

TÜRK HAVA KURUMU ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**NAVİGASYON SİSTEMLERİNDE
ZAMANA BAĞLI ENGEL MODELİ İLE EN İYİ ROTA PLANLAMASI**



YÜKSEK LİSANS TEZİ

Sine CANBOLAT

Elektrik ve Bilgisayar Mühendisliği Anabilim Dalı

Elektrik ve Bilgisayar Mühendisliği Programı

OCAK 2019

TÜRK HAVA KURUMU ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**NAVİGASYON SİSTEMLERİNDE
ZAMANA BAĞLI ENGEL MODELİ İLE EN İYİ ROTA PLANLAMASI**



YÜKSEK LİSANS TEZİ

Sine CANBOLAT

Elektrik ve Bilgisayar Mühendisliği Anabilim Dalı

Elektrik ve Bilgisayar Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Doktor Öğretim Üyesi Engin DEMİR

Türk Hava Kurumu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 1406010015 numaralı Yüksek Lisans öğrencisi, Sine CANBOLAT, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı Navigasyon Sistemlerinde Zamana Bağlı Engel Modeli ile En İyi Rota Planlaması başlıklı tezini, aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı: Doktor Öğretim Üyesi Engin DEMİR

Hacettepe Üniversitesi

Jüri Üyeleri: Prof. Dr. Ahmet COŞAR

Türk Hava Kurumu Üniversitesi

Doktor Öğretim Üyesi Engin DEMİR

Hacettepe Üniversitesi

Doktor Öğretim Üyesi Fuat AKAL

Hacettepe Üniversitesi

Tez Savunma Tarihi: 18 Ocak 2019

**TÜRK HAVA KURUMU ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ MÜDÜRLÜĞÜ'NE**

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum, Navigasyon Sistemlerinde Zamana Bağlı Engel Modeli ile En İyi Rota Planlaması adlı çalışmamın, tarafımdan akademik etik ve kurallara aykırı düşecek bir yardıma başvurmaksızın yazıldığını ve yararlandığım kaynakların kaynakçada gösterilenlerden oluştuğunu, bunlara atıf yapılarak yararlanılmış olduğunu belirtir ve bunu onurumla doğrularım.

18.01.2019
Sine CANBOLAT

TEŞEKKÜRLER

Çalışmalarımı yönlendiren, araştırmalarımın her aşamasında bilgi, öneri ve yardımlarını esirgemeyerek gelişmeye katkıda bulunan tez danışmanım Sayın Doktor Öğretim Üyesi Engin Demir'e teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca, çalışmalarım süresince birçok fedakârlıklar göstererek beni destekleyen aileme teşekkür ederim.

Ocak, 2019

Sine CANBOLAT

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜRLER	iv
İÇİNDEKİLER	v
TABLO LİSTESİ	vii
ŞEKİL LİSTESİ	viii
ÖZET	x
ABSTRACT	xi
BİRİNCİ BÖLÜM	1
1.1 Giriş	1
İKİNCİ BÖLÜM	5
2.1 Temel Kavramlar	5
2.1.1 Statik Ağlarda Rotalama Algoritmaları	5
2.1.2 Dinamik Ağlarda Rotalama Algoritmaları	13
2.2 Literatür Özeti	16
ÜÇÜNCÜ BÖLÜM	23
3.1 Analiz ve Sistem Modellemesi	23
3.1.1 Evrensel Engel Modeli	23
3.1.2 Ağ Modeli	27
3.2 Yol Ağı ve Engellerin Oluşturulması	27
3.2.1 Yol Ağı Verisinin Toplanması, Dönüştürülmesi ve Temizlenmesi	27
3.2.2 Engellerin Oluşturulması	28
3.2.3 Engellerin Yol Ağı ile İlişkilendirilmesi	30
DÖRDÜNCÜ BÖLÜM	31
4.1 Engel Bazlı Rotalama Algoritmaları	31
4.1.1 Engelden Kaçınan Rotalama (EKR) Algoritması	31
4.1.2 Engel Farkında Rotalama (EFR) Algoritması	33
4.2 Engellerin Rota ile İlişkilendirilmesi	35
BEŞİNCİ BÖLÜM	39
5.1 Deneyler ve Tartışma	39
ALTINCI BÖLÜM	49
6.1 Sonuçlar ve Öneriler	49

KAYNAKLAR

51

ÖZGEÇMİŞ

54



TABLO LİSTESİ

5.1	Yol ağında statik engelin bulunduğu sonuç tablosu.	43
5.2	Yol ağında sürekli engelin bulunduğu sonuç tablosu.	44
5.3	Yol ağında periyodik engelin bulunduğu sonuç tablosu.	45
5.4	Yol ağında hareketli engelin bulunduğu sonuç tablosu.	46
5.5	Yol ağında dinamik engelin bulunduğu sonuç tablosu.	47



ŞEKİL LİSTESİ

1.1	Engelin bulunmadığı yönlü çizge.	3
1.2	Engelin yer aldığı yönlü çizge.	3
2.1	Yönsüz çizge gösterimi.	6
2.2	Yönlü çizge gösterimi.	6
2.3	Rotalama algoritmaları.	7
2.4	Dijkstra algoritmasının arama uzayının gösterimi.	8
2.5	Bidirectional algoritmanın arama uzayının gösterimi.	8
2.6	A* algoritmasının arama uzayının gösterimi.	8
2.7	Zamanda genişletilmiş yaklaşım.	15
4.1	Engelden Kaçınan Rotalama (EKR) algoritmanın yapısı.	32
4.2	Başlangıç düğümü b'den, hedef düğümü d'ye en kısa rota planını üreten fonksiyon.	32
4.3	Engel Farkında Rotalama (EFR) algoritmasının yapısı.	34
4.4	Statik engel durumu.	36
4.5	Sürelî engel durumu.	36
4.6	Periyodik engel durumu.	36
4.7	Hareketli engel durumu, konum 1.	37
4.8	Hareketli engel durumu, konum 2.	37
4.9	Dinamik engel durumu, konum 1.	38
4.10	Dinamik engel durumu, konum 2.	38
4.11	Dinamik engel durumu, konum 3.	38
5.1	Almanya/Oldenburg bölgesine ait en iyi rota planı üzerindeki bir sürelî engelin gösterimi.	40
5.2	$e_s.t_0 - e_s.t_1$ zaman aralığında sürelî engel etkisinin bitmesinin beklendiği durum.	40
5.3	$e_s.t_1$ zamanından sonra sürelî engel etkisinin bittiği durum.	40
5.4	Almanya/Oldenburg bölgesine ait en iyi rota planı üzerindeki bir hareketli engel gösterimi.	42
5.5	$e_h.t_0$ zamanında hareketli engel ile ilk defa karşılaşma durumu.	42
5.6	$e_h.t_0 - e_s.t_1$ zaman aralığında hareketli engel ile birlikte hareket etme durumu.	42
5.7	$e_h.t_1$ zamanından sonra hareketli engelin en iyi ilk rota planı üzerinden ayrılma durumu.	42
5.8	Yol ağında sürelî engelin bulunduğu durum için EFR algoritmasının seyahat süresi kazanım yüzdesi ortalamaları.	44
5.9	Yol ağında periyodik engelin bulunduğu durum için EFR algoritmasının seyahat süresi kazanım yüzdesi ortalamaları.	45
5.10	Yol ağında hareketli engelin bulunduğu durum için EFR algoritmasının seyahat süresi kazanım yüzdesi ortalamaları.	46

5.11 Yol ağında dinamik engelin bulunduğu durum için EFR algoritmasının seyahat süresi kazanım yüzdesi ortalamaları.	47
5.12 EFR algoritmasının ortalama seyahat süresi kazanım yüzdesi.	47



ÖZET

Navigasyon Sistemlerinde Zamana Bağlı Engel Modeli ile En İyi Rota Planlaması

CANBOLAT, Sine

Yüksek Lisans, Elektrik ve Bilgisayar Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Doktor Öğretim Üyesi Engin DEMİR

Ocak - 2019, 54 sayfa

Engeller buldukları yolun erişilebilirlik maliyetini arttırdığı için zamana bağlı uygulama alanlarında iletişime/ulaşıma etki etmektedir. Halihazırdaki çalışmalarda, engeller iki farklı yaklaşıma bağlı olarak modellenmektedir. En temel yaklaşımda, engellerin yol ağında kalıcı olduğu kabul edilmektedir ve en iyi rota planı hesaplamasında engelin bulunduğu yol topolojik olarak dikkate alınmamaktadır. Diğer yaklaşımda ise sadece konumu ve boyutu değişen engellerin zamana bağlı maliyetleri dikkate alınmaktadır. Ancak farklı özelliklere sahip tüm engellerin zamana bağlı maliyetini hesaplayan bir yaklaşım önerilmemektedir. Bu çalışmada statik, süreli, periyodik, hareketli ve dinamik engeller olmak üzere beş farklı kategoriyi içeren zamana bağlı evrensel bir engel modeli önerilmiştir. Engelden kaçınan rota planını hesaplamak için Engelden Kaçınan Rotalama (EKR) algoritması, engelin zamana bağlı maliyetini dikkate alan rota planını hesaplamak için ise Engel Farkında Rotalama (EFR) algoritması geliştirilmiştir. Her iki algoritma da Dijkstra algoritmasının genişletilmiş bir versiyonudur. EFR algoritması ile EKR algoritmasının karşılaştırmalı deney sonuçları sunulmuştur. Deney sonuçları zamana bağlı olarak engelleri dikkate alan algoritmanın, engelden kaçınan algoritmaya göre daha iyi sonuçlar ürettiğini göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: rotalama algoritması, zaman bazlı rotalama, zaman bazlı engel modeli, yol ağları

ABSTRACT

Optimal Route Planning with Time Dependent Obstacle Model in Navigation System

CANBOLAT, Sine

Master, Electrical and Computer Engineering

Thesis Supervisor: Assist. Prof. Dr. Engin DEMİR

January - 2019, 54 pages

Obstacles increase the reachability cost of the road they belong, thus they affect the communication/navigation in time-dependent application areas. In current studies, obstacles are modeled based on two different approaches. Typically, obstacles are modeled as persistent objects in road networks and they are topologically disregarded in the planning algorithms. The other approach only regarded the time-dependent costs of obstacles changing its location and size. However, a time dependent common obstacle model is not presented. In this study, a time dependent common obstacle model containing five different categories including as static, periodic, temporary, moving and dynamic obstacles is proposed. Obstacle Avoid Routing (EKR) algorithm to calculate obstacle avoiding route plan, and Obstacle Aware Routing (EFR) algorithm to calculate the route plan considering the time dependent cost of the obstacles, are developed. Both algorithms are an extended version of the Dijkstra algorithm. Experimental comparison of EKR algorithm and EFR algorithm results are presented with time dependent common obstacle model. Experimental results showed that obstacle aware algorithm produces better cost than the obstacle avoiding algorithm.

Key words: routing algorithm, time dependent routing, time dependent obstacle model, road networks

BİRİNCİ BÖLÜM

1.1 Giriş

Navigasyon, havalimanı bagaj taşıma sistemlerindeki bagaj yönlendirme, kablo-suz ağlarda veri aktarımı için paket rotalama, acil durum müdahale ve robotik araçların özerk bir biçimde yönlendirilmesi gibi uygulamalarda en iyi rotanın planlanması temel problemlerden biridir. Bu uygulamalardaki ortak özellik düğümlerden ve yollar-dan oluşan bir ağ topolojisinin var olmasıdır. En iyi rota, verilen yol topolojisi üzerin-deki başlangıç ve bitiş düğümü arasında en kısa mesafe, en az seyahat süresi veya en az yakıt tüketimi gibi kriterler dikkate alınarak oluşturulan toplamda en düşük maliyete sahip sıralı yol dizisidir.

Yol ağında iki düğüm arasındaki erişilebilirlik maliyetini arttıran durumlar engel olarak tanımlanmaktadır. Engeller en iyi rota planlamasında maliyetleri zamana bağlı olarak etkilemektedir. Bu nedenle, rota planlamada seyahatin gerçekleşme süre-sinin ve engellerin zamana bağlı etkilerinin dikkate alınması gerekmektedir. Örneğin, navigasyon sistemlerinde yol ağı üzerinde oluşan trafik sıkışıklığı ya da kazalar en sık karşılaşılan engellerdendir. Bu engellerden trafik sıkışıklığının zamanla azalması, ka-zaların ise bulunduğu yerden kaldırılması sonucunda maliyetler zamanla değişkenlik göstermektedir.

Engellerin var olduğu bir yol ağında en iyi rotalama yöntemi için literatürde kabul görmüş en basit yaklaşım engellerin kalıcı olduklarını kabul ederek ve yol ağın-daki maliyetleri güncelleyerek rota planlaması yapmaktadır (Chitumalla v.d., 2008). Bu yaklaşımın en temel sorunu, engelin başlangıç ve bitiş zamanlarını dikkate almama-sıdır. Bu nedenle seyahat süresindeki gerçek maliyetleri içeren en iyi rotayı her zaman hesaplayamaz. Örneğin, iki düğüm arasındaki en iyi rotada oluşan bir engel nedeniyle yeni bir rota belirlenirken gerçekte engelin seyahat süresi içerisinde etkisini yitirmesi

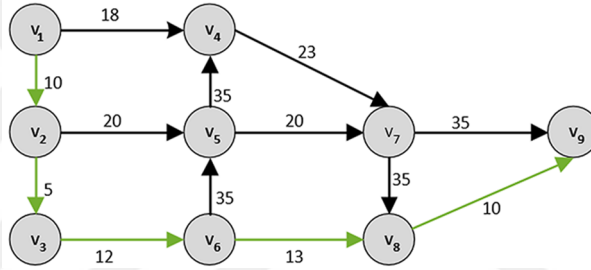
mümkün olabileceğinden yeniden hesaplamaya gerek olmayabilir. Engelin zaman maliyetini dikkate almayan algoritma çalıştırıldığında, engelin yol ağı üzerindeki etkisini yitirmesi beklenmez ve engel zaman maliyetinin rota planına dahil edildiği rota planı, alternatif rota planından daha iyi olduğu durumlarda en iyi rota planı hesaplanamamaktadır.

Diğer bir yaklaşım ise, engellerin zaman bazlı olarak kapladığı alan ve konumunun değiştiği durumlarda, rota üzerindeki engellerin zaman bazlı maliyetlerini dikkate alarak engeli aşmak, engelin yoldan kalkmasını beklemek veya engelden kaçınmaktır. Yangınlar, zararlı gaz bulutları ve seller kapladığı alan ve konumu değişen belirsiz sınırlara sahip engeller olarak örneklendirilmiştir (Wang v.d., 2017a). Bu yaklaşımdaki temel sorun, yalnızca alanı ve konumu değişen engellerin zamana bağlı olarak farkında olunması ve seyahat süresindeki gerçek maliyetlerin en iyi rota hesaplamasına her koşulda dahil edilmemesidir. Örneğin, acil durum müdahale uygulamasında aracın trafikte geçiş üstünlüğü olduğu için, bekleme zamanının hesaplanmasına ihtiyaç olmayacaktır. Ancak trafik akışında geçiş üstünlüğü olmayan araçlar için engelin yol ağı üzerindeki etkisini yitirme zamanı beklenmemektedir ve bu duruma bağlı olarak en iyi rota planı her zaman hesaplanamamaktadır.

Evrensel engel modeli sabit pozisyonlu ve değişken pozisyonlu engelleri kapsamaktadır. Statik, süreli ve periyodik engeller sabit pozisyonlu engel olarak tanımlanırken, hareketli ve dinamik engeller değişken pozisyonlu engeller olarak tanımlanmıştır. Statik engel yol ağının topolojik özellikleri ile ilişkilidir. Yaşam süresi zamanla azalmaz ve konumu sabittir. Süreli engelin yol ağındaki konumu sabittir ancak yaşam süresi zamanla azalır. Periyodik engelin yol ağındaki konumu sabittir, yaşam süresi belirli periyotlara bağlı olarak zamanla azalır ve belirli periyotlara bağlı olarak kendisini tekrarlamaktadır. Hareketli engelin yol ağındaki konumu yol eğrilerine bağlı olarak değişkendir ve yaşam süresi zamanla azalır. Dinamik engelin yol ağındaki konumu ve alanı yol eğrilerinden bağımsız olarak değişir ve yaşam süresi zamanla azalır. Bu çalışmanın amacı engel modeli ile engelin yol eğrisi üzerindeki maliyetlerini zamana bağlı olarak en iyi rota planı hesaplamasına dahil etmektir. Bu sayede, engelin yol eğrisi üzerindeki etkisinin tükenmesini bekleyen en iyi rota planı hesaplanmıştır. Bu çalışma kapsamında, en iyi rota planı maliyeti başlangıç düğümünden hedef düğümüne ulaşana kadar geçen zaman hesaplamasına dayanmaktadır. En düşük seyahat

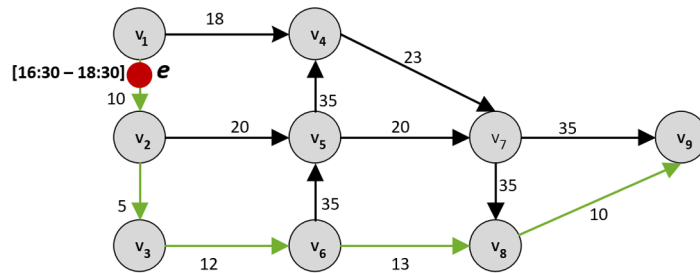
süresine sahip olan rota planı en iyi olarak hesaplanmıştır.

Yol eğrileri ve düğümlerden oluşan yol ağları, çizge olarak ifade edilmektedir ve çizgeler ağırlıksız ve ağırlıklı olarak tanımlanabilmektedir. Ağırlık iki düğüm arasındaki maliyettir. Örneğin, Şekil 1.1 ve Şekil 1.2’de negatif olmayan, reel sayı değerleri atanmış ağırlıklı yol çizgeleri sunulmuştur. Bu çizgelerdeki ağırlık iki düğüm arasındaki zaman maliyetine karşılık gelmektedir. Şekil 1.1’de çizge üzerinde engel bulunmamaktadır. Şekil 1.1’de yer alan ağırlıklı yol çizgesi için kaynak düğümü v_1 ve hedef düğümü v_9 olan en iyi rota planı sorgusu çalıştırılmıştır. Kaynak düğümü v_1 ’den hareket eden araç, v_2 ve v_4 düğümlerini keşfedecek ve ulaşım maliyeti en düşük olan düğüm üzerinden rota planı hesaplamasına devam edecektir. Bu durumda, en iyi rota planı sırasıyla v_1, v_2, v_3, v_6, v_8 ve v_9 düğümlerinden oluşmaktadır ve zaman maliyeti 50 dakikadır.



Şekil 1.1: Engelin bulunmadığı yönlü çizge.

Ancak Şekil 1.2’de düğüm v_1 ’den düğüm v_2 ’ye giden yol eğrisi üzerinde konumu sabit ve etki süresi zamanla azalan e engeli yer almaktadır. Şekil 1.2’de yer alan ağırlıklı yol çizgesi için kaynak düğümü v_1 ve hedef düğümü v_9 olan engelin zaman maliyetini dikkate alan ve almayan en iyi rota planı sorguları aynı seyahat başlangıç zamanı τ için çalıştırıldığında engelin etki süresine bağlı olarak farklı rota planları ve zaman maliyetleri hesaplanacaktır.



Şekil 1.2: Engelin yer aldığı yönlü çizge.

Şekil 1.2’de $v_1 - v_9$ düğümleri arasındaki en iyi rota planı üzerinde e süreli en-

gelinin 16:30 zamanında olduğu ve engel e 'nin yaşam süresinin 120 dakika olduğu kabul edilmektedir. Engelin maliyetini zamana bağlı olarak dikkate alan ve almayan en iyi rota planı sorgusu 18:10'da seyahatin başlayacağı kabul edilerek çalıştırılmıştır. Seyahat zamanında engel e aktiftir. Engelin maliyetini zamana bağlı olarak dikkate almayan en iyi rota planı sorgusu v_1 ve v_2 düğümlerini en iyi rota planına dahil edemeyecektir. En iyi rota planı sırasıyla v_1 , v_4 , v_7 ve v_9 düğümlerinden oluşmaktadır ve zaman maliyeti 76 dakikadır. Engelin maliyetini zamana bağlı olarak dikkate alan en iyi rota planı sorgusu çalıştırıldığında ise v_1 düğümünden ayrılan araç, engel e 'ye ulaşana kadar 8 dakika geçmektedir. Araç e engeli ile 18:18 karşılaşacaktır, engelin yol eğrisi üzerindeki zaman maliyeti 12 dakikadır. Engelin bulunduğu yol eğrisinin asli zaman maliyetine, engelin yol ağı üzerindeki etkisini yitirme zamanı eklenmiştir. v_1 düğümünden çıkan araç, v_2 düğümüne 18:32'de ulaşmaktadır. Bu durumda en iyi rota planı sırasıyla v_1 , v_2 , v_3 , v_6 , v_8 ve v_9 düğümlerinden oluşmaktadır ve zaman maliyeti 62 dakikadır.

Şekil 1.1 için her iki yaklaşım aynı τ seyahat zamanı, aynı $v_1 - v_9$ ikilisi için çalıştırılmış olmasına rağmen farklı rota planı sunmuştur. Engelin maliyeti zamana bağlı olarak rota hesabına dahil edilmediği için daha iyi olan rota planı hesaplanamamıştır. Bu nedenle, yol eğrileri üzerinde farklı özelliklere sahip engel tipleri için engel zaman maliyetinin dikkate alınması gerekmektedir. Bu çalışma kapsamında Dijkstra algoritması genişletilerek Engelden Kaçınan Rotalama (EKR) ve Engel Farkında Rotalama (EFR) algoritmaları geliştirilmiştir. EKR ile EFR deney sonuçları karşılaştırılmıştır. Seyahat başlangıç zamanına bağlı olarak engel farkında olan algoritmanın, engelden kaçınan algoritmaya göre daha düşük seyahat süresini önerdiği sonucuna ulaşılmıştır. Bu çalışma kapsamında önerilen çözüm en iyi rota planının sunulması açısından özgün değerler taşımaktadır.

İKİNCİ BÖLÜM

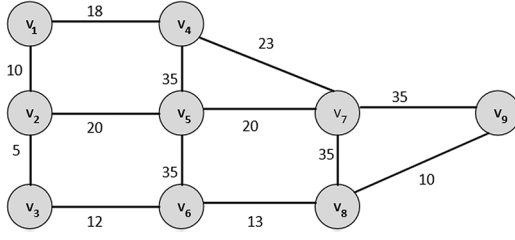
En iyi rota planını zaman, mesafe ve/veya yakıt maliyetlerine bağlı olarak sunan algoritmalar geliştirilmiştir. Bu algoritmaların birbirlerine karşı zaman karmaşıklığı ve yer karmaşıklığı açısından üstün ve zayıf oldukları durumlar mevcuttur. Algoritmaların verimliliği, rota planı hesaplamasına girdi olarak dahil edilen çizgenin yönlü veya yönsüz olmasına ve dinamik ağlarda uygulanma durumlarına bağlı olarak farklılık göstermektedir. Temel kavramlar bölümünde statik ve dinamik ağlarda rotalama algoritmaları sunulmaktadır. Literatür özeti kapsamında ise, literatürde güncel olarak çalışılan rotalama algoritmaları incelenmiştir. Bu çalışmanın literatürdeki ilgili çalışma alanlarına nasıl ışık tutacağına değinilmiştir.

2.1 Temel Kavramlar

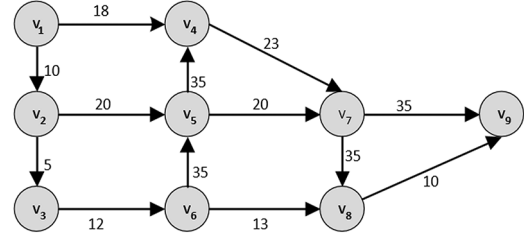
Rotalama probleminde yol ağında bulunan iki düğüm arasındaki en iyi maliyeti bulmak amacıyla çözüm üretilmektedir. Bu alanda Dijkstra algoritması (Dijkstra, 1959) klasik çözüm olarak uygulansa da kıtasal boyuttaki çizgelerde daha verimli sonuçlar elde edilebilmesi amacıyla önışleme ve sorgu safhaları yürütülmektedir. Temel kavramlar alanında statik ve dinamik ağlarda uygulanan rotalama ve önışleme algoritmaları sunulmaktadır.

2.1.1 Statik Ağlarda Rotalama Algoritmaları

Navigasyon sistemlerinde rota planlamasında uygulanan temel algoritmalar ve önışleme teknikleri incelenmiştir. Navigasyon sistemlerinin kaynak olarak kabul ettikleri yol ağı çizge olarak ifade edilmektedir. Çizgeler yönlü ve yönsüz olmak üzere iki şekilde oluşmaktadır. Yönsüz çizgenin gösterimi Şekil 2.1'de, yönlü çizgenin gösterimi ise 2.2'de sunulmuştur. Bir yönlü çizgenin gösteriminde eğrinin yönü ok ile gösterilmektedir (Godsil ve Royle, 2001). Ok yönü yol eğrisinin bitiş düğümünü göstermektedir. Ancak yönsüz bir çizgenin tanımlı yol eğrileri için bir yön ataması yapıl-



Şekil 2.1: Yönsüz çizge gösterimi.

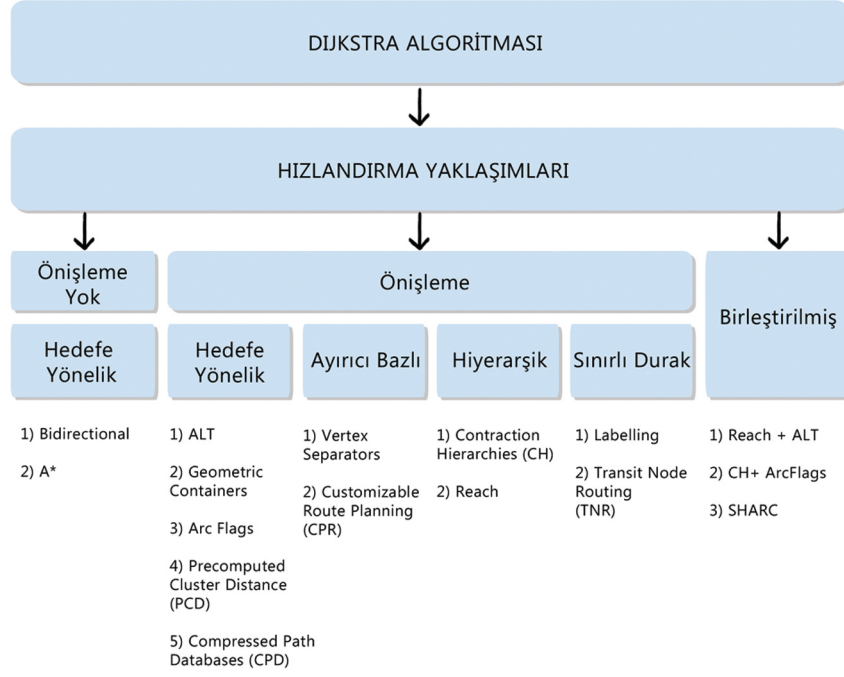


Şekil 2.2: Yönlü çizge gösterimi.

maz. Yol eğrileri üzerinde ağırlık bulunduran çizge w olarak ifade edilen bir ağırlık fonksiyonu taşımaktadır. w ağırlık fonksiyonu, A eğriler kümesi; $w: A \rightarrow \mathbb{R}$ olarak ifade edilir. Yönlü ve yönsüz çizgeler ağırlık fonksiyonu taşıyabilirler.

Yolun zaman maliyetlerine bağlı olarak en iyi rota planı sunulmaktadır. Çizgeler komşuluk dizileri veya komşuluk listesi veri yapıları ile temsil edilebilmektedir. Komşuluk listesi, sıkıştırılmış ve etkili bir çizge gösterimidir. Ancak yol ekleme ve çıkarma işlemleri maliyetlidir. Komşuluk dizisinde ise yol ekleme ve çıkarma işlemlerinin zaman karmaşıklığı sabittir (Mehlhorn ve Sanders, 2008). Algoritmaların verimliliği, üzerinde çalışılan çizgenin yönünden (yönlü çizge veya yönsüz çizge) ve uygulanan veri yapısından etkilenmektedir. Bu çalışma kapsamında yol ağırları, V düğümler kümesi ve A eğriler kümesi olmak üzere $G=(V,A)$ yönlü çizgesiyle ifade edilmiştir. u başlangıç düğümü ve v hedef düğümü olarak ifade edilmiştir. Her bir eğri $\text{arc}(u,v) \in A$ negatif olmayan maliyet $w(u,v)$ ile ilişkilendirilmiştir. Rotalama algoritmaları sınıflandırılarak Şekil 2.3'de sunulmaktadır. İlgili algoritmalar Bölüm 3 kapsamında detaylandırılmıştır.

Dijkstra algoritması en iyi rota planı hesaplanmasında kullanılan en yaygın algoritmadır (Dijkstra, 1959). Dijkstra algoritmasında (s,s) başlangıç düğümü hariç tüm maliyetler sonsuz olarak atanmaktadır, (s,s) 0 değerine eşit olmaktadır. Maliyet, başlangıç düğümünün tüm komşuları için hesaplanmaktadır. Eğer başlangıç düğümünden doğrudan bir eğri bulunmuyorsa, maliyet güncellenmemektedir ve sonsuz olarak kalmaktadır. u , başlangıç düğümünün komşusudur. En az maliyetli değerin $w(s,u)$ olarak bulunması durumunda, u bir sonraki düğüm olarak seçilmektedir ve alt en iyi yol olarak atanmaktadır. u ve komşuları arasındaki eğri maliyeti; $w(s,u)$ değerine eklenmektedir. Eğer önceki maliyette bir iyileşme meydana geliyorsa, mevcut maliyet güncellenmektedir. Bu yaklaşım ile başlangıçta sonsuz olarak atanan değerler, tercih



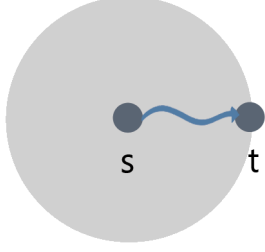
Şekil 2.3: Rotalama algoritmaları.

edilme durumlarına göre hesaplanabilir değerlere eşitlenmektedir. Önceki maliyetin güncellenmesi ile alt en iyi rota planı bulunmaktadır. Algoritma en iyi alt yolları her adımında hesapladığı için; hedefe ulaşıldığında en iyi yol garantilenmektedir. Dijkstra algoritması düğümden düğüme sorgular için t hedef düğümünü taradığında durmaktadır ve en iyi rota planı maliyetini, rota planı ile birlikte sunmaktadır.

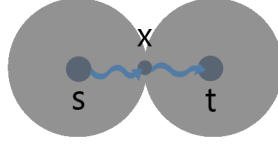
Önişlemenin olmadığı algoritmalarda çift yönlü arama ile arama uzayının daraltılması hedeflenmiştir. Eş zamanlı olarak s başlangıç düğümünden ileri doğru arama ve t hedef düğümünden geriye doğru arama çalıştırılmaktadır. Algoritma arama uzayları bir x düğümünde kesiştiğinde durmaktadır ve s-t düğümleri arasındaki kısa yol bulunmaktadır (Bast v.d., 2015).

A* algoritması 1968 yılında Peter Hart, Nils Nilsson ve Bertram Raphael tarafından tanımlanmıştır ve Dijkstra algoritmasının genişletilmiş bir versiyonudur (Hart v.d., 1968). A* algoritması hedef odaklı bir algoritmadır. Hedef odaklı algoritmalar t hedef düğümü yönünde olmayan düğümleri taramaktan kaçınarak aramayı gerçekleştirmektedir. A* algoritması maliyeti sezgisel olarak tahmin ettiği için, Dijkstra algoritması ile karşılaştırıldığında daha az bir alanı taramaktadır. Sezgisel değerler üçgen eşitsizliğine uymaktadır. Şekil 2.4'da Dijkstra algoritmasının, Şekil 2.5'de Bidirecti-

onal algoritmasının ve Şekil 2.6'da A* algoritmasının arama uzayları gösterilmiştir.



Şekil 2.4: Dijkstra algoritmasının arama uzayının gösterimi.



Şekil 2.5: Bidirectional algoritmanın arama uzayının gösterimi.



Şekil 2.6: A* algoritmasının arama uzayının gösterimi.

Önişlemenin olduğu algoritmalarda, iki aşamalı yaklaşım kullanılmaktadır; ilk olarak önişleme aşaması yardımcı veriyi üretmektedir, sonrasında bu veriler kullanılarak sorgular yürütülmektedir. Önişleme teknikleri, geometrik bilgilere, hiyerarşik alt gruplara ayırma işlemlerine, önemli düğümler arasındaki mesafelere ve eğri etiketlemesine dayanmaktadır. Önişleme uzun zaman alırken, sorgular hızlı bir şekilde yürütülmektedir. Önişlemenin olduğu algoritmalar, uyguladıkları tekniklere bağlı olarak gruplanarak sunulmaktadır.

ALT algoritması A* algoritmasının bir versiyonu olarak değerlendirilmektedir. Buradaki temel fikir uygulanabilir muhtemel fonksiyonu hesaplamak için sınır işaretleri ve üçgen eşitsizliğini kullanmaktır (Goldberg ve Harrelson, 2005). ALT algoritması öncelikle k sınır işaretlerinin $L \subset V$ kümesini seçer ve önişleme süresince V'deki her bir düğüm için bu sınır işaretlerine olan uzaklığı önceden hesaplar. Burada k seçilmek istenen sınır işareti sayısı olarak ifade edilmektedir. Hareket düğümü s ve hedef düğümü t sorgusu için üçgen eşitsizliğini kullanmaktadır. Sorgunun performansı önişleme sırasında hangi düğümün sınır işareti olarak seçildiğine bağlı olmaktadır. ALT algoritması daha iyi sınır işaretinin seçilmesiyle daha az düğüm belirleyebilmektedir ve bu sayede s-t sorgu uzayı daraltılabilmektedir (Fuchs, 2010).

Çizgenin planından geometrik bilgileri ayıklayıp çıkartarak ve geometrik objelerdeki en kısa yol bilgilerini kapsayarak Dijkstra algoritmasının arama uzayı önemli derecede küçültülebilmektedir. Bu işlem bir tür geometrik küçültme olarak değerlendirilmektedir (Wagner v.d., 2005). Kapsayıcılar en kısa yol hesaplamasında potansiyel olarak faydalı olan düğümlerin tutulmasında kullanılmaktadırlar. Geometric Containers algoritmasının önişleme aşaması esasen tüm çiftlerin en kısa yol hesabını ge-

rektirmektedir ve bu işlem maliyetlidir (Bast v.d., 2015).

Arc Flags algoritması, Geometric Containers algoritması ile benzerlik göstermektedir ancak Arc Flags algoritmasında geometri kullanılmamaktadır. Algoritmada önişleme ve sorgu sürelerinin dikkate alınması gerekmektedir. Arc Flags önişleme aşamasında haritayı eşit ağırlıkta alanlara bölmektedir ve her bir alan için her bir eğri yön işareti hesaplaması yapmaktadır. Yön işaretleri arc flags olarak adlandırılmaktadır. Arc flags algoritmasında sorgu süresi kapsamında hedef düğümünü içeren bölge belirlenmektedir. Her bir eğri, her bir alan için 0 veya 1 değerine eşit olan bir arc flag'e sahiptir. Eğer düğümden düğüme en kısa yol var ise arc flag değeri 1 olarak atanmaktadır. Birden çok kısa yolun bulunması durumunda bir tanesinin hesaba katılması yeterli olmaktadır. Arc Flags algoritması en kısa yol hesabına dahil edilecek yolların sayısını azaltmak için kullanılmaktadır. Dijkstra algoritması tüm eşit alt bölgelere uygulanabilmektedir. Bu sayede, tüm bölgeler için en iyi yollar bulunmaktadır. Bu yaklaşım ile Dijkstra algoritması hızlandırılmaktadır. Arc Flag yaklaşımında çizgeyi eşit yoğunluk-taki alanlara bölmek kolay olmayan bir işlemdir (Hilger v.d., 2009).

Precomputing Cluster Distances (PCD) algoritmasında çizge k tane ayrık kümeye ayrılmaktadır. $V = V_1 \cup \dots \cup V_k$ ve başlangıç, hedef düğümlerinin yanı sıra kümelerin her bir çifti arasındaki en kısa bağlantının uzunluk bilgisi tutulmaktadır. PCD algoritmasında k-Center Clustering ve Grid Clustering gibi çeşitli çizge bölme algoritmaları uygulanabilmektedir. Sorgu sırasında ise bu önceden hesaplanmış mesafelere Dijkstra algoritması, ikili arama ile birlikte uygulanmaktadır (Maue v.d., 2009).

Compressed Path Databases (CPD) algoritması tüm çiftlerin en kısa yol bilgilerini tutar ve bu sayede sorgu sırasında en kısa yol hızlı bir şekilde geri elde edilir. Düğümlerin x ve y koordinatlarının ulaşılabilir olduğu kabul edilmektedir. V'de yer alan düğümlerin benzersiz x(y) değerlerinin sıralı kümesindeki bir n düğümünün sütunu(satırı) x(y) koordinatının indeksidir. Önişleme sırasında, haritadaki herhangi iki düğüm arasındaki en iyi yol hesaplanmaktadır. Önişlenmiş verinin en sade haliyle tutulması hafıza gereksinimini oldukça arttırmaktadır. Bu nedenle yol bilgilerinin sıkıştırılması gerekmektedir. CPD algoritması ile sorgu sırasında yol bulmak amacıyla başlangıç düğümünden hedef düğüme kadar en iyi yol boyunca her bir düğümü ziyaret etmek gerekmektedir. Her bir $u \in V$ düğümü çizgenin diğer her v düğümü doğrultusunda en kısa yolun ilk hareketini tutan bir $L(u)$ etiketini devam ettirmektedir. Sorgu

sırasında s temel olarak t için $L(u)$ 'yu taramaktadır, en kısa yolun ilk eğrisi $\text{arc}(s,u)$ 'yu bulmaktadır; devamında ise u , t 'ye ulaşana kadar adımlar yinelenmektedir. (Botea v.d., 2011). Sorgu hızlıdır ancak yer karmaşıklığı oldukça yüksek olabileceği için CPD algoritması yerine başka yaklaşımlar tercih edilebilmektedir (Bast v.d., 2015).

Yol ağları, tüneller veya üst geçitler gibi yapılar nedeniyle düzlemsel olmasına rağmen, alt ayırıcılar olarak gözlemlenebilmektedirler. Vertex Separators çizmeyi çeşitli hücrelere ayırıştıran $S \subset V$ düğümler kümesidir. Bu ayırıcı S üzerinde bir G' yer paylaşımını çizmesini hesaplamak için kullanılabilir. Kısa yol eğrileri yer paylaşımına eklenebilir. Yönsüz, düzlemsel hale getirilmiş yol ağlarında yaklaşık en iyi yolu bulmak için iyi bir algoritma olarak değerlendirilmektedir (Bast v.d., 2015).

Customizable Route Planning (CRP) algoritmasında rastlantısal metrikler ile birlikte yol ağları üzerinde gerçek zamanlı sorguların yürütülmesi hedeflenmektedir. CRP algoritması dönüş maliyetlerini yönetebilir niteliktedir. Algoritma üç safhayı değerlendirmektedir. Metrik bağımsız önışleme (nadiren çalıştığı için görece yavaştır) çizge topolojisini girdi olarak almaktadır ve yardımcı veriler üretilebilir. İkinci safha, metrik özelleştirme, her bir metrik için bir kere çalıştırılmaktadır. Son olarak sorgu safhasında, ilk iki safhadaki çıktılar kullanılmaktadır. Metrik bağımsız safhada, çizge ilişkili hücreler şeklinde her birinde en fazla U (girdi parametresi) düğümü içeren parçalara ayrılmaktadır. Metrik özelleştirme safhasında tüm sınır düğümleri ve G' 'nin sınır eğrilerini içeren H yer paylaşımını çizgesi oluşturulmaktadır. Son safhada ise, Dijkstra algoritmasının çift yönlü adaptasyonu başlangıç düğümü s ve hedef düğümü t sorgusunda çalıştırılmaktadır. CRP algoritmasında parçalara ayırmak performansa direkt etki ettiği için, bu konu üzerinde iyileştirme öngörülmektedir (Delling v.d., 2011).

Arc Flags gibi hedefe yönelik yaklaşımlar hedef doğrultusunda ilerleyerek, Contraction Hierarchies gibi hiyerarşik algoritmalar ise önemli düğümleri ziyaret ederek aramayı gerçekleştirmektedirler. Contraction Hierarchies (CH) algoritması (Geisberger v.d., 2012) çizgelerin küçültülmesi açısından fayda sağlamaktadır. Başlangıç düğümünden hedef düğümüne ulaşmak için hesaplama yapılırken sadece önemli düğümler göz önünde bulundurulmaktadır.

Önışleme sırasında kestirme yolları eklemektedir ve yol ağlarının doğal hiye-

rarşik yapısından faydalanmaktadır. Sonrasında değişikliğe uğramış çift yönlü Dijkstra algoritması kısa yolu bulabilmektedir. Arama uzayı dar olduğu için taşınabilir cihazlarda uygulanması uygundur. Algoritmanın temel fikri; yönlü, ağırlıklı yol ağından önemli olmayan düğümleri çıkartmak ve en kısa yol mesafelerini muhafaza etmektir. Bu kavram, düğüm küçülmesi olarak adlandırılmaktadır. u düğümü silinmektedir ve kestirme yollar geriye kalan düğümler arasındaki en kısa yol mesafelerinin muhafaza edilebilmesi için eklenmektedir. Kestirme yol, u düğümünü atlamaktadır ve tüm yolları temsil etmektedir. Tüm özgün yollar kestirme yollar ile birlikte önişlemenin sonucunu ve bir küçülme hiyerarşisini oluşturmaktadır. Düğümler küçültüldükten sonra geriye kalan çizge mümkün olabileceği kadar seyrek olma durumundadır. CH algoritmasının kişisel bilgisayarlar ve taşınabilir cihazlar için iki ayrı uygulaması geliştirilmiştir. Burada önemli düğüm kestirme yolların sayısıdır. CH algoritmasında düğümler önem sırasına bağlı olarak sıralanmaktadır. Aynı maliyet değerine sahip kısa yolların hepsinin hesaplamaya eklenmesi zorunlu olmamaktadır. Bu tercih tasarıma bağlı olmaktadır. Kısa yollara karar verdikten sonra Dijkstra algoritması uygulanmaktadır.

Reach algoritması ağdaki asli olarak bulunan hiyerarşiye dayanmaktadır. Uzunluk ve mesafe kavramı, ağırlık ve maliyet kavramlarıyla esasen aynı değildir. Yol ağlarında gezinme süresi maliyet metrikleri olarak kullanılmaktadır ve eğrilerin üzerindeki ağırlıklar; seyahat mesafesi değil seyahat zamanı olarak ifade edilmektedir. Ancak, yol ağlarında seyahat mesafesinin *reach* metrik olarak kullanılması ağdaki hiyerarşiyi daha etkili bir şekilde tutmaktadır. Algoritma hesaplanmış yolların en iyi olduğunu garanti etmektedir. A* algoritması gibi diğer optimizasyon algoritmaları ile birlikte uygulanabilmektedir. Bellek gereksinimleri önişlenmiş veri tarafından önemli ölçüde arttırılamaz. Reach olarak adlandırılan özellik Dijkstra algoritmasının yeni bir versiyonu olarak ifade edilmiştir (Gutman, 2004).

Sınırlı durak algoritmalarında, çizgenin gösterimi probleminin en geleneksel yaklaşımı bir veri yapısının (örneğin komşuluk matrisi gibi) kullanılarak komşuluk bilgilerinin kayıt edilmesine dayanmaktadır. Verilen iki düğümün adı tablodaki uygun kayda bakılmasını sağlamaktadır. İsimlerin kendileri kullanılabilir bir bilgi içermektedir, sadece yer tutucu olarak hizmet etmektedirler. Buna karşılık çizgeler için daha bilgilendirici bir düzenin kullanılması, labeling algoritmasının temel ilgi alanını oluşturmaktadır. Kısa etiketler ile çizgenin düğümlerini etiketlemek mümkündür. Bu

şekilde, herhangi iki düğüm arasındaki mesafe, etiket denetlemesinden çıkartılabilmektedir (Peleg, 2000). Mesafe etiketleme düzeni iki düğüm arasındaki mesafeye karar verme yeteneğine sahiptir (Gavoille v.d., 2001). Labeling algoritmasında önışleme aşamasında çizgenin her bir u düğümü için bir etiket $L(u)$ hesaplanmaktadır. Herhangi bir u, v düğüm çifti için uzaklık $w(u, v)$ 'ye, etiket $L(u)$ ve etiket $L(v)$ 'ye bakılarak karar verilebilmektedir. Yol ağları için Labeling algoritmasının örnek pratik uygulaması Hub-Based Labeling algoritmasıdır.

Transit Road Routing (TNR) (Arz v.d., 2013) tam olarak bir algoritma olarak değil, bir çerçeve olarak tanımlanmaktadır. Çerçeve; geçiş düğümleri arasındaki en kısa yol mesafelerinin tablosu, ileri(geri) düğüm erişim haritası ve bölge filtresinden oluşmaktadır. Bölge filtresinde $L(s, t)$, s hareket ve t hedef düğümleri arasındaki en kısa yol bir geçiş düğümü tarafından kaplanmış ise *true* olarak atanmaktadır. TNR önışleme sırasında geçiş düğümlerinin $T \subseteq V$ küçük kümesini seçmektedir ve bunların arasındaki tüm ikili mesafeleri hesaplamaktadır. $s-t$ sorgusu mesafe tablosu üzerinde çalışmaktadır. Geçiş düğümü kümesinin seçimi algoritmanın performansında etkin rol oynamaktadır. Olağan yaklaşım düğüm ayırıcılarının veya eğri ayırıcıların sınır düğümlerinin, geçiş düğümleri olarak seçilmesidir. Daha iyi bir performans için hiyerarşik hızlandırma tekniği tarafından (CH gibi) önemli olarak sınıflandırılan düğümleri geçiş düğümü olarak seçilmektedir. TNR büyük ağlar için uygun değildir.

REAL algoritması Reach ve ALT algoritmalarının birleştirilmiş halidir. Her bir v düğümü için mesafe etiketi $d(v)$, üst düğüm $p(v)$ ve durum $S(v) \in$ erişilmedi, etiketlenmiş, tarandı olarak belirtilmektedir. Reach tarafından ek kısaltma ile ALT sorgusu çalıştırılmaktadır. Kestirme yolların eklenmesi performansı önemli ölçüde iyileştirmektedir (Goldberg v.d., 2009). CH ve Arc Flags algoritmalarının birleştirilmesi sonucunda elde edilen algoritma CHASE algoritması olarak adlandırılmıştır. Önışleme sırasında olağan CH algoritması yürütülmektedir ve tüm kısa yolları içeren arama çizgesi kurulmaktadır. Sonrasında küçültme sıralarına bağlı olarak en üst k düğümü içeren H alt çizgesi seçilerek alınmaktadır ve H sınırlı çizgesi üzerinde çift yönlü Arc Flags hesaplanmaktadır (Bauer v.d., 2008). SHARC algoritması çok seviyeli arc flags ile kısa yolların birlikte kullanılmasıdır. Önışleme algoritmasında çizgenin bölümlere ayrılmasına karar verilmektedir, sonrasında sırayla kısa yollar ve arc flags hesaplanmaktadır (Bauer ve Delling, 2009).

2.1.2 Dinamik Ağlarda Rotalama Algoritmaları

Trafiğin yoğun olması, kapalı olması veya beklenmeyen gecikmelerin oluşmasına sebep olan yapıların ağ üzerinde belirmesi nedeniyle yol ağları dinamik olma eğilimindedir. Hızlandırma tekniklerinin bu durumun üstesinden gelebilmesi için önışleme algoritmalarının yeniden çalıştırılması bir yaklaşım olarak sunulmuştur. Ancak burada sorgular statik senaryodaki kadar hızlı olmasına rağmen önışleme algoritmalarının yeniden çalıştırılması oldukça maliyetli olabilmektedir. Sonuç itibariyle dört temel yaklaşım dikkate alınmaktadır.

I. Temel Yaklaşım:

Önişlenmiş veriyi tekrar yapılandırmak yerine, düzeltmek daha muhtemel bir yaklaşım olarak sunulmaktadır. Bu yaklaşım, Geometric Containers, ALT, Arc Flags ve CH'yi ayrımlı tekniklerde test edilmiştir ve çeşitli başarı seviyelerine ulaşılmıştır. Örneğin CH algoritmasında, kısa yollar arasındaki bağların takip edilmesi devam ederken, küçültme gerekli olduğu durumlarda parçalı olarak yeniden yürütülmektedir. Önemli olan düğümlere daha az etki eden değişikliklerin daha hızlı üstesinden gelinebilmektedir. (Geisberger v.d., 2012) çalışıldığı üzere, bir kişisel bilgisayar üzerinde yeniden doğru CH'nin kurulumu için, sadece etkilenen kestirme yollar güncellenmektedir ve değişiklikten etkilenen düğümler yeniden küçültülmektedir. Taşınabilir cihazlarda ise, tekrar küçültme mümkün olmamaktadır ama aramanın etkilenen düğümlere ulaşabilmesinden emin olarak doğru sorgu oluşturulmaktadır.

II. Temel Yaklaşım:

Diğer yaklaşım sorgu algoritmasının önışleme safhasındaki "hatalı" bölümde çalıştırılacak şekilde adaptasyonunun gerçekleştirilmesidir. Bu yaklaşımda sorguların güncellemesi görece az olduğunda yarar sağlanmaktadır.

III. Temel Yaklaşım:

Üçüncü yaklaşım önışleme safhasını tamamen metrik bağımsız yapmaya dayanmaktadır. Tüm metrik bağımlı işler sorgu safhasına kaydırılmaktadır. Bu yaklaşım, maliyetlerin sorgu zamanında belirlenmesine olanak sağlamaktadır ancak sorgular önemli ölçüde yavaşlamaktadır.

IV. Temel Yaklaşım:

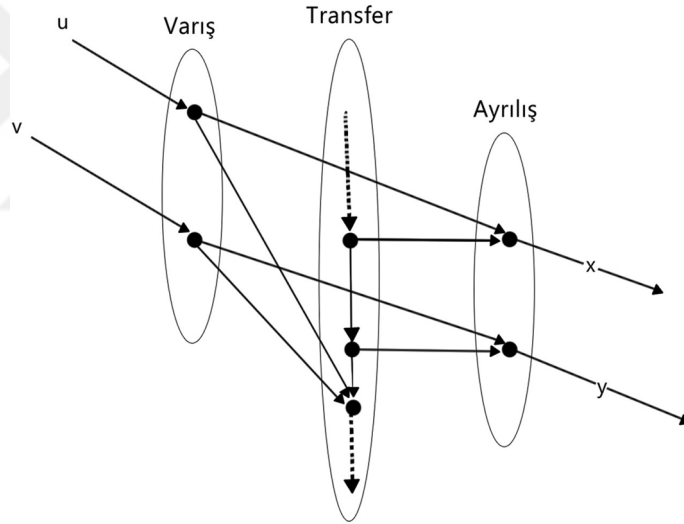
Son yaklaşımda ise daha pratik bir sorgu olarak önışleme safhası metrik bağımlı ve metrik bağımsız olmak üzere iki safhaya ayrılmaktadır. Metrik bağımsız safha

oldukça kararlı olan ağ topolojisini girdi olarak almaktadır. Eğri maliyetleri değiştirildiğinde (bu durumla sıklıkla karşılaşılmaktadır) sadece (daha düşük değere sahip olan) metrik bağımlı safha parçalı veya tamamen tekrar çalıştırılmaktadır. Bu kavram ALT, CH ve CRP gibi birçok teknikte kullanılabilir. CRP büyük ölçekli yol ağları için dönüş maliyetlerini de hesaba katmaktadır ve gerçek zamanlı uygulamalar için uygundur. CRP için parçalara ayırma ve yer paylaşımli topoloji önceden hesaplanmakta ve tutulmaktadır. CRP için sadece küçültme ve çizge aramalarının birleşimi kullanılarak kısa yol uzunlukları yeniden hesaplanmaktadır (Delling v.d., 2015b). Örneğin, dinamik olarak çok seviyeli yer paylaşımli çizgenin desteklenebilmesi için en kısa yol ağcını destekleyen bir veri yapısı önerilmiştir. Eğer esas çizge G üzerinde bir güncelleme olursa, en kısa yol ağcının güncellenmesi gerekmektedir (Bruera v.d., 2008).

Zamana bağlı ağlar bir eğride gezinme maliyetinin zamanla değiştiği durumda kullanılan bir modeldir. Varış zamanı ayrılış zamanının bir fonksiyonu olarak en iyi-uzunluk yolları yerine en iyi-zaman yollarını planlayabilmektedir. Ağda herhangi bir eğride beklemenin yasak olması durumunda ve ilk-giren-ilk-çıkarmodeline uyulmuyorsa, kısa yol sıralanmış olmayabilir, en iyi alt yol özelliği ihlal edilmiş olabilir. Herhangi bir ilk-giren-ilk-çıkarmodelinin etkisinin üstesinden gelenebilmesi için, düğümlerde beklemeye olanak sağlanmaktadır (Foschini v.d., 2014). Zamana bağlı en kısa yol probleminde $G=(V,A)$ yönlü çizgesi ve her bir eğri $arc(i,j) \in A$ için varış zaman fonksiyonu $a_{ij}(t)$ girdi olmaktadır. $a_{ij}(t)$ niceliği i 'den t anında yola çıktığında j 'deki varış zamanını vermektedir. Eğri gezinme zamanı fonksiyonları ve eğri ayrılma zamanı fonksiyonları tanımlanabilmekte ve uygulanabilmektedir. G 'nin ilk-giren-ilk-çıkarmodelinde bir ağ olduğu kabul edilmektedir (Dean, 2004).

Topoloji, ağ ile birlikte gelen fiziksel uzunluklar, şerit sayısı, yol kategorisi, hız limitleri ve dönüş tipleri gibi statik özelliklerin kümesinin çizge yapısı olarak tanımlanmasına karşılık gelmektedir. Metrik ise yol parçalarından geçmenin esas maliyetinin kodlanmasıdır. Metrik bir eğrinin statik özelliklerinin maliyetini karşılayan fonksiyon olarak da tanımlanabilmektedir. Rota planlamasında zaman tablosunun önem taşıdığı iki model, zamanda genişletilmiş model ve zamana dayalı model olarak sunulmuştur. Zamanda genişletilmiş ve zamana bağlı modeller kapsamında, beklenmeyen gecikmelerin yaşanması durumunda uygulanabilecek algoritmalara ve hızlandırma yaklaşımlarına yer verilmektedir.

Zamanda genişletilmiş modelde zaman tablosu belirli düğümlerde oluşan zamana bağlı olayları içermektedir. Bu modeldeki temel fikir zamanı genişleten uzay-zaman çizgesinin oluşturulmasıdır. Model, zaman tablosunun her bir olayı için bir düğüm oluşturmaktadır ve zaman akış yönünde sonraki olayları bağlamak için eğri-leri kullanmaktadır. Zamanda genişletilmiş modelde, terminalden her bir zaman olayı için (ayrılış veya varış) bir düğüm olmaktadır. Zaman tablosundaki her temel bağlantı (Z, S_1, S_2, t_d, t_a) için, çizgede ayrılış düğümü ile bağlantılı bir tren yolu bulunmaktadır. Her bir terminal S için, S'e ait olan tüm düğümler zaman değerlerine göre sıralanmaktadır. Gerçekçi modelde tüm ayrılış düğümlerinin ek kopyası transfer düğümleri adıyla tutulmaktadır ve Şekil 2.7'de sunulmaktadır. Zamanda genişletilmiş model genişletilmek için ek transfer düğümleri her bir ayrılış olayı için uygulanmaktadır ve her bir varış düğümü en az değişim kısıtlamasına uyan ilk transfer düğümüne bağlanmaktadır (Pyrga v.d., 2008).



Şekil 2.7: Zamanda genişletilmiş yaklaşım.

ALT (tek yönlü) algoritmasının (Delling v.d., 2009) ve Geometric Containers algoritmasının (Wagner v.d., 2005) zamanda genişletilmiş model için adaptasyonu gerçekleştirilebilmektedir. Zamanda genişletilmiş model sayısal değerlere bağlı eğri maliyetlerini kullandığı için, modelin etiketleme yaklaşımı ile adaptasyonu uygun olarak değerlendirilmiştir (Delling v.d., 2015a). Zamanda genişletilmiş modelin dezavantajı sonuç çizgesinin oldukça geniş olmasıdır.

Zamana bağlı modelde her bir eğri e için bağlantı geçiş fonksiyonuna sahip

olan $G = (V, A)$ yönlü çizgesi olarak ifade edilmektedir. Her bir düğüm bir durağı temsil etmektedir ve eğer ilgili duraklar temel bir bağ ile ilişkilendirilmiş ise iki düğüm eğri vasıtasıyla birleştirilmektedir. Eğri maliyetlerine anında atama gerçekleştirilmektedir. Bir eğrinin maliyeti, sorguya cevap vermek için en kısa yol algoritması tarafından belirli eğrinin kullanıldığı zamana bağlı olmaktadır (Brodal ve Jacob, 2004). Zamana bağlı modelde yolun maliyeti, bu belirli yolun en kısa yol algoritmasında kullanıldığı zamana bağlı olarak atanmaktadır (Geisberger, 2010). Sıfırdan farklı tren aktarması için zamana bağlı model genişletilmiştir. Zaman tablosunun T trenler kümesinden, S terminaller kümesinden ve ϵ temel bağlantılar kümesinden oluştuğu kabul edilmektedir. Bir temel bağlantı $e \in \epsilon$ ara durak bulunmayan iki komşu tren istasyonu arasındaki bağlantıyı tanımlamaktadır. Böyle bir bağlantı, $(e) \in S'$ den bir ayrılış terminali, $(e) \in S$ 'e bir varış terminali, bir $d(e)$ ayrılış zamanı ve bir $a(e)$ varış zamanı içermektedir. Tren hattı bağlantılarını gruplamak gerekmektedir. Aynı hatta bulunan iki bağlantının ayrılış ve varış zamanları onların trafik günlerinde farklılık gösterebilmektedir. Her bir terminal birkaç hat düğümü ile temsil edilmektedir. Terminal düğümü, sadece hat düğümlerine bağlanmak için kullanılmaktadır. A^* algoritmasının (Disser v.d., 2008) ve Contraction Hierarchies algoritmasının (Geisberger, 2010) zamana bağlı model için adaptasyonu gerçekleştirilmektedir.

2.2 Literatür Özeti

Bu çalışma kapsamında sunulacak olan zamana bağlı engel modeline dayalı en iyi rota planlaması çözümü ile rota planlama problemlerindeki güncel çalışmaların karşılaştırılmasına yer verilmektedir. En iyi rota planının sunulması; navigasyon, havaalanı bagaj taşıma bandı, kablosuz sensör ağı, öklid uzayında robotik araç yönlendirme gibi sistemlerin verimliliğine doğrudan etki etmektedir. Güncel çalışmalar, gerçekçi senaryolar üzerindeki zorlukları değerlendirerek rotalama planlamasında zaman ve yer karmaşıklığını azaltmayı hedefleyen çeşitli öneriler sunmaktadır. Literatür özeti kapsamında rotalama planlaması için önerilmiş güncel çalışmaların değerlendirilmesine ek olarak önerilen sorgu algoritmaları da incelenmektedir.

Rotalama problemlerinin çoğu her bir eğrideki maliyetin her sorguda sabit olduğunu kabul eden zamandan bağımsız planlamaya çözüm aramaktadır. Pratikte ise yol ağlarındaki geçerli trafik durumu gün içerisinde ve belirli saatler aralığında değiş-

mektedir. Bu nedenle geçmişe dayalı olan trafik verisini kullanan veya trafik kazası gibi sıkışma durumlarını tahmin eden çalışmalar rotalama problemlerinin ilgi alanını oluşturmaktadır. Temel kavramlar bölümünde yer verilmiş olan algoritmalar ilgili çalışmalar bölümündeki problem tanımlarına bağlı olarak uygulanmıştır veya ihtiyaç duyulması halinde genişletilmiştir.

Kriz durumlarında havaya zehirli duman salınabilir ve acil durum müdahale ekibinin rotası kapanabilir. Rüzgar hızı ve yönüne bağlı olarak dinamik bir şekilde hareket eden zehirli dumanın yayılması durumunda kurtarma ekipleri için en kısa ve en güvenli yolun hesaplanması gerekmektedir. (Chitumalla v.d., 2008) çalışmasında bu durumun modellenmesi için hava takip yazılımı ile birçok modülün entegrasyonu gerçekleştirilmiştir. Geometrik harita üzerinde dinamik duman bulutunu görüntülemek amacıyla seçenekler incelenmiştir. Modelde tehlike grafiği üç seviyeye ayrılarak ifade edilmektedir. Geometrik harita ile tehlike grafiğini üst üste getirmek için haritalama uygulaması kullanılmıştır. Bu sayede herhangi iki bölge arasındaki navigasyon için güvenli olmayan yollar kapatılmaktadır. Geliştirilmiş yazılım, kullanıcıların atmosfer detaylarını el ile giriş yapmalarına gerek duymadan canlı hava durumu bilgilerini olay sitesinden okumaktadır ve tehlike grafiği oluşturmaktadır. Genişletilmiş harita uygulaması ile grafik haritada gösterilmektedir. Nihayetinde uzamsal sorgu, duman bulutu içerisinde kalan tüm yolların çıkartılmasını, bu yolların trafiğe kapatılmasını sağlamaktadır. Bu durum, duman bulutu modelinin içerisindeki tüm yollar belirlendikten sonra, bu yollara bariyer özelliği etiketi eklemesi ile gerçekleşmektedir. Genişletilmiş Arc-Map Ağ Analisti duman bulutunun mevcudiyetinde bu etiketleri kullanarak ilk müdahale ekiplerine herhangi iki düğüm arasındaki en güvenli ve en kısa yolları bulmalarına izin vermektedir. Simülasyon ile iki düğüm arasındaki rota planı hesaplaması normal durum altında ve duman bulutunun mevcut olduğu durumda test edilmiştir. Sistem çalıştırılarak hava koşullarının duman bulutuna etkisi gözlemlenmiştir ve alternatif en kısa, en güvenli yol sunulmuştur. (Chitumalla v.d., 2008) çalışmasında engellerin yol ağ üzerindeki etkisinin kalkmasını bekleyen durum desteklenmemektedir. Engel farkında yaklaşım yerine engelden kaçınan yaklaşım desteklediği için çalışma kısıtlı kalmıştır. Engel sadece dinamik engelin özelliklerine bağlı kalınarak ifade edilmiştir ve evrensel bir engel modeli sunulmamıştır. Bu duruma ek olarak, rotalama algoritmalarının analizi üzerine bir çalışma mevcut değildir.

Dinamik çevrede otomatik olarak sürülen araçların veya insansız hava araçlarının güvenli bir şekilde bir yerden bir yere geçiş yapma yeteneğine sahip olması gerekmektedir. Bu nedenle, robotların yakın gelecekte dinamik objelerin bulunacağı yere göre çarpışma-bağımsız kısa yolları üretebilmesi gerekmektedir. Dinamik engellerin yörüngesi için öngörülerin sürekli olarak değişkenlik göstermesi nedeniyle robotların aynı zamanda bu yolları oldukça hızlı bir şekilde planlaması gerekmektedir. Dinamik çevrelerde sıkı bir zaman kısıtlaması altında iyi yolların sunulması kritik olmaktadır. (Narayanan v.d., 2012) çalışmasında güvenli aralık yol planlaması geliştirilmiştir ve gerçek zamanlı kısıtlamalar altında çalıştırılmıştır. Cevabın kısa sürede üretilmesi gerekmektedir aksi halde çakışma yaşanabilmektedir. Herhangi bir zaman anındaki planlayıcı A* algoritmasının bir varyasyonudur. Oluşturulan yörünge listesi en eski zamandan, en son zamana doğru sıralanmıştır ve zaman güvenli aralıklarla ifade edilmiştir. Simulasyon desteği ile algoritma rastgele oluşturulan çevrelerde çalıştırılmıştır. (Narayanan v.d., 2012) çalışmasında, statik ve dinamik engeller üzerinde çalışılmıştır ancak buradaki dinamik engellerin tanımları gereği boyutları ve etki alanları değişmemektedir. Gerçekçi bir senaryoda ise dinamik engellerin boyutları da değişebilmektedir. Bu açıdan değerlendirildiğinde (Narayanan v.d., 2012) çalışması, evrensel engel modelini kapsayan bir çözüm önermemiştir ve güvenli olmayan zaman aralıklarında engellerden kaçınmaktadır.

(Wang ve Zlatanova, 2013) çalışmasında, hareketli objeler arasındaki rotalama için A* algoritmasına dayanan bir arama yaklaşımı önerilmiştir. Buradaki yaklaşımda yol ağındaki her bir eğriye geçici aralıklar atanmaktadır. Bu çalışmada temel motivasyon acil durum müdahale uygulamalarındaki kurtarma işlemidir. Kurtarma işleminde hareketli engellerden kaçınacak şekilde bekleme durumu da bir seçenek olarak desteklenmiştir. Klasik A* algoritması hareketli engellerin önceden bilinen bilgilerini kapsayacak şekilde genişletilmiştir. A* algoritmasının uyarlamasında, her bir eğriye yol parçaları ile ilişkilendirilmiş toplam bekleme süresini göstermek için *waitingTime* adında bir değişken atanmaktadır. *waitingTime* varış süresine ve yol segmentinin kapalı olduğu zaman dilimine bağlı olarak hesaplanmaktadır. Sadece zehirli hareketli gaz engeli için bu çalışma yürütülmüştür, evrensel bir engel modeli sunulmamıştır.

Kablosuz ağdaki sensörlerin dinamik olarak organize edilmesi ve sensör verisinin sensörlerden alıcıya gönderilmesi önemli bir araştırma konusu olmaktadır. Kab-

losuz sensör ağlarında kümeleme, ağın yaşam ömrünü uzatmak için önemli bir teknik olarak önerilmektedir. Çoğu sınıflandırma, kablosuz sensör ağlarındaki rotalama probleminin ilgi alanında hiçbir engelin bulunmadığını varsaymaktadır. Bu kabul nedeniyle, engellerin sensör verisinin rotasına etkileri elenmektedir. (Gupta v.d., 2015) çalışmasında kablosuz sensör ağları için kümeleme tekniği önerilmiştir. Bu sayede, kablosuz sensör ağlarındaki ortalama; en iyi rota planında gezdiği düğüm sayısı, paket gecikmesi ve enerji tüketiminin azaltılması amaçlanmaktadır. Kablosuz sensör ağlarında en kısa yol, engeller arasındaki gezdiği düğüm sayısı olarak ifade edilmiştir. Dijkstra en kısa yol algoritması uygulanmaktadır. Simülasyon ile önerilen enerji tasarruflu homojen kümeleme tekniğinin ve rota optimizasyon tekniğinin farklı ağ senaryoları için performansı incelenmiştir. Ortalama gezdiği düğüm sayısının analizi, kablosuz sensör ağlarındaki enerji tüketimi, paket teslim oranı üzerine gerçekleştirilen çalışmalar sunulmuştur. Paket teslim oranı, ortalama gezdiği sayısı arttıkça azalmaktadır. (Gupta v.d., 2015) çalışmasında engel sensörlerin seyrek dağılımı, fiziksel engel ve sensör arızası olarak değerlendirilmektedir ve tanımları gereği statik olarak değerlendirilmektedirler. Ancak, (Gupta v.d., 2015) çalışması coğrafi koşullarda oluşabilecek tüm engel tiplerini kapsayacak şekilde bir çözüm önerisinde bulunmamıştır. Bu nedenle önerilen çözüm kısıtlı kalmıştır.

Potansiyel trafik sıkışıklığından kaçınmak için uzamsal ağlardaki rota planlaması önemli bir problem olmuştur. Burada iki temel zorluk bulunmaktadır. Bunlar, uygulamalı olarak uzamsal ağlardaki trafiğin farkında olan modelin oluşturulması ve farklı sorgu setleri altında etkili bir şekilde sorguların hesaplanmasıdır. (Shang v.d., 2015) çalışmasında, zaman eşik değer sorgusu, olasılıksal eşik değer sorgusu ve trafiğin farkında olan engellenmemiş yol sorgusu önerilmiştir. Sorguların temel motivasyonu kapalı alan uygulamalarına dayanmaktadır. Bagaj taşıma sistemlerinde iki senaryo probleminin ilgi alanını oluşturmuştur. Açık senaryo uygulamasında, VIP çantalarının potansiyel trafik sıkışıklığından kaçınması ve varış sürelerinin garanti edilmesi üzerinde durulmuştur. Başlangıç düğümünden belirli bir azami sürede hedef düğümüne ulaşabilmek için en düşük sıkışıklık ihtimalini sunan yol hangisidir sorusuna cevap aranmıştır. Kapalı senaryo uygulamasında ise, web sitelerinden paylaşılan seyahat bilgileri yardımıyla geçmiş seyahat yörüngeleri analiz edilerek trafik durumunu tanımlayan kapsamlı bir trafik modeli önerilmiştir. Taşıma bandında bulunan büyük

boyuttaki çantalar da sıkışıklığa neden olan engel olabilmektedir. Başlangıç düğümünden hedef düğümüne ulaşabilmek için belirli bir trafik yoğunluğundan düşük olan en hızlı yol hangisidir sorusuna cevap olarak olasılıksal model sunulmaktadır. (Shang v.d., 2015) çalışması, potansiyel trafik sıkışıklığından kaçınmaktadır. Bagaj taşıma bandı işlevselliği nedeniyle yönsüz bir çizge oluşturmaktadır. Sıkışıklığın taşıma bandından kalkmasını beklemek en iyi yol seçeneğini oluşturmaktadır ancak önerilen çözümler bu senaryonun desteklenmesi açısından kısıtlı olmaktadır.

(Baum v.d., 2016) çalışmasında, geçmişe ait trafik bilgisinin ve güncel trafik bilgisinin tahminlerini alan dinamik ve zamana bağlı rotalama problemi üzerine çalışılmıştır. Bu nedenle, kullanıcı tercihlerine dayalı olan ve zamana bağlı metriklerin geniş çaplı değişikliklerini (trafik güncellemelerine ve kullanıcı kısıtlarına karşılık) birleştiren algoritma önerilmiştir. Dijkstra algoritması ülke veya kıta boyutundaki yol ağlarında probleme cevap veren uygulamalar için çok yavaş kalmaktadır. Bu nedenle, hızlandırma teknikleri önerilmiştir. Önişleme iki safhadan oluşmaktadır; metrik bağımsız safha ayırıcıların iç içe olan hiyerarşisini ve yer paylaşımı çizgeyi hesaplamaktayken, metrik bağımlı safha (özelleştirme olarak da adlandırılmaktadır) mesafe-koruma ağırlıklarını hesaplamaktadır. Dinamik ve zamana bağlı rota planlamaları için rota maliyetleri her yol segmenti için artık sabit ve skaler olmamaktadır. Bunun yerine maliyetler, günün hangi saatinde yol eğrisinden geçildiğine bağlı olmaktadır. Maliyetler, zamanın fonksiyonu olarak değişikliğe uğramaktadır. Trafik örüntülerinin geçmiş bilgilerinin önceden hesaplanmasına, mevcut trafik olaylarına veya kısa süreli trafik öngörülerine bağlı olmaktadır. (Baum v.d., 2016) çalışmasında ayırıcı bazlı planlama dinamik zamana bağlı senaryolar için genişletilmiştir. Yüksek seviyeli yer paylaşımı çizgelerde kısa yolları hafıza tutmak oldukça maliyetli olmaktadır ve bu duruma ek olarak sorgu sırasında hesaplama oldukça maliyetli olmaktadır. Fonksiyonel karmaşıklığı azaltmak için her seviyeden sonra yaklaşık yer paylaşımı çizge önerilmektedir. Ancak (Baum v.d., 2016) çalışmasında dinamik bir senaryo üzerinde çalışılmasına rağmen, ortak bir engel modelinden ve bekleme süresinden bahsedilmemektedir.

Kriz yönetiminde müdahale ekibinin/ekiplerinin hedef düğümüne/düğümüne ulaşabilmesi amacıyla önerilen rota planı hayati önem taşımaktadır. Doğal ya da insan kaynaklı felaketler yol ağının geçici olarak kullanılamaz olmasına neden olan farklı türdeki engellere yol açmaktadır. Engeller yangınlar, gaz bulutları veya su baskınları

olarak örneklenmektedir. (Wang ve Zlatanova, 2016) çalışmasında çoklu ajan sistemi için hareketli objelerin mevcut olduğu bir veya daha fazla hedef düğümüne yönlendirilmesi için yaklaşımlar sunulmuştur. Önerilmiş çözüm, tehlike simülasyonundan bilgilerin toplanmasını, uzaysal-zamansal veri işlenmesini, analizini, geometrik veri tabanı ile bağlantıyı ve felaketlerden etkilenen dinamik çevrelerdeki rota üretimini desteklemektedir. Çoklu ajana dayalı navigasyon sisteminin mimarisi kestirim modülünü, geometrik veri tabanı modülünü, takip etme modülünü, yol planlama modülünü ve görüntüleme modülünü içermektedir. Yol planlama modülünde, bire-bir, bire-çok ve çoka-çok rota planlaması için hareketli objelerden kaçınan algoritmalar uygulanmaktadır. Bire-bir rota planlaması için zamanda genişletilmiş A* algoritması sunulmaktadır. Bire-çok rota planlamasında en iyi olana yakın çözüm için sezgisel yaklaşım kullanılmaktadır. Çoka-çok rota planlaması için ardışık tekli ögeler yaklaşımı uygulanmaktadır. Bu çalışmalarda engellerden kaçınan rota planları sunulmaktadır. Navigasyon durumlarının engeller ile kavramsal analizi bir/daha fazla müdahale ekibi, bir/daha fazla hedef düğümüne, statik/dinamik hedef düğümü ve statik/hareketli engel olarak ifade edilmektedir. Sadece hareketli engellerin dahil olduğu dört navigasyon senaryosu üzerine çalışılmıştır. (Wang ve Zlatanova, 2016) çalışmasındaki problemin etki alanı dar olması nedeniyle, rota hesabına dahil edilen düğüm ve eğri sayısı azdır. Engeller sadece hareketli olarak ifade edilmiştir. Uygulamada ise sadece hareketli engeller için dört navigasyon senaryosu değerlendirilmiştir. Ancak yol ağı üzerinde farklı özelliklere sahip olan tüm engelleri kapsayan bir çalışma gerçekleştirilmemiştir. Ayrıca engelin yol ağı üzerindeki etkisinin sonlanmasını bekleyerek en iyi rota planını sunan senaryolar desteklenmemiştir.

Öklid uzayında engellerden kaçınan en kısa rota planının sunulması, uzamsal analiz, konum modellemesi ve yol bulma görevleri için önemlidir. Büyük veri ortamlarında gerçek zamanlı analizleri desteklemek için yetenekler genişletilmiştir. Çok çekirdekli hesaplama yaklaşımıyla en iyi yolun etkili bir şekilde sunulması planlanmıştır. Yaklaşım engellerin tekrarlanarak değerlendirilmesinden ve yolların yapılandırılması için dışbükey gövde kavramından faydalanmıştır. (Hong v.d., 2016) çalışmasında, sunulan yaklaşım uzamsal filtre ve paralel hesaplamayı desteklemiştir. Hesaplanmak zorunda olan engellerin sayısını önemli ölçüde azaltmak için uzamsal filtreleme tekniği uygulanmıştır. Paralel algoritma ise dağıtılmış uzamsal sorguları ve gövde yapıla-

rını dağıtarak performansı büyük ölçüde artırmak amacıyla geliştirilmiştir. (Hong v.d., 2016) çalışmasında engellerin zaman ile bir bağlantısı bulunmamaktadır. Yol bulma rotası engellerden kaçınmıştır.

(Eser v.d., 2016) çalışmasında, seyrek yörüngeler kullanılarak zamanla değişen yol ağlarının üretilmesi üzerine çalışılmıştır. Yol eğrisi ağırlığı araçların gürültülü ve seyrek GPS gezinmeleri kullanılarak zamanla değişen veri setleri ile elde edilmiştir. Üretilen dinamik yol ağları üzerinde zamanla değişen ve statik en kısa yol çözümlerinin performansları hesaplanmıştır. Evrensel bir engel modeli sunulmamıştır.

(Wang v.d., 2017b) çalışması ilk müdahale uygulamasında hareketli engel ile karşılaşma durumu için çözüm üretmiştir. Üretilen çözüm ilk müdahale ekiplerinin zehirli gaz sızıntısı gibi hareketli bir engelin içerisinden geçmesi durumunu karşılamaktadır. İlk durum müdahale ekibi koruyucu ekipmanlarının durumuna bağlı olarak gaz sızıntısı içerisinden geçmektedir. Evrensel engel modeliyle bekleme zamanını hesaplayan bir çözüm sunulmamıştır. (Wang v.d., 2017a) çalışmasında ise trafik bilgisini kullanarak hareketli engelden kaçınan ve bekleme zamanını hesaplayan çözümü önermiştir. Rota planı hesaplaması için A* algoritması genişletilmiştir. Ancak evrensel bir engel modeli sunulmamıştır.

Bu tez çalışmasının çözümü farklı özelliklere sahip engellerin zaman bazlı farkında olarak en iyi rota planının sunulmasına dayanmaktadır. Genel durum itibarıyla literatürde yer alan çalışmalar evrensel engel modeli ve bekleme zamanı açısından sınırlı kalmıştır.

ÜÇÜNCÜ BÖLÜM

3.1 Analiz ve Sistem Modellemesi

3.1.1 Evrensel Engel Modeli

Önerilen evrensel engel modeli kapsamında engellerin ortak ve farklı olan özellikleri açıklanmıştır. Bu modele bağlı olarak, her engel için bir başlangıç ve bitiş zamanından oluşan zaman aralığı tanımlanmıştır. Bu aralık, engel etki süresi olarak ifade edilmiştir. Yol ağında her yolun bir gerçek zaman maliyeti vardır. Bu gerçek zaman maliyeti yol ağının fiziki özelliklerine bağlı olarak oluşmuştur. Engel, yol ağında etkilediği konumun gerçek zaman maliyeti üzerinde ek bir zaman maliyetine neden olmaktadır. Bu ek zaman maliyeti, engel zaman maliyeti olarak tanımlanmıştır. Engeller farklı özellikleri nedeniyle kategorilere ayrılmışlardır. Evrensel engel modelinde, engel yol ağı üzerinde sabit veya değişken pozisyonlu olarak bulunmaktadır. Sabit pozisyonlu engellerin yol ağı üzerindeki konumları zaman bazlı olarak değişmemektedir. Engellerin etki süreleri farklılık gösterdiği için sabit pozisyonlu engeller üç ayrı kategoriye ayrılarak statik, süreli ve periyodik engel olarak tanımlanmıştır. Değişken pozisyonlu engellerin ise zamana bağlı olarak konumları değişmektedir. Engellerin yol ağına bağlı hareket etme durumları ve yol ağında kapladıkları alan farklılık gösterdiği için değişken pozisyonlu engeller iki ayrı kategoriye ayrılarak hareketli ve dinamik engel olarak tanımlanmıştır. Statik, süreli, periyodik, hareketli ve dinamik engeller örneklendirilerek yol ağındaki özellikleri ve her engel tipi için zaman maliyet hesaplaması detaylandırılmıştır.

Köprüler, alt geçitler, hız limitleri, dönüş tipleri gibi özellikler yol ağının fiziki özellikleridir. Yol ağının fiziki özelliklerine bağlı olarak, yolun gerçek zaman maliyeti artabilir. Bu maliyet artışına neden olan engeller statik engel olarak tanımlanmıştır. Örneğin, köprü azami yükseklik sınırına ve araç yüksekliğine bağlı olarak

köprünün konumlandığı yolun gerçek zaman maliyeti üzerinde ek zaman maliyeti oluşabilir. Azami yükseklik sınırı 4.50 metre olan bir köprünün bulunduğu yol üzerinden, yüksekliği 1.41 metre olan araç ilerleyebilecektir. Ancak yüksekliği 4.55 metre olan araç için ilgili yol erişilebilir durumda değildir. Bu nedenle, statik engelin zaman maliyeti sonsuz olarak tanımlanmıştır.

Trafik kazaları ve yol çalışmaları, yolun erişilebilir olma durumunu süreli olarak kısıtlamaktadır. Kazaların ve yol çalışmalarının yol ağındaki konumları sabittir. Konumu değişmeyen, belirli bir etki süresi olan ve engel zaman maliyeti engel bitiş zamanına yaklaştıkça azalan engeller süreli engel olarak tanımlanmıştır. Örneğin, araç; trafik kazasının olduğu yoldan sınırlı geçiş yapabilmektedir veya hiç geçememektedir. Trafik kazası belirli bir süre sonunda yol ağından kaldırılmaktadır. Kazanın belirli bir etki süresi vardır ve bu etki süresi engelin yol ağından kaldırılma zamanına yaklaştıkça azalmaktadır. Kaza yoldan kaldırıldığında ise sıfırlanmaktadır. Süreli engelin zaman maliyeti, seyahat başlangıç zamanına, aracın engele ulaştığı zamana ve engel etki süresine bağlı olarak değişkendir.

Belirli gün ve saatler arasında yolun araç trafiğine kapatılarak, yaya trafiğine açılması paylaşımlı yol olarak tanımlanmaktadır. Paylaşımlı yolların, yol ağındaki konumları sabittir. Süreli engelin, belirli periyotlara bağlı olarak tekrarlanması sonucunda oluşan engeller periyodik engel olarak tanımlanmıştır. Örneğin, açılır kapanır köprüler periyodik engel olarak modellenmiştir. Açılır kapanır köprüler belirli aylar ve saatler arasında açılıp kapanarak araç trafiği ve deniz trafiğini kontrol etmektedir. Köprünün belirli periyotlara bağlı olan bir etki süresi vardır ve bu etki süresi engelin yol ağından kaldırılma zamanına yaklaştıkça her bir periyotta azalmaktadır. Köprü deniz trafiğine kapatılıp araç trafiğine açıldığında, ilgili köprünün bulunduğu yol araç için erişilebilir durumdadır. Periyodik engelin zaman maliyeti, seyahat başlangıç zamanına, aracın engele ulaştığı zamana ve engelin periyodik etki süresine bağlı olarak değişkendir.

Uzun/geniş yük taşıyan araçlar veya tehlikeli madde taşıyan araçlar yolun erişilebilir olma durumunu kısıtlamaktadır. Bu araçlar yol ağında, belirli bir hız ve güzargaha bağlı olarak hareket etmektedirler. Konumu yol ağına bağlı olarak değişen, belirli bir hıza, güzargaha bağlı olarak yol ağında hareket eden ve engel maliyeti engel bitiş zamanına yaklaştıkça azalan engeller hareketli engel olarak tanımlanmıştır. Örneğin, rüzgar türbin kanadı taşıyan araç, yol eğrisi üzerinde kapladığı alan nede-

niyle takip ettiği yolun bir başka araç tarafından eş zamanlı olarak kullanımını kısıtlamaktadır. Bu nedenle, rüzgar türbin kanadını taşıyan araç takip ettiği yolların gerçek zaman maliyetlerini arttırmaktadır. Rüzgar türbin kanadı taşıyan aracın belirli bir etki süresi vardır ve bu etki süresi engelin yoldan kalkma zamanına yaklaştıkça azalmaktadır. Uzun/geniş yük taşıyan bu aracın yoldaki zaman maliyetine bağlı olarak, yolun zaman maliyeti hesaplanmaktadır. Hareketli engelin zaman maliyeti, hareketli engelin zamana bağlı konumuna, seyahat başlangıç zamanına, aracın engele ulaştığı zamana, hızına, güzergaha ve engel etki süresine bağlı olarak farklı ağırlık değerlerine sahiptir.

Tehlikeli gaz sızıntıları, seller ve yangınlar yolun erişilebilir olma durumunu süreli olarak kısıtlamaktadır. Gaz sızıntılarının, sellerin ve yangınların yol ağındaki konumları ve boyutları zamana bağlı olarak farklılık göstermektedir. Konumu ve boyutu zamana bağlı olarak değişen, yol ağından bağımsız olarak hareket eden ve engel zaman maliyeti engel bitiş zamanına yaklaştıkça azalan engeller dinamik engel olarak tanımlanmıştır. Örneğin tehlikeli gaz taşıyan bir aracın tankerinde oluşan gaz sızıntısı yolun gerçek maliyetini arttırmaktadır. Araç tehlikeli gaz sızıntısının olduğu yoldan güvenlik nedeniyle geçememektedir. Gaz sızıntısı; yüksek seviyeye sahip tehlikeli bölge, orta seviyeye sahip tehlikeli bölge ve düşük seviyeye sahip tehlikeli bölge olmak üzere üç aşamalı sınırlayıcı kutular ile ifade edilmiştir. Her aşama için belirli bir engel başlangıç zamanı ve engel bitiş zamanı vardır. Üç aşamanın yol ağını etkiledikleri alanlar değişkenlik göstermektedir. Dinamik engelin zaman maliyeti, dinamik engelin zamana bağlı konumuna, boyutuna, seyahat başlangıç zamanına, aracın engele ulaştığı zamana ve engel etki süresine bağlı olarak farklı ağırlık değerlerine sahiptir.

Evrensel engel modeli kapsamında engel zaman maliyetini hesaplayan zaman fonksiyonu açıklanmıştır.

t_0 : engel oluşma zamanı

t_1 : engel etkisinin bitme zamanı

sb : seyahat başlangıç zamanı

be : etkilenen yol eğrisinin başlangıç düğümü ve engel arasındaki gerçek zaman maliyeti

eb : etkilenen yol eğrisinin bitiş düğümü ve engel arasındaki gerçek zaman maliyeti

tt : araç engele ulaşana kadar geçen süre

f_p : periyodik engel için periyot bilgisi

v : hareketli engel için engel hızı

yu : hareketli engel için yol uzunluğu

g : hareketli engel için güzergah bilgisi

s_d : dinamik engel için sınırlayıcı kutu bilgisi

Her engelin bir engel oluşma t_0 zamanı ve engel etkisini yitirme t_1 zamanı vardır. Eğer; seyahat başlangıç zamanı engel oluşma zamanından büyük ve engel etkisini yitirme zamanından küçük değilse engel yol ağını etkilemeyeceği için engelin zaman maliyeti hesaplanmamıştır. Ancak seyahat başlangıç zamanı engel oluşma zamanı ile engel etkisini yitirme zamanı arasında ise; her bir engel için engel zaman maliyeti hesaplanmıştır. Periyodik engel için f_p engelin yol ağında oluşma sıklığı, hareketli engel için engelin güzergah bilgisi g ve dinamik engel için sk bilgileri hesaplamaya dahil edilmiştir. $f(p, sb)$ yolun zaman maliyetini hesaplayan fonksiyonda, p zaman maliyeti hesaplanan yolun koordinat bilgisi iken sb seyahat başlangıç zamanıdır.

Statik engeller için, yol üzerinde bulunan statik engelin, engel etkisinin bitme zamanı sonsuzdur. Bu nedenle, $f(p, sb) = \infty$ olarak hesaplanmıştır. Süreli engel için, seyahat başlangıç zamanı sb engel başlangıç zamanı t_0 'den büyük ve engel bitiş zamanı t_1 'den küçük ise, engel zaman maliyeti $f(p, sb) = ((t_1 - sb) - tt)$ fonksiyonu ile hesaplanmıştır. Periyodik engel için seyahat başlangıç zamanı sb engelin tekrarlanma sıklığı f_p bilgisine bağlı olarak t_0 'den büyük ve engel bitiş zamanı t_1 'den küçük ise, engel zaman maliyeti $f(p, sb) = ((t_1 - sb) - tt)$ fonksiyonu ile hesaplanmıştır. Hareketli engel için, seyahat başlangıç zamanı sb engel başlangıç zamanı t_0 'den büyük ve engel bitiş zamanı t_1 'den küçük ise ve hareketli engelin g güzergah, v bilgilerine bağlı olarak araç ve hareketli engel ilk defa karşılaşıyorsa, $f(p, sb)$, *etkilenen yol eğrisinin hedef düğümüne, engel ile birlikte ulaşma zamanı* hesaplamasına dayanmaktadır. Burada engel ile birlikte hareket etme zaman maliyeti, hareketli engelin v hız bilgisine bağlıdır. Ancak araç ve hareketli engel ilk defa karşılaşmıyorsa, $f(p, sb) = (t_1 - t_0)$ fonksiyonu ile hesaplanmıştır. Dinamik engel için, seyahat başlangıç zamanı sb engel başlangıç zamanı t_0 'den büyük ve engel bitiş zamanı t_1 'den küçük ise, engel zaman maliyeti s_d sınırlayıcı kutuların bilgisine bağlı olarak $f(p, sb) = ((t_1 - sb) - tt)$ fonksiyonu ile hesaplanmıştır. Engellerin özellikleri ve yol eğrisi üzerindeki etki sürelerine bağlı olarak, engel zaman maliyetleri hesaplanmıştır.

3.1.2 Ağ Modeli

Yol ağı, çizge olarak ifade edilmektedir. Çizgeler ise komşuluk listelerinin veya komşuluk matrisinin bir araya getirilmesiyle temsil edilebilmektedir. Bu çalışmada yol ağı komşuluk listesi olarak ifade edilmiştir. Yol ağı için düğümler arasındaki erişilebilirlik durumu kontrol edilmiştir. Düğümler arası erişilebilirlik benzer ölçekteki diğer bölgelerden daha iyi olduğu için Almanya/Oldenburg bölgesi üzerinde çalışılmıştır. Almanya/Oldenburg bölgesinin yol ağı, V düğümler kümesi ve A yol eğrileri kümesi olmak üzere $G=(V,A)$ yönlü çizgesi ile ifade edilmektedir. Yol eğrilerinin maliyetleri, negatif olmayan reel zaman değerleri üzerinden gösterilmektedir. Yol eğrilerinin zaman maliyetleri, eğrilerdeki ayrılış zamanlarını seyahat süresine eşleştiren yolun zaman maliyetini hesaplayan fonksiyon tarafından kodlanmaktadır. Yol eğrilerine evrensel engel modelinin farkında olan özellikler eklenerek, zamana bağlı ağ modeli kullanılmıştır. Bu özellikler başlangıç düğümü - engel arasındaki zaman maliyeti, engel - hedef düğümü arasındaki zaman maliyeti, statik engel bilgisi, hareketli engel hızı, hareketli engel güzergahı, dinamik engel bilgisi, sınırlayıcı kutu bilgisi, engel oluşma periyodu, yol eğrisi için en yüksek hız limiti, yol eğrisi uzunluğu ve engel hızı olarak listelenmiştir. Bu bilgiler ışığında, evrensel engel modelinde tanımlanmış olan, yolun zaman maliyetini hesaplayan fonksiyonun ihtiyaç duyduğu parametrelere ulaşılmıştır.

3.2 Yol Ağının ve Engellerin Oluşturulması

Bu çalışma kapsamında en iyi rota planının hesaplanabilmesi için yol ağı ve engeller oluşturulmuştur. Evrensel engel modeli kapsamında statik, süreli, periyodik, hareketli ve dinamik olmak üzere 5 farklı kategoride oluşturulan engeller yol ağı ile ilişkilendirilmiştir. Bölüm 3.2.1’de yol ağı verisinin toplanması, dönüştürülmesi, temizlenmesi konularına yer verilmiştir. Bölüm 3.2.2’de, engellerin nasıl oluşturulduğu detaylandırılmıştır. Bölüm 3.2.3’de ise oluşturulan bu engellerin yol ağı ile ilişkilendirilmesi açıklanmıştır.

3.2.1 Yol Ağı Verisinin Toplanması, Dönüştürülmesi ve Temizlenmesi

Bu çalışma kapsamında yol ağının oluşturulması için Almanya/Oldenburg bölgesinin OSM ¹ verisi kullanılmıştır. Ancak bu bilgiler rotalama uygulamalarının ça-

¹<http://www.openstreetmap.org/>

lışması için uygun bir veri kümesi değildir. Bu nedenle OSM verisinin ayrıştırılması gerekmektedir. Bu ayrıştırma işlemi açık kaynaklı *osm4routing* aracı yardımı ile gerçekleştirilmiştir. *osm4routing* girdi olarak OpenStreetMap XML dosya tipini kabul etmektedir. Çıktı olarak rotalama uygulamalarının ihtiyaç duyduğu kaynak düğümü, hedef düğümü, yol tipi, yol yönü gibi özellikleri kapsayan veri kümesini oluşturmaktadır. Bu çalışmada her bir yol eğrisinin zaman maliyetine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu nedenle, yol uzunluğu ve Almanya'nın yol tiplerine bağlı hız limiti ² verilerine bağlı olarak yol eğrilerinin zaman maliyeti hesaplanmıştır.

Oldenburg yol ağının depolanması ve yönetilmesi için Nesne İlişkisel Veri tabanı yönetim sistemi olan PostgreSQL ³ veri tabanından faydalanılmıştır. Uzamsal bilgilerin PostgreSQL veri tabanında tutulabilmesi için PostGIS ⁴ uzamsal veri tabanı genişleticisi kullanılmıştır. Veri tabanına aktarılan yol ağında uzunluk değeri sıfıra eşit olan yollar tespit edilmiştir. Ancak mevcut bir yolun uzunluk değerinin sıfır olması mümkün değildir. Bu nedenle uzunluğu sıfıra eşit olan yollar veri tabanından kaldırılarak, yol ağı verisi temizlenmiştir.

3.2.2 Engellerin Oluşturulması

Statik engellerin oluşması yol ağının özellikleri ile ilişkilidir. Bu nedenle statik engeller oluşturulurken yol ağı tablosundaki köprü bilgileri dikkate alınmıştır. Süreli, periyodik ve hareketli engellerin oluşturulması için zaman maliyetine bağlı olarak en iyi n tane rota planını hesaplayan ve bu rota planlarını maliyete göre sıralı sunan Yen algoritmasından (Yen, 1970) faydalanılmıştır. Yen algoritmasının ürettiği en iyi rota planındaki yolların başlangıç ve bitiş düğümü koordinatlarına bağlı olarak süreli, periyodik ve hareketli engeller üretilmiştir.

Zaman-uzamsal objelerin oluşturulabilmesi için açık kaynaklı veya ticari araçlar sunulmaktadır. Bu çalışma kapsamında dinamik engellerin oluşturulmasında, Thomas Brinkhoff tarafından geliştirilmiş olan ağ tabanlı hareketli obje üreticisinden ⁵ yararlanılmıştır. Thomas Brinkhoff tarafından geliştirilmiş olan ağ tabanlı hareketli obje üreticisi (NBGMO) trafik simülasyonu için sentetik veya gerçekçi veri setleri üretmek-

²<https://ad-wiki.informatik.uni-freiburg.de/teaching/EfficientRoutePlanningSS2012/RoadTypesAndSpeeds>

³<https://www.postgresql.org/>

⁴<http://www.postgis.net/>

⁵<https://iapg.jade-hs.de/personen/brinkhoff/generator/>

tedir (Brinkhoff, 2002). Brinkhoff ağ tabanlı hareketli obje üreticisi, hareketli objelerin tüm hareket periyodunu n kadar zaman damgalarına bölen ayrık zaman modelini kullanmaktadır. Objelerin sayısı zaman bağımlı bir fonksiyondur. Her bir zaman damgasında yeni bir obje üretilmektedir ve bulunan mevcut objeyi hareket ettirmektedir. Objeler, hedef düğümüne ulaştığında veya en yüksek zaman damgasına ulaşıldığında yok olmaktadır. Harici adıyla tanımlanan objeler hava durumunun ve/veya benzer etkilerin sebep olduğu tesirin simülasyonu için üretilmektedir. NBGMO tarafından üretilen, harici olarak tanımlanan objeler konumlarını ve dikdörtgensel alanlarını zamanla değiştirmektedir. NBGMO sırası ile 4 adımda yürütülmektedir. Bu adımlar;

- ağın hazırlanması
- gerekli olan kullanıcı tanımlı parametrelerin/fonksiyonların tanımlanması
- hareketli objelerin ve harici objelerin hesaplanması
- hesaplanan objelerin raporlanması

olarak listelenmiştir. NBGMO, içerisinde yol ve düğüm verilerini tutan node ve edge uzantılı dosyaları girdi olarak kabul etmektedir. Thomas Brinkhoff tarafından geliştirilmiş olan TIGER/Line ve Shapefiles programları ise yol ağını, node ve edge uzantılı ağ dosya tipine dönüştürmektedir. Shapefiles programına, Oldenburg bölgesinin shapefile dosyası girdi olarak verilmiştir ve node, edge ağ dosyaları ile yol ağı elde edilmiştir. NBGMO verinin parametreler ile yönetilebilmesi ve üretilen objelerin gözlemlenebilmesi için grafiksel arabirim sunmaktadır. Basit kullanıcı etkileşimi ve ön tanımlı parametre dosyaları tarafından karşılanamayan işlevsellikler için ihtiyaca bağlı olarak açık kaynak kodlu sınıfların adaptasyonunun sağlanması mümkündür. NBGMO çıktısı olarak hareketli objelerin bilgilerini raporlamaktadır. Raporlanan objeler bir metin dosyasına veya veri tabanına yazılabilmektedir. Ancak, dinamik engellerin oluşturulmasında kullanılan harici objeler için bir obje çıktı dosyası üretilmemektedir. Bu nedenle, harici objelerin konumlarının raporlanabilmesi amacıyla açık kaynak kodu içerisinde yer alan *generator2.Reporter.java*, *generator2.PositionReporter.java* sınıfları kapsamında gerek duyulan iyileştirmeler uygulanmıştır. Bu sayede, objenin ID'si, hareket eden objenin sınıfı, zaman damgasının indeksi, (x_1, y_1) ve (x_2, y_2) koordinat bilgileri çıktı dosyasında yer almaktadır. Engel verisinin depolanması ve yönetilmesi

için PostgreSQL veri tabanından faydalanılmıştır. Engel verisi, yol ağı verisi ile aynı veri tabanında tutulmaktadır.

3.2.3 Engellerin Yol Ağı ile İlişkilendirilmesi

En iyi rota sıralı yol dizisinden oluşmaktadır. Bu yol dizisindeki düğüm sayısına bağlı olarak farklı yoğunluktaki sorgu havuzları tanımlanmıştır. Düşük, orta ve yüksek olmak üzere üç farklı yoğunlukta düğüm sayısı içeren sorgu havuzları oluşturulmuştur. Yol ağının fiziki özelliklerine bağlı olarak oluşan statik engellerin, n tane en iyi rota planını sıralı olarak hesaplayan, Yen algoritmasının ürettiği rota planlarına bağlı olarak oluşturulan süreli, periyodik ve hareketli engellerin ve NBGMO tarafından oluşturulan dinamik engellerin, sorgu havuzları ile ilişkilendirilmesi gerekmektedir. Bu nedenle, C++ programlama dili ile harita eşleme modülü geliştirilmiştir. Bu modül içerisinde, PostgreSQL veri tabanı üzerine kurulmuş olan uzamsal veri tabanı geliştiricisi postgis'in sunmuş olduğu *ST_Intersects* ve *ST_MakeEnvelope* metotlarından faydalanılmıştır. *ST_Intersects* metodu coğrafi olarak kesişim olma durumunu kontrol ederken, *ST_MakeEnvelope* metodu sınırlayıcı kutu oluşturmuştur. Harita eşleme modülü engelin koordinat bilgisini, engelin olduğu zamanı, engelin yol eğrisindeki etkisinin tü-kendiği zamanı, hareketli engel bilgisini, dinamik engel bilgisini, güzergah bilgisini, engelin oluşma periyodunu ve engelin hızını girdi olarak kabul etmektedir. Eğer engel düğüm ise (x_1, y_1) koordinat bilgisi, eğer engel sınırlayıcı kutu ise $((x_1, y_1), (x_2, y_2))$ koordinat bilgisi kabul edilmektedir. Engel etki zamanına bağlı olarak yol ağını etkilemiyorsa yani durumu pasif ise, ilgili engel yol ağı ile ilişkilendirilmez. Engellerin yol ağı üzerindeki etkileri, ayrık/kesikli olaya dayanarak oluşturulmuştur.

DÖRDÜNCÜ BÖLÜM

4.1 Engel Bazlı Rotalama Algoritmaları

4.1.1 Engelden Kaçınan Rotalama (EKR) Algoritması

Dijkstra algoritmasının genişletilmiş bir versiyonu olan Engelden Kaçınan Rotalama (EKR) algoritması, en iyi rota planı hesabına engelin zamana bağlı maliyetini dahil etmemektedir. Şekil 4.1’de EKR algoritmasının yapısı sunulmaktadır. EKR algoritması girdi olarak, engellerin bilgisini, yol ağını, başlangıç düğümünü, hedef düğümünü ve seyahat başlangıç zamanını almaktadır. Çıktı olarak ise toplam seyahat zamanını ve rota planını üretmektedir. Şekil 4.1’de 15. - 17. satırlar arasında gösterildiği üzere engel maliyeti sonsuz değeri ile rota planı hesaplamasına dahil edilerek Dijkstra algoritması genişletilmiştir. 16. satırda gösterildiği üzere tüm engeller için zaman maliyeti sonsuz değerini almaktadır. 11. satırda, $rotaPlanı(önceki[], b, h)$ fonksiyonu kullanılmıştır. Şekil 4.2’de $rotaPlanı(önceki[], b, h)$ fonksiyonun yapısı sunulmaktadır. Bu fonksiyon başlangıç düğümü b , hedef düğümü h arasındaki en iyi rota planı sıralı dizisinin ters yineleme yöntemi ile sunulmasını sağlamaktadır. Bu algoritmada engellerin zaman maliyeti sonsuz değerine eşit olduğu için, engelin bulunduğu yolun toplam maliyeti sonsuz değerini almaktadır. Bu nedenle engelin bulunduğu yol en iyi rota planına dahil edilmemektedir. EKR algoritması Dijkstra algoritmasının genişletilmiş bir versiyonu olduğu için, çalışma zamanı hesaplamasında Dijkstra algoritmasının çalışma zamanı baz alınmıştır. V çizgedeki toplam düğüm sayısı, A çizgedeki toplam yol sayısıdır. Dijkstra algoritmasının çalışma zamanı, en düşük öncelik kuyruğu’nun ikili yığın ile uygulanması durumunda $O(A \lg V)$ olarak hesaplanmaktadır. EKR algoritmasının çalışma zamanı da Dijkstra ile aynı çalışma zamanı $O(A \lg V)$ ’ye karşılık gelmektedir.

Algoritma 1: E engeller kümesi ve $e \in E$ 'dir. $G=(V,A)$ yönlü çizgedir. Başlangıç düğümü b 'den, hedef düğümü h 'ye, t_{sb} sorgu zamanında engelden kaçınan rota planının hesaplanması

```
1: düğüm kümesi Q oluştur
2: G'deki her düğüm v için:
3:   maliyet[v] ← ∞
4:   önceki[v] ← tanımsız
5:   v'yi Q'ya ekle
6: maliyet[başlangıç] ← 0
7: while Q ≠ ∅ do
8:   u ← Q'daki en düşük maliyet[u] düğümü
9:   u'yu Q'dan kaldır
10:  eğer u = h ise:
11:    rotaPlanı(önceki[], b, h)
12:    sonlandır
13:  u'nun her komşusu v için:
14:    toplamMaliyet ← maliyet[u] + yolMaliyet(u,v)
15:    ∀ e ∈ A(u,v).E :
16:      engelMaliyeti(u,v) ← ∞
17:      toplamMaliyet ← maliyet[u] + yolMaliyet(u,v) + engelMaliyeti(u,v)
18:      eğer toplamMaliyet < maliyet[v] ise:
19:        maliyet[v] ← toplamMaliyet
20:        önceki[v] ← u
```

Şekil 4.1: Engelden Kaçınan Rotalama (EKR) algoritmanın yapısı.

rotaPlanı(önceki[], b, h)

```
1: S ← boş yığın
2: u ← h
3: eğer önceki[u] tanımlı veya u = b ise:
4: while u tanımlı do
5:   u'yu S'ye ekle
6:   u ← önceki[u]
```

Şekil 4.2: Başlangıç düğümü b 'den, hedef düğümü d 'ye en kısa rota planını üreten fonksiyon.

4.1.2 Engel Farkında Rotalama (EFR) Algoritması

Dijkstra algoritmasının genişletilmiş bir versiyonu olan Engel Farkında Rotalama (EFR) algoritması, en iyi rota planı hesabına engelin zamana bağlı maliyetini dahil etmektedir. Şekil 4.3’de EFR algoritmasının yapısı sunulmaktadır. EFR algoritması girdi olarak, engellerin bilgisini, yol ağını, başlangıç düğümünü, hedef düğümünü ve seyahat başlangıç zamanını almaktadır. Çıktı olarak ise toplam seyahat zamanını ve rota planını üretmektedir. Şekil 4.3’de 15. - 33. satırları arasında gösterildiği üzere zaman bazlı engel maliyeti rota planı hesaplamasına dahil edilerek Dijkstra algoritması genişletilmiştir. 16. - 17. satırlar arasında ifade edildiği üzere engel tipinin statik olması durumunda engel zaman maliyeti sonsuz değerini almaktadır. 18.- 30. satırlar arasında gösterildiği üzere yol üzerinde süreli, periyodik, hareketli ve dinamik engelin bulunması durumunda engelin etkin olduğu zaman aralığı kontrol edilerek engelin zamana bağlı maliyeti hesaplanmaktadır. Şekil 4.3’de 11. satırda, en iyi rota planının sıralı yol dizisini sunmak için *rotaPlanı(önceki[], b, h)* fonksiyonu kullanılmıştır. EFR algoritması engel maliyetini zamana bağlı olarak evrensel bir engel modeli ile hesapladığı için engelin bulunduğu yolu en iyi rota planı hesaplamasına dahil etmektedir. Engelin zamana bağlı maliyetine göre sabit veya değişken pozisyonlu engel etkisinin geçmesi beklenebilmektedir. EFR algoritmasında engel etkisinin geçmesi için bekleme konumu, engelin etkin olduğu yol eğrisinin başlangıç düğümüdür. Engel yolu değil düğümü etkiliyorsa, ilgili düğüme bağlı tüm yollar da engelden etkilenmektedir. Düğümün etkilendiği bu durumda, engel etkisinin geçmesi için bekleme konumu, engelin etkilemediği bir önceki düğümdür. EFR algoritması Dijkstra algoritmasının genişletilmiş bir versiyonu olduğu için, çalışma zamanı hesaplamasında Dijkstra algoritmasının çalışma zamanı baz alınmıştır. EFR algoritmasının çalışma zamanı $O(A \lg V)$ ’dir.

Algoritma 2: E engeller kümesi ve $e \in E$ 'dir. $G=(V,A)$ yönlü çizgedir. Başlangıç düğümü b 'den, hedef düğümü h 'ye, t_{sb} sorgu zamanında, zamana bağlı engel maliyeti ile rota planının hesaplanması

```

1: düğüm kümesi Q oluştur
2: G'deki her düğüm v için:
3:   maliyet[v] ← ∞
4:   önceki[v] ← tanımsız
5:   v'yi Q'ya ekle
6: maliyet[başlangıç] ← 0
7: while Q ≠ ∅ do
8:   u ← Q'daki en düşük maliyet[u] düğümü
9:   u'yu Q'dan kaldır
10:  eğer u = h ise:
11:    rotaPlanı(önceki[], b, h)
12:    sonlandır
13:  u'nun her komşusu v için:
14:    toplamMaliyet ← maliyet[u] + yolMaliyet(u,v)
15:    ∀ e ∈ A(u,v).E:
16:      eğer  $e_i.tip = \text{statik}$  ise:
17:        engelMaliyeti(u,v) ← ∞
18:      eğer  $e_i.tip = \text{sürekli}, e_i.tip = \text{periyodik}, e_i.tip = \text{hareketli}, e_i.tip = \text{dinamik}$  ise:
19:        eğer  $e_i.t_0 < t_t < e_i.t_1$  ise:
20:          eğer  $e_i.tip = \text{hareketli}$  ise:
21:            eğer hareketli engel ile ilk defa karşılaşılmıyorsa:
22:              yolMaliyet(u,v) ← 0
23:              engelMaliyeti(u,v) ←  $(e_i.t_1 - e_i.t_0)$ 
24:            aksi durumda ise:
25:               $t_k \leftarrow u$ 'dan  $e$ 'ye ulaşma zamanı
26:               $t_b \leftarrow e$  ile birlikte  $v$ 'ye ulaşma zamanı
27:              engelMaliyeti(u,v) ←  $t_b$ 
28:              yolMaliyeti(u,v) ←  $t_k$ 
29:            aksi durumda:
30:              engelMaliyeti(u,v) ←  $((e_i.t_1 - t_{sb}) - t_t)$ 
31:            eğer engelMaliyeti(u,v) < 0 ise:
32:              engelMaliyeti(u,v) ← 0
33:            toplamMaliyet ← maliyet[u] + yolMaliyet(u,v) + engelMaliyeti(u,v)
34:            eğer toplamMaliyet < maliyet[v] ise:
35:              maliyet[v] ← toplamMaliyet
36:              önceki[v] ← u

```

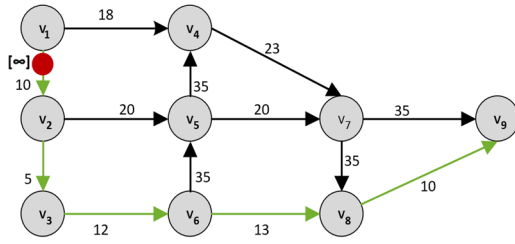
Şekil 4.3: Engel Farkında Rotalama (EFR) algoritmasının yapısı.

4.2 Engellerin Rota ile İlişkilendirilmesi

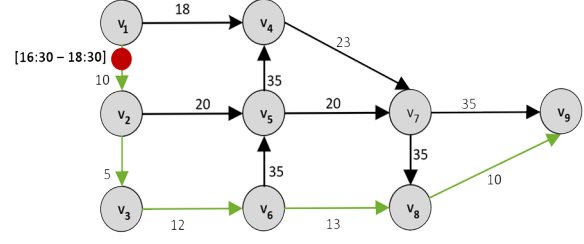
Durum testleri statik, süreli, periyodik, hareketli ve dinamik engeller için 5 farklı durum altında incelenmiştir. Araç statik, süreli, periyodik ve hareketli engellerin karakteristik özellikleri nedeniyle tanımlanmış 4 engel tipinin içerisinde geçemez. Aracın, hareketli engelin içerisinde geçmesi güvenli olmayacağı gerekçesiyle tercih edilmemiştir. Bunun nedeni aracın acil durum müdahale uygulamalarında olduğu gibi güvenli bir geçişe yardım eden ekipmanın bulunmamasıdır. Engelin yol eğrisi üzerindeki zaman etkisinin bitme süresi hesaplanmıştır ve rota planı hesabına dahil edilmiştir. En iyi rota planı en düşük seyahat süresine sahip olan rota planıdır.

Statik engel yol ağına bağlı olarak oluşmaktadır ve statik engelin yol ağındaki etkisinin bitme zamanı sonsuz değerine eşittir. Şekil 4.4'deki yönlü çizgede gösterildiği üzere v_1 ve v_2 düğümleri arasında statik engel bulunmaktadır. Statik engelin etkisinin bitme zamanı sonsuz olarak atanmıştır. v_1 başlangıç düğümünden v_9 hedef düğümüne en iyi rota planını hesaplamak için EKR ve EFR algoritmaları çalıştırılmıştır. Engel ile 16:30 zamanında karşılaşıldığında, v_1 düğümünden v_2 düğümüne ulaşamayacağı için, her iki algoritma da v_1, v_4, v_7, v_9 en iyi rota planını 76 dakika zaman maliyeti ile hesaplamıştır. En iyi rota planı engelin yol üzerinde bulunmadığı rota planıdır.

Süreli engel yol ağına bağlı olarak oluşmaktadır. Süreli engelin maliyeti zaman bazlı azalmaktadır. Şekil 4.5'deki yönlü çizgede gösterildiği üzere v_1-v_2 düğümleri arasında süreli engel bulunmaktadır ve 16:30-18:30 zaman aralığında yolu etkilemektedir. v_1 başlangıç düğümünden v_9 hedef düğümüne en iyi rota planını hesaplamak amacıyla seyahat başlangıç zamanı 18:10 olacak şekilde EKR ve EFR algoritmaları çalıştırılmıştır. EKR algoritması çalıştırıldığında engel v_1-v_2 düğümleri arasında etkindir ve algoritma engelin zamana bağlı maliyetini rota planı hesaplamasına dahil etmemiştir. Bu nedenle EKR algoritması v_1, v_4, v_7, v_9 rota planını 76 dakika zaman maliyeti ile hesaplamıştır. EFR algoritması ise engelin yol eğrisi üzerindeki etkisini zamana bağlı olarak hesaplamıştır. EFR algoritması çalıştırıldığında, engelin zamana bağlı maliyeti 10 dakika olarak hesaplanmıştır. Bu nedenle EFR algoritması $v_1, v_2, v_3, v_6, v_6, v_9$ en iyi rota planını 60 dakika zaman maliyeti ile hesaplamıştır. Engelin bulunduğu rota planı alternatif rota planlarına göre daha iyi bir zaman maliyetine sahiptir. En iyi rota planı engelin yol üzerinde bulunduğu ve engelin yoldan kalkmasının beklendiği rota planıdır.

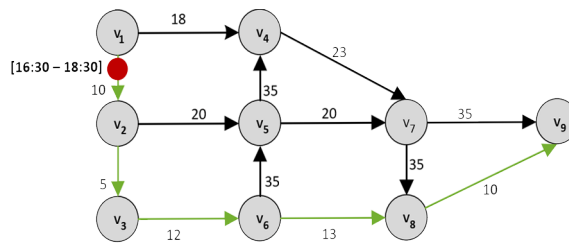


Şekil 4.4: Statik engel durumu.

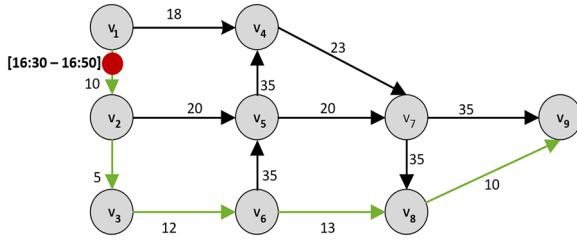


Şekil 4.5: Süreli engel durumu.

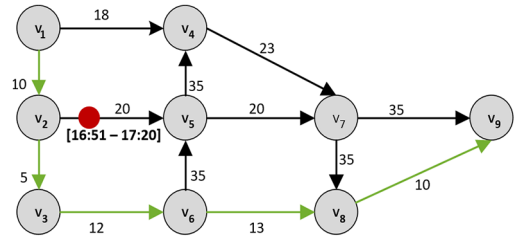
Periyodik engel yol ağına bağlıdır ve maliyeti belirli zaman periyotlarına göre azalmaktadır. Şekil 4.6'daki yönlü çizgede gösterildiği üzere v_1-v_2 düğümleri arasında periyodik engel bulunmaktadır ve cumartesi, pazar günleri 16:30-18:30 zaman aralığında yolu etkilemektedir. v_1 başlangıç düğümünden v_9 hedef düğümüne en iyi rota planını hesaplamak amacıyla seyahat başlangıç zamanı cumartesi 18:10 olacak şekilde EKR ve EFR algoritmaları çalıştırılmıştır. EKR algoritması çalıştırıldığında engel v_1-v_2 düğümleri arasında etkindir ve algoritma engelin zamana bağlı maliyetini rota planı hesaplamasına dahil etmemiştir. Bu nedenle EKR algoritması v_1, v_4, v_7, v_9 rota planını 76 dakika zaman maliyeti ile hesaplamıştır. EFR algoritması ise engelin yol eğrisi üzerindeki etkisini zamana bağlı olarak hesaplamıştır. EFR algoritması çalıştırıldığında, engelin zamana bağlı maliyeti 10 dakika olarak hesaplanmıştır. Bu nedenle EFR algoritması $v_1, v_2, v_3, v_6, v_8, v_9$ en iyi rota planını 60 dakika zaman maliyeti ile hesaplamıştır. Süreli ve periyodik engelin yol ağını etkileme durumları benzerdir. Periyodik engelin, süreli engelden farkı ise periyodik engelin belirli zaman aralıkları ile kendisini tekrarlamasıdır. Bu nedenle, EFR algoritması kapsamında periyodik engelin oluşma sıklığı dikkate alınarak en iyi rota planı hesabı yapılmıştır. Engelin bulunduğu rota planı alternatif rota planlarına göre daha iyi bir zaman maliyetine sahiptir. En iyi rota planı engelin yol üzerinde bulunduğu ve engelin yoldan kalkmasının beklendiği rota planıdır.



Şekil 4.6: Periyodik engel durumu.



Şekil 4.7: Hareketli engel durumu, konum 1.

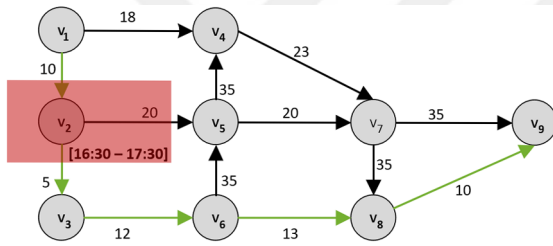


Şekil 4.8: Hareketli engel durumu, konum 2.

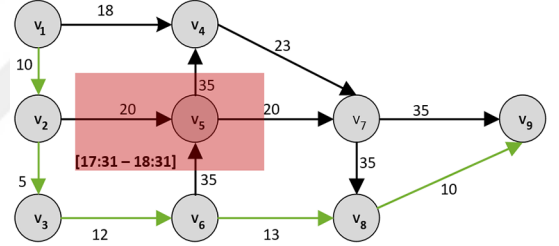
Hareketli engel yol ağına bağlı olarak belirli bir güzergahı takip etmektedir. Hareketli engelin maliyeti zaman bazlı azalmaktadır. Şekil 4.7'deki yönlü çizgede gösterildiği üzere v_1-v_2 düğümleri arasında hareketli engel bulunmaktadır ve 16:30-16:50 zaman aralığında yolu etkilemektedir. Şekil 4.7'de hareketli engelin yoldaki ilk konumu gösterilmektedir. Şekil 4.8'deki yönlü çizgede gösterildiği üzere v_2-v_5 düğümleri arasında hareketli engel bulunmaktadır ve 16:51-17:20 zaman aralığında yolu etkilemektedir. Şekil 4.8'de hareketli engelin yoldaki ikinci konumu gösterilmiştir. v_1 başlangıç düğümünden v_9 hedef düğümüne en iyi rota planını hesaplamak amacıyla seyahat başlangıç zamanı 16:20 olacak şekilde EKR ve EFR algoritmaları çalıştırılmıştır. EKR algoritması çalıştırıldığında engel v_1-v_2 düğümleri arasında etkindir ve algoritma engelin zamana bağlı maliyetini rota planı hesaplamasına dahil etmemiştir. Bu nedenle EKR algoritması v_1, v_4, v_7, v_9 rota planını 76 dakika zaman maliyeti ile hesaplamıştır. EFR algoritması ise engelin yol eğrisi üzerindeki etkisini zamana bağlı olarak hesaplamıştır. EFR algoritması çalıştırıldığında, engelin zamana bağlı maliyeti 16 dakika olarak hesaplanmıştır. Bu nedenle EFR algoritması $v_1, v_2, v_3, v_6, v_8, v_9$ en iyi rota planını 56 dakika zaman maliyeti ile hesaplamıştır. Şekil 4.8'de bulunan engel en iyi rota planı hesabına etki etmemektedir. Engelin bulunduğu rota planı alternatif rota planlarına göre daha iyi bir zaman maliyetine sahiptir. En iyi rota planı engelin yol üzerinde bulunduğu ve engelin hızına bağlı olarak engel ile hareket edildiği rota planıdır.

Dinamik engelin boyutu yol ağından bağımsız olarak değişir ve engelin maliyeti zamana bağlı olarak azalır. Şekil 4.9'daki yönlü çizgede gösterildiği üzere $v_1-v_2, v_2-v_3, v_2-v_5$ düğümleri arasında dinamik engel bulunmaktadır ve 16:30-17:30 zaman aralığında yolları etkilemektedir. Şekil 4.10'daki yönlü çizgede gösterildiği üzere $v_2-v_5, v_6-v_5, v_5-v_4$ düğümleri arasında dinamik engel bulunmaktadır ve 17:31-18:31 za-

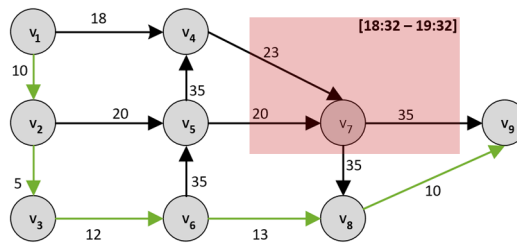
man aralığında yolları etkilemektedir. Şekil 4.11'deki yönlü çizgede gösterildiği üzere v_5-v_7 , v_4-v_7 , v_7-v_8 , düğümleri arasında dinamik engel bulunmaktadır ve 18:32-19:32 zaman aralığında yolları etkilemektedir. v_1 başlangıç düğümünden v_9 hedef düğümüne en iyi rota planını hesaplamak amacıyla seyahat başlangıç zamanı 17:10 olacak şekilde EKR ve EFR algoritmaları çalıştırılmıştır. EKR algoritması çalıştırıldığında engel v_1-v_2 , v_2-v_3 , v_2-v_5 düğümleri arasında düğümleri arasında etkindir ve algoritma engelin zamana bağlı maliyetini rota planı hesaplamasına dahil etmemiştir. Bu nedenle EKR algoritması v_1, v_4, v_7, v_9 rota planını 76 dakika zaman maliyeti ile hesaplamıştır. EFR algoritması ise engelin yol eğrisi üzerindeki etkisini zamana bağlı olarak hesaplamıştır. EFR algoritması çalıştırıldığında, engelin zamana bağlı maliyeti 10 dakika olarak hesaplanmıştır. Bu nedenle EFR algoritması $v_1, v_2, v_3, v_6, v_8, v_9$ en iyi rota planını 60 dakika zaman maliyeti ile hesaplamıştır. Şekil 4.10'da ve Şekil 4.11'de ifade edilen engeller en iyi rota planı hesabına etki etmemektedir.



Şekil 4.9: Dinamik engel durumu, konum 1.



Şekil 4.10: Dinamik engel durumu, konum 2.



Şekil 4.11: Dinamik engel durumu, konum 3.

Engelin bulunduğu rota planı alternatif rota planlarına göre daha iyi bir zaman maliyetine sahiptir. En iyi rota planı engelin yol üzerinde bulunduğu ve engelin yoldan kalkmasının beklendiği rota planıdır. Bu nedenle, engellerin zaman maliyetinin rota planı hesabına dahil edilmesi önemlidir.

BEŞİNCİ BÖLÜM

5.1 Deneyler ve Tartışma

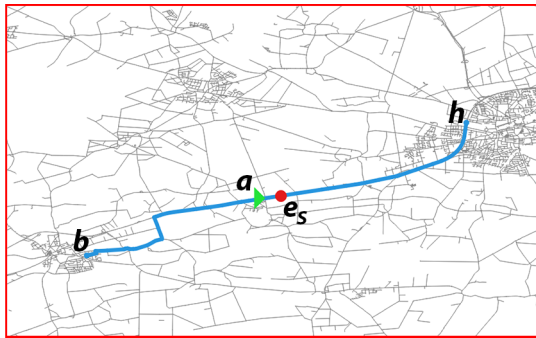
Bu bölümde Engelden Kaçınan Rotalama (EKR) ve Engel Farkında Rotalama (EFR) algoritmalarının çalıştırılması ile elde edilen deney sonuçları sunulmuştur. EKR, EFR algoritmaları ve harita eşleme modülü C++ programlama dili ile uygulanmıştır ve tüm deney sonuçları Ubuntu 16.04 LTS’de 16GB RAM kullanılarak 2.80GHz x 8 CPU bilgisayar üzerinde elde edilmiştir. Yol ağı olarak Almanya’nın Oldenburg bölgesi üzerinde çalışılmıştır. Oldenburg 152270 düğüm ve 371850 yol eğrisinden oluşmaktadır.

Bu çalışma kapsamında düşük(D), orta(O), yüksek(Y) olmak üzere üç farklı yoğunlukta sorgu havuzu oluşturulmuştur. Sorgu havuzunun yoğunluğu ise, başlangıç ve hedef düğümleri ikilisi için en iyi rotanın sıralı yol dizisindeki toplam düğüm sayısına bağlıdır. Bu düğüm sayılarına ise, Oldenburg bölgesindeki toplam düğüm sayısına bağlı olarak karar verilmiştir. Düşük yoğunluğa sahip sorgu havuzundaki en iyi rotayı oluşturan sıralı yol dizisindeki gezilen düğüm sayısı, Oldenburg bölgesindeki toplam düğüm sayısının yaklaşık %0.02’si ile %0.1’i aralığındadır. Orta yoğunluktaki sorgu havuzundaki bu oran %0.2 ile %0.3 aralığına karşılık gelirken, yüksek yoğunluktaki sorgu havuzunda ise %0.4 ile %0.7 aralığındadır. Her bir sorgu havuzunda 5 farklı başlangıç, hedef düğümü ikilisi vardır. Engellerin, engel veri tabanına bir servis aracılığıyla eklendiği ve veri tabanında seyahat zamanından önce hazır olduğu kabul edilmiştir. Engellerin yol ağıyla ilişkilendirilmesi gerekmektedir. Engel en iyi ilk rota planı üzerinde değilse, rota planının toplam zaman maliyetini etkilemez. Bu nedenle, sabit ve değişken pozisyonlu engellerin düşük, orta ve yüksek yoğunluktaki sorgu havuzunda bulunan her bir başlangıç, hedef düğümü ikilisinin en iyi ilk rotaya sahip sıralı yol dizisiyle ilişkilendirilmesi sağlanmıştır. Engelin en iyi ilk rota planı ile ilişkilendirilme durumu, çıktı olarak zaman bazlı n tane en iyi rota planını sıralı olarak hesaplayabilen, Yen algoritması ile kontrol edilmiştir.

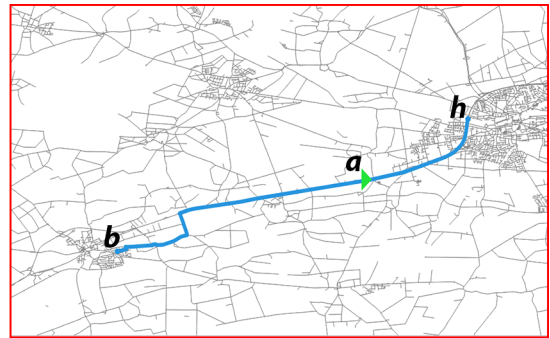
Sabit pozisyonlu engellerden olan statik, süreli ve periyodik engellerin yol ağı üzerinde konumları değişmemektedir. Ancak bu engellerin yaşam süreleri farklıdır. Bu çalışma kapsamında statik engelin, köprülerin azami yükseklik sınırı ve araç yükseklik sınırına bağlı olarak oluştuğu kabul edilmiştir. Statik engelin yol ağından kaldırılma zamanı sonsuz değerini almıştır. Süreli engellerin trafik kazalarına bağlı olarak oluştuğu ve yol eğrileri üzerinde oluşan trafik kazalarının toplam yaşam süresinin 120 dakika olduğu kabul edilmiştir. Şekil 5.1’de Almanya/Oldenburg bölgesine ait en iyi ilk rota planı üzerindeki bir süreli engelin gösterimi sunulmuştur. Şekil 5.2’de ve Şekil 5.3’de ise, Şekil 5.1’deki rota planının yakınlaştırılmış durumu gösterilmiştir. Şekil 5.2’de b başlangıç düğümünden, h hedef düğümüne ulaşmak için sunulan en



Şekil 5.1: Almanya/Oldenburg bölgesine ait en iyi rota planı üzerindeki bir süreli engelin gösterimi.



Şekil 5.2: $e_s.t_0 - e_s.t_1$ zaman aralığında süreli engel etkisinin bitmesinin beklendiği durum.



Şekil 5.3: $e_s.t_1$ zamanından sonra süreli engel etkisinin bittiği durum.

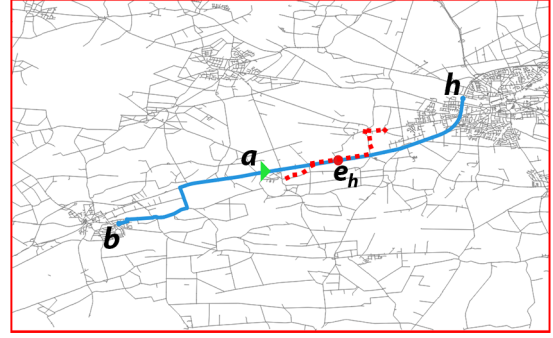
iyi ilk rota planı üzerinde e_s süreli engeli bulunmaktadır. Araç a , t_0 zamanında engel e_s 'nin etkisinin geçmesini, engelin etkin olduğu yol eğrisinin başlangıç düğümünde

beklemiştir. Şekil 5.3’de engelin yol üzerindeki etkisi t_1 zamanında bitmiştir ve araç a ’nın, hedef düğüm h ’ye en iyi ilk rota planı ile ulaşabildiği gösterilmiştir. Periyodik engeller ise yolun araç trafiğine ve yaya trafiğine açık olma durumuna bağlı olarak oluşmaktadır ve belirli periyotlara bağlı olarak tekrarlanmaktadır.

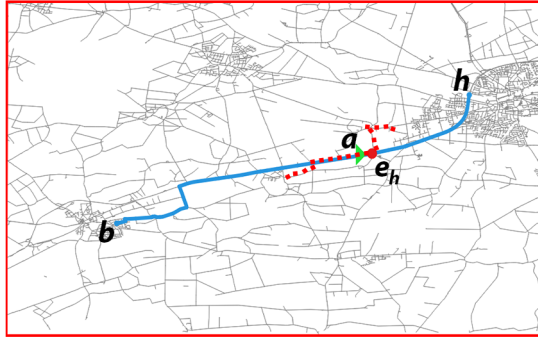
Değişken pozisyonlu engeller kapsamında yer alan hareketli ve dinamik engellerin yol ağı üzerindeki konumları değişmektedir. Ancak bu engellerin yol üzerindeki kapladıkları alanlar ve yol ağına bağlı olarak hareket etme durumları farklılık göstermektedir. Hareketli engeller, güzergah bilgilerine bağlı olarak yol ağıyla ilişkilendirilmiştir. Koordinatı (x_1, y_1) olan bir nokta olarak tanımlanan, güzergahı ve sabit hızı olan hareketli engelin araç ile aynı yönde ilerlediği durum üzerinde çalışılmıştır. Hareketli engelin, engel olarak tanımlanabilmesi için hızının araçtan daha düşük olması gerekmektedir. Aksi durumda, yol eğrisinin zaman maliyetini arttırmayacağı için engel değildir. Araç, hareketli engel ile karşılaştıktan sonra, hareketli engelin hızına bağlı olarak yol eğrisinde ilerlemektedir. Şekil 5.4’de Almanya/Oldenburg bölgesine ait en iyi ilk rota planı üzerindeki bir hareketli engel gösterilmiştir. Şekil 5.5’de, Şekil 5.6’da ve Şekil 5.7’de ise, Şekil 5.4’deki rota planının yakınlaştırılmış durumu gösterilmiştir. Şekil 5.5’de b başlangıç düğümünden, h hedef düğümüne ulaşmak için sunulan en iyi ilk rota planı üzerinde e_h hareketli engeli bulunmaktadır. Şekil 5.6’da araç a ’nın, t_1 zamanında engel e_h ile karşılaşması ve birlikte hareket etme durumları gösterilmiştir. Şekil 5.7’de ise hareketli engel e_h , en iyi ilk rota planı üzerinden t_2 zamanında ayrılmıştır ve önceden belirli olan kendi rota planını takip etmiştir. Araç a ’nın, hedef düğüm h ’ye en iyi ilk rota planı ile ulaşabildiği gösterilmiştir. Dinamik engellerin ise tehlikeli gaz sızıntısı sebebiyle ve zamana bağlı olarak 3 farklı boyut ve konumda olduğu kabul edilmiştir. Bu 3 farklı alan ve konum tehlike seviyeleri ile ilişkilendirilmiştir. Bu çalışma kapsamında her bir tehlike seviyesinin yol eğrisi üzerindeki etkisi 60 dakika olarak kabul edilmiştir. Yüksek tehlike seviyesi, 60 dakika sonra etkisini orta tehlike seviyesine, orta tehlike seviyesi 60 dakika sonra etkisini düşük tehlike seviyesine devretmektedir, düşük tehlike seviyesi ise 60 dakika sonra yol eğrisindeki etkisini yitirerek yol eğrisi üzerinden kalkmaktadır. Dinamik engeller sınırlayıcı kutu olarak tanımlanmıştır. Boyut ve konumları farklılık gösteren üç farklı sınırlayıcı kutunun yol eğrisi üzerindeki etkisinin zaman maliyeti hesaplanmıştır.



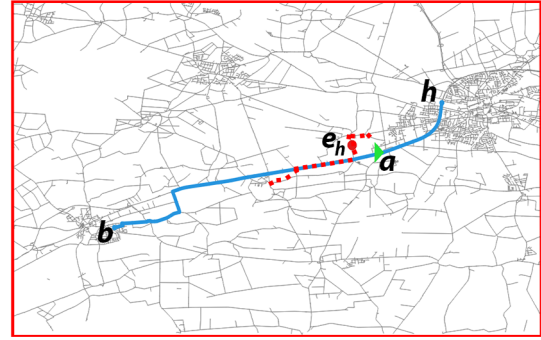
Şekil 5.4: Almanya/Oldenburg bölgesine ait en iyi rota planı üzerindeki bir hareketli engel gösterimi.



Şekil 5.5: $e_h.t_0$ zamanında hareketli engel ile ilk defa karşılaşma durumu.



Şekil 5.6: $e_h.t_0 - e_s.t_1$ zaman aralığında hareketli engel ile birlikte hareket etme durumu.



Şekil 5.7: $e_h.t_1$ zamanından sonra hareketli engelin en iyi ilk rota planı üzerinden ayrılma durumu.

Bu çalışmada, farklı yoğunluğa sahip sorgu havuzlarındaki başlangıç, hedef düğümü ikilileri için rota planını hesaplayan EKR ve EFR algoritmalarının deney sonuçları sunulmuştur. Bu deney sonuçlarının sunulduğu tablolar, sorgu havuzunun yoğunluğuna ve rotalama algoritmalarına bağlı olarak sınıflandırılmıştır. Tablodaki *Seyahat Süresi* alanında, en iyi rota planının toplam zaman maliyetleri saniye cinsinden sunulmuştur. *Gezilen Düğüm Sayısı* ifadesi ise EKR ve EFR algoritmalarının en iyi rota planındaki toplam düğüm sayısını ifade etmektedir. Kazanım yüzdeleri en iyi rota planının toplam seyahat süresi ve en iyi rota planında gezilen düğüm sayısı için hesaplanmıştır. Seyahat süresi kazanım yüzdesi, EKR ve EFR algoritmalarının toplam seyahat süreleri arasındaki farkın yüzdelik olarak hesaplanmasıyla belirlenmiştir. Gezilen düğüm sayısı kazanım yüzdesi ise, EKR ve EFR algoritmalarının gezilen düğüm sayıları arasındaki farkının yüzdelik olarak hesaplanmasıyla elde edilmiştir.

Tablo 5.1’de statik engelin en iyi ilk rota planını etkilediği deney sonuçları yer almaktadır. En iyi rota planı hesaplamasında statik engel ile karşılaşma durumunda statik engelin bulunduğu yol atlanır. Bu yaklaşım EKR ve EFR algoritmalarında benzer olduğu için, her iki algoritmanın deney sonuçları aynıdır. Bu nedenle, zaman maliyeti sonuçları saniye cinsinden *Seyahat Süresi* başlığı altında tek bir sütunda sunulmuştur. Gezilen düğüm sayısı başlığı altında ise her iki algoritma için de aynı sonuçlar elde edilmiştir ve aynı şekilde tek bir sütunda sunulmuştur.

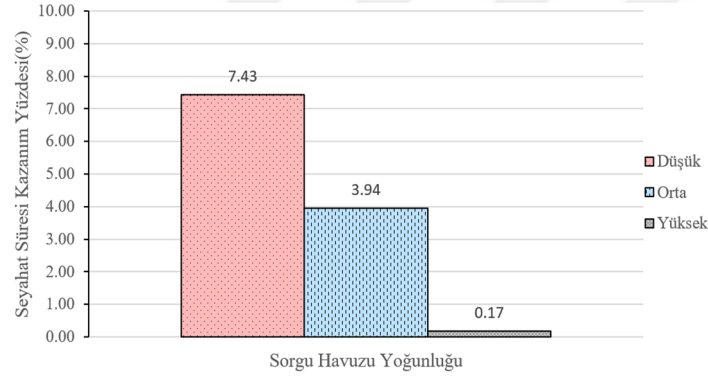
Tablo 5.1: Yol ağında statik engelin bulunduğu sonuç tablosu.

	Sorgu Adı	EKR ve EFR Algoritmaları	
		Seyahat Süresi (sn.)	Gezilen Düğüm Sayısı
Düşük	s1	156	26
	s2	587	46
	s3	689	89
	s4	879	109
	s5	1496	160
Orta	s6	1774	310
	s7	1579	333
	s8	1774	452
	s9	2079	486
	s10	3151	508
Yüksek	s11	3798	699
	s12	4065	712
	s13	4911	826
	s14	3514	835
	s15	7126	1124

Tablo 5.2’de süreli engelin en iyi ilk rota planını etkilediği deney sonuçları yer almaktadır. Toplam seyahat süresi ve gezilen düğüm sayısı sonuçları karşılaştırıldığında her bir sorgu için, EFR algoritmasının hesapladığı sonuçların, EKR algoritmasının hesapladığı sonuçlara göre daha iyi olduğu görülmüştür. Düşük yoğunluktaki sorgu havuzundaki, beşinci sorgu olan s5 sorgusunun %14.21 oranı ile seyahat süresindeki en yüksek kazanım olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Yüksek yoğunluktaki sorgu havuzundaki, ilk sorgu olan s11 sorgusunun %21.42 oranı ile gezilen düğüm sayısındaki en yüksek kazanım olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Şekil 5.8’de gösterildiği üzere seyahat süresindeki en yüksek ortalama kazanım %7.43 sonucu ile düşük yoğunluktaki sorgu havuzundan elde edilmiştir.

Tablo 5.2: Yol ağında süreli engelin bulunduğu sonuç tablosu.

	Sorgu Adı	EKR Algoritması		EFR Algoritması		Kazanım Yüzdesi	
		Seyahat Süresi (sn.)	Gezilen Düğüm Sayısı	Seyahat Süresi (sn.)	Gezilen Düğüm Sayısı	Seyahat Süresi (sn.)	Gezilen Düğüm Sayısı
Düşük	s1	156	26	139	24	10.90	7.69
	s2	587	46	578	40	1.53	13.04
	s3	689	89	626	79	9.14	11.24
	s4	878	109	866	99	1.37	9.17
	s5	1379	150	1183	146	14.21	2.67
Orta	s6	1966	311	1750	296	10.99	4.82
	s7	1579	333	1473	320	6.71	3.90
	s8	1800	484	1790	451	0.56	6.82
	s9	2022	487	2019	483	0.15	0.82
	s10	3197	664	3155	504	1.31	24.10
Yüksek	s11	3872	887	3812	697	1.55	21.42
	s12	4109	898	4086	708	0.56	21.16
	s13	4961	844	4919	823	0.85	2.49
	s14	3514	835	3513	833	0.03	0.24
	s15	7129	1130	7127	1121	0.03	0.80

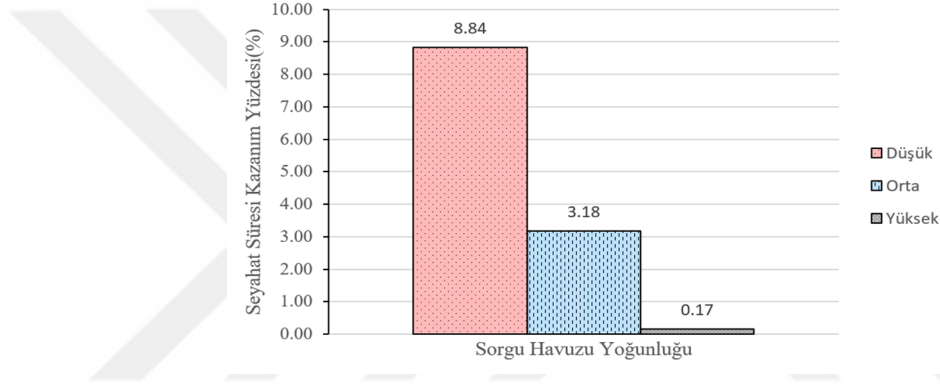


Şekil 5.8: Yol ağında süreli engelin bulunduğu durum için EFR algoritmasının seyahat süresi kazanım yüzdesi ortalamaları.

Tablo 5.3’de periyodik engelin en iyi rota planını etkilediği deney sonuçları yer almaktadır. Toplam seyahat süresi ve gezilen düğüm sayısı sonuçları karşılaştırıldığında her bir sorgu için, EFR algoritmasının hesapladığı sonuçların, EKR algoritmasının hesapladığı sonuçlara göre daha iyi olduğu görülmüştür. Düşük yoğunluğa sahip sorgu havuzundaki, beşinci sorgu olan s5 sorgusunun, % 14.24 oranı ile seyahat süresindeki en yüksek kazanım olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Yüksek yoğunluktaki sorgu havuzundaki, ilk sorgu olan s11 sorgusunun %21.42 oranı ile gezilen düğüm sayısındaki en yüksek kazanım olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Süreli ve hareketli engellerin yol ağını zamana bağlı etkileme durumları benzer olduğu için, deney sonuçları da Tablo 5.2’de ve Tablo 5.3’de gösterildiği üzere birbirine oldukça yakındır. Şekil 5.9’da gösterildiği üzere seyahat süresindeki en yüksek ortalama kazanım %8.84 sonucu ile düşük yoğunluktaki sorgu havuzundan elde edilmiştir.

Tablo 5.3: Yol ağında periyodik engelin bulunduğu sonuç tablosu.

	Sorgu Adı	EKR Algoritması		EFR Algoritması		Kazanım Yüzdesi	
		Seyahat Süresi (sn.)	Gezilen Düğüm Sayısı	Seyahat Süresi (sn.)	Gezilen Düğüm Sayısı	Seyahat Süresi (sn.)	Gezilen Düğüm Sayısı
Düşük	s1	156	26	139	24	10.83	7.69
	s2	587	46	578	40	1.62	13.04
	s3	689	89	625	79	9.23	11.24
	s4	879	109	806	99	8.27	9.17
	s5	1379	150	1183	146	14.24	2.67
Orta	s6	1966	311	1750	296	11.00	4.82
	s7	1579	333	1533	320	2.91	3.90
	s8	1800	484	1790	451	0.57	6.82
	s9	2022	487	2019	483	0.12	0.82
	s10	3197	664	3155	504	1.32	24.10
Yüksek	s11	3872	887	3849	697	0.60	21.42
	s12	4109	898	4025	708	2.02	21.16
	s13	4961	844	4919	823	0.83	2.49
	s14	3514	835	3513	833	0.01	0.24
	s15	7129	1130	7124	1121	0.08	0.80

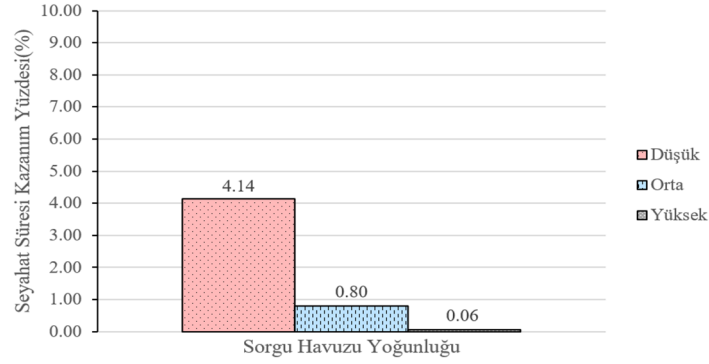


Şekil 5.9: Yol ağında periyodik engelin bulunduğu durum için EFR algoritmasının seyahat süresi kazanım yüzdesi ortalamaları.

Tablo 5.4’de hareketli engelin en iyi rota planını etkilediği deney sonuçları verilmiştir. Toplam seyahat süresi ve gezilen düğüm sayısı sonuçları karşılaştırıldığında her bir sorgu için, EFR algoritmasının hesapladığı sonuçların, EKR algoritmasının hesapladığı sonuçlara göre daha iyi olduğu görülmüştür. Düşük yoğunluğa sahip sorgu havuzundaki, dördüncü sorgu olan s4 sorgusunun, % 9.29 oranı ile seyahat süresindeki en yüksek kazanım olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Orta yoğunluktaki sorgu havuzundaki, beşinci sorgu olan s10 sorgusunun %24.10 oranı ile gezilen düğüm sayısındaki en yüksek kazanım olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Şekil 5.10’da gösterildiği üzere seyahat süresindeki en yüksek ortalama kazanım %4.14 sonucu ile düşük yoğunluktaki sorgu havuzundan elde edilmiştir.

Tablo 5.4: Yol ağında hareketli engelin bulunduğu sonuç tablosu.

	Sorgu Adı	EKR Algoritması		EFR Algoritması		Kazanım Yüzdesi	
		Seyahat Süresi (sn.)	Gezilen Düğüm Sayısı	Seyahat Süresi (sn.)	Gezilen Düğüm Sayısı	Seyahat Süresi (sn.)	Gezilen Düğüm Sayısı
Düşük	s1	156	26	153	24	2.33	7.69
	s2	587	46	586	40	0.21	13.04
	s3	574	79	573	79	0.08	0.00
	s4	842	115	763	99	9.29	13.91
	s5	1379	150	1258	146	8.79	2.67
Orta	s6	1774	310	1747	296	1.52	4.52
	s7	1496	335	1477	320	1.28	4.48
	s8	1800	484	1794	451	0.33	6.82
	s9	2022	487	2015	483	0.34	0.82
	s10	3197	664	3181	504	0.52	24.10
Yüksek	s11	3798	699	3790	697	0.21	0.29
	s12	4109	898	4084	708	0.60	21.16
	s13	4961	844	4947	823	0.28	2.49
	s14	3514	835	3509	833	0.14	0.24
	s15	7129	1130	7128	1121	0.02	0.80

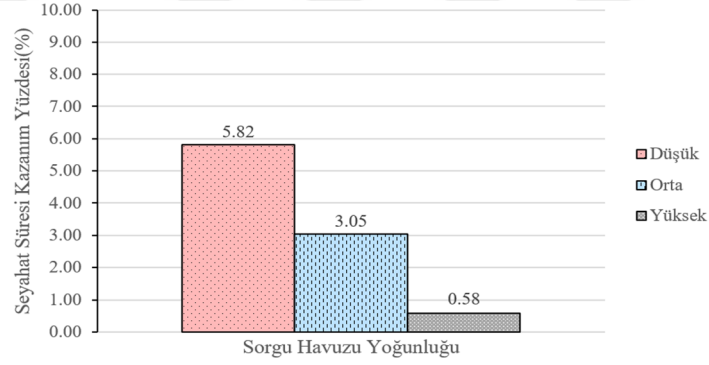


Şekil 5.10: Yol ağında hareketli engelin bulunduğu durum için EFR algoritmasının seyahat süresi kazanım yüzdesi ortalamaları.

Tablo 5.5’de dinamik engelin en iyi rota planını etkilediği deney sonuçları sunulmuştur. Toplam seyahat süresi ve gezilen düğüm sayısı sonuçları karşılaştırıldığında her bir sorgu için, EFR algoritmasının hesapladığı sonuçların, EKR algoritmasının hesapladığı sonuçlara göre daha iyi olduğu görülmüştür. Düşük yoğunluğa sahip sorgu havuzundaki, ilk sorgu olan s1 sorgusunun, % 17.12 oranı ile seyahat süresindeki en yüksek kazanım olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Düşük yoğunluktaki sorgu havuzundaki, ilk sorgu olan s1 sorgusunun %17.24 oranı ile gezilen düğüm sayısındaki en yüksek kazanım olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Şekil 5.11’de gösterildiği üzere seyahat süresindeki en yüksek ortalama kazanım %5.82 sonucu ile düşük yoğunluktaki sorgu havuzundan elde edilmiştir.

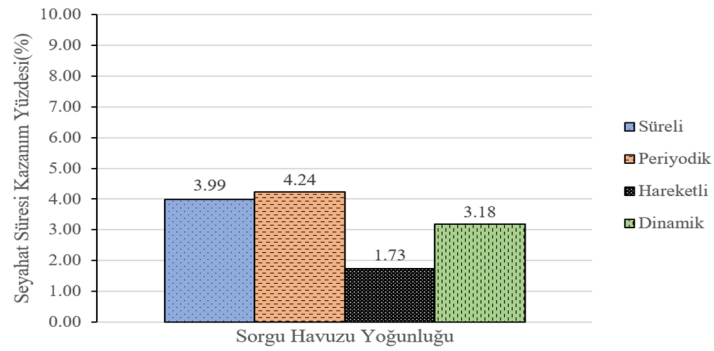
Tablo 5.5: Yol ağında dinamik engelin bulunduğu sonuç tablosu.

	Sorgu Adı	EKR Algoritması		EFR Algoritması		Kazanım Yüzdesi	
		Seyahat Süresi (sn.)	Gezilen Düğüm Sayısı	Seyahat Süresi (sn.)	Gezilen Düğüm Sayısı	Seyahat Süresi (sn.)	Gezilen Düğüm Sayısı
Düşük	s1	182	29	151	24	17.12	17.24
	s2	586	43	581	40	0.90	6.98
	s3	576	79	576	79	0.10	0.00
	s4	858	104	768	99	10.47	4.81
	s5	1189	150	1184	146	0.49	2.67
Orta	s6	1825	296	1780	296	2.47	0.00
	s7	1589	327	1520	320	4.35	2.14
	s8	1839	459	1748	451	4.94	1.74
	s9	2079	486	2048	483	1.47	0.62
	s10	3267	511	3201	504	2.02	1.37
Yüksek	s11	3807	710	3791	697	0.42	1.83
	s12	4034	723	4033	708	0.02	2.08
	s13	5097	911	4950	823	2.89	9.66
	s14	3503	851	3502	833	0.03	2.12
	s15	7162	1203	7160	1121	0.02	6.82



Şekil 5.11: Yol ağında dinamik engelin bulunduğu durum için EFR algoritmasının seyahat süresi kazanım yüzdesi ortalamaları.

Şekil 5.12’de yol ağını etkileyen engellerin EFR algoritmasının seyahat sürelerindeki ortalama kazanım değerleri sunulmuştur.



Şekil 5.12: EFR algoritmasının ortalama seyahat süresi kazanım yüzdesi.

Periyodik engelin bulunduğu rota planı hesaplamaları en yüksek kazanım oranına sahiptir. Engelin zamana bağlı maliyeti rota planı hesaplamasına dahil edildiğinde en iyi rota planının hesaplandığı deneyler yardımıyla kanıtlanmıştır. Bu alışma kapsamında, sorgu havuzundaki yoğunluk arttıkça seyahat suresindeki ortalama kazanım oranının dřtđđ sonucuna ulaşılmıştır. Ancak bu durum, kazanım oranının yol ağının özelliklerine bağlı olması nedeniyle her zaman geçerli değildir.



ALTINCI BÖLÜM

6.1 Sonuçlar ve Öneriler

Bu çalışmada, zamana bağlı engel modeli ile en iyi rota planının hesaplanabilmesi için Dijkstra algoritması genişletilerek Engelden Kaçınan Rotalama (EKR) algoritması ve Engel Farkında (EFR) rotalama algoritmaları önerilmiştir. Zamana bağlı engel maliyetinin en iyi rota planı hesaplamasına dahil edilmesinin gerekli olduğu deneysel çalışmalar ile desteklenmiştir. En iyi rota planı üzerinde bir tane engelin bulunduğu durumda, EFR algoritmasının engelin yoldan kalkmasını bekleyerek hesapladığı seyahat süresi, EKR algoritmasının hesapladığı seyahat süresi ile karşılaştırıldığında her engel tipi için ortalama %1.73 ile %4.24 aralığında kazanım elde edildiği gözlenmiştir. Bu çalışma kapsamında elde edilen iyileştirme, ileride gerçekleştirilecek uygulamalar ile birlikte daha kapsamlı hale gelebilecektir.

Dijkstra algoritmasının sorgu zamanı yüksek olduğu için, ilerleyen çalışmalarda yaklaşık en iyi rota planını sunan ve daha iyi bir sorgu zamanına sahip olan sezgisel yaklaşımlar tercih edilebilir. Hedef odaklı olan A* algoritmasının dallanma ve sınırlandırma yaklaşımı ile birlikte uygulanması sorgu zamanını azaltılabilir. Geliştirilen algoritmalar bir yol eğrisi üzerinde bir engel bulunduğu kabulüne bağlı olarak rota planını hesaplamıştır. İlerleyen çalışmalarda, bir yol eğrisi üzerinde farklı özelliklere sahip çoklu engellerin bulunduğu durumlar için çözüm geliştirilebilir. Bu çözümde, engellerin zaman ve konum bazlı baskın olma baskın olma durumları, engelin zamana bağlı maliyet hesabına dahil edilebilir. Bu duruma ek olarak, en az yakıt tüketiminin ve yol ağlarının tehlike seviyeleri belirlenerek güvenli geçiş durumlarının hesaplanabilmesi için pareto optimal çözüm geliştirilebilir.

Bu çalışma kapsamında engellerin özellikleri önceden bilinmektedir. Sorgu zamanında oluşan engellerin en iyi rota planı hesaplamasına dahil edilebilmesi için engellerin bir servis ile gerçek zamanlı elde edilmesi ve engel tiplerine ayrıştırılması

işlemleri gerçekleştirilebilir. Ayrıca engellerin yol ağında bulunma durumu için olasılıksal hesaplama yapılarak, engel veri tabanı oluşturulabilir. EKR ve EFR algoritmaları, Oldenburg bölgesi için en iyi rota planını hesaplamıştır. Ancak algoritmaların daha geniş ölçeklere sahip yol ağları için sonuç üretmesi, bu çalışmadan elde edilen kazanımları farklı yol ağları için de destekleyecektir. İki düğüm arasında en iyi rota planının hesaplanması, ilgili rota planı üzerindeki araç yoğunluğunun artmasına neden olacaktır. Bu nedenle ilerleyen çalışmalarda, sorgular için eşik değerlere karar verilerek, yol eğrilerinin zaman maliyetlerinin artması durumu kontrol edilebilir.

Hareketli engel, belirli bir güzergahı olan ve araç ile aynı yönde hareket eden bir nokta olarak tanımlanmıştır. İlerleyen çalışmalarda, engelin yol ağında bir konvoy olarak ilerleme durumu üzerine çalışılabilir. Hareketli engelin başlangıç, bitiş noktası ve konvoy uzunluğunun da bilinmesi gerekecektir. Bu duruma ek olarak, engel araç ile ters yönde hareket edebilir ve engelin araç ile karşı karşıya geldiği bir güzergah oluşabilir. Aracın, hareketli engelin bulunduğu yol ağı üzerindeki etkisi bitene kadar, düğüm üzerinde beklemesi gerekecektir. Dinamik engelin, yol ağındaki hareketinin ve boyutunun kestirilmesinde, gazın özelliği, gaz sızıntısının olduğu bölgedeki hava durumu, bina yüksekliği gibi ilgili bölgenin fiziki koşulların bilinmesi gerekebilir. Bu bilgilere göre, yol ağında farklı hareket ve boyutlara sahip dinamik engeller rota planı hesaplamasına dahil edilebilir.

Bu çalışma, engel maliyetinin zaman bazlı olarak rota planı hesaplamasına dahil edilmesinin gerekli olduğunu göstermiştir. Bu durumdan, navigasyon, havalimanı bagaj taşıma bandı, kablosuz ağlarda veri aktarımı ve robotik araçların özerk bir biçimde gerçekleştirdiği hareketler gibi ulaşım/iletişime çözüm ve iyileştirme arayan sistemler fayda sağlayabilir.

KAYNAKLAR

- Arz, J., Luxen, D., ve Sanders, P. (2013). Transit node routing reconsidered. In *International Symposium on Experimental Algorithms*, s. 55–66. Springer.
- Bast, H., Delling, D., Goldberg, A., Müller-Hannemann, M., Pajor, T., Sanders, P., Wagner, D., ve Werneck, R. F. (2015). Route planning in transportation networks. *arXiv preprint arXiv:1504.05140*.
- Bauer, R. ve Delling, D. (2009). Sharc: Fast and robust unidirectional routing. *Journal of Experimental Algorithmics (JEA)*, 14:4.
- Bauer, R., Delling, D., Sanders, P., Schieferdecker, D., Schultes, D., ve Wagner, D. (2008). Combining hierarchical and goal-directed speed-up techniques for dijkstra’s algorithm. In *International Workshop on Experimental and Efficient Algorithms*, s. 303–318. Springer.
- Baum, M., Dibbelt, J., Pajor, T., ve Wagner, D. (2016). Dynamic time-dependent route planning in road networks with user preferences. In *International Symposium on Experimental Algorithms*, s. 33–49. Springer.
- Botea, A. ve others (2011). Ultra-fast optimal pathfinding without runtime search. In *AIIDE*.
- Brinkhoff, T. (2002). A framework for generating network-based moving objects. *Geoinformatica*, 6(2):153–180.
- Brodal, G. S. ve Jacob, R. (2004). Time-dependent networks as models to achieve fast exact time-table queries. *Electronic Notes in Theoretical Computer Science*, 92:3–15.
- Bruera, F., Cicerone, S., D’Angelo, G., Di Stefano, G., ve Frigioni, D. (2008). Dynamic multi-level overlay graphs for shortest paths. *Mathematics in Computer Science*, 1(4):709–736.
- Chitumalla, P. K., Harris, D., Thuraisingham, B., ve Khan, L. (2008). Emergency response applications: dynamic plume modeling and real-time routing. *IEEE Internet Computing*, 12(1):38–44.
- Dean, B. C. (2004). Shortest paths in fifo time-dependent networks: theory and algorithms. *Rapport technique, Massachusetts Institute of Technology*.
- Delling, D., Dibbelt, J., Pajor, T., ve Werneck, R. F. (2015a). Public transit labeling. In *International Symposium on Experimental Algorithms*, s. 273–285. Springer.
- Delling, D., Goldberg, A. V., Pajor, T., ve Werneck, R. F. (2011). Customizable route planning. In *International Symposium on Experimental Algorithms*, s. 376–387. Springer.

- Delling, D., Goldberg, A. V., Pajor, T., ve Werneck, R. F. (2015b). Customizable route planning in road networks. *Transportation Science*.
- Delling, D., Pajor, T., ve Wagner, D. (2009). Engineering time-expanded graphs for faster timetable information. In *Robust and Online Large-Scale Optimization*, s. 182–206. Springer.
- Dijkstra, E. W. (1959). A note on two problems in connexion with graphs. *Numerische mathematik*, 1(1):269–271.
- Disser, Y., Müller-Hannemann, M., ve Schnee, M. (2008). Multi-criteria shortest paths in time-dependent train networks. In *International Workshop on Experimental and Efficient Algorithms*, s. 347–361. Springer.
- Eser, E., Kocayusufoğlu, F., Eravci, B., Ferhatosmanoğlu, H., ve Larriba-Pey, J. L. (2016). Generating time-varying road network data using sparse trajectories. In *Data Mining Workshops (ICDMW), 2016 IEEE 16th International Conference on*, s. 1118–1124. IEEE.
- Foschini, L., Hershberger, J., ve Suri, S. (2014). On the complexity of time-dependent shortest paths. *Algorithmica*, 68(4):1075–1097.
- Fuchs, F. (2010). On preprocessing the alt-algorithm. *Student thesis, Faculty of Computer Science, Institut for Theoretical Informatics (ITI), Karlsruhe Institute of Technology (KIT)*.
- Gavoille, C., Peleg, D., Pérennes, S., ve Raz, R. (2001). Distance labeling in graphs. In *Proceedings of the twelfth annual ACM-SIAM symposium on Discrete algorithms*, s. 210–219. Society for Industrial and Applied Mathematics.
- Geisberger, R. (2010). Contraction of timetable networks with realistic transfers. In *International Symposium on Experimental Algorithms*, s. 71–82. Springer.
- Geisberger, R., Sanders, P., Schultes, D., ve Vetter, C. (2012). Exact routing in large road networks using contraction hierarchies. *Transportation Science*, 46(3):388–404.
- Godsil, C. ve Royle, G. (2001). *Algebraic graph theory*. Springer-Verlag, New York.
- Goldberg, A. V. ve Harrelson, C. (2005). Computing the shortest path: A search meets graph theory. In *Proceedings of the sixteenth annual ACM-SIAM symposium on Discrete algorithms*, s. 156–165. Society for Industrial and Applied Mathematics.
- Goldberg, A. V., Kaplan, H., ve Werneck, R. F. (2009). Reach for a*: Shortest path algorithms with preprocessing. *The Shortest Path Problem: Ninth DIMACS Implementation Challenge*, 74:93–139.
- Gupta, H. P., Rao, S., Yadav, A. K., ve Dutta, T. (2015). Geographic routing in clustered wireless sensor networks among obstacles. *IEEE Sensors Journal*, 15(5):2984–2992.
- Gutman, R. J. (2004). Reach-based routing: A new approach to shortest path algorithms optimized for road networks. *ALLENEX/ANALC*, 4:100–111.

- Hart, P. E., Nilsson, N. J., ve Raphael, B. (1968). A formal basis for the heuristic determination of minimum cost paths. *IEEE transactions on Systems Science and Cybernetics*, 4(2):100–107.
- Hilger, M., Köhler, E., Möhring, R. H., ve Schilling, H. (2009). Fast point-to-point shortest path computations with arc-flags. *The Shortest Path Problem: Ninth DIMACS Implementation Challenge*, 74:41–72.
- Hong, I., Murray, A. T., ve Rey, S. (2016). Obstacle-avoiding shortest path derivation in a multicore computing environment. *Computers, Environment and Urban Systems*, 55:1–10.
- Maue, J., Sanders, P., ve Matijevic, D. (2009). Goal-directed shortest-path queries using precomputed cluster distances. *Journal of Experimental Algorithmics (JEA)*, 14:2.
- Mehlhorn, K. ve Sanders, P. (2008). *Algorithms and data structures: The basic toolbox*. Springer Science & Business Media.
- Narayanan, V., Phillips, M., ve Likhachev, M. (2012). Anytime safe interval path planning for dynamic environments. In *2012 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, s. 4708–4715. IEEE.
- Peleg, D. (2000). Proximity-preserving labeling schemes. *Journal of Graph Theory*, 33(3):167–176.
- Pyrga, E., Schulz, F., Wagner, D., ve Zaroliagis, C. (2008). Efficient models for timetable information in public transportation systems. *Journal of Experimental Algorithmics (JEA)*, 12:2–4.
- Shang, S., Liu, J., Zheng, K., Lu, H., Pedersen, T. B., ve Wen, J.-R. (2015). Planning unobstructed paths in traffic-aware spatial networks. *GeoInformatica*, 19(4):723–746.
- Wagner, D., Willhalm, T., ve Zaroliagis, C. (2005). Geometric containers for efficient shortest-path computation. *Journal of Experimental Algorithmics (JEA)*, 10:1–3.
- Wang, Z., Steenbruggen, J., ve Zlatanova, S. (2017a). Integration of traffic information into the path planning among moving obstacles. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 6(3):86.
- Wang, Z. ve Zlatanova, S. (2013). An a*-based search approach for navigation among moving obstacles. In *Intelligent systems for crisis management*, s. 17–30. Springer.
- Wang, Z. ve Zlatanova, S. (2016). Multi-agent based path planning for first responders among moving obstacles. *Computers, Environment and Urban Systems*, 56:48–58.
- Wang, Z., Zlatanova, S., ve van Oosterom, P. (2017b). Path planning for first responders in the presence of moving obstacles with uncertain boundaries. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 18(8):2163–2173.
- Yen, J. Y. (1970). An algorithm for finding shortest routes from all source nodes to a given destination in general networks. *Quarterly of Applied Mathematics*, 27(4):526–530.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı: Sine CANBOLAT

Uyruğu: Türkiye Cumhuriyeti

Doğum Yeri ve Tarihi: Ankara 07.05.1989

Medeni Hali: Bekar

Adres: 4. cadde 32. sokak Apartman No:12 Daire No:3 Emek/Ankara

E -Posta Adresi: canbolat.sine@gmail.com

İletişim (Telefon): +905333055198

EĞİTİM

Lise: Gazi Üniversitesi Vakfı Özel Fen Lisesi

Lisans: Atılım Üniversitesi - Yazılım Mühendisliği

Yüksek Lisans: Türk Hava Kurum Üniversitesi- Elektrik ve Bilgisayar Mühendisliği

MESLEKİ DENEYİM

Türk Hava Kurumu Üniversitesi - Araştırma Görevlisi

YABANCI DİL

İngilizce