VE TEKNOLOJİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**TRAFİK TIKANIKLIĞI DİKKATE ALINARAK ÇEKİCİ KAMYON VE
VİNÇLERİN BEKLEME LOKASYONLARININ OPTİMİZASYONU**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Güşta DİLAVER

Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Eda YÜCEL

NİSAN 2021

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

TRAFİK TIKANIKLIĞI DİKKATE ALINARAK ÇEKİCİ KAMYON VE VİNÇLERİN BEKLEME LOKASYONLARININ OPTİMİZASYONU

Güşta DİLAVER

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

Danışman: Dr. Eda YÜCEL

Eş Danışman: Dr. U. Mahir YILDIRIM

Tarih: Nisan 2021

Bu tezde, kaza müdahale araçları olan çekici kamyon ve vinçler için şehir içinde uygun bekleme lokasyonlarının belirlenmesi problemi ele alınmıştır. Şehir içinde farklı noktalarda meydana gelen kazalar, çekici araçlara ihtiyaç duymakta ve oluştukları bölgelerde farklı boyutlarda trafik tıkanıklıklarına sebep olmaktadır. Geçmişte farklı boyutlardaki kazaların oluştukları bölgelerde trafiği ne şekilde etkileyebildiği, yollara yerleştirilmiş olan sensörler aracılığı ile tespit edilebilmektedir. Gün içinde farklı sayıda, farklı zaman ve lokasyonlarda ve farklı tıkanıklık etkisine sahip kaza oluşma durumları, tez kapsamında farklı senaryolar ile modellenmiştir. Farklı kaza senaryoları dikkate alınarak, çekici araçların gün içerisinde bekleyecekleri lokasyonların, kazalara kaza anından çekici aracın sevk edilmesine kadar geçen toplam müdahale süresi ve kazaların sebebiyet verdiği trafik tıkanıklığı en küçüklenecek şekilde belirlenmesi hedeflenmiştir. Problemin çözümü için öncelikle bir karma tamsayılı matematiksel programlama modeli geliştirilip modelin geçerlemesi yapılmıştır. Ancak gerçek boyutlu problem örnekleri için matematiksel modelin makul sürede kaliteli sonuç vermemesi nedeniyle sezgisel

özüm yöntemi Açgözlü Rassallaştırılmış Uyarlamalı Arama Yordamı geliştirilmiştir. İstanbul Büyükşehir Belediyesi'nden alınan gerçek veriler üzerinde yapılan çalışma ile kaza senaryoları oluşturulmuş ve kazaların yayılma etkisi analiz edilerek gerçekçi veri setleri oluşturulmuştur. Önerilen yöntemin ve bu yöntemin farklı iki versiyonunun etkinliği, gerçek problem örnekleri üzerinde deneysel çalışmalar ile test edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Lokasyon Rotalama, Sezgisel Algoritma, Kaza Yönetimi, Çekici araçlar



ABSTRACT

Master of Science

OPTIMIZING THE LOCATION OF INCIDENT RESPONSE VEHICLES FOR CONGESTION MITIGATION

GüŖta DİLAVER

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

Supervisor: Asst. Prof. Eda YÜCEL

Co-Supervisor: Asst. Prof. U. Mahir YILDIRIM

Date: April 2021

In this study, we study the location routing problem for determining the waiting locations of incident response vehicles, i.e. tow trucks. Incidents that occur at different points in a city, require tow trucks and cause traffic congestion at different volumes in the regions where they occur. How different incidents may affect the traffic can be determined by the sensors placed on the roads. Different number of incidents, different occurrence times and locations of incidents and different sizes of that traffic congestion under they cause are handled through different scenarios under the scope of this thesis. Considering different incident scenarios, the locations where the tow trucks should wait during the day are aimed to be determined in a way that minimizes the intervention time from the occurrence time of incident to the dispatch time and the traffic congestion caused by the incidents. To address the problem, first a mixed integer mathematical programming model has been developed and validated. However, because of that quality solutions could not be provided in a reasonable time by mathematical model, heuristic solution approach Greedy Randomized Adaptive Search Procedure has been developed. Incident scenarios have been created

by use of real data obtained from Istanbul Metropolitan Municipality and realistic data sets have been created by analyzing the congestion spreading effect of the incidents. We demonstrate the performance of the proposed heuristic algorithm and its two different versions through realistic problem instances.

Keywords: Location routing, Heuristic algorithm, Incident management, Tow trucks



TEŞEKKÜR

Çalışmalarım ve yüksek lisans eğitimim boyunca benden desteğini ve zamanını hiçbir zaman esirgemeyen, her zaman motivasyonumu sürdürmemi sağlayan kıymetli danışman hocalarım Dr. Öğr. Üyesi Eda YÜCEL ve Dr. Öğr. Üyesi U. Mahir YILDIRIM'a,

Değerli zamanlarını ayırarak tezimi okuyan tez jürimin üyeleri Doç. Dr. Ayşegül ALTIN KAYHAN ve Dr. Öğr. Üyesi Semih YALÇINDAĞ'a,

Lisans ve yüksek lisans eğitimim boyunca bana burs sağlayan TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi'ne, lisans eğitimimin en başından itibaren bana mesleğimi sevdiren ve ilgimi her geçen gün artıran, tecrübelerini ve desteklerini esirgemeyen TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi Endüstri Mühendisliği Bölümü öğretim üyelerine,

Yüksek lisans eğitimim ve çalışmalarım boyunca desteğini ve inancını her zaman gönülden hissettiren Sercan'a, daima yanımda olan ve 12 senedir beni desteklemekten asla vazgeçmeyen Güncel'e, bu zorlu çalışma sürecinde varlıklarıyla beni mutlu eden, beni anlamaya çalışıp emek veren Çağnur, İrem ve Merve'ye, lisans eğitimimden beri yanımda olan ve beni daima motive eden Erhan, Batu ve Cem'e, lisans ve yüksek lisans eğitimimiz boyunca tüm projelerde birlikte çalıştığım en iyi takım arkadaşım Meryem'e ve her zaman desteğini ve sevgisini hissettiren, beni anlayan ve motive eden Kader'e,

Her konuda bana destek veren ve yanımda duran, tüm hayatım boyunca inancını ve sevgisini hiçbir zaman esirgemeyen, bu çalışmayı tamamlarken manevi gücünü ve desteğini her zaman hissettiğim canım kardeşim, annem ve babama gönülden teşekkürler.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET	ii
ABSTRACT	iv
TEŞEKKÜR	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGE LİSTESİ	viii
KISALTMALAR	ix
SEMBOL LİSTESİ	x
RESİM LİSTESİ	xi
1. GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR TARAMASI	3
3. PROBLEM TANIMI VE MATEMATİKSEL MODEL	7
4. ÖNERİLEN ÇÖZÜM YÖNTEMİ	15
4.1 Birinci Adım: Senaryolarda Araçların Kaza Lokasyonlarına Atanması ve Bekleme Lokasyonu Seçimi	15
4.1.1 İlk aşama: Araçların başlangıç lokasyonlarının seçimi	15
4.1.2 İkinci aşama: Araçların kaza lokasyonlarına atanması	18
4.1.3 Üçüncü aşama: Araçların kazaya müdahaleden sonraki bekleme lokasyonlarının belirlenmesi	19
4.2 İkinci Adım: Genel Durumda Araçların Bekleme Lokasyonu Seçimi	22
4.3 Üçüncü Adım: Genel Durum Lokasyonlarına Göre Senaryolarda Araçların Kaza Lokasyonlarına Tekrar Atanması ve Bekleme Lokasyonu Seçimi	24
4.3.1 Birinci Aşama: Araçların Genel Durum Lokasyonlarından Kazalara Atanması	24
4.3.2 İkinci Aşama: Araçların Müdahaleden Sonra Bekleme Lokasyonuna Atanması	26
5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR VE SONUÇLAR	27
5.1 Veri Setleri	27
5.2 Önerilen Sezgisel Yöntemin Çözüm Kalitesinin Değerlendirilmesi	30
5.3 Önerilen Çözüm Yönteminin Performansının Mevcut Durum ile Karşılaştırılması	32
6. SONUÇ VE ÖNERİLER	35
KAYNAKLAR	37
EKLER	40

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 5.1 : Deneysel veri seti oluştururken kullanılan değer aralıkları	28
Çizelge 5.2 : Gerçek veri setlerindeki kaza sayısı aralıkları ve senaryo tipi sayısı. ..	29
Çizelge 5.3 : Küçük boyutlu örneklerin karşılaştırmalı sonuçları	31
Çizelge 5.4 : Orta boyutlu örneklerin karşılaştırmalı sonuçları	32
Çizelge 5.5 : Gerçek boyutlu örneklerin karşılaştırmalı sonuçları	34



KISALTMALAR

MM	: Matematiksel Model
ARUAY	: Açgözlü Rassallaştırılmış Uyarlamalı Arama Yordamı
RAY	: Rassallaştırılmış Arama Yordamı
AAAY	: Açgözlü Arama Yordamı
TBHD	: Toplam Beklenen Hız Düşüşü
İBB	: İstanbul Büyükşehir Belediyesi



SEMBOL LİSTESİ

Bu çalışmada kullanılmış olan simgeler açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Kümeler

P	Çekici araçlar için potansiyel bekleme lokasyonları kümesi
I_s	$s \in S$ senaryosunda meydana gelen kazaların lokasyonları kümesi
N	Düğüm noktaları kümesi ($P \cup I$)
N'	Yapay depo düğümleri içeren düğüm noktaları kümesi $P \cup I_s \cup \{0, N + 1\}$
K	Çekici araç kümesi
S	Senaryolar kümesi
A	Ayrıtlar kümesi

Parametreler

o_{is}	$s \in S$ senaryosunda $i \in I_s$ lokasyonundaki kazanın meydana gelme anı
s_{is}	$s \in S$ senaryosunda $i \in I_s$ lokasyonundaki kazaya müdahale için gereken servis süresi
t_{ij}	Bir çekici aracın $i \in N'$ noktasından $j \in N'$ noktasına seyahat süresi
d_{ia}	Bir çekici aracın $i \in I_s$ kaza noktasından $a \in A$ ayrıtlına seyahat süresi
τ^{max}	Planlama ufkundaki periyot sayısı
p_s	$s \in S$ senaryosunun gerçekleşme olasılığı
β_{ij}	$i \in P$ ve $j \in P$ lokasyonlarının birbirinin kopyası olması durumunu ifade eden ikili parametre
M	Yeterince büyük bir sayı ($M = \tau^{max} + \max\{t_{ij}\}; i, j \in N'$)

RESİM LİSTESİ

Sayfa

Resim Ek.1 : GO6S153I28P28V32580A sonucuna göre bekleme lokasyonları..... 42

Resim Ek.2 : GO15S408I28P28V189660A sonucuna göre bekleme lokasyonları... 43

1. GİRİŞ

Trafik sıkışıklığı insanların yaşam kalitesini etkileyen önemli faktörlerden biridir. Özellikle kalabalık şehirlerde yaşayan insanlar için günlük hayatın kaçınılmaz bir parçası haline gelen trafik sıkışıklığı insanların yaşam kalitesini ciddi oranda düşürmektedir. Bu sıkışıklığın sebeplerini inceleyecek olursak birkaç farklı faktörü tespit edebiliriz. Bunlardan bir tanesi mevsimsel olarak sıklıkla karşılaştığımız yağmur, kar gibi hava olaylarıdır. Bir diğeri mesai başlangıcı ve bitişi gibi yoğun saatlerde yol kapasitesinin yeterli gelmemesidir. Başka bir faktör ise, bu çalışmada da ele alınmış olan trafik kazalarıdır. Kazaların meydana gelmesi kazanın olduğu yol ve buna bağlı olan diğer yolların tıkanmasına sebebiyet vermektedir.

Yapılan analizler trafik sıkışıklığına %25 oranında trafik kazalarının sebebiyet verdiği ve bu oranın artmakta olduğunu göstermektedir. (Amerika Birleşik Devletleri Ulaştırma Bakanlığı Federal Otoyol İdaresi, 2018)

15.519.267 nüfus ile Dünya'nın en kalabalık on dördüncü şehri olan (İstanbul İstatistik Ofisi, 2021) Türkiye'de son on yılda ortalama 1,200,000 trafik kazası meydana gelmektedir. (Türkiye İstatistik Kurumu, 2020)

Trafik kazalarına hızlı bir şekilde müdahale ederek kazaların sebep olduğu trafik sıkışıklığını en aza indirmek için kazalara müdahale eden çekici araçların etkin konumlandırılması önemlidir. Bu tez kapsamında, çekici araçların gün içindeki konumlarını etkin bir şekilde belirleyerek İstanbul'da trafik kazaları nedeniyle oluşan trafik sıkışıklığının en küçüklenmesi hedeflenmektedir.

Halihazırda İstanbul Büyükşehir Belediyesi, çekici araç filosundaki araçları şehir içinde çeşitli bekleme lokasyonlarına atamakta ve bu lokasyonlardan kazalara müdahale etmeleri yönlendirmektedir. Gün içinde bir kazaya müdahale etmek üzere bekleme lokasyonundan ayrılan bir çekici araç müdahale sonrası kendisine atanan lokasyona geri dönmektedir. Kazalar farklı coğrafi lokasyonlarda meydana gelmekte olup, trafik sıkışıklığını etkileme oranları birbirinden farklıdır. Bu farklılık kazanın meydana gelmiş olduğu arter ve kazanın büyüklüğüne bağlı olarak oluşmaktadır.

Belediyenin kaza müdahale aracı filosundaki araç sayısı belli olup araçların yetersiz gelmesi durumunda dış kaynak kullanılmamaktadır. Halihazırda her çekici araca gün boyu bir bekleme lokasyonu atayan İstanbul Büyükşehir Belediyesi, geçmiş kaza verilerine dayalı olarak yolların günün farklı zamanlarındaki kazaya yatkınlıklarını da dikkate alarak kazalar nedeniyle oluşan trafik sıkışıklığı en küçüklenecek şekilde çekici araçların gün içerisindeki bekleme lokasyonlarını, zamana bağlı olarak belirlemek istemektedir.

Tez kapsamında, geçmişte farklı günlerde, farklı zaman ve lokasyonlarda oluşan kazaların verileri gün bazında ayrı senaryolar olarak ele alınarak senaryo tabanlı bir karma tam sayılı matematiksel model geliştirilmiştir. Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda, problemin gerçek hayat uygulamalarındaki boyutu için geliştirilen matematiksel model makul sürede, istenilen kalitede çözüm üretememiştir. Bu sebeple, makul sürede kaliteli sonuçlar elde edebilmek amacıyla bir sezgisel yöntem (Açgözlü Rassallaştırılmış Uyarlamalı Arama Yordamı) geliştirilmiştir. Geliştirilen sezgisel yöntem ile bu yöntemin iki farklı versiyonunun etkinliği, İstanbul Büyükşehir Belediyesi'nden elde edilen gerçek problem örnekleri ve deneysel örnekler kullanılarak test edilmiştir.

2. LİTERATÜR TARAMASI

Bu kısımda literatürde bulunan, ele alınan problem ve geliştirilen çözüm yöntemlerini içeren çalışmalar incelenmiştir. Acil durum müdahale araçları lokasyon ve alokasyon problemleri için literatür taraması, “amaç fonksiyonu”, “problem yaklaşımı” ve “çözüm yöntemi” boyutlarında ayrı ayrı ele alınmıştır.

Acil durum müdahale araçlarının lokasyon ve alokasyon problemleri ele alınırken literatürde farklı amaçlar güdülen çözüm yöntemleri geliştirilmiştir. Beklenen toplam maliyeti en küçükmek (Zhang ve Li, 2014), toplam seyahat süresini en küçükmek (Yin ve Madanat, 2005), toplam kaza müdahale süresini en küçükmek (Lou ve Yin, 2011), toplam müdahale edilen kaza sayısını en büyükmek (Marianov, 2017; Brotcorne ve Laporte, 2003; Doerner ve Hartl, 2005) literatürde sıklıkla karşılaşılan amaç fonksiyonlarına örnek gösterilebilir. Bu tez kapsamında, literatürdeki bilinen tüm çalışmalardan farklı olarak kazaların sebep olduğu trafik sıkışıklığının en küçüklenmesi amaçlanmıştır.

Literatürde yer alan benzer çalışmalar probleme yaklaşımları kapsamında farklılıklar göstermektedir. Bu yaklaşımlara örnek olarak senaryo tabanlı olup olmaması, trafik sıkışıklığının dikkate alınıp alınmaması, araçların özdeş olup olmaması verilebilir.

Acil durum müdahale araçlarının hizmet verdiği olaylar çoğunlukla öngörülemeyen ve anlık olarak meydana gelen olaylardır. Bu sebeple çalışılacak olan veriler tahminleme ve geçmiş verilerden yola çıkılarak elde edilen muhtemel verilerdir. Literatürde yer alan bazı çalışmalar bu muhtemel olayları senaryolar çerçevesinde modelleyerek çok sayıda ihtimali göz önünde bulundurmuşlardır. Senaryo tabanlı çalışmalara örnek olarak Gendreau ve Laporte (2000), Hu ve Chan (2010), Ozbay ve İyigün (2012), Marianov (2017), Sun ve Wang (2018) gösterilebilir. Bu tez çalışması kapsamında İBB’den sağlanmış geçmiş veriler çerçevesinde farklı senaryolar oluşturulmuştur. Senaryolarda kaza sayısı, kazaların meydana geldiği lokasyon ve zaman dilimi geçmiş verilerden yola çıkılarak belirlenmiştir. Kaza sayılarına göre bazı senaryolar oluşması muhtemel en iyi durumları, bazıları en kötü durumları,

bazıları ise genellikle karşılaşılan durumları içermektedir. Her bir senaryo için gerçekleşme ihtimalleri geçmiş verilere bakılarak belirlenmiştir.

Literatürdeki bazı çalışmalar kazalara müdahale ederken kazaların sebebiyet verdiği trafik sıkışıklığını dikkate alırken, bazı çalışmalar almamaktadır. Trafik sıkışıklığını dikkate alan çalışmalar, bu tez çalışması kapsamında ele alındığı gibi trafik sıkışıklığını en küçükleme yerine trafik sıkışıklığını bir kısıt çerçevesinde modellemiştir. Bu çalışmalara örnek olarak Yin ve Madanat (2005), Hu ve Chan (2010), Yin (2006), Hyeonmi Kim ve Woon Kim (2014), Daneshgar ve Haghani (2016) gösterilebilir. Bu çalışmalarda trafik sıkışıklığının müdahale araçlarının müdahale süresini uzatması göz önüne alınmıştır. Bu tez çalışmasında araçların kazalara müdahale için acil şeritleri kullandığı varsayılmıştır.

Acil durum müdahale araçlarının lokasyon ve alokasyon problemlerinde bazı çalışmalar tek tip araç içerirken, bazı çalışmalarda birden fazla araç tipi bulunmaktadır. Bu araçlar özdeş olmadıkları için hepsi her acil duruma müdahale edememektedir. Müdahale bakımından farklı yeteneklere sahip olan bu araçlar filoda çeşitlilik yaratmaktadır. Razi ve Karataş (2016) heterojen araç filosu içeren çalışmalara örnek olarak gösterilebilir. Bazı çalışmalarda ise bir acil durum birden fazla müdahale aracına gereksinim duymaktadır. Çoklu araç tipi ve birden fazla müdahale aracına gereksinim duyan acil durumlar barındıran çalışmalara örnek olarak Brotcorne ve Laporte (2003); tek araç tipi ve birden fazla müdahale aracına gereksinim duyan acil durumlar barındıran çalışmalara örnek olarak Hu ve Chan (2010), Özbay ve İyigün (2012) gösterilebilir. Bu tez çalışmasında araçlar özdeş olup bir kazaya müdahale bir araç tarafından sağlanmaktadır. Bir kazanın birden fazla araç gerektirmesi durumunda ilgili kazanın gerekli araç sayısında kopyalanması sağlanabilir.

Literatürdeki acil durum müdahale araçlarının lokasyon ve alokasyon problemi çalışmalarında çözüm yöntemi olarak kesin çözüm yöntemleri veya sezgisel yaklaşımlara başvurulmuştur. Çalışmalarında çözüm yöntemi olarak kesin çözüm yöntemi ve sezgisel yaklaşımı beraber kullanan çalışmalara örnek olarak Andrade ve Cunha (2015), Sun ve Wang (2108), Diaz ve Mayorga (2013), Doerner ve Hartl (2005), Yin (2006), Marianov (2017) gösterilebilir.

İBB'nin karşılaştığı gerçek bir problemin ele alındığı bu çalışmada; oluşması muhtemel farklı durumları ifade eden senaryoların oluşturulması, bu senaryolarda yer alan veriler doğrultusunda her senaryoda araçların gün boyunca bekleyecekleri lokasyonların belirlenmesi, gün içerisinde lokasyon değişimlerinin gerçekleşmesi, senaryoların oluşma ihtimalleri de göz önüne alınarak senaryolardan bağımsız olarak araçların her bir zaman periyodundaki bekleme lokasyonlarının belirlenmesi, araçların meydana gelen kazalara mümkün olan en kısa sürede müdahalesinin sağlanması hedeflenmektedir. Bu çalışmanın literatürdeki çalışmalardan en büyük farkı ise amaç fonksiyonu olarak toplam beklenen trafik sıkışıklığının en küçüklenmesini almasıdır.





3. PROBLEM TANIMI VE MATEMATİKSEL MODEL

Bu bölümde, çalışmada ele alınan gerçek hayat probleminin genel hatları ve özellikleri anlatılmakta olup problem tanımlanmış ve çözümü için geliştirilen matematiksel model sunulmaktadır.

İBB'nin karşılaştığı olduğu problemde trafik kazaları farklı coğrafi lokasyonlarda ve zaman dilimlerinde meydana gelmekte olup farklı etki büyüklükleri bulunmaktadır. Bu kazalara müdahale etmek için ise özdeş bir kaza müdahale araç filosu bulunmaktadır. Mevcut durumda, filodaki araçlar gün başında lokasyonlara yerleştirilmektedir. Bir kaza meydana geldiğinde müsait olan araçlardan herhangi bir araç kazaya müdahale için yola çıkmakta, kazaya müdahale edip çekilmesi gereken aracı alıp ilgili lokasyona bırakmaktadır. Sonrasında araç gün başında o araç için belirlenmiş olan lokasyona dönmektedir. Mevcut durum değerlendirildiğinde araçların gün içinde bekleme lokasyonlarını değiştirmemesinin oluşacak kazalara müdahalede gecikmelere sebebiyet vereceği fikrine varılmıştır. Bu sebeple ele alınan problemde çekici araçların gün içinde değişebilen bekleme lokasyonlarının belirlenmesi hedeflenmiştir. Çekici araçların gün içinde değişebilen bekleme lokasyonları belirlenirken geçmiş kaza verileri üzerinden farklı senaryolar oluşturulmuş ve her bir senaryoda çekici araçların trafik sıkışıklığını en küçükleyecek şekilde kazalara atanmasını sağlayan çekici araç bekleme lokasyonlarını belirlemesi hedeflenmiştir. Trafik sıkışıklığı hesaplanırken oluşan bir kazanın bağlı olduğu yol ve bu yolun bağlı olduğu diğer yollar dikkate alınmıştır.

Problem kapsamında hizmet verilen bölge, $G = (N', A)$ çizgesiyle tanımlanmıştır. N kümesi hizmet bölgesinde bulunan potansiyel bekleme lokasyonları ve kaza lokasyonlarını belirtmektedir. N' ise depo düğümü "0" ve çekici araçların gün sonunda gidecekleri " $|N| + 1$ " düğümünü içeren $N \cup \{0\} \cup \{|N| + 1\}$ kümesidir. A kümesi mevcut düğümler arasındaki yolları (ayrıtları) ifade etmektedir. N' kümesinde bulunan her $i, j \in N'$ düğümleri arasındaki ulaşım süresi t_{ij} parametresi ile temsil edilmiştir. Çekici araçların acil şeridini kullandığı varsayılmış, parametre değerleri buna göre belirlenmiştir. S kümesi senaryo kümesidir ve p_s parametresi $s \in$

S senaryosunun oluşma olasılığını ifade etmektedir. I_s , $s \in S$ senaryosunda meydana gelen kazaların lokasyon kümesidir. d_{ia} parametresi $i \in I_s$ kaza lokasyonu ile $a \in A$ ayrıtı arasındaki ulaşım süresini belirtmektedir. Kaza lokasyonunun ayrıta uzaklığı, ayrıtın başlangıç ve bitiş düğümleri arasındaki orta nokta nokta ile kaza lokasyonu arasındaki seyahat süresi hesaplanarak bulunur. $s \in S$ senaryosunda, $i \in I_s$ lokasyonunda meydana gelen her kaza için; o_{is} kazanın meydana geldiği zaman dilimini, s_{is} kazanın ortadan kalkması için gerekli servis süresini ifade eden parametrelerdir. P kümesi araçların potansiyel bekleme lokasyonlarını içermektedir. β_{ij} $i \in P$ ve $j \in P$ lokasyonlarının birbirinin kopyası olması durumunu ifade eden 0-1 parametresidir. Matematiksel modelde akışı sağlayabilmek adına bir potansiyel lokasyonda en fazla bir araç bulunabilir kısıtı yer aldığından ve gerçek hayat probleminde böyle bir durum söz konusu olmadığından potansiyel lokasyonların kopyaları oluşturulmuştur. K kümesi çekici araç filosunu temsil etmektedir.

Ele alınan problem için planlama çevreni $(0, \tau^{max}]$ olarak belirlenmiştir. τ^{max} planlama çevrenindeki zaman dilimi sayısını ifade etmektedir. M ise $(\tau^{max} + \max\{t_{ij}\}; i, j \in N')$ şeklinde belirlenen büyük bir sayıdır.

Kısıtlarda kullanılan karar değişkenleri aşağıda verilmiştir:

Y_{iks} : $s \in S$ senaryosunda $k \in K$ aracının $i \in N'$ düğümünü ziyaret edip etmediğini belirten ikili karar değişkeni.

X_{ijks} : $s \in S$ senaryosunda $k \in K$ aracının $i \in N'$ düğümünden sonra $j \in N'$ düğümünü ziyaret edip etmediğini belirten ikili karar değişkeni.

A_{iks} : $s \in S$ senaryosunda $k \in K$ aracının $i \in N'$ düğümüne varış anı.

D_{iks} : $s \in S$ senaryosunda $k \in K$ aracının $i \in N'$ düğümünden ayrılış anı.

R_{is} : $s \in S$ senaryosunda $i \in I_s$ lokasyonunda meydana gelen kazaya müdahale anı.

$\alpha(i, a, s)$: $s \in S$ senaryosunda $i \in I_s$ lokasyonunda meydana gelen kaza sebebi ile $a \in A$ ayrıtındaki hızdaki azalma oranı.

Z_{ijks} : Doğrusal olmayan kısıtları doğrusallaştırmak için kullanılan ikili karar değişkeni.

Y'_{ik} : $k \in K$ aracının $i \in N'$ düğümünü ziyaret edip etmediğini belirten ikili karar değişkeni.

X'_{ijk} : $k \in K$ aracının $i \in N'$ düğümünden sonra $j \in N'$ ziyaret edip etmediğini belirten ikili karar değişkeni.

A'_{ik} : $k \in K$ aracının $i \in N'$ düğümüne varış anı.

D'_{ik} : $k \in K$ aracının $i \in N'$ düğümünden ayrılış anı.

Kısıtlar:

$$\alpha(i, a, s) = (R_{is} - o_{is})/d_{ia} \quad \forall i \in I_s, a \in A, s \in S \quad (1)$$

$$\sum_{j \in P \cup I_s} X_{0jks} = 1 \quad \forall k \in K, s \in S \quad (2)$$

$$\sum_{j \in P \cup I_s} X_{j,n+1,k,s} = 1 \quad \forall k \in K, s \in S \quad (3)$$

$$\sum_{j \in P \cup I_s \cup \{n+1\} \setminus \{i\}} X_{ijks} = Y_{iks} \quad \forall i \in P \cup I_s, k \in K, s \in S \quad (4)$$

$$\sum_{j \in P \cup I_s \cup \{0\} \setminus \{i\}} X_{jiks} = Y_{iks} \quad \forall i \in P \cup I_s, k \in K, s \in S \quad (5)$$

$$\sum_{j \in P \cup \{n+1\}} X_{ijks} \geq 1 - M(1 - Y_{iks}) \quad \forall i \in I_s, k \in K, s \in S \quad (6)$$

$$\sum_{j \in P \cup I_s \cup \{0\} \setminus \{i\}} X_{jiks} = \sum_{j \in P \cup I_s \cup \{n+1\} \setminus \{i\}} X_{ijks} \quad \forall i \in P \cup I_s, k \in K, s \in S \quad (7)$$

$$D_{0ks} = 0 \quad \forall k \in K, s \in S \quad (8)$$

$$A_{n+1,k,s} = \tau^{max} \quad \forall k \in K, s \in S \quad (9)$$

$$D_{iks} + t_{ij} \leq A_{jks} + M(1 - X_{ijks}) \quad \forall k \in K, i \in P \cup I_s \cup \{0\} \setminus \{j\}, \quad (10)$$

$$i \in P \cup I_s \cup \{n+1\}, s \in S$$

$$D_{iks} + t_{ij} \geq A_{jks} - M(1 - X_{ijks}) \quad \forall k \in K, i \in P \cup I_s \cup \{0\} \setminus \{j\}, \quad (11)$$

$$i \in P \cup I_s \cup \{n+1\}, s \in S$$

$$D_{iks} \geq A_{iks} \quad \forall k \in K, i \in P \cup I_s, s \in S \quad (12)$$

$$D_{iks} = A_{iks} + s_{is}Y_{iks} \quad \forall k \in K, i \in I_s, s \in S \quad (13)$$

$$A_{iks} \leq MY_{iks} \quad \forall k \in K, i \in P \cup I_s, s \in S \quad (14)$$

$$D_{iks} \leq MY_{iks} \quad \forall k \in K, i \in P \cup I_s, s \in S \quad (15)$$

$$o_{is}Y_{iks} + t_{ij}X_{jiks} \leq A_{iks} \quad \forall k \in K, i \in I_s, j \in P, s \in S \quad (16)$$

$$R_{is} \geq A_{iks} \quad \forall k \in K, i \in I_s, s \in S \quad (17)$$

$$R_{is} \geq \tau^{max} (1 - \sum_{k \in K} Y_{iks}) \quad \forall i \in I_s, s \in S \quad (18)$$

$$\sum_{k \in K} Y_{iks} = 1 \quad \forall i \in I_s, s \in S \quad (19)$$

$$\sum_{k \in K} Y_{iks} \leq 1 \quad \forall i \in P, s \in S \quad (20)$$

$$\sum_{j \in P} X'_{0jk} = 1 \quad \forall k \in K \quad (21)$$

$$\sum_{j \in P} X'_{j,n+1,k} = 1 \quad \forall k \in K \quad (22)$$

$$\sum_{j \in P \cup \{n+1\} \setminus \{i\}} X'_{ijk} = Y'_{ik} \quad \forall i \in P \cup \{0\}, k \in K \quad (23)$$

$$\sum_{j \in P \cup \{0\} \setminus \{i\}} X'_{jik} = \sum_{j \in P \cup \{n+1\} \setminus \{i\}} X'_{ijk} \quad \forall i \in P, k \in K \quad (24)$$

$$D'_{0k} = 0 \quad \forall k \in K \quad (25)$$

$$A'_{n+1,k} = \tau^{max} \quad \forall k \in K \quad (26)$$

$$D'_{ik} + t_{ij} \leq A'_{jk} + M(1 - X'_{ijk}) \quad \forall k \in K, i \in P \cup \{0\} \setminus \{j\}, \quad (27)$$

$$i \in P \cup \{n+1\}$$

$$D'_{ik} + t_{ij} \geq A'_{jk} - M(1 - X'_{ijk}) \quad \forall k \in K, i \in P \cup \{0\} \setminus \{j\}, \quad (28)$$

$$i \in P \cup \{n+1\}$$

$$D'_{ik} \geq A'_{ik} \quad \forall k \in K, i \in P \quad (29)$$

$$A'_{ik} \leq MY'_{ik} \quad \forall k \in K, i \in P \quad (30)$$

$$D'_{ik} \leq MY'_{ik} \quad \forall k \in K, i \in P \quad (31)$$

$$\sum_{k \in K} Y'_{ik} \leq 1 \quad \forall i \in P \quad (32)$$

$$X_{0jks} = X'_{0jk} \quad \forall k \in K, j \in P, s \in S \quad (33)$$

$$X_{ijks}, Z_{ijks} \in \{0,1\} \quad \forall k \in K, i \in N', j \in N', s \in S \quad (34)$$

$$Y_{iks}, A_{iks}, D_{iks} \geq 0 \quad \forall k \in K, i \in N', s \in S \quad (35)$$

$$R_{is} \geq 0 \quad \forall i \in I_s, s \in S \quad (36)$$

$$\alpha(i, a, s) \geq 0 \quad \forall i \in I_s, a \in A, s \in S \quad (37)$$

$$Y'_{ik}, A'_{ik}, D'_{ik} \geq 0 \quad \forall k \in K, i \in N' \quad (38)$$

$$X'_{ijk} \in \{0,1\} \quad \forall k \in K, i \in N', j \in N' \quad (39)$$

(1) numaralı kısıt ile ayrıtlardaki hız düşüş oranı hesaplanmaktadır. Bir ayrıttaki hız düşüşü kazanın meydana geldiği lokasyonun ayrıta uzaklığı ile ters orantılı iken kaza anından müdahale anına kadar geçen süre ile doğru orantılıdır. Çizgede iki düğüm arasında yer alan ayrıtların uzunlukları farklılık göstermektedir. Bu durum hız düşüş oranının doğruluğunu etkilediğinden ayrıtlar, üzerinde yer alan düğümler arasında parçalanarak birden fazla, görece kısa ayrıtlara çevrilmiştir. Araçların ayrıtlar üzerindeki zamana bağlı hızları bu kısıt ile hesaplanan oran ile hesaplanırken anlık trafik sıkışıklığı da dikkate alınmaktadır. Yani halihazırda başka bir kaza veya yol yapım çalışması vb. farklı etmenler sebebi ile düşen hızda ek olarak düşüş meydana gelecektir. (1) - (20) numaralı ve arasındaki kısıtlar senaryolardaki durumları sağlar

iken (21) - (32) numaralı ve arasındaki kısıtlar genel durumu sağlamaktadır. Çünkü senaryolar dikkate alınarak bir genel durum çözümü elde edilmek istenmektedir ve senaryolarda N düğüm kümesi kaza lokasyonları ve bekleme lokasyonlarından oluşurken genel durumda yalnızca bekleme lokasyonlarını içermektedir. Genel durumda çekici araçların zamana bağlı bekleme lokasyonları elde edilmek istendiğinden kümede kaza lokasyonları yer almamaktadır. (2), (3) ve (21), (22) numaralı kısıtlar, bütün çekici araçların rotalarının “0” düğümünde başlamasını ve “ $|N| + 1$ ” düğümünde bitmesini sağlar. (4), (5), (6) ve (23), (24) numaralı kısıtlar ile bir araç bir lokasyonu ziyaret etmiş ise, bu lokasyonun çekici aracın rotasında bulunması sağlanır. Kısıt (7), “ $|N| + 1$ ” düğümü dışında bir düğümü ziyaret eden çekici aracın başka bir düğümüne geçmesini sağlayan kısıttır. Kısıt (8) ve (25) periyot 0’da aracın “0” düğümünden ayrılmasını; kısıt (9) ve (26) ise planlama ufkunun son periyodunda “ $|N| + 1$ ” düğümüne gelmesini sağlar. (10), (11) ve (27), (28) numaralı kısıtlar bir çekici araç i düğümünden j düğümüne geçiyse i düğümünden ayrılış anından, i ve j düğümleri arasındaki seyahat süresi kadar sonra j düğümüne varmasını sağlar. Kısıt (12) ve (29) ile bir lokasyona varış zamanının ayrılış zamanından önce olması sağlanır. (13) numaralı kısıt kazaya müdahale eden çekici aracın servis süresi kadar kaza lokasyonunda bulunmasını sağlar. Kısıt (14), (15) ve (30), (31) aracın ziyaret etmediği lokasyonlar için varış ve ayrılış zamanlarının sıfır olmasını sağlar. (16) numaralı kısıt ile aracın bir kaza lokasyonuna kaza oluşmadan ziyareti engellenir. Kısıt (17) ile bir kazaya müdahale anının kaza lokasyonuna varış anı olması sağlanır. (18) numaralı kısıt ile hiçbir araç tarafından müdahale edilmeyen kazalara planlama ufkunun son periyodunda müdahale edildiği varsayılır. Kısıt (19) ile bir kazaya bir araç tarafından müdahale edilir. (20) ve (32) numaralı kısıtlar ile bir potansiyel bekleme lokasyonunda en fazla bir aracın beklemesi sağlanır. Kısıt (33) ile senaryolarda araçların başlangıç lokasyonunun senaryodan bağımsız durumdaki başlangıç lokasyonu ile aynı olması sağlanır. (34) ve (39) numaraları arasındaki kısıtlar ise değişken tanımlı kısıtlardır.

Bu kısıtlara ek olarak, her bir senaryodaki potansiyel bekleme lokasyonu ziyaretlerinin senaryodan bağımsız durumla uyumlu olması için aşağıdaki iki kısıtın sağlanması gerekmektedir:

$$D_{jks} \leq A'_{ik} \quad \forall k \in K, i \in P, j \in P, s \in S \quad (40)$$

veya

$$A_{jks} \geq D'_{ik} \quad \forall k \in K, i \in P, j \in P, s \in S \quad (41)$$

Bu iki kısıtın doğrusallaştırılmış şekli aşağıda yer almaktadır:

$$D_{jks} - A'_{ik} \leq M(1 - Z_{ijks}) \quad \forall k \in K, i \in P, i \in P, s \in S \quad (42)$$

$$D'_{ik} - A_{jks} \leq MZ_{ijks} \quad \forall k \in K, i \in P, i \in P, s \in S \quad (43)$$

Bu iki kısıt $s \in S$ senaryosunda çekici aracın j düğümünden ayrılışının genel durumda i düğümüne varışından sonra olamayacağını veya j düğümüne varışının genel durumda i düğümünden ayrılışından önce olamayacağını ifade etmektedir. Yani genel durumda i düğümüne varış anından ayrılış anına kadar çekici araç, senaryolarda i bekleme lokasyonundan başka bir lokasyonda bekleyemez.

Matematiksel model için amaç fonksiyonu ayrıtlardaki hız düşüşünün en küçüklenmesi olarak tanımlanmıştır. Model senaryo tabanlı olduğu için toplam beklenen hız düşüşü en küçüklenmiştir. Toplam beklenen hız düşüşü aşağıda verilen şekilde hesaplanmaktadır:

$$\sum_{a \in A} \sum_{s \in S} \sum_{i \in I_s} p_s \alpha(i, a, s) \quad (44)$$

Ele alınan problem bir lokasyon rotalama problemi ve problem iki zor alt problemden oluşmaktadır: tesis lokasyon seçimi problemi ve araç rotalama problemi. Bu iki problemin de ayrı ayrı NP-zor olduğu kanıtlanmıştır. (Cornuéjols ve diğ.,1977; Karp, 1972; Lenstra & Rinnooy Kan, 1981) Dolayısı ile ele alınan problem NP-zor problem sınıfına ait iki alt problemden oluşan NP-zor bir problemdir.

Deneysel çalışmalar sonucu, geliştirilen matematiksel model ile en fazla 3 senaryo, 6 kaza, 4 potansiyel bekleme lokasyonu ile optimal sonuçları bulabildiği görülmüştür. Örnekler 4 senaryo, 16 kaza, 8 potansiyel bekleme lokasyonu olacak şekilde genişletildiğinde 2 ve 3 saatlik zaman limitinde olurlu sonuç bulunamadığı gözlenmiştir. 4 saatlik zaman limiti ile ancak olurlu sonuçlar bulunabilmiştir. Problemin bir gerçek hayat problemi olduğu göz önüne alındığında ve İBB'nin karşılaştığı problemin boyutu düşünüldüğünde, ticari çözümler ile matematiksel model çözdürülerek makul sürede, istenilen kalitede çözümler elde edilemeyeceği görülmüştür. Bu sebeple, makul sürede ve istenilen kalitede çözüm elde edebilmek için sezgisel yöntemlere başvurulmuştur.



4. ÖNERİLEN ÇÖZÜM YÖNTEMİ

Önerilen sezgisel yöntem üç adımdan oluşmaktadır. İlk adımda araçlar senaryolarda kazalara ve potansiyel lokasyonlara atanmaktadır. Bir diğer ifade ile her senaryo için ayrı çözümler elde edilmektedir. İkinci adımda, ilk adımda herbir senaryoda tüm zaman dilimleri için lokasyonları belli olan araçların genel durumda hangi bekleme lokasyonlarında ne zaman bulunacağı belirlenmiştir. Son adımda ise genel durumda lokasyonları belli olan araçlar tüm senaryolarda tekrar kazalara atanmakta ve senaryo bazlı nihai çözüm elde edilmektedir. Önerilen sezgisel yöntemin üç farklı versiyonu geliştirilmiştir; Açgözlü Rassallaştırılmış Uyarlamalı Arama Yordamı (ARUAY), Rassallaştırılmış Arama Yordamı (RAY) ve Açgözlü Arama Yordamı (AAY). Açgözlü Arama Yordamı, gerçek problem örnekleri üzerinde uygulanmıştır. Bu bölümde sezgiselin tüm adımları ve tüm versiyonları detaylı bir şekilde anlatılmaktadır.

4.1 Birinci Adım: Senaryolarda Araçların Kaza Lokasyonlarına Atanması ve Bekleme Lokasyonu Seçimi

4.1.1 İlk aşama: Araçların başlangıç lokasyonlarının seçimi

Sezgisel yöntemin ilk adımında araçların kazalara atamalarının yapılabilmesi adına ilk aşama araçların başlangıç lokasyonlarının belirlenmesidir. Problem rassallık barındırdığı için algoritmalarda yapılan lokasyon seçimlerinde rassallığa yer verilmiştir.

Problemin çözümü için geliştirilen ilk sezgisel yöntem versiyonunda (ARUAY) her senaryoda, tüm potansiyel lokasyonlar için bir skor hesaplaması yapılmaktadır. Bu skor hesaplaması bir potansiyel lokasyonun o senaryoda gerçekleşen kaza lokasyonlarına olan uzaklığının toplamı ile sağlanmaktadır. Kaza lokasyonlarına toplam uzaklığı en küçük olan potansiyel lokasyon, başlangıç lokasyonu olarak seçilmesi en muhtemel olan lokasyondur. Skor hesaplaması tüm potansiyel

lokasyonlar için yapıldıktan sonra normalize edilerek her bir potansiyel lokasyon için bir seçilme olasılığı hesaplanmaktadır. Hesaplanan olasılıklara göre rulet çarkı seçimi ile her bir araç için o senaryodaki başlangıç lokasyonu seçilmektedir.

Algoritma 1 Araçlar İçin Başlangıç Lokasyonu Seçimi: Rulet Çarkı Seçimi (ARUAY)

Girdiler P : potansiyel bekleme lokasyonu kümesi, I_s : $s \in S$ senaryosunda gerçekleşen kaza lokasyonları, S : senaryo kümesi, K : çekici araç kümesi, $N_{s,k}$: Her $s \in S$ senaryosunda, her $k \in K$ aracı için ziyaret edilen sıralı lokasyonlar kümesi

```

1: while durma koşulları sağlanmadığı sürece do
2:   for her  $s \in S$  senaryosu için do
3:     for her  $p \in P$  bekleme lokasyonu için do
4:        $skor_{s,p} \leftarrow 0$ 
5:       for her  $i \in I_s$  kazası için do
6:          $skor_{s,p} \leftarrow skor_{s,p} + t_{pi}$ 
7:       end for
8:        $skor_{s,p} \leftarrow 1/skor_{s,p}$ 
9:     end for
10:     $toplam\ skor_s \leftarrow \sum_{p \in P} skor_{s,p}$ 
11:    for her  $p \in P$  bekleme lokasyonu için do
12:       $olasilik_{s,p} \leftarrow skor_{s,p} / toplam\ skor_s$ 
13:    end for
14:    for her  $k \in K$  müdahale aracı için do
15:       $N_{s,k} \leftarrow \{ \}$ 
16:       $var\ rasgele := [0, 1]$  aralığında bir ondalıklı sayı
17:       $ll \leftarrow 0$ 
18:       $başlangıç\ lokasyonu_{s,k} \leftarrow 0$ 
19:      for her  $p \in P$  bekleme lokasyonu için do
20:        if  $rasgele \leq ll + olasilik_{s,p}$  then
21:           $başlangıç\ lokasyonu_{s,k} \leftarrow p$ 
22:           $N_{s,k} \leftarrow N_{s,k} \cup \{başlangıç\ lokasyonu_{s,k}\}$ 
22:        else
23:           $ll \leftarrow ll + olasilik_{s,p}$ 
24:        end if

```

18: **end for**

19: **end for**

20: **end for**

21: **end while**

Çıktılar: Her $s \in \mathcal{S}$ senaryosunda, her $k \in \mathcal{K}$ aracı için başlangıç lokasyonu

Sezgisel yöntemin ikinci versiyonunda (RAY) ise potansiyel lokasyonlar için bir skor hesaplaması yapılmaksızın rulet çarkı seçimi yerine her araç için başlangıç lokasyonu potansiyel lokasyonlar içerisinde rasgele seçilir.

Algoritma 2 Araçlar İçin Rasgele Başlangıç Lokasyonu Seçimi

(RAY)

Girdiler P : potansiyel bekleme lokasyonu kümesi, \mathcal{S} : senaryo kümesi, \mathcal{K} : kaza müdahale araç filosu kümesi, $N_{s,k}$: Her $s \in \mathcal{S}$ senaryosunda, her $k \in \mathcal{K}$ aracı için ziyaret edilen sıralı lokasyonlar kümesi

1: **while** durma koşulları sağlanmadığı sürece **do**

2: **for** her $s \in \mathcal{S}$ senaryosu için **do**

3: **for** her $k \in \mathcal{K}$ müdahale aracı için **do**

4: $N_{s,k} \leftarrow \{\}$

5: *başlangıç lokasyonu* $_{s,k} := 1$ ve $|P|$ arasında rasgele bir tamsayı

6: $N_{s,k} \leftarrow N_{s,k} \cup \{\textit{başlangıç lokasyonu}_{s,k}\}$

7: **end for**

8: **end for**

9: **end while**

Çıktılar: Her $s \in \mathcal{S}$ senaryosunda, her $k \in \mathcal{K}$ aracı için başlangıç lokasyonu

Üçüncü version (AAY) yalnızca gerçek veri örneklerine uygulandığı için başlangıç lokasyonu seçimi algoritması kullanılmamıştır.

4.1.2 İkinci aşama: Araçların kaza lokasyonlarına atanması

Araçların iki statüsü bulunmaktadır; uygun ve meşgul. Meşgul statüsünde olan araç, bir kazaya atanmış, bir kazaya müdahale etmek için kaza lokasyonuna gitmek üzere yolda, bir kazaya müdahale etmekte veya bir kazaya müdahalesi bittikten sonra bekleme lokasyonuna dönmekte olabilir. Bir aracın statüsünün uygun olması ise, o aracın yalnızca bekleme lokasyonunda beklemekte olduğunu ve herhangi bir kazaya atanmamış olduğunu gösterir.

Bir kaza gerçekleştiğinde, kazanın gerçekleştiği periyotta uygun statüsünde bulunan araç olup olmadığı kontrol edilir. Eğer varsa bu araçlar içerisinde kaza lokasyonuna en yakın lokasyonda bekleyen araç, kazaya atanır ve kazaya müdahale etmek üzere yola çıkar. Eğer kazanın gerçekleştiği periyotta uygun statüde hiç araç yoksa, bir periyot sonrası için araçların statüleri kontrol edilir. Bu kontrol işlemi planlama ufkunun son periyoduna kadar devam eder. Planlama ufku içerisinde müdahale edilemeyen kazalara planlama ufkunun son periyodunda müdahale edildiği varsayılır.

Algoritma 3 Araçların Kaza Lokasyonlarına Atanması (ARUAY, RAY, AAY)

Girdiler I_s : $s \in \mathcal{S}$ senaryosunda gerçekleşen kaza lokasyonları, \mathcal{S} : senaryo kümesi, K : kaza müdahale araç filosu kümesi, $N_{s,k}$: Her $s \in \mathcal{S}$ senaryosunda, her $k \in K$ aracı için ziyaret edilen sıralı lokasyonlar kümesi

```
1: for her  $s \in \mathcal{S}$  senaryosu için do
2:   for her  $i \in I_s$  kazası için do
3:      $t \leftarrow kaza\ anı_i$  // t'yi kazanın oluşma anından başlat
4:      $l \leftarrow 0$  // kazaya müdahaledeki gecikme
5:     while  $t + l \leq \tau^{max}$  do
6:       if uygun statüsündeki araç sayısı  $\geq 1$  then
7:         for her  $k \in K$  müdahale aracı için do
8:            $t_k \leftarrow MümkünOlanEnYakınMüdahaleZamanı(k, i, s)$ 
7:         end for
8:          $k^* \leftarrow argmint_k$  // kazaya en önce müdahale edebilecek aracı belirle
```

9: **AracıKazayaAta**(k^*, i, s)

10: $N_{s,k} \leftarrow N_{s,k} \cup \{i\}$

11: **else**

12: $l++$

13: **end if**

14: **end while**

15: **end for**

16: **end for**

Çıktılar: Her $s \in S$ senaryosunda, kaza $i \in I_s$ araç $k \in K$ atamaları

4.1.3 Üçüncü aşama: Araçların kazaya müdahaleden sonraki bekleme lokasyonlarının belirlenmesi

Kazaya müdahalesini bitiren araç, kazada hasar gören aracı da bırakacağı bir sonraki bekleme lokasyonuna ilerlemek durumundadır. Bunun için problemin çözümü için geliştirilen ilk sezgisel yöntemde başlangıç lokasyonu belirlemede olduğu gibi; her senaryoda, tüm potansiyel lokasyonlar için bir skor hesaplaması yapılmaktadır. Bu skor hesaplaması bir potansiyel lokasyonun o senaryoda gerçekleşen kaza lokasyonlarına olan uzaklığının toplamı ile sağlanmaktadır. Başlangıç lokasyonu seçimi algoritmasından farklı olarak tüm kaza lokasyonlarına olan uzaklığına bakılmamaktadır. O senaryoda henüz müdahale edilmemiş kaza lokasyonlarına toplam uzaklığı en küçük olan potansiyel lokasyon, bir sonraki lokasyon olarak seçilmesi en muhtemel olan lokasyondur. Skor hesaplaması tüm potansiyel lokasyonlar için yapıldıktan sonra normalize edilerek her bir potansiyel lokasyon için bir seçilme olasılığı hesaplanmaktadır. Hesaplanan olasılıklara göre rulet çarkı seçimi ile aracın bir sonraki bekleme lokasyonu belirlenmektedir.

Algoritma 4 Araçlar İçin Müdahale Sonrası Lokasyonu Seçimi: Rulet Çarkı Seçimi

(ARUAY)

Girdiler P : potansiyel bekleme lokasyonu kümesi, I_s : $s \in S$ senaryosunda gerçekleşen kaza lokasyonları, S : senaryo kümesi, K : kaza müdahale araç filosu kümesi, $N_{s,k}$: Her $s \in S$ senaryosunda, her $k \in K$ aracı için ziyaret edilen sıralı lokasyonlar kümesi

```
1: while durma koşulları sağlanmadığı sürece do
2:   for her  $s \in S$  senaryosu için do
3:     for her  $p \in P$  bekleme lokasyonu için do
4:        $skor_{s,p} \leftarrow 0$ 
5:       for her  $i \in I_s$  kazası için do
6:         if  $i$  henüz müdahale edilmemiş bir kaza
7:            $skor_{s,p} \leftarrow skor_{s,p} + t_{pi}$ 
8:         end if
9:       end for
10:       $skor_{s,p} \leftarrow 1/skor_{s,p}$ 
11:    end for
12:     $toplam\ skor_s \leftarrow \sum_{p \in P} skor_{s,p}$ 
13:    for her  $p \in P$  bekleme lokasyonu için do
14:       $olasilik_{s,p} \leftarrow skor_{s,p} / toplam\ skor_s$ 
15:    end for
16:    for her  $k \in K$  müdahale aracı için do
17:      var rasgele := [0, 1] aralığında bir ondalıklı sayı
18:       $ll \leftarrow 0$ 
19:       $sonraki\ lokasyon_{s,k} \leftarrow 0$ 
20:      for her  $p \in P$  bekleme lokasyonu için do
21:        if  $rasgele \leq ll + olasilik_{s,p}$  then
22:           $sonraki\ lokasyon_{s,k} \leftarrow p$ 
23:           $N_{s,k} \leftarrow N_{s,k} \cup \{sonraki\ lokasyon_{s,k}\}$ 
24:        else
25:           $ll \leftarrow ll + olasilik_{s,p}$ 
```

26: **end if**
27: **end for**
28: **end for**
29: **end for**
30: **end while**

Çıktılar: Her $s \in \mathcal{S}$ senaryosunda, her $k \in \mathcal{K}$ aracı için $i \in I_s$ kazasına müdahaleden sonra gideceği bekleme lokasyonu

Sezgisel yöntemin ikinci versiyonunda ise potansiyel lokasyonlar için bir skor hesaplaması yapılmaksızın rulet çarkı seçimi yerine her araç için kazaya müdahaleden sonra gideceği bekleme lokasyonu potansiyel lokasyonlar içerisinde rasgele seçilir.

Algoritma 5 Araçlar İçin Rasgele Müdahale Sonrası Lokasyonu Seçimi (RAY)

Girdiler P : potansiyel bekleme lokasyonu kümesi, \mathcal{S} : senaryo kümesi, \mathcal{K} : kaza müdahale araç filosu kümesi, $N_{s,k}$: Her $s \in \mathcal{S}$ senaryosunda, her $k \in \mathcal{K}$ aracı için ziyaret edilen sıralı lokasyonlar kümesi

1: **while** durma koşulları sağlanmadığı sürece **do**
2: **for** her $s \in \mathcal{S}$ senaryosu için **do**
3: **for** her $k \in \mathcal{K}$ müdahale aracı için **do**
4: *sonraki lokasyon* $_{s,k} := 1$ ve $|P|$ arasında rasgele bir tamsayı
5: $N_{s,k} \leftarrow N_{s,k} \cup \{\textit{sonraki lokasyon}_{s,k}\}$
6: **end for**
7: **end for**
8: **end while**

Çıktılar: Her $s \in \mathcal{S}$ senaryosunda, her $k \in \mathcal{K}$ aracı için $i \in I_s$ kazasına müdahaleden sonra gideceği bekleme lokasyonu

Sezgisel yöntemin üçüncü versiyonunda her araç için kazaya müdahaleden sonra gideceği bekleme lokasyonu olarak potansiyel lokasyonlar içerisinde kaza lokasyonuna en yakın olan lokasyon seçilir.

Algoritma 6 Araçlar İçin Müdahale Sonrası En Yakın Lokasyonu Seçimi (AAY)

Girdiler P : potansiyel bekleme lokasyonu kümesi, S : senaryo kümesi, K : kaza müdahale araç filosu kümesi, $N_{s,k}$: Her $s \in S$ senaryosunda, her $k \in K$ aracı için ziyaret edilen sıralı lokasyonlar kümesi

```
1: while durma koşulları sağlanmadığı sürece do
2:   for her  $s \in S$  senaryosu için do
3:     for her  $k \in K$  müdahale aracı için do
4:       for her  $p \in P$  potansiyel bekleme lokasyonu için do
5:          $d_i \leftarrow$  kaza lokasyonuna en yakın potansiyel lokasyon mesafesi
6:       end for
7:        $p^* \leftarrow$  argmindi // kazaya lokasyonuna en yakın potansiyel lokasyon
5:       sonraki lokasyons,k := 1 ve |P| arasında rasgele bir tamsayı
6:        $N_{s,k} \leftarrow N_{s,k} \cup \{sonraki lokasyon_{s,k}\}$ 
7:     end for
8:   end for
9: end while
```

Çıktılar: Her $s \in S$ senaryosunda, her $k \in K$ aracı için $i \in I_s$ kazasına müdahaleden sonra gideceği bekleme lokasyonu

4.2 İkinci Adım: Genel Durumda Araçların Bekleme Lokasyonu Seçimi

Senaryolarda araçların başlangıç bekleme lokasyonlarının belirlenmesi, kazalara atamalarının yapılıp müdahale sonrası gidecekleri bekleme lokasyonlarının belirlenmesi birinci adımda yapılmıştır. (Bölüm 4.1) Böylece tüm senaryolarda, tüm periyotlarda araçların lokasyon bilgisi sağlanmıştır. Problem senaryo tabanlı bir yaklaşım ile çözüldüğü için tüm senaryolar dikkate alınarak genel durumda araçların bekleme lokasyonlarının belirlenmesi gerekmektedir.

Geliştirilen tüm sezgisel yöntem versiyonlarında ortak bir algoritma kullanılmıştır. Her aracın, tüm periyotlarda genel durumda, hangi lokasyonda bekleyeceği bilgisi elde edilmek istenmiştir. Bunun için her periyotta, araçların senaryolardaki lokasyonlarının enlem ve

boylamları senaryoların gerçekleşme olasılıkları ile doğru orantılı olarak hesaplamaya dahil edilmiştir. Böylelikle yapay bir lokasyon elde edilmiştir. Bu yapay lokasyona en yakın bekleme lokasyonunu bulabilmek için, elde edilen yapay lokasyon ile potansiyel bekleme lokasyonları arasındaki Öklid uzaklık hesaplanmıştır. En kısa uzaklığa sahip bekleme lokasyonu ilgili aracın o periyottaki bekleme lokasyonu olarak kaydedilmiştir.

Algoritma 7 Araçların Senaryodan Bağımsız Bekleme Lokasyonu Seçimi (ARUAY, RAY, AAY)

Girdiler P : potansiyel bekleme lokasyonu kümesi, S : senaryo kümesi, K : kaza müdahale araç filosu kümesi, $N_{s,k}$: Her $s \in S$ senaryosunda, her $k \in K$ aracı için ziyaret edilen sıralı lokasyonlar kümesi

```
1: while durma koşulları sağlanmadığı sürece do
2:  $t \leftarrow 1$  // t=1 anından başla
2: for her  $k \in K$  aracı için do
3:  $N_k \leftarrow \{\}$ 
4: for her  $s \in S$  senaryosu için do
5:    $xKoordinat_{k,t} += (olasılık_s * xKoordinat_{s,k,t}) / senaryoSayısı$ 
6:    $yKoordinat_{k,t} += (olasılık_s * yKoordinat_{s,k,t}) / senaryoSayısı$ 
7: end for
8: for her  $p \in P$  bekleme lokasyonu için do
9:  $d_{k,p,t} \leftarrow$  potansiyel bekleme lokasyonlarına Öklid uzaklık hesaplama
10: end for
11:  $p_{k,t}^* \leftarrow argmind_{k,p,t}$  //yapay koordinatlı lokasyona en yakın bekleme lokasyonunu bul
12:  $N_k \leftarrow N_k \cup \{p_{k,t}^*\}$ 
13: end for
14: end while
```

Çıktılar: Her $k \in K$ aracı için N_k ziyaret edilen sıralı bekleme lokasyonları kümesi

4.3 Üçüncü Adım: Genel Durum Lokasyonlarına Göre Senaryolarda Araçların Kaza Lokasyonlarına Tekrar Atanması ve Bekleme Lokasyonu Seçimi

4.3.1 Birinci Aşama: Araçların Genel Durum Lokasyonlarından Kazalara Atanması

Araçların genel durumdaki lokasyonları bulunduktan (Bölüm 4.2) sonra bu lokasyonlara göre kaza atamalarının tekrar yapılması gerekmektedir. Bölüm 4.1.2’de incelenen atamalar yalnızca araçların genel durumda beklemeleri gereken potansiyel bekleme lokasyonlarını bulmak için yapılmaktadır. Ulaşılmak istenen atamalar ve trafik sıkışıklığının hesaplanması için gerekli kaza müdahale gecikmeleri bu bölümde incelenecek atamalar ile sağlanmaktadır.

Tüm senaryolarda araçların herbir periyottaki lokasyonu genel durumda ilgili aracın o periyottaki lokasyonuna eşitlenir. Bölüm 4.1.2’de olduğu gibi bir kaza gerçekleştiğinde, kazanın gerçekleştiği periyotta uygun statüsünde bulunan araç olup olmadığı kontrol edilir. Eğer varsa bu araçlar içerisinde kaza lokasyonuna en yakın lokasyonda bekleyen araç, kazaya atanır ve kazaya müdahale etmek üzere yola çıkar. Eğer kazanın gerçekleştiği periyotta uygun statüde hiç araç yoksa, bir periyot sonrası için araçların statüleri kontrol edilir. Bu kontrol işlemi planlama ufkunun son periyoduna kadar devam eder. Planlama ufku içerisinde müdahale edilemeyen kazalara planlama ufkunun son periyodunda müdahale edildiği varsayılır.

**Algoritma 8 Araçların Senaryolarda Kaza Lokasyonlarına Tekrar Atanması
(ARUAY, RAY, AAY)**

Girdiler I_s : $s \in \mathcal{S}$ senaryosunda gerçekleşen kaza lokasyonları, \mathcal{S} : senaryo kümesi, K : kaza müdahale araç filosu kümesi, $N_{s,k}$: Her $s \in \mathcal{S}$ senaryosunda, her $k \in K$ aracı için ziyaret edilen sıralı lokasyonlar kümesi

```
1:for her  $s \in \mathcal{S}$  senaryosu için do
2: for her  $k \in K$  müdahale aracı için do
3:  for  $t=1, \dots, \tau^{max}$  do
4:    $N_{s,k} = N_k$  //araçların senaryolardaki lokasyonları genel duruma eşitlenir.
5:  end for
6: end for
2: for her  $i \in I_s$  kazası için do
3:   $t \leftarrow kaza\ anı_i$  // t'yi kazanın oluşma anından başlat
4:   $l \leftarrow 0$  // kazaya müdahaledeki gecikme
5:  while  $t + l \leq \tau^{max}$  do
6:   if uygun statüsündeki araç sayısı  $\geq 1$  then
7:    for her  $k \in K$  müdahale aracı için do
8:      $t_k \leftarrow MümkünOlanEnYakınMüdahaleZamanı(k, i, s)$ 
7:    end for
8:     $k^* \leftarrow argmint_k$  // kazaya en önce müdahale edebilecek aracı belirle
9:     $AracıKazayaAta(k^*, i, s)$ 
10:    $N_{s,k} \leftarrow N_{s,k} \cup \{i\}$ 
11:  else
12:    $l++$ 
13:  end if
14: end while
15: end for
16: end for
```

Çıktılar: Her $s \in \mathcal{S}$ senayosunda, kaza $i \in I_s$, araç $k \in K$ atamaları

4.3.2 İkinci Aşama: Araçların Müdahaleden Sonra Bekleme Lokasyonuna Atanması

Kazaya müdahalesi biten aracın gideceği bekleme lokasyonunu belirlemek için öncelikle genel durumda aracın müdahale bitiş anındaki lokasyonuna bakılmaktadır. Sonrasında $t' = \text{müdahale bitiş anı} + \text{kaza lokasyonu ile bekleme lokasyonu arasındaki seyahat süresi}$ anında genel durumda aracın hala o lokasyonda olup olmadığı kontrol edilir. Eğer araç genel durumda o lokasyonda ise araç senaryoda da o lokasyona atanır. Aksi durumda tüm sezgisel yöntem versiyonları için Bölüm 4.1.3'te bahsedilen şekilde bir seçim algoritması yürütülür.



5 DENEYSEL ÇALIŞMALAR VE SONUÇLAR

Önerilen çözüm yönteminin etkinliği, farklı veri setleri ile deneysel çalışmalar yapılarak test edilmiştir. İlk veri seti, detaylarından bu bölümde bahsedilecek belli kurallar altında üretilmiş deneysel verilerdir. İkinci veri seti ise, İBB'nin sağlamış olduğu gerçek verileri içerir. Bölüm 5.1'de veri setlerinin özelliklerine değinilmektedir.

Deneysel çalışmalar yapılırken ilk önce Bölüm 5.2'de önerilen sezgisel yöntemin matematiksel model ile performans kıyaslaması yapılmıştır. Sonrasında önerilen sezgisel yöntemin versiyonlarının performansı, mevcut durumdaki operasyon ile Bölüm 5.3'te karşılaştırılmıştır.

Geliştirilen matematiksel model, CPLEX 12.6.2 kullanılarak çözülmüştür. Örnek boyutunun büyümesi ile zaman sınırı, herbir karma tamsayılı programlama modeli için 4 saat olarak belirlenmiştir. Önerilen sezgisel yöntem C# programlama dilinde kodlanmış, Visual Studio Entegre Geliştirme Programında çözülmüştür. Tüm koşullar 1,8 GHz Intel Core i5 işlemci ve 8 GB RAM özelliğine sahip MacOS 10.13.6 işletim sistemine sahip bilgisayarda alınmıştır. Önerilen sezgisel yöntemler rassallık barındırdığı için her örneklem birden çok kez tekrarlanmıştır. Bölüm 5.2 ve Bölüm 5.3'te tekrar sayısının belirlenme kriterleri açıklanacaktır.

5.1 Veri Setleri

İlk veri seti, Çizelge 5.1'de belirtilen değer aralıklarına göre rasgele üretilmiştir. Örneklerin büyüklüğü küçük ve orta olacak şekilde belirlenmiş, senaryolara atanan olasılıklara göre kazaların senaryolara dağılımı yapılmıştır. Çizelge 5.1'e göre rasgele üretilen örnekleri ifade etmek için "DO" ifadesi kullanılacaktır.

Çizelge 5.1: Deneysel veri seti oluşturulurken kullanılan değer aralıkları

Kümeler	Küçük Boyutlu Örnekler			Orta Boyutlu Örnekler		
S	1	2	3	4	5	6
P	2	4	6	8	10	12
I_s	2	4	6	8	10	12
K	1	2	3	4	5	6
A	1	2	3	4	5	6
T	30	90	150	210	270	300
Parametreler						
o_{is}	uniform(1,30)			uniform(1,120)		
s_{is}	uniform(1,15)			uniform(1,60)		
d_{ia}	uniform(0,50)			uniform(0,100)		
t_{ij}	uniform(0,50)			uniform(0,100)		
t_{max}	30	90	150	210	270	330
M	t_{max} ve t_{ij} parametreleri ile hesaplanır.			t_{max} ve t_{ij} parametreleri ile hesaplanır.		
p_s	uniform(0,1)			uniform(0,1)		

İkinci veri seti ise, İBB'den sağlanan gerçek verilerden elde edilmiştir. Veri setindeki tüm örneklerde, İstanbul Belediyesi'nin kaza müdahale araçlarını yerleştiği lokasyonlar potansiyel bekleme lokasyonu olarak alınmıştır. Araç sayısı belediyenin bünyesindeki araç sayısı kadar belirlenmiştir. Geçmiş kaza lokasyon ve zaman bilgilerine senaryolarda yer verilmiştir. Planlama ufku bir gün olacak şekilde belirlenip, bir zaman periyodu bir dakikayı ifade etmektedir. Potansiyel bekleme ve kaza lokasyonlarının konumlarının enlem ve boylam olarak verilmesi nedeni ile lokasyonlar arası seyahat süresi hesaplanırken Manhattan formülü temel alınmıştır. İki enlem arası mesafenin 111,3 km olduğu bilinmektedir. Bu sebeple enlemler arası fark 111,3 ile çarpılarak kilometre cinsinden uzaklık bulunmuştur. Ancak çözüm yönteminde iki lokasyon arası mesafe, dakika cinsinden seyahat süresi olarak belirlenmiştir. Müdahale araçlarının acil şeridi kullandıkları ve Karayolları Genel Müdürlüğü'nün belirlediği limite göre hız 40 km/sa olarak alınmıştır (KGM, 2021). Enlemler arası mesafe bu parametreler kullanılarak dakika cinsinden hesaplanmıştır. İki boylam arası mesafe ise Pisagor Teoremi'ne göre ilgili enlemlerin ortalamasının kosinüs değeri ve 111,3 ile çarpılarak hesaplanmıştır (Pisagor T.). Sonrasında enlemler arası seyahat süresinde hesaplandığı şekilde dakika cinsine çevrilmiştir.

Üç tipte senaryo bulunmaktadır; en iyi durum, sıradan durum ve en kötü durum. Hangi tip senaryodan kaç adet bulunacağı ise gerçek hayat verilerinden elde edilmiştir. Gerçek veriler incelendiğinde bir günde en fazla 43, en az 12 kaza olduğu görülmüştür. Çizelge 5.2'de hangi değerler arasındaki kaza sayısının hangi tip senaryoya denk geldiği ve gerçek veri setinde bu tiplere karşılık gelen kaç senaryo bulunduğu gösterilmiştir.

Çizelge 5.2: Gerçek veri setlerindeki kaza sayısı aralıkları ve senaryo tipi sayısı

Senaryo Tipi	Kaza Sayısı Aralığı	Senaryo Sayısı
İyi Durum	12 - 20	6
Sıradan Durum	21 - 33	20
Kötü Durum	34 - 43	5

Buna göre örneklerde yer alan senaryoların yaklaşık olarak %20'si iyi durum, %65'i sıradan durum ve %15'i kötü durum aralığındaki kaza sayısı kadar kaza ile oluşturulmuştur.

Ele alınan problemde çizgenin tam çizge olduğu düşünülmüştür. Kazaların ayrıtlarda sebep olduğu hız düşüşü hesaplanırken kaza lokasyonlarının ayrıtlara olan uzaklığı dikkate alınmıştır. Bir kaza lokasyonunun bir ayrıta uzaklığı, ayrıtın başlangıç ve bitiş düğümlerinin orta noktası ile kaza lokasyonu arasındaki seyahat süresi hesaplanarak bulunmuştur. Bu hesaplama yapılırken yukarıda anlatılan lokasyonlar arası seyahat süresi hesaplaması adımları izlenmiştir.

Gerçek veri setine ait örnekler "GO" olarak isimlendirilmiştir.

Herbir örneğin ismi beş farklı parametreyi belirtmektedir: "S", "T", "P", "V" ve "A" sırası ile senaryo sayısını, toplam kaza sayısını, potansiyel bekleme lokasyonu sayısını, kaza müdahale araç sayısını ve ayrıt sayısını ifade etmektedir. Örneğin DO5S20I10P3V6A isimli örnek 5 senaryolu, meydana gelen kaza sayısının 20 olduğu, 10 tane potansiyel bekleme lokasyonu, 3 tane araç ve 6 tane ayrıt bulunduran deneysel bir örnektir. GO1S33I28P28V3660A isimli örnek ise 1 senaryolu, meydana gelen kaza sayısının 33 olduğu, 28 tane potansiyel bekleme lokasyonu, 28 tane araç ve 3660 tane ayrıt bulunduran gerçek veri setine ait bir örnektir.

5.2 Önerilen Sezgisel Yöntemin Çözüm Kalitesinin Değerlendirilmesi

Önerilen sezgisel yöntemin performansını ölçmek için, küçük ve orta boyutlu deneysel örneklerle sonuçlar alınmıştır. Herbir örnekte sezgisel yöntemlerin koşturum sayısı 1500 olarak belirlenmiştir. Bu sayı belirlenirken belli koşturum sayıları ile sonuçlar alınmış ve sonuçlar arası farklılıklar analiz edilmiştir. Örnek boyutunun artması ile matematiksel modelin makul sürelerde çözüm vermemesi sonucu dört saatlik zaman limiti altında koşturulmuştur.

Küçük boyutlu örneklerde matematiksel model (MM), Açgözlü Rassallaştırılmış Uyarlamalı Arama Yordamı (ARUAY) ve Rassallaştırılmış Arama Yordamı (RAY) sonuçlarının

karşılaştırması Çizelge 5.3'te gösterilmektedir. Sezgisel yöntem versiyonları ile matematiksel modelin sonuçları 9 örnekte ortak iken bir örnekte sezgisel yöntem versiyonları daha kötü bir sonuç elde etmiştir. Bunun sebebi sezgisel yöntemlerde bir araç uygun statüde ise kazalar arasında ilk oluşan kazaya atanır. Ancak her kazanın trafik sıkışıklığına etkisi aynı olmadığından matematiksel model aracı önce oluşmuş ama etkisi düşük kazaya atamaktansa sonra oluşan daha büyük etkili kazaya atamayı tercih etmektedir.

Çizelge 5.3: Küçük boyutlu örneklerin karşılaştırmalı sonuçları

Örnek	TBHD				Zaman (s)		
	MM	ARUAY	RAY	Fark (%)	MM	ARUAY	RAY
DO1S1I2P1V3A	7,33	7,33	7,33	0	< 60	< 60	< 60
DO1S2I3P1V3A	20,17	20,17	20,17	0	< 60	< 60	< 60
DO2S2I3P1V3A	5,5	5,5	5,5	0	< 60	< 60	< 60
DO2S3I6P1V3A	4,58	4,58	4,58	0	< 60	< 60	< 60
DO2S4I6P1V3A	9,17	9,17	9,17	0	180	< 60	< 60
DO2S6I9P2V5A	13,7	13,7	13,7	0	1980	< 60	< 60
DO2S6I9P2V5A	108,75	108,75	108,75	0	< 60	< 60	< 60
DO3S3I4P1V3A	21,45	21,45	21,45	0	< 60	< 60	< 60
DO3S6I4P1V3A	83,23	87,08	87,08	-4	360	< 60	< 60
DO3S6I4P2V3A	39,6	40,7	39,6	0	< 60	< 60	< 60

Küçük boyutlu örneklerde matematiksel model kabul edilebilir sürede DO2S6I9P2V5A örneğini çözebilmiştir. Ancak orta boyutlu örneklere geçildiğinde matematiksel model 6 saati aşkın sürelerde çalışmıştır. Bu sebeple orta boyutlu örneklerde matematiksel model ile sonuçlar alınırken 4 saatlik zaman limiti koyulmuştur. Çizelge 5.4'te orta boyutlu örneklerinin matematiksel model (MM), Açgözlü Rassallaştırılmış Uyarlamalı Arama Yordamı (ARUAY) ve Rassallaştırılmış Arama Yordamı (RAY) ile elde edilen sonuçlarının karşılaştırması gösterilmektedir.

Çizelge 5.4: Orta boyutlu örneklerin karşılaştırmalı sonuçları

Örnek	TBHD				Zaman (s)		
	MM	ARUAY	RAY	İyi.(%)	MM	ARUAY	RAY
DO4S16I8P2V3A	115,04	123,75	113,67	1	14400	< 60	< 60
DO4S16I8P3V3A	116,42	82,95	81,13	44	14400	< 60	< 60
DO4S16I8P1V3A	250,71	269,96	272,25	-7	14400	< 60	< 60
DO4S16I8P4V3A	86,17	51,33	52,25	68	14400	< 60	< 60
DO5S20I10P2V6A	208,06	142,21	131,90	58	14400	< 60	< 60
DO5S20I10P1V6A	287,22	319,72	310,14	-7	14400	< 60	< 60
DO5S20I10P3V6A	161,68	91,18	89,29	81	14400	< 60	< 60
DO5S20I10P3V6A	99,25	60,97	60,01	65	14400	< 60	< 60

Çizelge 5.4 incelendiğinde matematiksel modelden 4 saatlik zaman limiti ile sonuçlar alınırken sezgisel yöntem versiyonları yaklaşık bir dakikada çözüm vermektedir. İyileştirme oranı ARUAY ve RAY'dan sağlanan maksimum yüzdesel iyileştirme oranıdır($MM - \min(\text{ARUAY}, \text{RAY}) / MM$). Sonuçlar karşılaştırıldığında ise DO4S16I8P1V3A ve DO5S20I10P1V6A örnekleri haricinde sezgisel yöntem versiyonlarından en az biri matematiksel modelin sağladığı sonuçtan daha iyi çözüm üretmiştir. Bu iki örnekte matematiksel modelin daha iyi sonuç vermesinin sebebi ise küçük boyutlu örneklerde açıklanan sebep ile aynıdır.

5.3 Önerilen Çözüm Yönteminin Performansının Mevcut Durum ile Karşılaştırılması

Mevcut durumda İBB, araçları belli lokasyonlara yerleştirmekte ve araçlar başka bekleme lokasyonlarına geçmemektedir. Ancak bunun kazalara müdahale süresini olumsuz yönde etkilediği öngörülmektedir. Bu öngörüü analiz etmek adına mevcut operasyonel durum ile önerilen çözüm yöntemi kıyaslanmıştır. Sezgisel yöntemde araçlar planlama ufkunun ilk periyodunda, belediyenin araçlar için belirlemiş olduğu lokasyonlara yerleştirilmiş ve gün içindeki lokasyon değişimlerinin sonuç üzerindeki etkisi analiz edilmiştir. Gerçek veri seti ile yapılan bu karşılaştırmalarda hem sezgisel yöntem versiyonlarının kendi arasındaki performansı hem de mevcut durum üzerindeki iyileştirmeleri Çizelge 5.5'te görülebilir. Veri

setindeki tüm örneklerde belediyenin filosunda yer alan araç sayısı (28) kadar kaza müdahale aracı ve bekleme lokasyonu bulunmaktadır. KoşTURUM tekrarlarının (10.000) yarısı ARUAY ile yarısı ise RAY ile alınmıştır. AAY'de lokasyon seçimi sadece kazaya müdahaleden sonra yapıлып rassallık barındırmadığından koşTURUM sayısı bir olarak belirlenmiştir.

Çizelge 5.5.'te İBB, İstanbul Büyükşehir Belediyesi'nin mevcut operasyonel durumuna göre elde edilmiş sonuçları göstermektedir. İyileştirme oranı, mevcut durum üzerindeki ARUAY, RAY ve AAY'dan sağlanan maksimum yüzdesel iyileştirme oranıdır.

Çizelge 5.5'te elde edilen sonuçlarda, veri setindeki tüm örneklerde araçlar için oluşturulan günlük potansiyel bekleme lokasyonu rotası farklılık göstermektedir. Bazı veri örneklerinin çözümlerinden elde edilen rotaları Ek1 ve Ek2'de gösterilmektedir. Önerilen sezgisel yöntem versiyonlarında koşTURUM süresi olarak kabul edilebilir olsa da senaryo sayısı az iken çözüm kalitesi açısından AAY diğer versiyonlara göre iyi sonuçlar sağlayamamıştır. Ancak senaryo sayısı az iken koşTURUM süresi fazla olmasına rağmen ARUAY ve RAY daha fazla iyileştirme sağlamıştır.

Örneklerde senaryo sayısı arttıkça kaza lokasyonları ve dolayısı ile çizgedeki ayrıt sayısı da arttıkça çözüm süresinin arttığı görülmektedir. Ancak veri setindeki örneklerin çözümleri incelendiğinde, senaryo sayısı altıdan daha fazla olduğunda senaryo sayısındaki artışın araçların yerleştirildiği lokasyonlar üzerinde çok fazla bir etkisi olmamaya başlamıştır. Aynı zamanda araçların gün içinde bekleme lokasyonlarını değiştirmesi araç filosunun daha etkin kullanılmasını sağlamıştır. Resim Ek.1.'de GO6S153I28P28V32580A, Resim Ek.2.'de ise GO15S408I28P28V189660A örneğinin çözümüne göre araçların gün içindeki lokasyon değişimleri harita üzerinde göstermiştir.

Çizelge 5.5: Gerçek boyutlu örneklerin karşılaştırmalı sonuçları

Örnek	TBHD					Zaman (dk)			
	İBB	ARUAY	RAY	AAY	İyi.(%)	İBB	ARUAY	RAY	AAY
GO1S33I28P28V3660A	265.188,72	20.445,8	20.445,8	21.539,55	92,29	< 1	34	31	1
GO2S45I28P28V5256A	335.789,54	23.464,58	22.892,48	23.988,18	93,18	< 1	60	42	1
GO3S70I28P28V9506A	532.554,81	41.621,3	41.621,3	4.3873	92,18	< 1	126	83	1
GO4S70I28P28V9506A	377.720,68	31.075,75	32.102,31	27.976,41	92,59	< 1	202	140	1
GO5S128I28P28V24180A	1.265.608,44	122.711,56	120.338,49	113.136,65	91,06	< 1	252	220	1
GO6S153I28P28V32580A	1.624.941,58	177.852,82	193.645,83	171.589,39	89,44	< 1	261	254	1
GO7S169I28P28V38612A	1.946.847,17	217.526,1	219.995,88	202.538,58	89,60	< 1	265	274	2
GO10S266I28P28V86142A	3.909.020,02	543.731,08	520.578,42	462.003,53	88,18	< 1	320	300	2
GO15S408I28P28V189660A	11.189.462,5	1.298.943,81	1.290.602,95	1.036.491,7	90,74	< 1	353	326	2
GO20S549I28P28V332352A	19.959.403,9	2.309.856,77	2.497.521,54	1.871.397,28	90,62	< 1	420	378	2

6 SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, Türkiye'nin en kalabalık şehri ve trafik kazalarının sıklıkla meydana geldiği İstanbul için, İBB'nin günlük olarak karşılaştığı bir problem olan çekici araçlar için lokasyon rotalama problemi ele alınmıştır. Problemin belirsiz parametreler içermesi göz önünde bulundurularak senaryo tabanlı bir optimizasyon yaklaşımı sunulmuştur. Kazaların ayrıntılar üzerinde sebep olduğu hız düşüşü, yani trafik sıkışıklığı en küçüklenmek istenmiş ve toplam beklenen hız düşüşünün en küçüklenmesi amaçlanmıştır.

Problemin çözümü için öncelikle bir matematiksel model önerilmiştir. Bu modelde senaryolar ile gerçekleşebilecek farklı durumlar dikkate alınmış olup araçların gün içindeki bekleme lokasyonlarının belirlenmesi hedeflenmiştir. Problem boyutu büyüdükçe matematiksel modelin kabul edilebilir sürede ve istenilen kalitede sonuçlar vermediği görülmüştür. Bu nedenle matematiksel modele ek olarak, senaryo tabanlı üç farklı versiyona sahip sezgisel çözüm yöntemi geliştirilmiştir. İlk versiyon, araçların gün başı ve kazalara müdahale sonrası bekleme lokasyonlarını belirlerken kaza lokasyonlarını dikkate alan rulet çarkı seçimini içermektedir. İkinci versiyon, tamamen bu lokasyonların rasgele seçilmesi metodunu içermektedir. Üçüncü versiyonda ise, araçların kazalara müdahale sonrası bekleme lokasyonu için en yakın lokasyon seçimi yapılmıştır. Deneysel çalışmalar sonucunda, önerilen sezgisel yöntemin mevcut operasyonel duruma kıyasla yüksek kalitede çözümler üretebildiği gözlemlenmiştir.

Senaryo tabanlı bir yaklaşımın sergilenmesi, problemi daha zorlu hale getirmiştir. Ancak bu kararın uygulanması, tek bir senaryonun değil birden çok senaryonun probleme dahil edilmesini ve böylelikle daha genel durum için çözüm üretilmesini sağlamıştır.

Çekici araçların İBB tarafından belirlenen tek bir lokasyonda beklemesi yerine bekleme lokasyonlarının gün içinde değiştirilmesi ve kazalara atamalarının bu

lokasyonlardan yapılması ile Çizelge 5.5'te de gösterildiği gibi en az %88 oranında iyileşme sağlanmıştır.



KAYNAKLAR

- Aktas, E., Ozaydin, O., Bozkaya, B., Ulengin, F., Onsel, S.,** (2013).Optimizing Fire Station Locations for the Istanbul Metropolitan Municipality, *INFORMS Journal on Applied Analytics*, 43, 209-296.
- Andrade, L., A., C., G., Cunha, C., B., D.,** (2015).An ABC heuristic for optimizing moveable ambulance station location and vehicle repositioning for the city of Sao Paulo, *International Transactions in Operational Research*, 22, 473-501.
- Brotcorne, L., Laporte, G.,** (2003).Ambulance Location and Relocation Models, *European Journal of Operational Research*, 147, 451-463.
- Cornuejols, G. Fisher, M., L., Nemhauser, G., L.,,** (1977). On the uncapacitated location problem. *Annals of Discrete Mathematics* 1 (pp. 789-810).
- Daneshgar, F., Haghani, A.,** (2016).Joint Mixed Integer Model to Minimize Incident Response Time in Freeway Service Patrol Program, *Transportation Research Board 95th Annual Meeting,*, Washington DC, USA,10-14 January.
- Diaz, H., T., Mayorga, M., E., Chanta, S., McLay, L., A.,** (2013).Joint location and dispatching decisions for Emergency Medical Services, *Computers & Industrial Engineering*, 64, 917-928.
- Gendreau, M., Laporte, G.,** (2000).A dynamic model and parallel tabu search heuristic for real-time ambulance relocation, *Parallel Computing*, 27, 1641-1653.
- Geroliminis, N., Sun, J.,** (2011).Properties of a well_defined macroscopic fundamental diagram for urban traffic, *Transportation Research Part B*, 45, 605-617.
- Hu, J., Chan, Y.,** (2013).Stochastic incident-management of asymmetrical network-workloads, *Transportation Research Part C*, 27, 140-158.
- Karatas, M., Yakıcı, E.,** (2017).An Iterative Solution Approach to a Multi_objective Facility Location Problem, *Applied Soft Computing*, 26, 272-287.
- Karp, R. M.,** (1972). Reducibility among combinatorial problems. In *Complexity of computer computations* (pp. 85-103). Springer.
- Kim, H., Kim, W., Chang, G., L.,** (2014).Design of Emergency Response System to Minimize Incident Impacts, *Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board*, 1, 65-77.
- Lenstra, J. K., Rinnooy Kan, A. H. G.,** (1981). Complexity of vehicle routing and scheduling problems, *Networks*, 11, 221-227.

- List, G., Wood, B., Nozick, L., Turnquist, M., Jones, D.,** (2003). Robust optimization for fleet planning under uncertainty, *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 39, 209-227.
- Long, J., Gao, Z., Zhao, X., Lian, A., Orenstein, P.,** (2011). Urban Traffic Jam Simulation Based on the Cell Transmission Model, *Network and Spatial Economics*, 11, 43-64.
- Lou, Y., Yin, Y., Lawphongpanich, S.,** (2011). Freeway service patrol deployment planning for incident management and congestion mitigation, *Transportation Research Part C*, 19, 283-295.
- Marianov, V.,** Location Models for Emergency Service Applications, *INFORMS Tutorials in Operations Research*, (Sf. 237), Maryland, USA, (2017).
- Ozbay, K., Iyigun, C., Gursoy, M., B., Xiao, W.,** (2013). Probabilistic programming models for traffic incident management operations planning, *Annals of Operations Research*, 203, 389-406.
- Ozbay, K., Xiao, W., Jaiswal, G., Bartin, B., Kachroo, P.,** (2009). Evaluation of incident management strategies and technologies using an integrated traffic/incident management simulation, *World Review of Intermodal Transportation Research*, 2, No. 2/3
- Park, H., Waddell, D., Haghani, A.,** (2019). Online optimization with look-ahead for freeway emergency vehicle dispatching considering availability, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 109, 95-116.
- Puerto, J., Rodriguez-Chia, A., M.,** (2007). Robust Positioning of Service Units, *Stochastic Models*, 19, 125-147.
- Razi, N., Karatas, M.,** (2016). A multi-objective model for locating search and rescue boats, *European Journal of Operational Research*, 254, 279-293.
- Salman, F., S., Yucel, E.,** (2015). Emergency facility location under random network damage: Insights from the Istanbul case, *Computers & Operations Research*, 62, 266-281.
- Sun, X., Wang, J.,** (2018). Routing design and fleet allocation optimization of freeway service patrol: Improved results using genetic algorithm, *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 501, 205-216.
- Wang, B., Li, M., Hu, Y., Huang, L., Lin, S.,** (2018). Optimizing Locations and scales of Emergency Warehouses Based on Damage Scenarios, *Journal of the Operations Research Society of China*, 8, 437-456.
- Xu, J., Guo, J., Zhang, J., Sun, Y., Liu, W.,** (2021). Optimization method of emergency logistics network in the initial post-earthquake stage considering multiple factors and the case analysis, *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, 40, 1357-1366.
- Yin, Y.,** (2006). Optimal Fleet Allocation of Freeway Service Patrols, *Networks and Spatial Economics*, 6, 221-234.

- Yin, Y., Madanat, S., (2005).**Developing Optimal Planning and Management Strategies for a Robust Highway System., *California PATH Research Report*, ISSN 1055-1425.
- Yucel, E., Salman, F., S., Arsik, I., (2018).**Improving post-disaster road network accessibility by strengthening links against failures, *European Journal of Operational Research*, 269, 406-422.
- Zhang, Z., Li, K., (2014).**A novel probabilistic formulation for locating and sizing emergency medical service stations, *Annals of Operations Research*, 229, 813-835.
- Amerika Birleşik Devletleri Ulaştırma Bakanlığı Federal Otoyol İdaresi, 2018**
https://ops.fhwa.dot.gov/congestion_report/executive_summary.htm
Alındığı tarih: 12.04.2019.
- İstanbul İstatistik Ofisi, 2021** <https://istatistik.istanbul/> Alındığı tarih: 14.04.2021
- KGM, 2021** <https://www.kgm.gov.tr/Sayfalar/KGM/SiteTr/Trafik/HizSinirlari.aspx>
Alındığı tarih: 27.03.2021.
- Pisagor T.** <https://www.mkompf.com/gps/distcalc.html>. Distance calculation
Alındığı tarih: 27.03.2021.
- Türkiye İstatistik Kurumu, 2021** <https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Karayolu-Trafik-Kaza-Istatistikleri-2019-33628> Alındığı Tarih: 14.04.2021

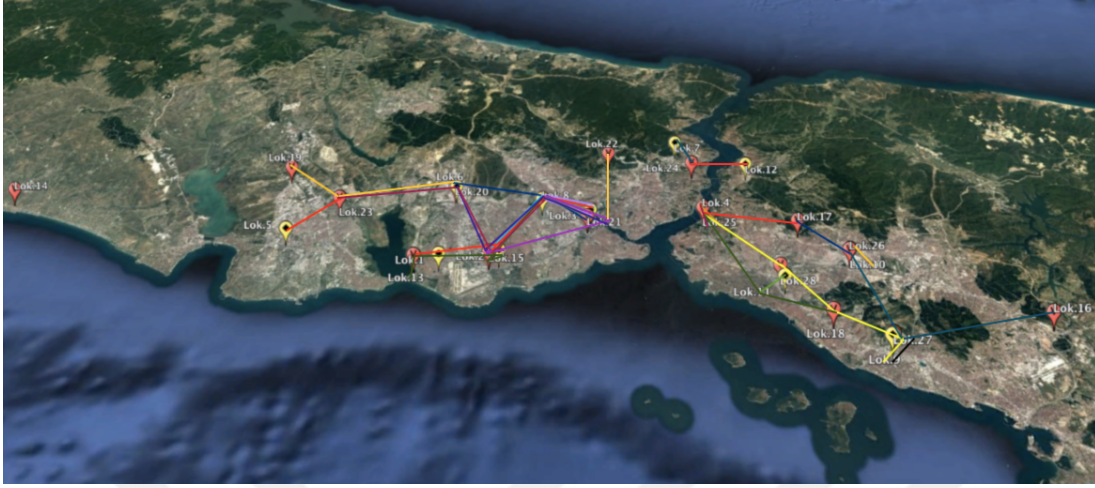
EKLER

EK 1: GO6S153I28P28V32580A örneđi sonucuna göre bekleme lokasyonları

EK 2: GO15S408I28P28V189660A örneđi sonucuna göre bekleme lokasyonları



EK 2



Resim Ek.2: GO15S408I28P28V189660A sonucuna göre bekleme lokasyonları

