

T.C.  
SAKARYA UYGULAMALI BİLİMLER ÜNİVERSİTESİ  
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

İNSANSIZ DENİZ ARAÇLARI İÇİN İYİLEŞTİRİLMİŞ YAPAY  
POTANSİYEL ALAN ALGORİTMASI İLE YOL PLANLAMA VE  
ENGELDEN KAÇINMA

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Serdar ÖZKAYA

Enstitü Anabilim Dalı : MEKATRONİK MÜHENDİSLİĞİ

Tez Danışmanı : Dr. Öğr. Üyesi Gökhan ATALI

Temmuz 2023

T.C.  
SAKARYA UYGULAMALI BİLİMLER ÜNİVERSİTESİ  
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

İNSANSIZ DENİZ ARAÇLARI İÇİN İYİLEŞTİRİLMİŞ YAPAY  
POTANSİYEL ALAN ALGORİTMASI İLE YOL PLANLAMA VE  
ENGELDEN KAÇINMA

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Serdar ÖZKAYA

Enstitü Anabilim Dalı : MEKATRONİK MÜHENDİSLİĞİ

Bu tez 04/07/2023 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oybirliği ile kabul edilmiştir.

JÜRİ	BAŞARI DURUMU
Jüri Başkanı: Dr.Öğr. Üyesi Gökhan ATALI	BAŞARILI
Üye: Dr.Öğr. Üyesi Ali Furkan KAMANLI	BAŞARILI
Üye: Dr.Öğr. Üyesi Muhammed Fatih ADAK	BAŞARILI

## BEYAN

Tez içindeki tüm verilerin akademik kurallar çerçevesinde tarafımdan elde edildiğini, görsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uygun şekilde sunulduğunu, kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapılmadığını, başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunulduğunu, tezde yer alan verilerin bu üniversite veya başka bir üniversitede herhangi bir tez çalışmasında kullanılmadığını beyan ederim

Serdar ÖZKAYA

04/07/2023

## TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitiminin boyunca değerli bilgi ve deneyimlerinden yararlandığım, her konuda bilgi ve desteğini almaktan çekinmediğim, araştırmanın planlanmasından yazılmasına kadar tüm aşamalarında yardımlarını esirgemeyen, teşvik eden, aynı titizlikte beni yönlendiren değerli danışman hocam Dr. Öğr. Üyesi Gökhan ATALI'ya tüm içtenliğimle teşekkürlerimi sunarım.

Manevi desteğiyle her zaman yanımda olduğunu hissettiren değerli eşim Hilal ÖZKAYA'ya, varlığıyla beni mutlu eden kızım Turna Gökçen'e tüm içtenliğimle teşekkürlerimi sunarım.

Hayatım boyunca desteklerini hissettiğim beni bugünlere getiren annem Zeliha ÖZKAYA ve babam Ali Osman ÖZKAYA'ya teşekkürü bir borç bilirim.

# İÇİNDEKİLER

BEYAN.....	iii
TEŞEKKÜR .....	iv
İÇİNDEKİLER .....	v
KISALTMALAR .....	vii
SİMGELER.....	ix
TABLolar LİSTESİ.....	xi
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	xii
ÖZET.....	xiv
ABSTRACT .....	xv

## BÖLÜM 1.

GİRİŞ .....	1
1.1. Tezin Amacı .....	2
1.2. Literatür Araştırması .....	2
1.3. Araştırma Çalışmasının Yenilik ve Katkıları .....	10
1.4. Tezin Organizasyonu.....	10

## BÖLÜM 2.

MATERYAL VE METOT .....	12
2.1. İnsansız Deniz Araçları .....	12
2.1.1. İnsansız Deniz Araçları Tarihi .....	13
2.1.2. Türkiye'nin İnsansız Deniz Araçları.....	15
2.2. Denizde Çatışmayı Önleme Yönergesi .....	19
2.2.1. DÇÖY Temel Manevralar.....	19
2.3. Görüntü İşleme Teknikleri .....	20
2.3.1. Canny Kenar Tespit Yöntemi .....	20
2.3.2. Convex Hull Yöntemi .....	21
2.4. İnsansız Deniz Araçlarında Yol Planlama ve Engelden Kaçınma .....	22
2.4.1. A* Algoritması.....	22
2.4.2. Parçacık Sürü Optimizasyon Algoritması.....	23
2.4.3. Dinamik Pencere Yaklaşımı Algoritması .....	24
2.4.4. Yapay Potansiyel Alan Algoritması.....	25
2.4.4.1. Hedefin Engele Yakın Olması Problemi.....	27
2.4.4.2. Yerel Minimuma Takılma Problemi .....	28

<b>BÖLÜM 3.</b>	
<b>SİSTEM TASARIMI .....</b>	<b>30</b>
3.1. Kullanılan Haritalar .....	32
3.1.1. Canny Kenar Tespiti ile Engellerin Kenarlarını Bulma.....	32
3.1.2. Convex Hull Yöntemi ile Kara Parçalarını Düzenleme.....	34
3.2. Dinamik Pencere Yaklaşımı Algoritmasıyla Yol Planlama.....	36
3.3. Geliştirilmiş Yapay Potansiyel Alan Algoritması ile Yol Planlama.....	37
3.3.1. Hedefin Engelle Yakın Olması Probleminin İyileştirilmesi .....	37
3.3.2. Yerel Minimize Takılma Probleminin İyileştirilmesi.....	38
3.3.3. Dinamik Engelli Ortamda Engellerden Kaçınma .....	42
<b>BÖLÜM 4.</b>	
<b>SİMÜLASYON SONUÇLARI.....</b>	<b>43</b>
4.1. Geliştirilmiş Yapay Potansiyel Alan ile Statik Engelli Ortamda Yol Planlama .....	43
4.2. Geliştirilmiş Yapay Potansiyel Alan ile Dinamik Engelli Ortamda Yol Planlama .....	47
4.2.1. Yetişme Durumu .....	47
4.2.2. Pruvaya Pruvaya Geliş Durumu .....	49
4.2.3. Aykırı Geçiş Durumu.....	50
<b>BÖLÜM 5.</b>	
<b>SONUÇLAR VE ÖNERİLER .....</b>	<b>52</b>
<b>KAYNAKLAR .....</b>	<b>54</b>

## KISALTMALAR

AIS	: Automatic Identification System
APF	: Yapay Potansiyel Alan (Artificial Potential Field)
BFS	: Breath First Search
COLREG	: Convention on the International Regulations for Preventing Collusion at Sea
CSGA	: Melez Guguk Kuşu-Genetik Algoritma
DCPA	: En Yakın Çarpışma Risk Noktasının Konumu
DÇÖY	: Denizde Çatışmayı Önleme Yönergesi
DWA	: Dinamik Pencere Yaklaşımı (Dynamic Window Approach)
ECDIS	: Elektronik Harita (Electronic Chart Display and Information System)
EKF	: Genişletilmiş Kalman Filtresi (Extended Kalman Filter)
FEA	: Sonlu Elemanlar Analizi (Finite Element Analysis)
GA	: Genetic Algorithm
GNC	: Guidance, Navigation And Control
IMO	: Uluslararası Denizcilik Örgütü (International Maritime Organization)
ISOM	: Improved Self-Organization Mapping
İDA	: İnsansız Deniz Aracı
KKA	: Karınca Koloni Algoritması
LTE	: Long-Term Evolution
PSO	: Parçacık Sürü Optimizasyonu (Particle Swarm Optimization)
RADAR	: Radio Detection and Ranging
RHG	: Regular Hexagon-Guided
ROV	: Remote Operating Vehicle
RRT	: Hızlı Keşif Rastgele Ağaçlar (Rapidly-Exploring Random Trees)
SİDA	: Silahlı İnsansız Deniz Aracı
SOM	: Self Organizing Map
TCPA	: En Yakın Çarpışma Risk Noktası Zamanı

TPP : Gelgit Yol Planlaması (Tide Path Planning)  
TSP : Gezgin Satıcı Problemi (Travelling Salesman Problem)  
USV : Unmanned Surface Vehicle





## SİMGELER

$S_x, S_y$	: Sobel operatörleri
$G(x, y)$	: Gauss filtre fonksiyonu
$F(n)$	: Toplam maliyet fonksiyonu
$G(n)$	: Gerçek mesafe
$H(n)$	: Sezgisel mesafe
$V_{t+1}$	: Yenilenen hız değeri
$p_{t+1}$	: Yenilenen konum değeri
$rand_1, rand_2$	: Rastgele üretilen sayı değerleri
$c_1, c_2$	: Ölçeklendirme değerleri
$p_{best}, g_{best}$	: Yerel ve küresel en iyi değer
$W_t$	: Atalet ağırlık değeri
$G(V, w)$	: Amaç fonksiyonu
$poz. (V, w)$	: Robotun hedefe göre açısı
$mes. (V, w)$	: Robot ile engel arası mesafe
$hız(V, w)$	: Yörüngede robotun ulaşabileceği hız değeri
$\alpha, \beta, \gamma$	: Sabit değerler
$\sigma$	: Düzleştirme operatörü
$U_{att}(X)$	: Çekici potansiyel alan fonksiyonu
$k_{att}$	: Çekici potansiyel alan sabiti
$d(X, X_g)$	: Araç ile hedef arası öklid mesafesi
$\nabla$	: Gradyan operatörü
$F_{att}(X)$	: Çekici potansiyel alan kuvveti fonksiyonu
$U_{rep}(X)$	: İtici potansiyel alan fonksiyonu
$k_{rep}$	: İtici potansiyel alan sabiti
$d(X, X_o)$	: Araç ile engel arası mesafe
$d_o$	: Emniyetli engel geçiş mesafesi, İtici potansiyel alan etki mesafesi

- $F_{rep}(X)$  : İtici potansiyel alan kuvveti fonksiyonu  
 $U(X)$  : Yapay potansiyel alan fonksiyonu  
 $F(X)$  : Yapay potansiyel alan kuvveti  
 $F_{uçatt}(X)$  : Engel uç noktası çekici



## TABLULAR LİSTESİ

Tablo 1.1. : Literatürdeki çalışmaların belirli kriterlere göre karşılaştırma tablosu ....	9
Tablo 2.1 : Albatros-S Teknik Özellikler.....	15
Tablo 2.2 : ULAQ Teknik Özellikler.....	16
Tablo 2.3 : DOĞUŞ-USV Teknik Özellikler.....	17
Tablo 2.4 : GLOBİDA Teknik Özellikler.....	18
Tablo 3.1 : DWA parametreleri .....	36
Tablo 4.1 : Geliştirilmiş APF parametreleri.....	43
Tablo 4.2 : Simülasyon Deneyleri.....	47

## ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1 : Albatros-S İnsansız Deniz Aracı.....	15
Şekil 2.2 : ULAQ SIDA .....	16
Şekil 2.3 : DOĞUŞ-USV .....	17
Şekil 2.4 : GLOBİDA .....	18
Şekil 2.5 : DÇÖY temel manevraları .....	19
Şekil 2.6 : Canny Kenar Tespit Süreci .....	20
Şekil 2.7 : Convex Hull işleminden geçirilmiş görüntü.....	22
Şekil 2.8 : PSO Akış Diyagramı .....	23
Şekil 2.9 : Çekici potansiyel alan fonksiyonu grafiği.....	25
Şekil 2.10 : İtici potansiyel alan fonksiyonu grafiği .....	26
Şekil 2.11 : Yapay potansiyel alan fonksiyonu grafiği .....	27
Şekil 2.12 : Hedefin engele yakın olması problemi .....	28
Şekil 2.13 : Yerel minimuma takılma problemi (a) İtme ve Çekme kuvvetinin aynı doğrultuda olması durumu (b) İki engel arasında kalması durumu .....	28
Şekil 3.1 : Yol planlama akış diyagramı .....	31
Şekil 3.2 : Uluabat Gölü harita görüntüsü.....	32
Şekil 3.3 : Gri Tonlu Uluabat Gölü harita görüntüsü.....	33
Şekil 3.4: Engellerin kenarları tespit edilmiş görüntü (a) Canny Kenar Tespit Opertarı çıktı görüntüsü (b) Uluabat Gölü Haritası kara parçalarının kenarları tespit edilmiş görüntü .....	33
Şekil 3.5: Girinti ve çıkıntıları yumuşatılmış görüntü .....	34
Şekil 3.6: Kara parçaları birleştirilmiş görüntü.....	35
Şekil 3.7: Algoritmaya gönderilen görüntü işlemenin son çıktısı.....	35
Şekil 3.8: DWA ile rota planlaması grafik gösterimi.....	36
Şekil 3.9 : Hedefin engele yakın olması problemi çözümü (a) Grafiks gösterim (b) Harita gösterim .....	38
Şekil 3.10 : Yerel minimum problemi çözümü.....	38
Şekil 3.11 : Yerel minimum probleminin çözümü ve karşılaştırma görüntüleri (a) Geleneksel APF ile yerel minimum problemine takılma grafik gösterimi (b) Geliştirilmiş APF ile yerel minimum problemi çözümü grafik gösterimi (c) Geleneksel APF ile yerel minimum problemine takılma harita gösterimi (d) Geliştirilmiş APF ile yerel minimum problemi çözümü harita görüntüsü .....	40
Şekil 3.12 : Geliştirilmiş APF yönteminin yerel minimum problemi çözümü (a) Geleneksel APF'nin yerel minimuma takılmasının grafiks gösterimi (b) Geliştirilmiş APF ile yerel minimum probleminin çözümü grafiks gösterimi (c) Geleneksel APF'nin yerel minimuma takılmasının harita gösterimi (d) Geliştirilmiş APF ile yerel minimum probleminin çözümü harita gösterimi .....	41

Şekil 4.1 : Geliştirilmiş Yapay Potansiyel Alan ile statik engelli ortamda yol planlama 1 (a) Grafiksel gösterim (b) Harita gösterimi .....	44
Şekil 4.2 : Geliştirilmiş Yapay Potansiyel Alan ile statik engelli ortamda yol planlama 2 (a) Grafiksel gösterim (b) Harita gösterimi .....	45
Şekil 4.3 : Geleneksel ve Geliştirilen yöntem karşılaştırması 2 (a) Geleneksel yöntemle rota çizimi grafiksel gösterimi (b) Geliştirilen yöntemle rota çizimi grafiksel gösterimi (c) Geleneksel yöntemle rota çizimi harita gösterimi (d) Geliştirilen yöntemle rota çizimi harita gösterimi .....	46
Şekil 4.4 : Yetişme durumu manevrasının grafik gösterimi .....	48
Şekil 4.5 : Yetişme durumu manevrasının harita gösterim .....	48
Şekil 4.6 : Pruva pruvaya geliş durumu manevrasının grafik gösterimi .....	49
Şekil 4.7 : Pruva pruvaya geliş durumu manevrasının harita gösterimi .....	50
Şekil 4.8 : Aykırı geçiş durumu manevrasının grafik gösterimi .....	51
Şekil 4.9 : Aykırı geçiş durumu manevrasının harita gösterimi .....	51



# İNSANSIZ DENİZ ARAÇLARI İÇİN İYİLEŞTİRİLMİŞ YAPAY POTANSİYEL ALAN ALGORİTMASI İLE YOL PLANLAMA VE ENGELDEN KAÇINMA

## ÖZET

Günümüzde otonom araçların kullanımı birçok alanda yaygınlaşmaktadır. İnsan kaynaklı hataları en aza indirerek, can ve mal kayıplarını azaltmak için geliştirilen kendi kendine karar alarak hareket edebilme yeteneğine sahip yapay zeka destekli bu araçlar askeri, ulaşım, tarım gibi bir çok alanda kendini ispatlamıştır. Dünya ticaretinin büyük bir kısmının deniz yolları üzerinden sağlandığı, bilinen bir gerçektir. Bu nedenle deniz ulaşımının güvenirliliği büyük bir öneme sahiptir. Uluslararası Denizcilik Örgütü'nün ve denizcilik sigorta kuruluşlarının yayınladığı istatistiklere göre deniz ulaşımında gerçekleşen kazalar %60-90 arasında insan kaynaklı hatalar nedeniyle olmaktadır. Kazaların sonucunda can ve mal kayıpları olmaktadır. Kayıpların en aza indirilmesi insansız deniz araçlarının geliştirilmesi ile mümkün olacaktır.

Bu çalışmada; statik ve dinamik engellerin bulunduğu ortamda engellere çarpmadan rota planlaması yaparak hedefe ulaşmayı sağlayan geliştirilmiş yapay potansiyel alan algoritmasının simülasyon ortamında etkinliğinin ispatlanması gerçekleştirilmiştir. Harita olarak Bursa'da bulunan Uluabat Gölü'nün kara parçaları yer alan bir kesiti kullanılmıştır.

Harita, üzerinde bulunan engelleri algoritmanın kolaylıkla algılayabilmesi ve yol planlamayı desteklemesi adına bir takım görüntü işleme adımlarından geçirilmiştir. Ardından Yapay Potansiyel Alan (APF, Artificial Potential Field) algoritması üzerinde sabit engellere çarpmadan en kısa yolu bulması için geliştirmeler yapılmıştır. Algoritmanın karşılaşılan dinamik engeller karşısında Denizde Çatışmayı Önleme Yönergesi (DÇÖY) kurallarına göre manevra yapabildiği sağlanmıştır.

Anahtar Kelimeler: İnsansız Deniz Aracı, Yapay Zeka, DÇÖY, Yol Planlama, Engelden Kaçınma, Yapay Potansiyel Alan, Otonom Araçlar

# **PATH PLANNING AND OBSTACLE AVOIDANCE WITH AN IMPROVED ARTIFICIAL POTENTIAL FIELD ALGORITHM FOR UNMANNED MARITIME VEHICLES**

## **ABSTRACT**

Today, the use of autonomous vehicles is becoming widespread in many areas. These vehicles, which are developed to minimize human-induced errors and reduce the loss of life and property, have the ability to act by making their own decisions, and are supported by artificial intelligence, have proven themselves in many fields such as military, transportation and agriculture. It is a known fact that most of the world trade is provided via sea routes. Therefore, it is of great importance that maritime transport be reliable. According to the statistics published by the International Maritime Organization and maritime insurance organizations; Between 60-90% of accidents in maritime transportation are due to human-induced errors. As a result of accidents, there is loss of life and property. With the development of unmanned sea vehicles, the losses in accidents will be minimized.

In this study; In the environment where static and dynamic obstacles exist, the effectiveness of the developed artificial potential field algorithm, which enables to reach the target by route planning without hitting the obstacles, has been proven in the simulation environment. As a map, a section of the Uluabat Lake in Bursa with land parts was used.

In order for the algorithm to easily detect the obstacles on the map and to support road planning, a number of image processing steps have been taken. Then, improvements were made on the Artificial Potential Field algorithm to find the shortest path without hitting fixed obstacles. It has been ensured that the algorithm can maneuver in the face of dynamic obstacles in accordance with the Convention on the International Regulations for Preventing Collusion at Sea (COLREG).

Keywords: Unmanned Surface Vehicle, Artificial Intelligence, COLREG, Path Planning, Obstacle Avoidance, Artificial Potential Field, Autonomous Vehicle

## **BÖLÜM 1. GİRİŞ**

Günümüzde akıllı cihazların üretilmesine yönelik teknolojik gelişmeler yaygınlaşmaktadır. Günlük hayat, ekonomi, ulaşım, uzay ve savunma gibi birçok alanda kendine yer bulan bu sektörün gelişmesinin temelinde yapay zeka vardır.

Yapay zekanın gelişmesiyle birlikte kendi kendine düşünebilen, karar alabilen ve tecrübe eden mekanizmalar ortaya çıkmıştır. Bu gelişmeyle birlikte otonom araçlar üzerine yapılan çalışmalar da hız kazanmıştır. Deniz araçlarında ise elektronik seyir cihazlarının üretilmesiyle gemilerin konumlarının kolaylıkla elektronik harita üzerinde gösterilmesine, rota belirlenmesine ve takibine yönelik büyük kolaylıklar elde edilmiştir. Ancak tam otonom bir gemi seyri için insan müdahalesi olmaksızın bir noktadan hedef noktaya ilerlemesi, çıkabilecek muhtemel problemler karşısında kendi kendine düşünerek karar vermesi ve bunu uygulaması gerekmektedir. Bunun için de çevresel faktörlerin tümüyle simüle edildiği güvenilir bir rota belirleme ve engellerden kaçınma algoritması geliştirilmesi gerekmektedir.

Otonom araçlarda engellere çarpmadan hedefe ulaşabilmek adına rota planlayan çeşitli algoritmalar kullanılmaktadır. Ancak geleneksel algoritmaların deniz araçlarına doğrudan uygulanması pek mümkün olmamaktadır. Çünkü denizlerin dinamik bir ortam olması ve rüzgar, akıntı, dalga gibi çevresel faktörlerden kara ve hava araçlarına göre daha fazla etkilenmesi nedeniyle deniz araçlarının kontrolü oldukça zordur [1]. Bu nedenle deniz araçlarında kullanılan algoritmaların daha esnek bir yapıya sahip olması gerekmektedir. Kullanılan çoğu algoritma, amacına ve kullanım yerine göre geliştirilmiş veya bir çok farklı algoritmanın birleşimi ile kompozit bir yapıda oluşturulmuştur.



## 1.1. Tezin Amacı

İnsansız deniz aracının bir operatör tarafından belirlenen başlangıç ve hedef noktaları arasında, güvenli seyir yapabilmesi için geliştirilen rota belirleme ve engelden kaçınma algoritmasının, Uluabat Gölü haritasının üzerinde kara parçaları yer alan bir kesitini kullanarak simülasyon ortamında deneysel seyir çalışmaları ile etkinliğinin doğrulanması gerçekleştirilmiştir.

## 1.2. Literatür Araştırması

Dünya üzerinde otonom gemiler üzerine yapılan çalışmaların yaygınlaşmasıyla birlikte geliştirilen engelden kaçınma ve rota planlama algoritmaları önem kazanmıştır. Bu algoritmalar geliştirilirken Uluslararası Denizcilik Örgütü' nün (IMO, International Maritime Organization) yayınladığı COLREG (Convention on the International Regulations for Preventing the Collisions) kuralları dikkate alınmaktadır. Bu metnin ülkemizdeki karşılığı Denizde Çatışmayı Önleme Yönergesi'dir (DÇÖY). Bu yönergenin içeriğinde gemilerin emniyetli seyir yapabilmesi için deniz trafiğinin düzenlenmesi adına uluslararası kabul görmüş kurallar bulunmaktadır [2]. Otonom deniz araçları üzerine son on yılda yapılan çalışmalar aşağıda sıralanmıştır:

Yorulmaz ve arkadaşları yapmış oldukları çalışmada otonom gemilerin deniz ulaşımında kullanılmasının gemi kazalarına etkisi, taşınabilecek yük miktarına etkisi ve gemiadamlarının işsiz kalması konularında kaptanların bakış açısına göre incelemişlerdir. Çalışmada nitel araştırma yöntemlerinden olgu bilim deseni kullanılmış olup verilerin toplanmasında anket ve doküman analizi tekniği kullanılmıştır. Sonuç olarak araştırmacılar otonom gemilerin kullanılmasının deniz kazalarını azaltacağı, taşınan yük miktarına etkisinin olmayacağı ve gemiadamlarının işsiz kalmasına olumsuz etkisinin olmayacağını değerlendirmişlerdir. [3].

Kurowski ve arkadaşları yapmış oldukları çalışmada insansız deniz aracı için yan taramalı sonar ve gradiyometre seti içine iki manyetometrenin entegre edilmesiyle oluşan birleşik sistem geliştirmişlerdir. Kıyıya yakın çok sığ sularda sondaj çalışması yapmak üzere kullanılan bir jack-up iskelesini yerleştirmek için en uygun yerin tespit edilmesi, bölgenin patlamamış mühimmatlardan temizlenmesi ve iç inceleme yapmak amacıyla kullanmayı amaçlamışlardır. İncelemenin yapılabilmesi adına insansız deniz

aracının yol planlama, doğru çizgi yol takibi, sensör entegrasyonu ve füzyonu ile araç hareket kontrolü için yöntemler önermişlerdir. Sonuç kısmında ise yan taramalı sonar ve manyetometre ölçümlerinin sonuçları ile hareket kontrol sürecine ilişkin araştırma gereksinimlerine ve önerilere yer vermişlerdir [4].

Dabit ve arkadaşları yapmış oldukları çalışmada bir insansız deniz aracı kullanarak Endonezya'da bulunan büyük balık çiftliklerinde yemlerin havuzun her noktasına eşit oranda dağıtılması problemine çözüm getirmeyi amaçlamışlardır. Yemleme için insansız deniz aracında 8 kg kapasiteli bir hazne ve aracın havuzun kenarlarına çarpmaması için ultrasonik sensör kullanmışlardır. Kontrplak malzemeden ürettikleri insansız deniz aracının, önce 3 boyutlu çizim programı üzerinde sonlu elemanlar analizi ile gerinim ve yer değiştirme dayanımını 2, 4, 6 ve 8 kilogramlık statik yüke maruz bırakarak ölçmüşlerdir. Analiz sonuçları üzerinden malzeme dayanımının yeterli olmadığı sonucuna ulaşmışlardır. Bu nedenle aracı polyester macunu ve sertleştirici karışım birleşiminden oluşturulan reçine katmanı ile kaplayarak prototip üretmişlerdir. Üretilen prototipin taşımada başarılı olduğu sonucunu değerlendirmişlerdir [5].

Ryu yapmış olduğu çalışmada iDroneboat isimli insansız deniz aracı prototipinin üzerine bağlı sensörlerle çözülmüş oksijen, iletkenlik, ph ve su sıcaklığı değerlerini ölçerek suyun kalitesi hakkında değerlendirmede bulunmuş ve bu verileri Long-Term Evolution (LTE) iletişim protokolü üzerinden bulut ortamına ileterek veri paylaşımında bulunmuştur. Prototipin üretilmesinde Ardupilot uygulamasından yararlanılmış ve kontrolör olarak Raspberry Pi tabanlı Navio2 kartı kullanılmıştır. Sonuç olarak iDroneboat'un küçük göletlerde veri toplamak için başarılı bir performans gösterdiği ancak büyük göllerde veya okyanus ortamında iletişim kopukluğu nedeniyle verimli olmadığı değerlendirilmesinde bulunmuştur [6].

Han ve arkadaşları yapmış oldukları çalışmada gemilerin çatışmadan kaçınarak güvenli bir seyir yapabilmesi için radar görüntüleri üzerinden diğer gemilerin yer, konum, hız parametrelerinin yanı sıra geometrik özelliklerini genişletilmiş bir Kalman filtresi (EKF) kullanarak tahmin etmeyi amaçlamışlardır. Önerilen hedef takip algoritmasının performansını ölçmek için KRISO firması tarafından geliştirilen Aragon İnsansız Deniz Aracı'nı kullanarak saha deneyleri yapmışlardır. 294 metre uzunluğunda bir konteyner gemisinin radar görüntüleri üzerinden geometrik çıkarımlar yapmışlardır. Tahmin edilen

değerleri otomatik tanımlama sistemi (AIS, Automatic Identification System) verileriyle karşılaştırılarak grafik üzerinde göstermişlerdir. Sonuç olarak araştırmacılar EKF ile tahmin edilen verilerin başarılı olduğunu göstermişlerdir. [7].

Atalı ve arkadaşları yapmış oldukları çalışmada mobil bir robot üzerine yerleştirilmiş odometri sensörlerinden gelen verileri ve kamera görüntülerinin görüntü işleme teknikleri ile işlenmesinden elde edilen verileri genişletilmiş kalman filtresinden geçirerek hassas konumlandırma yapmayı amaçlamışlardır. Elde edilen verileri tablo halinde sunmuşlardır. Önerilen yöntemin etkinliğini Kobuki robot üzerinde yapılan deneyler sonucu doğrulamışlardır [8].

Savitz ve arkadaşları yapmış oldukları çalışmada insansız deniz araçlarının ABD donanmasını desteklemek üzere hangi görevlerde kullanılabileceğini, diğer platformlara göre avantajlı yönlerini ortaya koyan rapor hazırlamışlardır. Raporda insansız deniz araçlarını fiziksel çevreyi tanıma, düşmanlar hakkında gözlem ve bilgi toplama, mayın tespiti, askeri yanıltma/bilgi operasyonları/elektronik harp, arama ve kurtarma gibi görevlerdeki işlevsellikleri açısından inceleyerek tablo halinde sunmuşlardır. Sonuç olarak araştırmacılar insansız deniz araçlarının insanlı sistemlere göre birçok açıdan daha yararlı olduğu, daha riskli görevleri üstlenebildikleri, benzer boyutlardaki diğer insansız kara ve hava araçlarına göre daha büyük yükler taşıyabildikleri, daha yüksek güç çıkışı sağladıkları ve daha az enerji harcayarak iş yaptıkları gibi avantajları olduğunu değerlendirmişlerdir. ABD donanması adına birçok görevde başarı gösterebilecek olmaları nedeniyle bu alanda çalışmalar yapılması gerektiğini önermişlerdir [9].

Yang ve arkadaşları yapmış oldukları çalışmada güvenli bir rota planlaması için geliştirdikleri Hızlı Keşif Rastgele Ağaçlar (RRT) algoritmasını kullanarak geometrik çarpışma tespiti ile yol budama işlemini ve Kuadratik Beizer Eğrisi yöntemi ile yol düzleştirme işlemini yaparak verimliliği artırmayı amaçlamışlardır. Sonuç olarak araştırmacılar aracın rotayı başarılı bir şekilde izlediğini ve ortalama yol takibi kontrol sapmasının, araç genişliğinin % 5.2'si olduğunu göstermişlerdir. Rota planlama işlemini şerit değiştirme işlemi içinde uygulamışlardır ve şerit değiştirmedeki ortalama yol sapmasının aracın genişliğinin % 8.3' ünden az olduğu sonucuna varmışlardır. [10].

Kurdi ve arkadaşları yapmış oldukları çalışmada dünya ile ay arasındaki çekim kuvveti sonucu meydana gelen doğal gel-git olgusundan esinlenerek türetilen gel-git yol planlaması (TPP) algoritmasını en kısa yol planlaması yapmak için kullanmışlardır. Daha sonra TPP algoritmasını ile A\*, BFS (Breath First Search), Dijkstra ve Genetik Algoritma (GA) gibi yaygın yol planlama optimizasyon algoritmaları ile karşılaştırmışlardır. TPP algoritmasının diğer algoritmalara kıyasla daha az hücreyi ziyaret ederek daha kısa zamanda hedefe ulaştığı sonucunu ortaya koymuşlardır [11].

Wang ve arkadaşları yapmış oldukları çalışmada dinamik bir trafik senaryosunda otonom bir kara aracının engellere çarpmadan ilerleyebilmesi için B-Spline yol planlama algoritmasının kullanımını incelemişlerdir. İlk olarak, sürücü yol planlama mekanizmasını analiz ederek destek vektör makinesi temelli bir dinamik risk tanımlama modeli oluşturmuşlardır. Ardından B-spline algoritmasını, oluşturulan risk tanımlama modeli ve yol kısıtlamalarına göre optimize ederek geliştirilmişlerdir. Yol planlama yaklaşımını test etmek için CarSim/Simulink uygulaması kullanmışlardır. Sonuç olarak araştırmacılar algoritmanın, çarpışmasız bir yol planlamasını dinamik kısıtlamaları karşılayacak şekilde başarıyla gerçekleştirdiğini değerlendirmişlerdir. [12].

Jian ve arkadaşları yapmış oldukları çalışmada otonom sualtı araçlarının çarpışmasız bir şekilde yol yörünge planlaması yapabilmesi için statik veya dinamik engel ile karşılaşma durumuna göre yerel ve küresel yol planlama algoritmalarının birleşiminden oluşan hibrit bir yöntem önermişlerdir. Yöntem, dinamik engeller ile karşılaşılması durumunda Dinamik Pencere Yaklaşımı (Dynamic Window Approach, DWA) algoritmasının devreye girdiği, statik engeller ile karşılaşılması durumunda Hızlı Keşif Rastgele Ağaç (RRT\*) algoritmasına geçiş yapılmasını mümkün kılar. Önerilen hibrit yol planlama algoritmasının simülasyon ortamında test edilmiş ve başarıya ulaşmıştır [13].

Atalı yapmış olduğu çalışmada sualtı araçları için itici pervane tasarlamıştır. İtcinin kuvvet, tork, verimlilik, sürtünme gibi özelliklerini akışkanlar mekaniği ve momentum teorisi hesaplamalarıyla elde etmiştir. İtici pervaneyi sonlu elemanlar analizi (FEA) yöntemini kullanarak analiz etmiştir ve üretilen protipini Fersah-ROV isimli sualtı aracı üzerinde test etmiştir. Araştırmacı yapılan hesaplama ve testlerin sonucunda tasarlanan itcinin su kaçağını azalttığı ve itme kuvvetini artırdığı sonucunu değerlendirmiştir [14].

Garip ve arkadaşları yapmış oldukları çalışmada otonom hareket eden çoklu mobil araçların yol planlaması problemi için Genetik Algoritma ve A\* algoritması birleşiminden oluşan hibrit bir yöntem önermişlerdir. Yöntemde, genetik algoritmanın hız ve maliyet açısından iyileştirilmesi amacıyla kullanılan amaç fonksiyonu olarak A\* sezgisel fonksiyonlarının kullanılmasını önermişlerdir. Matlab programı üzerinde yapılan simülasyon ve deneysel sonuçlarını tablo halinde göstererek yöntemin etkinliğini doğrulamışlardır [15].

İnan ve arkadaşı yapmış oldukları çalışmada gemi kazalarını önlemek için 3 aşamalı bir karar destek mekanizması oluşturmuşlardır. Bunların ilki diğer gemilerin hareketlerini tahmin edebilen bir yapay sinir ağı sistemi, ikincisi çarpışma risk analizi yapan bulanık mantık sistemi ve son olarak Melez Guguk Kuşu-Genetik Algoritma'sı (CSGA) ile engellerden kaçınma sistemidir. Sonuç olarak araştırmacılar CSGA algoritmasının yol planlamada kullanılan Karınca Koloni Algoritması (KKA), Parçacık Sürü Optimizasyon Algoritması (PSO, Particle Swarm Optimization) ve Genetik Algoritma karşılaştırarak CSGA algoritmasının hesaplama süresi ve yol uygunluğu açısından daha iyi performans gösterdiğini değerlendirmişlerdir [16].

Xia ve arkadaşları yapmış oldukları çalışmada bir insansız deniz aracı için çoklu görevleri yerine getirme ve rota planlama problemlerine çeşitli algoritmalarından oluşan hibrit bir yöntem geliştirmişlerdir. İlk olarak görev atama problemini çözmek için görev düğüm noktalarını harita üzerinde belirtmek üzere ISOM (Improved Self-Organization Mapping) algoritmasını kullanmışlardır. İkinci olarak yol planlaması için geliştirilmiş bir Genetik Algoritması kullanmışlardır. Ardından rota takibi esnasında engellerden kaçmak üzere Yapay Potansiyel Alan algoritmasını kullanmışlardır. Sonuç olarak geliştirilen hibrit yöntemin etkinliğini simülasyon deneyleriyle göstermişlerdir [17].

Kim ve arkadaşları yapmış oldukları çalışmada bir insansız deniz aracının DÇÖY kurallarına göre manevra yapabilmesi problemine Dinamik Pencere Yaklaşımı algoritmasıyla çözüm getirmeyi amaçlamışlardır. Yöntem en yakın çarpışma risk noktasının konumu (DCPA) ve en yakın çarpışma risk noktası zamanına (TCPA) bağlı olarak tehlikeleri öngörmektedir. Sonuç olarak araştırmacılar geleneksel DWA algoritması ile DÇÖY uyumlu DWA (CCDWA) algoritması simülasyon ortamında

karşılaştırmışlardır ve yöntemin DÇÖY'e uygun manevra yaptığını değerlendirmişlerdir. [18].

Singh ve arkadaşları yapmış oldukları çalışmada zorlu deniz ortamında bulunan bir insansız deniz aracı için A\* algoritması ile optimum rota planması yapmayı amaçlamışlardır. Yol planlaması için engellerden belirli bir mesefa uzaklıkta rota uğrak noktaları belirleyerek statik, dinamik engeller ve okyanus akıntılarının bulunduğu çeşitli ortamlarda deneyler gerçekleştirmişlerdir. Simülasyon sonucunda araştırmacılar önerdikleri yöntemin belirlenen güvenli noktalar üzerinden başarılı rota çizdiğini göstermişlerdir. [19].

Guo ve arkadaşları yapmış oldukları çalışmada insansız bir deniz aracının navigasyon problemine geliştirdikleri Parçacık Sürü Optimizasyonu algoritmasını kullanarak çözüm getirmeyi amaçlamışlardır. Geliştirdikleri yöntem iki aşamadan oluşmaktadır: İlk aşamada gezgin satıcı problemi (TSP) modeline dayalı bir yöntem ile görev noktaları arasında küresel bir yol planlaması yapmışlardır. İkinci aşamada ise geliştirilmiş bir PSO (CSPSO) kullanılarak iki görev noktası arasında yerel bir yol planlaması yapmışlardır. CSPSO algoritmasının performansını ayrıca Benchmark analiz yöntemi ile analiz etmişlerdir. Sonuç olarak araştırmacılar simülasyon grafikleri ve açık hava deneyleri ile önerilen yöntemin etkinliğini göstermişlerdir [20].

Jiang ve arkadaşları yapmış oldukları çalışmada elektrikli araçlardaki lityum pil paketinin şarj edilmesi esnasında Yapay Potansiyel Alan algoritması kullanarak hücre şarj durum dengelemesini sağlamayı amaçlamışlardır. Sonuç olarak önerilen yöntemin etkinliği bir laboratuvar ortamında geleneksel yöntemle karşılaştırma test sonuçları ile doğrulanmıştır. Deneysel sonuçlar farklı parametreler altında yapay potansiyel alan kontrolü altındaki enerji tüketimini ve şarj durumu sapmasını ölçerek elde edilmiştir [21].

Zhang ve arkadaşları yapmış oldukları çalışmada çift kollu bir robotun birbirleri ile çarpışmadan ve engellerden kaçınarak hareket planlaması yapabilmesi problemine geliştirdikleri Yapay Potansiyel Alan algoritmasını kullanarak çözüm getirmeyi amaçlamışlardır. Önerdikleri yöntemin etkinliğini Matlab ve Adams simülasyonu ortamlarında simüle edilerek göstermişlerdir [22].

Song ve arkadaşları yapmış oldukları çalışmada insansız bir deniz aracının engellere çarpmadan hedefe ulaşabilmesi adına bir yapay potansiyel alan algoritması geliştirmişlerdir. Geliştirdikleri algoritma ile hedefin engele yakın olması ve yerel minimum problemlerine çözüm getirmişlerdir. Ayrıca aracın seyir halinde herhangi bir engelle karşılaşması durumunda tahmine dayalı potansiyel alan yaklaşımı uygulanmaktadır. Bu sayede yöntem engele henüz yaklaşmadan öngörücü bir itme potansiyeli uygulayarak mesafeden kazanç sağlamaktadır. Sonuç olarak araştırmacılar geleneksel yapay potansiyel alan yaklaşımı ile geliştirilen algoritma arasında karşılaştırma yaparak elde edilen sonuçları tartışmaya sunmuşlardır [23].

Chen ve arkadaşları yapmış oldukları çalışmada bir insansız deniz aracının geleneksel A\* algoritmasına göre daha optimum bir yol planlaması yapabilmesi adına üç komşulu A\* arama algoritmasıyla Yapay Potansiyel Alan algoritmasının birleşiminden oluşan hibrit bir yöntem önermişlerdir. Deney ve simülasyon sonuçlarında önerdikleri yöntemin geleneksel yöntemle göre daha kısa sürede daha az düğüm noktalı ve daha az yol maliyetli bir rota planlaması yaptığını grafik ve tablo üzerinde göstermişlerdir [24].

Fan ve arkadaşları yapmış oldukları çalışmada geliştirdikleri Yapay Potansiyel Alan algoritmasını kullanarak gerçek zamanlı statik ve dinamik engellerden kaçarak yol planlaması yapmayı amaçlamışlardır. Geliştirdikleri yöntemle yapay potansiyel alan algoritmasının dezavantajları arasında yer alan hedefin engelin yakınında olması problemlerine çözüm getirmişlerdir. Ayrıca diğer bir dezavantaj olan yerel minimuma takılma problemlerine regular hexagon-guided (RHG) yöntemini kullanarak çözüm getirmişlerdir. Matlab programı üzerinde yapılan simülasyonlar ve yapılan deney sonuçlarıyla yöntemin etkinliğini göstermişlerdir [25].

Raheem ve arkadaşı yapmış oldukları çalışmada yol planlama yöntemlerinden Yapay Potansiyel Alan algoritmasının parametre değerlerini optimize etmek için Parçacık Sürü Optimizasyonu algoritmasını kullanmayı amaçlamışlardır. Ardından yol düzleştirme işlemi için spline eşitliği yöntemini kullanılmışlardır. Simülasyon sonuçları ile araştırmacılar yöntemin etkinliğini göstermişlerdir [26].

Literatürde yer alan otonom deniz araçlarının kullanım amacı, kullanılan algoritma türü, DÇÖY'e uygunluğu, Görüntü İşleme Tekniği kullanılıp kullanılmadığı gibi özellikler açısından karşılaştırılması Tablo 1.1'de verilmiştir.

Tablo 1.1. : Literatürdeki çalışmaların belirli kriterlere göre karşılaştırma tablosu

Kaynak	Araç	Algoritma / Yöntem	Görüntü İşleme	DÇÖY (COLREG)	Amaç
[4]	MESSIN İDA	GNC, SPKF			İnceleme, Saha Görevleri
[5]	İDA	Sonlu Elemanlar Analizi			Saha Görevleri
[6]	iDroneboat	Ardupilot			Saha Görevleri
[7]	Aragon İDA	EKF	✓		Hedef Takip, Geometrik Tahmin
[15]	İDA	YSA, Fuzzy Logic, CSGA		✓	Yol Planlama
[16]	İDA	SOM, GA, APF			Yol Planlama
[17]	İDA	CCDWA		✓	Engelden Kaçma, Manevra
[18]	Springer İDA	GA	✓	✓	Engelden Kaçma, Yol Planlama
[19]	İDA	TSP, CSPSO	✓	✓	Engelden Kaçma, Yol Planlama
[22]	İDA	PAPF			Yol Planlama
[25]	İDA	PSO, APF, Spline		✓	Engelden Kaçma, Yol Planlama

Tablo 1.1 belirtilen özelliklere göre incelendiğinde, otonom deniz araçlarının en büyük probleminin rota planlaması olduğu, bunun için kullanılan yaygın yöntemlerin geliştirildiği, genel olarak birden fazla algoritmanın birleşiminden oluşan hibrit yöntemlerin oluşturulduğu görülmektedir. Kullanılan yöntemler genel olarak yapay zaka temelli optimizasyon, sezgisel arama, yerel ve küresel yol planlama algoritmalarından oluşmaktadır. İnsansız deniz araçlarında APF algoritmasının yol planlaması amacıyla yaygın olarak kullanıldığı ve yol planlaması için DÇÖY’de belirtilen kurallar çerçevesinde manevra yapılmasının gerekliliği ortaya çıkmaktadır. Ayrıca insansız deniz araçlarında görüntü işlemenin yol planlamasında yaygın olarak kullanılmadığı ancak kullanılmasının yol planlamasını desteklemede önemli bir katkısının olduğu tespit edilmiştir.



### **1.3. Araştırma Çalışmasının Yenilik ve Katkıları**

Yapılan tez çalışmasında insansız deniz araçlarının yol planlaması ve engellerden kaçınması üzerinde durulmuştur. Yapay potansiyel alan yaklaşımında temel problemlerin çözümü için görüntü işleme teknikleri kullanarak ve sezgisel kısa yol bulma yöntemleri uygulanarak özgün bir algoritma geliştirilmiştir. Geliştirilen algortimanın dinamik engellerin bulunduğu ortamda DÇÖY kurallarına göre manevra yapabilmesi için yöntem geliştirilmiştir.

Literatür incelendiğinde insansız deniz araçlarında görüntü işleme teknikleri kullanımının yetersiz olduğu görülmektedir. Tez çalışmasında görüntü işleme tekniklerinin insansız deniz araçlarında kullanılmasının bu alandaki eksikliğin giderilmesine katkı sağlayacağı değerlendirilmektedir. İnsansız deniz araçlarının yol planlaması problemlerinde yaygın olarak kullanılan yapay potansiyel alan algoritmasının bilinen dezavantajı yerel minimum problemine getirilen özgün çözüm önerileri ile bu alandaki çalışmalara katkı sağlanıldığı düşünülmektedir. Dinamik engeller karşısında DÇÖY kurallarına göre manevra yapabilen yöntem geliştirilmesinin deniz ortamında diğer gemilerinde emniyetli seyir yapabilmeleri adına katkı sağlayacağı değerlendirilmektedir. Ayrıca insansız deniz araçları için yol planlamasında DÇÖY' e göre manevra yapabilen yöntemler geliştirilmesinin yaygınlaşmasına katkı sağlandığı değerlendirilmektedir. Bu tez kapsamında insansız deniz araçları için engellerden kaçınma ve yol planma algoritması geliştirilmesiyle çalışmanın yenilikçi yönünün güçlülüğü ortaya konulmuştur.

### **1.4. Tezin Organizasyonu**

Bu tez çalışmasında, Bölüm 1'de çalışmanın amacı, literatür araştırması ve çalışmanın yenilik ve katkılarından bahsedilmiştir.

Bölüm 2'de insansız deniz araçlarından, DÇÖY temel manevralarından, çalışmada kullanılan görüntü işleme tekniklerinden ve yaygın olarak kullanılan yol planlama algoritmalarının teorik hesaplamalarından bahsedilmiştir. Bu hesaplamalar neticesinde yol planlama algoritmasının temeli oluşturulmuştur.

Bölüm 3’te başlangıç ve hedef noktaları arasında statik ve dinamik engellerin bulunduğu ortamda engellerden kaçınarak yol planlaması yapabilen geliştirilmiş yapay potansiyel alan algoritması önerilmiştir. Kullanılan haritanın algoritmaya verilmeden önceki görüntü işleme yöntemlerinin harita üzerindeki kullanımından bahsedilmiştir. Önerilen yöntemle yapay potansiyel alan algoritmasının engelin hedefe yakın olması ve yerel minimuma takılma problemlerine getirilen çözüm önerilerinden bahsedilmiştir. Dinamik engellerin bulunduğu ortamda DÇÖY kurallarına göre manevra yapabilmesi için yapılan geliştirmelerden bahsedilmiştir.

Bölüm 4’te çalışmanın simülasyon ortamında denemeleri yapılmıştır. Denemelerin sonucu tespit edilen bulgulardan bahsedilmiştir.

Bölüm 5’te elde edilen sonuçlardan bahsedilmiştir ve geleceğe yönelik çalışmalar için önerilerde bulunulmuştur.

## BÖLÜM 2. MATERYAL VE METOT

Bu bölümde gerçekleştirilen tez çalışmasında kullanılan yöntemler anlatılmıştır. Tez çalışmasında kullanılan görüntü işleme teknikleri, DÇÖY kuralları, insansız deniz araçları ve rota planlama algoritmaları (APF, DWA, A\*, PSO) anlatılmıştır.

### 2.1. İnsansız Deniz Araçları

İnsansız deniz araçları üzerine yapılan birçok tanım bulunduğu gibi genel olarak üzerinde herhangi bir mürettebat barındırmayan uzaktan kumandalı ve otonom şekilde ya da her ikisinin kombinasyonu ile hareket edebilen araçlardır [27]. Bir başka ifadeyle IMO (Uluslararası Denizcilik Örgütü), insansız deniz araçlarını değişen derecelerde insan etkileşimi olmaksızın çalışabilen gemiler şeklinde tanımlamıştır [28].

İnsansız deniz araçlarında insan unsuruna ne derece ihtiyaç duyulduğu kullanılan kontrol sisteminin zeka seviyesine bağlıdır. İyi bir zekaya sahip algoritmayla donatılmış otonom gemi daha az insan müdahalesine ihtiyaç duyacaktır. Bu düşünceyle insansız deniz araçları insan unsurunun geminin kontrol sistemine ne derece müdahil olduğuna veya geminin karar alma sürecinin karmaşıklığına göre farklı kategorilerde incelenmektedir [29]. IMO ise otonomi seviyelerine ve insan müdahalesine göre insansız deniz araçlarını 4 farklı sınıfta incelemiştir:

- Otomatik işlemlere ve karar destek sistemine sahip gemi: Denizciler, gemi sistemlerini, fonksiyonlarını çalıştırmak ve kontrol etmek için gemide bulunurlar. Bazı işlemler otomatiktir.
- Denizcilerin gemide bulunduğu uzaktan kontrol edilen gemi: Gemi, başka bir yerden kontrol edilir ve işletilir, ancak gemide denizciler bulunur.
- Denizcilerin bulunmadığı uzaktan kontrol edilen gemi: Gemi, başka bir yerden kontrol edilir ve işletilir. Gemide denizciler bulunmaz.

- Tam otonom gemi: Geminin işletim sistemi, kendisi karar verebilir ve hareketlerini belirleyebilir.

### 2.1.1. İnsansız Deniz Araçları Tarihi

İlk uzaktan kumanda edilebilen insansız deniz aracı 1892 yılında Nichola Tesla tarafından Madison Square Garden’da sergilenmiştir. Radyo dalgaları ile kontrol edilebilen küçük ölçekli bu gemi ABD Savunma Bakanlığı tarafından alay konusu olarak ele alınmış ve ilgi görmemiştir [30]. Bu gelişmeyle birlikte radyo kontrollü uzaktan hareket ettirilebilen gemiler üzerine çeşitli çalışmalar yapılmıştır. 1903 yılında İspanyol mühendis Leonardo Torres, Royal Country House Gölü’nde “Telekino” isimli elektrik motorlu tekneyi uzaktan kumanda etmeyi başarmıştır [31]. 1. Dünya Savaşı sırasında Almanların ilk etapta 20 km uzunluğundaki kablolarla kontrol edilebilen FL-boot isimli insansız gemilerini üreterek kundak gemilerine benzer şekilde düşman gemilerini imha etmeyi amaçlamışlardır. Daha sonra geliştirilen FL-7 gemisi İngiliz gözcü gemilerine saldırmak amaçlı kullanılmıştır [32].

1. Dünya Savaşı’ndan sonra insansız deniz araçları genel olarak tatbikatlarda destek unsuru olarak kullanılmışlardır. 2. Dünya Savaşı’ndan sonra ise daha çok mayın ve engel temizleme görevlerinde kullanılmışlardır [33]. Kanada tarafından geliştirilen COMOX isimli insansız deniz aracı deniz üzerine duman kandili bırakılması amacıyla dizayn edilmiştir [34].

Yakın tarihimizde ise sivil bahriye ve milli savunmada çeşitli amaçlara hizmet eden insansız deniz araçlarına yönelik birçok ülke yatırım yapmakta ve geliştirmeye devam etmektedir. ABD insansız deniz araçlarının geliştirilmesi adına ciddi yatırımlar yapmakta, mevcut uçak ve savaş gemilerine eşlik edecek otonom gemi filolarını birçok amaçla kullanılabilecek şekilde dizayn etmektedir [35]. 1993’te Amerika’da MIT tarafından geliştirilen ARTEMIS isimli insansız deniz aracı balıkçı teknesi formunda nehirlerde akustik ölçüm yaparak daha önce işaretlenmiş balıkları izlemek maksatlı kullanılıyordu. Bu insansız deniz aracı Amerika için bu alana yönelik potansiyel oluşturmuştur [36]. ARTEMIS’in boyutlarını büyütme, daha sağlam bir platform haline getirmek için 1996 yılında ACES geliştirilmiştir ve oşinografik ölçümler için kullanılmıştır. Bu gelişmelerin devamında Amerika’da sürekli olarak platformlar

geliştirilerek ilerletilmiştir [37]. İlk olarak 2019 yılında sergilenen Çin tarafından geliştirilmiş JARI İnsansız Deniz Aracı askeri alanda çok amaçlı olarak kullanılabilir. 15 metre uzunluk 4.8 metre genişliğe sahip JARI insansız savaş gemisi maksimum 42 knot hıza ve 500 mil menzile sahiptir. Küçük boyutu ve çok amaca hizmet edebilmesi nedeniyle dikkat çekmiştir [38]. Ayrıca Çin’de üretilen dünyanın ilk otonom elektrikli konteyner taşıma gemisi Zhi Fei adıyla seferlerini yapmaktadır [39]. 1998-2000 yılları arasında Almanya Federal Eğitim, Araştırma ve Teknoloji Bakanlığı tarafından desteklenen MESSIN projesi ile yüksek doğruluklu konumlandırma ve ölçüm cihazlarının sığ sularda taşınması için prototip ASC Measuring Dolphin geliştirilmiştir [40]. İngiltere merkezli Roll-Royce Firması ile Finlandiya Devleti feribot seferlerini düzenleyen Finferries Firması tarafından geliştirilen otonom feribotlar başarıyla seferlerini tamamlamıştır ve geliştirilen otonom yanaşma sistemi sayesinde limana yanaşabilmiştir. Ayrıca Roll-Royce Firması tarafından uzaktan kontrollü ve tam otonom gemiler için çeşitli navigasyon sistemleri geliştirilmesiyle birlikte çeşitli projeler (AAWA, SVAN) yürütülmektedir [41]. Dünyanın ilk otonom elektrikli kargo gemisi Norveç üretimi Yara Birkeland mürettebatsız olarak 2022 yılı kasım ayında ilk seyrini Horten’den Oslo’ya doğru Norveç kıyıları boyunca hareket ederek tamamladı. Hayalet gemi olarak da bilinen Yara Birkeland, lityum pilleri İsveç’ten temin etmektedir ve çevreci olması öne çıkan özelliklerindedir [42]. Japon Yamaha Firması tarafından geliştirilen UMV-H İnsansız Deniz Aracı 40 Knot hızlara erişebilen yüksek hızlı jet motoruna sahiptir. Keşif gözetleme gibi görevleri yerine getirebilmesi için üzerinde sualtı kamera ve sonar sistemi mevcuttur. UMV-O İnsansız Deniz Aracı da aynı özellikleri üzerinde barındırmasının yanı sıra okyanus ortam koşulları için üretilmiştir [43]. İsrail menşeli Rafael Firması’na ait Protector isimli insansız deniz aracı kuvvet koruma, keşif/gözetleme, mayın harbi ve elektronik harp maksatlı kullanılabilir. Yine, İsrail firması Elbit tarafından geliştirilen Stingray isimli insansız deniz aracı 40 Knot sürat ve 8 saatlik görev süresine erişebilmektedir [33].

Görüldüğü üzere tarih boyunca birçok ülke tarafından gerek ticari gerekse savunma alanlarında otonom gemilerle ilgili projeler geliştirilmektedir. Böylelikle insan kaynaklı hataları en aza indirmek, hatalardan kaynaklı can ve mal kayıplarını azaltmak amaçlanmaktadır.

### 2.1.2. Türkiye'nin İnsansız Deniz Araçları

Aselsan tarafından geliştirilen Albatros-S İnsansız Deniz Araçları sürü otonom sistemine sahiptir. Sürü olarak tam otonom bir şekilde düzenli hareket edebilen Albatros-S İnsansız Deniz Araçları, çeşitli sürü formasyonlarında verilen görevleri yerine getirmektedir [44].



Şekil 2.1 : Albatros-S İnsansız Deniz Aracı [45].

Albatros-S İnsansız Deniz Aracına ait görüntü Şekil 2.1'de gösterilmiştir. Ayrıca Albatros-S'e ait teknik bilgiler Tablo 2.1'de gösterilmiştir.

Tablo 2.1 : Albatros-S Teknik Özellikler

Özellik	Değeri
Uzunluk :	7.20 metre
Genişlik :	2.00 metre
Ağırlık :	1995 kg
Hız :	40 Knot
Seyir Menzili :	200 deniz mili
Çalışma Süresi :	10+ saat
Faydalı Yük Kapasitesi :	250+ kg
Tahrik Sistemi :	Kuyruklu İçten Takma Dizel Motor

Ares Tersanesi ve Meteksan Savunma tarafından geliştirilen silahlı insansız deniz aracı (SİDA) ULAQ 2020 yılında ortaya konmuştur. 2021 yılında Umtas ve Cirit yerli füzelerimizin atış testlerini icra etmiştir. İstihbarat toplama, mayın avlama, denizaltı savunma harbi, yangın söndürme ve insani yardım/tahliye gibi görevlerde kullanılabilir [46].



Şekil 2.2 : ULAQ SİDA [47].

ULAQ silahlı insansız deniz aracına ait görüntü Şekil 2.2’de ve teknik bilgiler Tablo 2.2’de gösterilmiştir. Dearsan Tersanesi’nin geliştirdiği SALVO SİDA ve Yonca-Onuk Tersanesi Havelsan işbirliğiyle üretilen SANCAR SİDaları ULAQ SİDA’ya benzer özellik ve amaçlar için üretilmiş diğer silahlı insansız deniz araçlarındandır.

Tablo 2.2 : ULAQ Teknik Özellikler

Özellik	Değeri
Uzunluk :	7.20 metre
Genişlik :	2.00 metre
Ağırlık :	1995 kg
Hız :	40 Knot
Seyir Menzili :	200 deniz mili
Çalışma Süresi :	10+ saat
Faydalı Yük Kapasitesi :	250+ kg
Tahrik Sistemi :	Kuyruklu İçten Takma Dizel Motor

Doğuş Üniversitesi tarafından geliştirilen DOĞUŞ-USV, enerji kaynağı olarak güneş enerjisini kullanmaktadır. Keşif ve gözetleme görevlerini yerine getirmesi istenen İDA'nın mümkün olabilecek en uzun süre denizde kalması amaçlanmıştır. Üzerinde bulunan stereo kamera ile alınan görüntüler işlenerek cisimler tanımlanmakta ve mesafeleri ölçülmektedir [48]. Doğuş-USV'ye ait görüntü Şekil 2.3'te gösterilmiştir.



Şekil 2.3 : DOĞUŞ-USV [49].

Doğuş-USV'ye ait teknik bilgiler Tablo 2.3'te gösterildiği gibidir.

Tablo 2.3 : DOĞUŞ-USV Teknik Özellikler

Özellik	Değeri
Uzunluk :	3.30 metre
Genişlik :	1.51 metre
Ağırlık :	256 kg
Hız :	16 Knot
Güç :	5 HP
Enerji :	Güneş Enerjisi
Batarya Kapasitesi :	100 ah (her biri)
Batarya Adeti :	4
Araç Denetleyicisi :	Arduino Mega 2560



Global Teknik şirketi tarafından TÜBİTAK desteği alınarak üretilen Globida İnsansız Deniz Aracı keşif, gözetleme, savunma amaçlı kullanılabilir. Üzerine çeşitli radar, sualtı kamerası, robot kolları, hafif makineli silah monte edilebilir [50]. Globida İnsansız Deniz Aracı'na ait görüntü Şekil 2.4'te gösterilmiştir.



Şekil 2.4 : GLOBİDA [51].

Globida İnsansız Deniz Aracı'nın teknik özellikleri Tablo 2.4'te gösterilmiştir [52].

Tablo 2.4 : GLOBİDA Teknik Özellikler

Özellik	Değeri
Uzunluk :	3.95 metre
Genişlik :	1.24 metre
Yükseklik :	1.38 metre
Ağırlık :	300 kg
Hız :	30 Knot
Görev Süresi :	10 saat
Yakıt :	Benzin

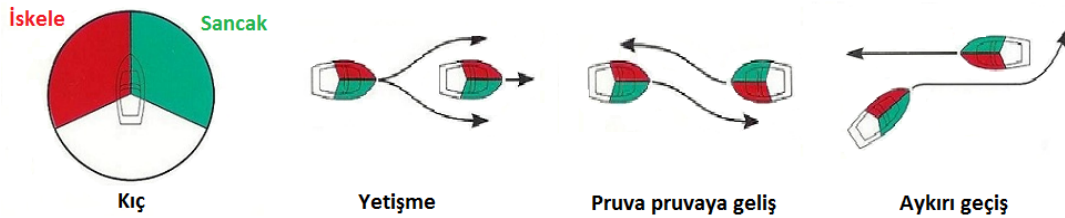
## 2.2. Denizde Çatışmayı Önleme Yönergesi

COLREG , Uluslararası Denizcilik Örgütü (IMO) tarafından hazırlanmış ve 1972 yılında kabul edilmiştir [53]. Bu metin ülkemizde karşılığı DÇÖY olarak 1978 yılında resmi gazetede yayımlanmıştır. Bu yönerge, gemilerin seyir esnasında diğer gemiler ve deniz araçlarıyla etkileşimlerini düzenleyerek emniyeti sağlar [54]. Uluslararası denizcilikte gemilerin çatışmalarını önlemek amacıyla nasıl manevra yapmaları gerektiğini, hangi uyarı ve durum belirtir işaretleri vereceklerini belirten deniz trafiğini düzenleyen kurallardır [55].

### 2.2.1. DÇÖY Temel Manevralar

DÇÖY, gemilerin çatışma durumunda yapabilecekleri 3 temel manevra durumundan bahsetmektedir. Bunlar; yetişme, pruva pruvaya geliş ve aykırı geçiş şeklinde adlandırılmıştır.

Yetişme durumu senaryosunda bir geminin herhangi bir başka gemiye yetişmesi durumunda yetişilen geminin yolundan ayrılması gerekmektedir (Kural 13). Eğer iki gemi birbirlerine karşılıklı olarak hareket ediyor ve çatışma riski söz konusu ise bu senaryo pruva pruvaya geliş durumudur. Böyle bir senaryoda her iki gemi de diğer gemiyi iskele tarafına alması ve rotasını sancağa doğru çevirmesi gerekmektedir (Kural 14). Herhangi iki teknenin birbiriyle çatışma tehlikesi oluşturacak şekilde rotalarının çakışması aykırı geçiş durumudur. Böyle bir senaryoda iki gemiden diğerini sancak tarafında gören geminin, yol vermesi ve diğer geminin pruvasından kaçınması gerekmektedir (Kural 15). DÇÖY gereği yapılması gereken temel manevralar Şekil 2.5' te gösterilmiştir.



Şekil 2.5 : DÇÖY temel manevraları [56].

## 2.3. Görüntü İşleme Teknikleri

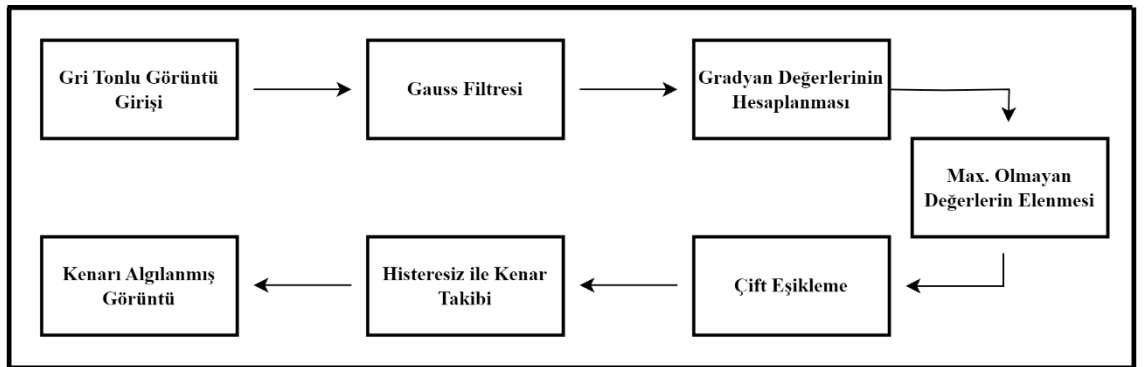
Görüntü işleme teknikleri otonom cihazlarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Çoğu zaman engelin tanımlanması, geometrik parametre tespiti ve mesafe ölçümü maksadıyla kullanılan görüntü işleme, bu çalışmada harita üzerinde iyileştirme yapılması amacıyla kullanılmıştır. Çalışmada, görüntü işleme tekniklerinden Canny Kenar Bulma ve Convex Hull (Dışbükey Kabuk) Çizdirme Yöntemleri kullanılmıştır.

### 2.3.1. Canny Kenar Tespit Yöntemi

Canny Kenar Tespit Yöntemi 1986 yılında John Canny tarafından optimal kenar tespiti operatörü olarak önerilmiştir [57]. Canny Kenar Tespit Yöntemi 5 aşamalı bir yöntemdir [58]:

- 1- Gauss filtresi kullanarak görüntüyü yumuşatma
- 2- Gradyan değerlerini hesaplama
- 3- Maksimum olmayan değerleri sindirme
- 4- Çift Eşikleme
- 5- Histerezis ile Kenar Takibi

Canny kenar tespit süreci Şekil 2.6'da blok şeması şeklinde gösterilmiştir.



Şekil 2.6 : Canny Kenar Tespit Süreci [59].

Gauss filtresi kullanarak görüntü üzerindeki gürültülerin giderilerek yumuşatılması amaçlanır. Bu işlem için 3x3 boyutunda bir çekirdek matris kullanılır. Gauss filtresi için kullanılan formül denklem 2.1'de gösterildiği gibidir.

$$G(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \times e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}} \quad (2.1)$$

Her bir piksel için gradyan değeri hesaplanırken Sobel operatörü kullanılmaktadır [60]. Sobel operatörü denklem 2.2’de gösterilen matrise göre hesaplanan gradyanın büyüklük değeridir.

$$S_x = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 2 \end{bmatrix} \quad S_y = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -2 & -1 \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

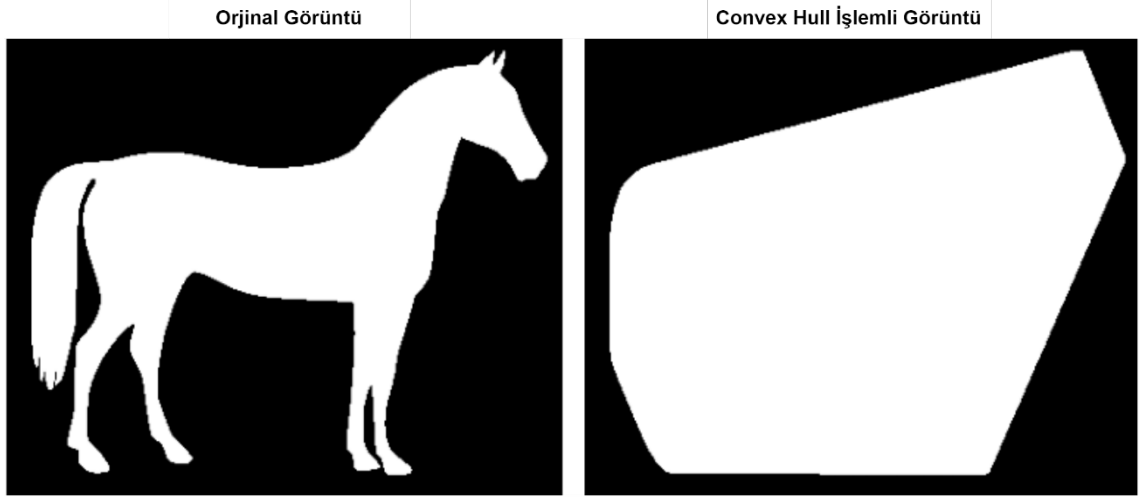
"Non-maximum suppression" adımı, maksimum olmayan kenar piksellerini ve kenar değeri olarak kabul edilmeyen pikselleri (0 olarak ayarlanan pikseller) ortadan kaldırmak için yapılır. Böylece ince bir kenar değeri elde edilir.

"Double thresholding" adımında piksel değerlerinin alt ve üst eşik değerlerinin altında, üstünde veya arasında olması durumuna göre 0, 1 değerini alması veya gri tonlamalı piksel değeri olması sağlanır.

Canny Kenar Tespiti Yönteminin son aşaması olan Histeresiz ile kenar takibi adımında üçlü kenara bağlı olmayan tüm kenarları bastırılmaktadır.

### 2.3.2. Convex Hull Yöntemi

Convex Hull Yöntemi görüntüleri işleme uygulamalarında görüntüdeki bir nesnenin şeklini kapsayacak şekilde esnek bir dışbükey kabuk oluşturma işlemidir. Düzlemdeki belirli bir nokta kümesini konveks poligon adı verilen çokgen bir kapsülle inşa etmek, geliştirmek, şekillendirmek, çevrelemek veya sarmalamakla ilgilidir. Konveks poligon, kenarlarındaki iki nokta arasında bulunan herhangi bir doğru parçasının poligonun dışına çıkmadığı basit bir yapıdır [61] . Şekil 2.7’de Convex Hull işleminden geçirilmiş bir görüntü gösterilmektedir.



Şekil 2.7 : Convex Hull işleminden geçirilmiş görüntü [62].

## 2.4. İnsansız Deniz Araçlarında Yol Planlama ve Engelden Kaçınma

Otonom araçların hareket planlamasındaki en önemli işlem basamağı yol planlamasıdır. İyi bir yol planlama algoritmasının kalitesi, çevresel faktörlerin etkisini en aza indirerek başlangıç ve hedef noktası arasında statik, dinamik engellere çarpmadan güvenli bir mesafede geçmek üzere en kısa yol ve süre ile seyir yapabilmesi kriterlerine bağlıdır [63].

Çalışmada otonom deniz araçlarının yol planlamasında sıklıkla kullanılan A\*, Parçacık Sürü Optimizasyon ve Yapay Potansiyel Alan algoritmalarından bahsedilmiştir.

### 2.4.1. A\* Algoritması

A\* algoritması yöntemi 1968 yılında Hart ve arkadaşları tarafından başlangıç ve bitiş noktası arasındaki en düşük maliyetli yolu bulmak için önerilmiştir [64]. Sezgisel algoritmalar içerisinde en az maliyetli yolu bulması nedeniyle popüler bir algoritmadır. Algoritma yol planlama problemlerinde uygulanmadan önce çevre ızgara tabanlı bitmap hücresel haritaya dönüştürülmesi gerekir. Başlangıç ve bitiş noktası belirlendikten sonra komşu hücreler engel olup olmadığı noktasında sorgulanır ve maliyet fonksiyonundan geçirilir [65].

İnsansız deniz araçlarında seyir rota planlaması için kullanımından önce çevredeki engellerin konumu elektronik harita (ECDIS) ve RADAR gibi cihazlar aracılığıyla tespit edilir. Daha sonra bu bilgi bir ızgara haritasına dönüştürülür. Oluşturulan ızgara

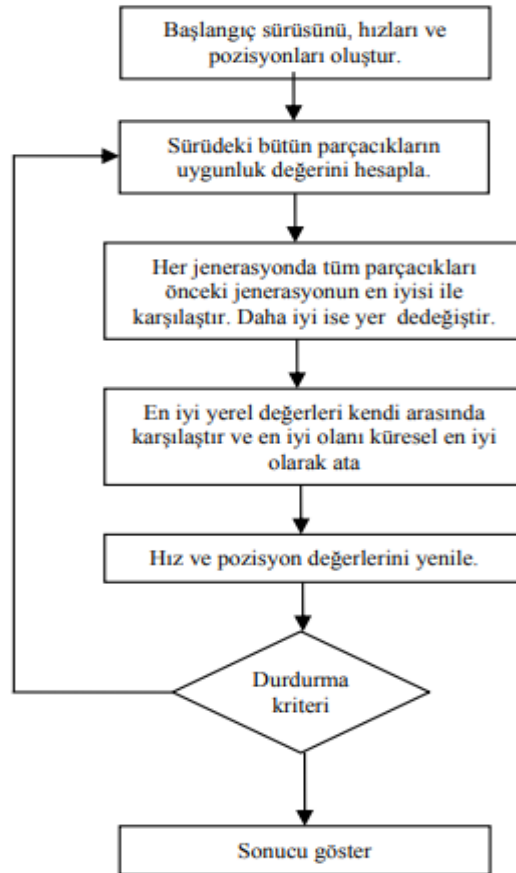
haritası başlangıç ve bitiş noktası seçilerek A\* algoritması çalıştırılır [66]. A\* algoritmasının maliyet fonksiyonu denklem 2.3'te gösterildiği gibidir.

$$F(n) = g(n) + h(n) \quad (2.3)$$

Burada  $F(n)$  n. komşu hücrenin toplam maliyet değeri,  $g(n)$  başlangıçtan n. hücreye olan gerçek uzaklık değeri ve  $h(n)$  ise hücreden hedefe olan sezgisel mesafe değerini ifade etmektedir.

#### 2.4.2. Parçacık Sürü Optimizasyon Algoritması

Kenedy ve Eberhart (1995) tarafından geliştirilen Parçacık Sürü Optimizasyon algoritması kuş veya balık gibi canlıların yiyecek aramak için sürü zekasıyla gösterdikleri davranışları incelenerek ortaya konmuştur [67]. Sürü popülasyonu içerisindeki her bir bireye parçacık denmektedir ve her parçacığın kendine ait hız ve konum bilgileri bulunmaktadır [68,69].



Şekil 2.8 : PSO Akış Diyagramı [68].

Şekil 2.8’de PSO algoritmasının akış diyagramı gösterilmiştir. Hız ve pozisyon değerlerinin yenilenmesi aşamasında kullanılan formül denklem 2.4 ve 2.5’te gösterildiği gibidir.

$$V_{t+1} = VW_t + c_1rand_1(p_{best} - p_t) + c_2rand_2(g_{best} - p_t) \quad (2.4)$$

$$p_{t+1} = p_t + V_{t+1} \quad (2.5)$$

Burada  $V_{t+1}$  yenilenen hız değerlerini  $p_{t+1}$  ise yenilenen pozisyon değerlerini verir. Ayrıca  $rand_1$  ve  $rand_2$  rastgele üretilmiş sayılar olmakla birlikte,  $c_1$  ve  $c_2$  ölçeklendirme değerleridir. Son olarak  $p_{best}$  yerel en iyi değerini,  $g_{best}$  global en iyi değerini ve  $W_t$  ise atalet ağırlık değerini temsil etmektedir.

### 2.4.3. Dinamik Pencere Yaklaşımı Algoritması

Fox ve arkadaşları tarafından 1997 yılında önerilen Dinamik Pencere Yaklaşımı algoritması, mobil robotların hareketlerinde engellerden kaçınabilmesi için ortaya konmuştur [69]. Algoritmada yol planlamanın belirlenmesinde ilk olarak robotun dinamik kısıtlılıkları içerisinde anlık açısal ve hız değerlerinden yola çıkılarak belirli zaman aralığındaki robotun ulaşabileceği hız değerlerinin kümesi elde edilir. Bu hız kümesi içerisinde engellere temas edenler elenir ve kalanlar denklem 2.6’da gösterilen  $G(V, w)$  amaç fonksiyonundan geçirilerek en iyi hedefe yönelik pozisyon, engellerle arasındaki mesafe ve en uygun hız değerinde olan seçilir [72,73].

$$G(V, w) = \sigma[\alpha * pozisyon(V, w) + \beta * mesafe(V, w) + \gamma * hiz(V, w)] \quad (2.6)$$

Burada  $pozisyon(V, w)$  robotun hedefe göre olan açısını temsil etmektedir. Engellerle robot arasında bırakılması istenen mesafeyi  $mesafe(V, w)$  ifadesi temsil etmektedir. Robotun bir yörünge boyunca ulaşabileceği hız değerini ise  $hiz(V, w)$  ifadesi temsil etmektedir.  $\alpha$ ,  $\beta$  ve  $\gamma$  değerleri birer sabittir ve  $\sigma$  fonksiyonu bir düzleştirme operatörü olarak işlev yapmaktadır.

#### 2.4.4. Yapay Potansiyel Alan Algoritması

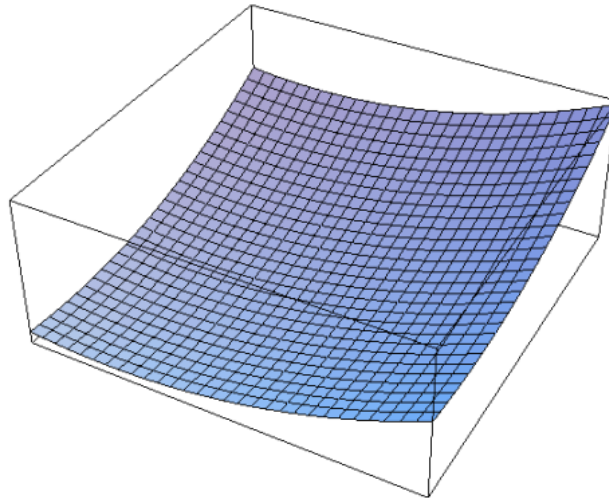
Khatib'in 1985 yılında ortaya koyduğu yöntem bir mobil robotun gitmek istediği hedef noktasının çekme kuvvetine ve alan içerisindeki engellerin itme kuvvetine maruz kalması, bu kuvvetlerin bileşkesi yönünde ilerlemesi yöntemini ele alır [70]. İtme, çekme kuvvetleri hedef ve engellerin oluşturduğu itme, çekme potansiyel alan fonksiyonlarının negatif gradyanları ile elde edilmektedir [71]. Çekici potansiyel alan değeri uzaklık ile doğru orantılı olarak artmaktadır ve denklem 2.7'de gösterilmiştir.

$$U_{att}(X) = \frac{1}{2}k_{att} \cdot d^2(X, X_g) \quad (2.7)$$

Denklem üzerindeki  $U_{att}(X)$  değeri çekici potansiyel alan fonksiyonunu temsil etmektedir ve  $k_{att}$  değeri çekici potansiyel alan sabitidir. Hedef ile araç arasındaki mesafe ise  $d(X, X_g)$  ile ifade edilmektedir. Bu fonksiyonun negatif gradyanı alınarak elde edilen  $F_{att}(X)$  çekici potansiyel alan kuvveti denklem 2.8'de gösterilmiştir.

$$F_{att}(X) = -\nabla U_{att}(X) = k_{att} \cdot d(X, X_g) \quad (2.8)$$

Çekici potansiyel alan kuvveti hedef ile araç arasındaki çizgi ile aynı doğrultudadır ve yönü hedefe doğrudur. Çekici potansiyel alan fonksiyonunun grafiği Şekil 2.9'da gösterilmiştir.



Şekil 2.9 : Çekici potansiyel alan fonksiyonu grafiği



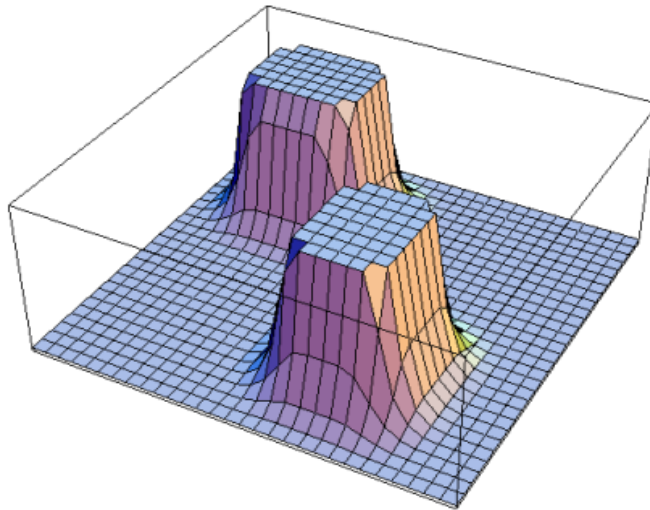
İtme potansiyel alan değeri engel ile araç arasındaki mesafe ile ters orantılıdır. Yani engel ile araç arasındaki mesafe kısaltıldıkça itme potansiyel alan fonksiyonunun değeri artmaktadır ve formülü denklem 2.9'da gösterilmiştir.

$$U_{rep}(X) = \begin{cases} \frac{1}{2}k_{rep} \left( \frac{1}{d(X, X_o)} - \frac{1}{d_0} \right)^2, & d(X, X_o) \leq d_0 \\ 0, & d(X, X_o) > d_0 \end{cases} \quad (2.9)$$

Denklem üzerindeki  $U_{rep}(X)$  ifadesi çekme potansiyel alan fonksiyonunu belirtmektedir ve  $k_{rep}$  itme potansiyel alan sabitidir. Engel ile araç arasındaki mesafe ise  $d(X, X_o)$  ile ifade edilmektedir. İtici potansiyel alanın etkili mesafesi başka bir ifadeyle engel emniyetli geçiş mesafesi  $d_0$  ile temsil edilmektedir.. İtme potansiyel alan kuvveti  $F_{rep}(X)$  itme potansiyel alan fonksiyonu  $U_{rep}(X)$ 'in negatif gradyanıdır ve denklem 2.10'da gösterildiği gibi formüle edilmektedir.

$$F_{rep}(X) = -\nabla U_{rep}(X) = \begin{cases} k_{rep} \left( \frac{1}{d(X, X_o)} - \frac{1}{d_0} \right) \frac{\nabla d(X, X_o)}{d^2(X, X_o)}, & d(X, X_o) \leq d_0 \\ 0, & d(X, X_o) > d_0 \end{cases} \quad (2.10)$$

İtici potansiyel alan kuvveti engel ile araç arasındaki çizgi ile aynı doğrultudadır ve yönü araca doğrudur. İtici potansiyel alan fonksiyonunun grafiği Şekil 2.10'da gösterilmiştir.



Şekil 2.10 : İtici potansiyel alan fonksiyonu grafiği

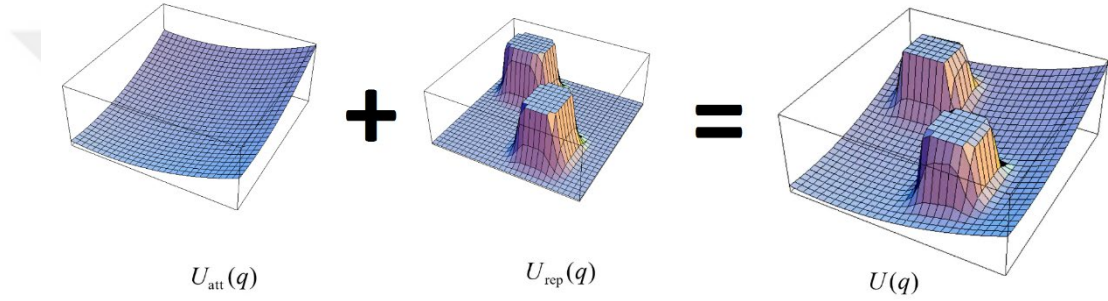
Yapay potansiyel alanın fonksiyonu itme ve çekme potansiyel alan fonksiyon değerlerinin toplamına eşittir (denklem 2.11).

$$U(X) = U_{att}(X) + U_{rep}(X) \quad (2.11)$$

Bu denklemin negatif gradyanının alınmasıyla elde edilen yapay potansiyel alan kuvveti  $F(X)$  denklem 2.12’de gösterildiği gibidir.

$$F(X) = F_{att}(X) + F_{rep}(X) \quad (2.12)$$

Yapay potansiyel alan fonksiyonun grafiği şekil 2.11’de gösterilmiştir.

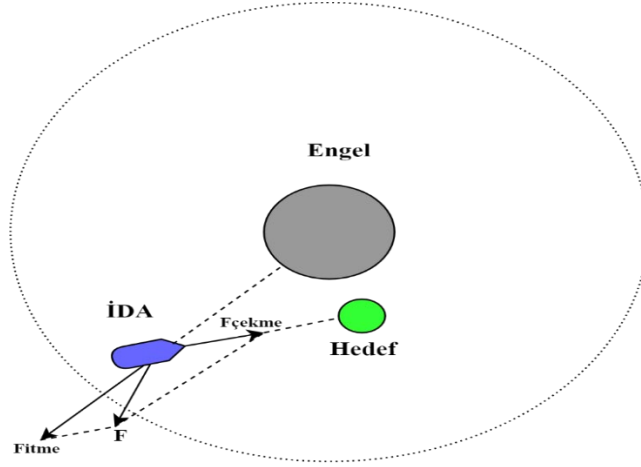


Şekil 2.11 : Yapay potansiyel alan fonksiyonu grafiği

Geleneksel yapay potansiyel alan algoritmasında karşılaşılan temel iki problem vardır: Bunlardan ilki, hedefin engele yakın olması problemidir. Araç, hedef noktasına çekme kuvveti ile yaklaşırken hedefin yakınındaki engelin uyguladığı itme kuvveti hedefin çekme kuvvetini geçmesi halinde araç hedefe ulaşamayacaktır. Diğeri ise algoritmanın yerel minimuma takılması problemidir [72]. Tez çalışmasında, sıklıkla karşılaşılan bu iki problem çözüme kavuşturulmuştur.

#### 2.4.4.1. Hedefin Engele Yakın Olması Problemi

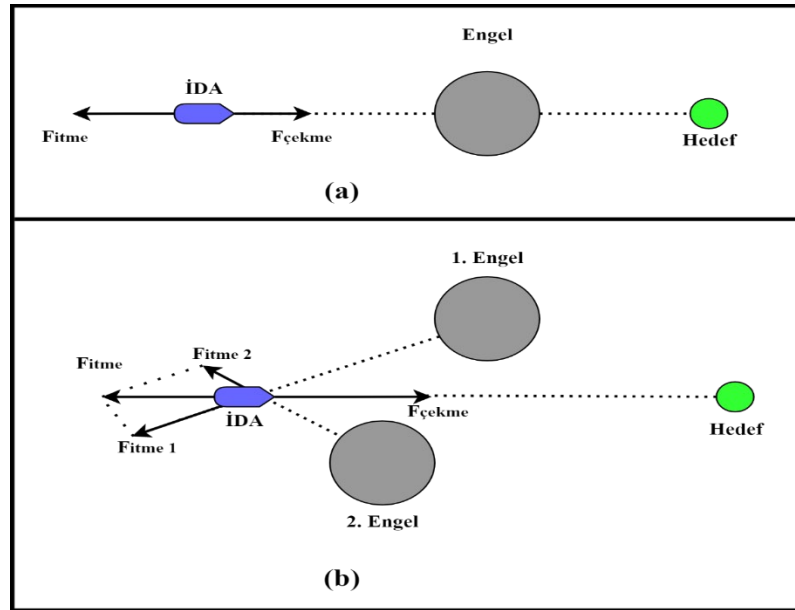
Hedefin herhangi bir engelin yakınında olması durumunda hedefe yaklaştıkça araç ile olan mesafe azalır dolayısıyla engele de yaklaşmış olur. Bu nedenle itme kuvveti, mesafe ile ters orantılı olduğundan artar. Çekme kuvveti ise mesafe ile doğru orantılı olarak azalır. Bu durumda araç hedefe ulaşamaz. Hedefin engele yakın olması probleminin örneği Şekil 2.12’de gösterilmiştir.



Şekil 2.12 : Hedefin engele yakın olması problemi

#### 2.4.4.2. Yerel Minimuma Takılma Problemi

Yerel minimuma takılma problemine temelde iki durum neden olur: Bunlardan ilki engel ile hedefin uyguladığı itme ve çekme potansiyel alan kuvvetlerinin aynı doğrultuda olması nedeniyle toplam bileşke kuvvet sıfıra doğru yakınsamaya başlar. Bu da hareketi kısıtlar. Diğer durumda ise birbirine yakın iki engel arasından hedefe ilerlemek isteyen araca engellerin uyguladığı itme potansiyel kuvvetlerin bileşkesi ile hedefin çekme potansiyel kuvvetinin aynı doğrultu üzerinde olması durumudur. Yerel minimuma takılma problem durumları Şekil 2.13'te (a) ve (b) olarak gösterilmiştir.



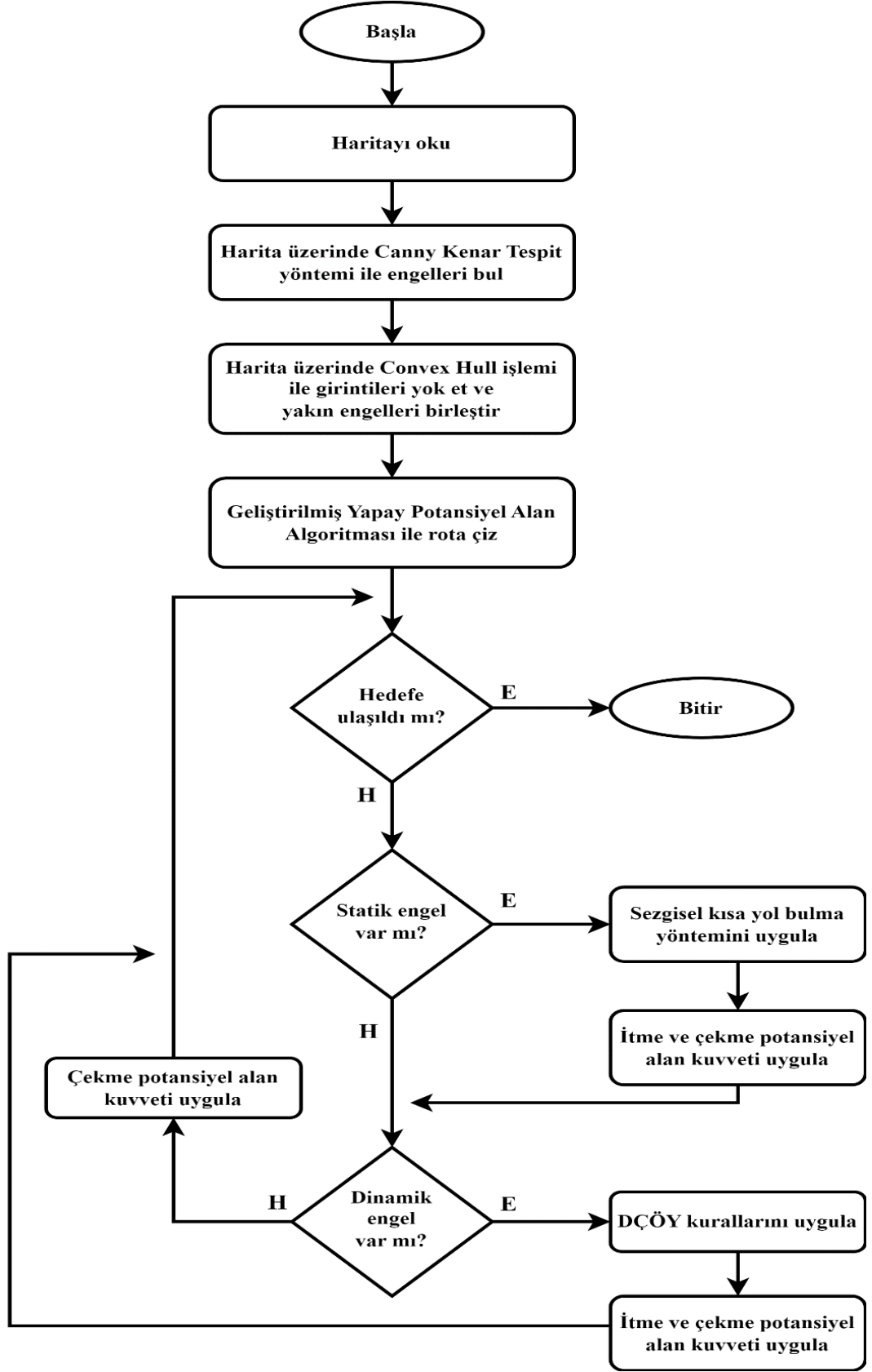
Şekil 2.13 : Yerel minimuma takılma problemi (a) İtme ve Çekme kuvvetinin aynı doğrultuda olması durumu (b) İki engel arasında kalması durumu

Çalışmada Şekil 2.13'te (a) ve (b) olarak gösterilen iki durum için de ayrı yöntemler geliştirilmiştir. İki durumda da ortak olan özellik itme ve çekme kuvvetlerinin aynı doğrultu üzerine düşmesidir. Bu durumda, araç ilerledikçe çekme kuvvetinin mesafe ile doğru orantılı olarak azalması ve itme kuvvetinin ise ters orantılı olarak artması nedeniyle araç hedefe doğru ilerleyemeyip durma noktasına gelmektedir.



### **BÖLÜM 3. SİSTEM TASARIMI**

Çalışmada insansız bir deniz aracının başlangıç ile hedef noktası arasında engellere çarpmadan dinamik bir yol planlaması yapabilmesi amacıyla çeşitli aşamalar katedilerek algoritma geliştirilmiştir. İlk olarak Google haritalar aracılığıyla göl haritasının üzerinde kara parçaları bulunan bir kesiti alınmıştır. Alınan harita görüntüsü bir takım görüntü işleme tekniği aşamalarından geçirilerek algoritmanın haritayı algılayabilmesi sağlanmıştır. Görüntü işleme kullanılması, algoritmanın yol planlamasında karşılabileceği muhtemel problemlerin aşılması için algoritmanın geliştirilmesine katkı sağlamıştır. DWA algoritması ile bir yol planlaması yapılarak süre ve maliyet açısından incelenmesi gerçekleştirilmiştir. Geliştirilen yapay potansiyel alan algoritması üzerinde, belirlenen çeşitli başlangıç ve hedef noktaları arasında statik ve dinamik engellerin bulunduğu senaryolar ile deneysel çalışmalar simülasyon ortamında gerçekleştirilmiştir. Algoritmanın geliştirilme aşamasında DÇÖY’de belirtilen temel 3 manevra kuralı dikkate alınarak dinamik engeller için rota planlaması gerçekleştirilmiştir. Geliştirilen yapay potansiyel alan algoritmasının akış diyagramı Şekil 3.1’de gösterilmiştir.



Şekil 3.1 : Yol planlama akış diyagramı

### 3.1. Kullanılan Haritalar

Çalışmada Bursa'da bulunan Uluabat Gölü'nün Google Haritalar üzerinden 501x544 piksel uzunluğundaki görüntüsü alınmıştır. Uluabat Gölü harita görüntüsü Şekil 3.2'de görülmektedir ve algoritmada kullanılmadan önce birtakım görüntü işleme aşamalarından geçirilmiştir.



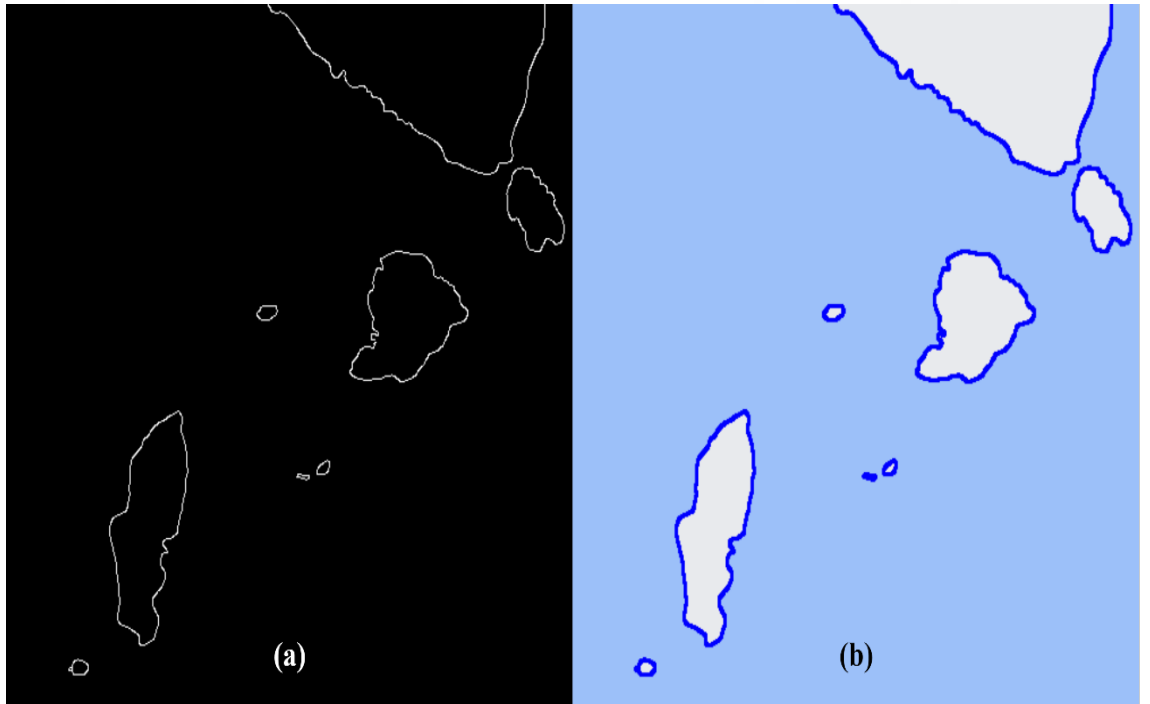
Şekil 3.2 : Uluabat Gölü harita görüntüsü

#### 3.1.1. Canny Kenar Tespiti ile Engellerin Kenarlarını Bulma

Çalışmada rota planlama yapılabilmesi için ortamda bulunan engellerin algoritma tarafından tanınması gerekmektedir. Bu nedenle harita üzerinde bulunan engellerin kenarlarının bulunması gerekir. Öncelikle harita görüntüsü gri tonlu görüntüye çevrilir. Gri tonlu görüntü Canny Kenar Tespit operatörü tarafından alınarak işlenir ve sonucunda engellerin kenarları bulunmuş görüntü elde edilir. Gri tonlu harita görüntüsü, Şekil 3.3'te ve kenarları bulunmuş harita görüntülerinin çıktısı, Şekil 3.4'te gösterilmiştir.



Şekil 3.3 : Gri Tonlu Uluabat Gölü harita görüntüsü

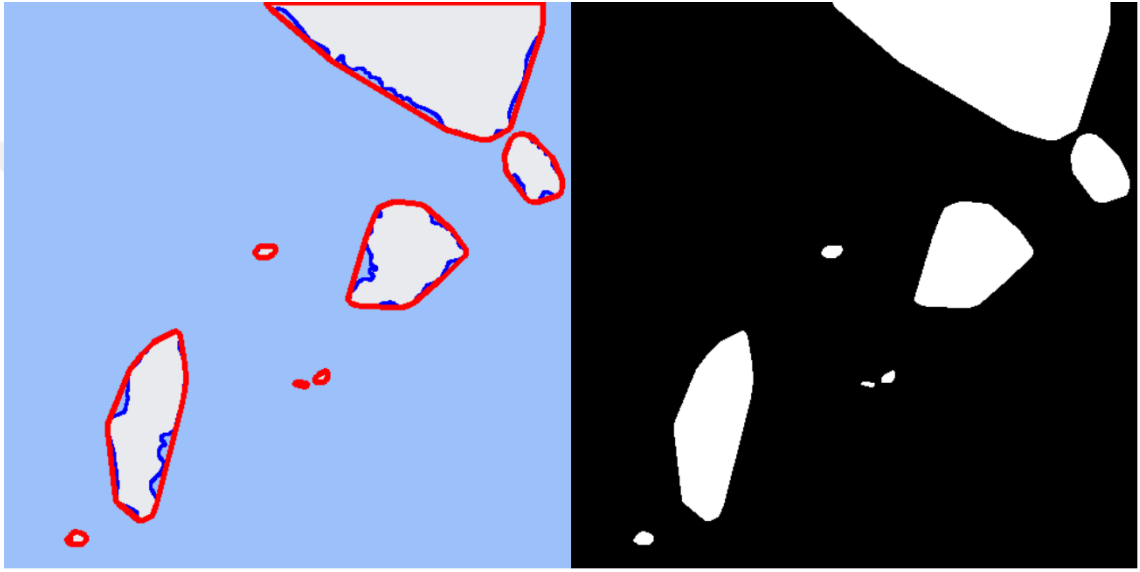


Şekil 3.4: Engellerin kenarları tespit edilmiş görüntü (a) Canny Kenar Tespit Operatörü çıktı görüntüsü (b) Uluabat Gölü Haritası kara parçalarının kenarları tespit edilmiş görüntü



### 3.1.2. Convex Hull Yöntemi ile Kara Parçalarını Düzenleme

Çalışmada Convex Hull yöntemi iki önemli amaç için kullanılmıştır: Bunlardan ilki, kara parçaları üzerindeki girintilerin yok edilmesi işlemidir. Bu işlemin amacı, insansız deniz aracının hedef noktasına ilerlerken önüne bir kara parçası çıktığında engelin üzerindeki girintiler nedeniyle oluşabilecek zaman ve yol maliyeti açısından kayıpları önlemektir. Ayrıca araç girinti içerisine yöneldiğinde, yerel minimuma takılma riski yüksektir. Şekil 3.5'te girintileri yumuşatılmış harita görüntüleri gösterilmektedir.



Şekil 3.5: Girinti ve çıkıntıları yumuşatılmış görüntü

Convex Hull yönteminin kullanım amaçlarından diğeri ise birbirine  $d_0$  emniyetli geçiş mesafesinden yakın kara parçalarını birleştirerek algoritmaya destek olmaktır. İnsansız deniz aracı birbirine yakın iki engel arasından geçebilmek için hiç çaba sarfetmeden doğrudan etrafından dolaşmanın yoluna bakacaktır. Böylelikle hem süre hem de maliyet açısından kazanç elde edilebildiği gibi yerel minimuma takılma riski de azalacaktır. Convex Hull yöntemi ile birleştirilmiş kara parçalarının yer aldığı görüntü şekil 3.6'da gösterilmiştir. Bu işlemin sonucunda, elde edilen binary (0,1) harita görüntüsü üzerinde kenarların tespiti tekrar yapılarak algoritmaya gönderilir. Görüntü işleme sonucu algoritmaya gönderilen kenarları tespit edilmiş ve convex hull işleminden geçirilmiş son harita görüntüsü Şekil 3.7'de görülmektedir.



Şekil 3.6: Kara parçaları birleştirilmiş görüntü



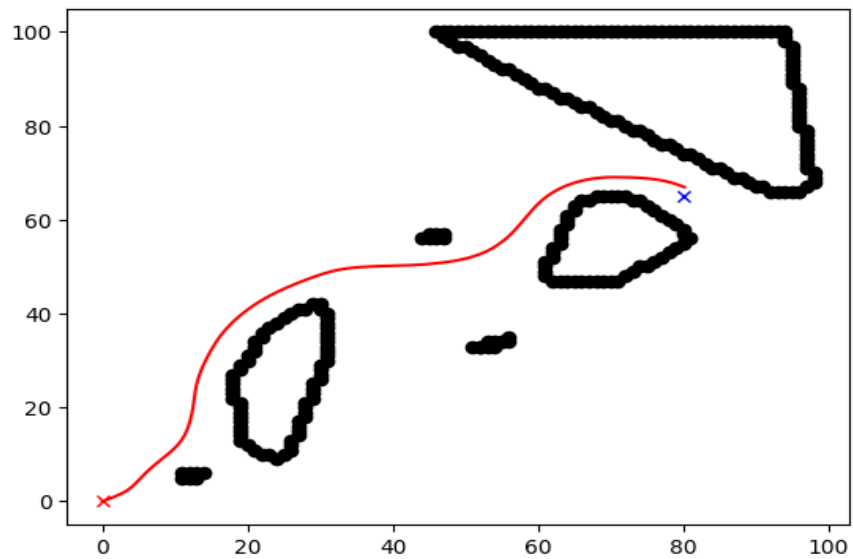
Şekil 3.7: Algoritmaya gönderilen görüntü işlemenin son çıktısı

### 3.2. Dinamik Pencere Yaklaşımı Algoritmasıyla Yol Planlama

Görüntü işleme sonucunda elde edilen harita görüntüsü DWA algoritmasına verilmeden önce yeniden boyutlandırma işlemi uygulanarak 100x100 piksel uzunluğuna düşürülmüştür. Başlangıç noktası [0,0] ve hedef noktası [80,65] şeklinde belirlenerek program çalıştırıldığında yol planlaması işlemi toplamda 40 sn sürmüştür ve maliyeti 134 piksel adıdır. Elde edilen yol planlamasının görüntüsü, Şekil 3.8’de ve DWA algoritmasının parametre değerleri, Tablo 3.1’de gösterilmiştir. DWA algoritması için kullanılan yazılımın kodları Github Sitesi’nden hazır alınarak algoritma parametre değerleri ve kullanılan harita değiştirilmiştir [73].

Tablo 3.1 : DWA parametreleri

Parametre	Değeri
Maksimum Hız :	10 m/s
Minimum Hız :	0 m/s
Maksimum Açısal Hız :	25 rad/s
Maksimum İvme :	4 m/s <sup>2</sup>
Maksimum Açısal İvme :	4 rad/s <sup>2</sup>
$\alpha$ :	0.15
$\beta$ :	4
$\gamma$ :	4



Şekil 3.8: DWA ile rota planlaması grafik gösterimi

### 3.3. Geliştirilmiş Yapay Potansiyel Alan Algoritması ile Yol Planlama

Geleneksel yapay potansiyel alan algoritması ile yol planlamada sıklıkla karşılaşılan iki problem geliştirilen yöntemle giderilmiştir. Bunlardan ilki, hedefin engele yakın olması nedeniyle hedefe ulaşamama diğeri ise yerel minimuma takılma problemidir.

#### 3.3.1. Hedefin Engele Yakın Olması Probleminin İyileştirilmesi

Geliştirilmiş yöntemle aracın engelin yakınındaki bir hedefe yaklaşması durumunda itici potansiyel alana mesafe düzenleyici faktör eklenmektedir. Böylece, aracın hedefe yaklaşması durumunda itici kuvvetin hızla artmasının önüne geçilmesi amaçlanmıştır [24]. Böylelikle yeni itici potansiyel alan fonksiyonu denklem 3.1’de gösterildiği gibi tanımlanabilir.

$$U_{rep}(X) = \begin{cases} \frac{1}{2}k_{rep} \left( \frac{1}{d(X, X_o)} - \frac{1}{d_0} \right)^2 d^n(X, X_g) , & d(X, X_o) \leq d_0 \\ 0 , & d(X, X_o) > d_0, \end{cases} \quad (3.1)$$

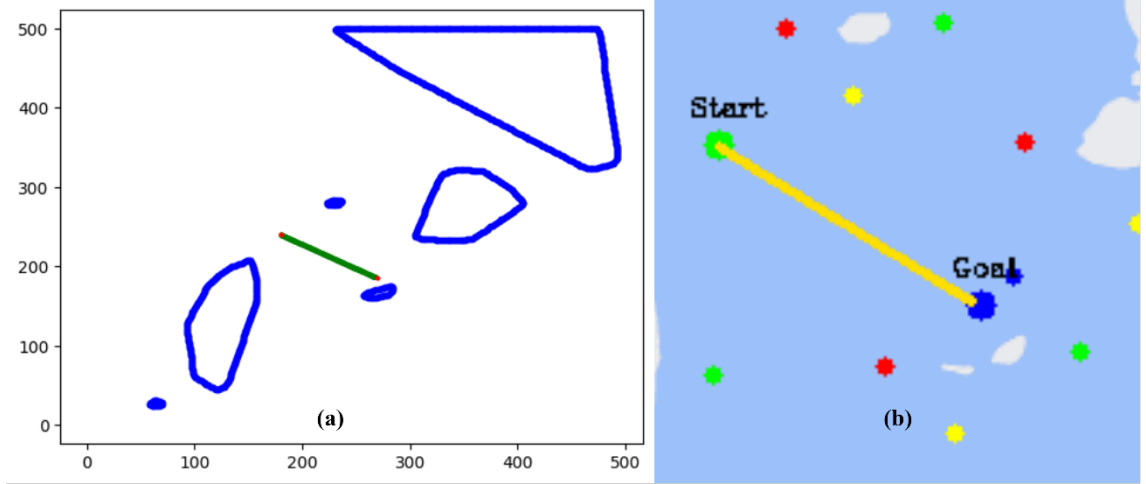
İtme potansiyel alanı fonksiyonunun negatif gradyanı alınmasıyla yeni itme potansiyel alan kuvveti denklem 3.2, 3.3 ve 3.4’te gösterildiği gibi olacaktır.

$$F_{rep}(X) = -\nabla U_{rep}(X) = \begin{cases} F_{rep1}(X) + F_{rep2}(X) , & d(X, X_o) \leq d_0, \\ 0 , & d(X, X_o) > d_0 \end{cases} \quad (3.2)$$

$$F_{rep1}(X) = k_{rep} \left( \frac{1}{d(X, X_o)} - \frac{1}{d_0} \right) \frac{d^n(X, X_g)}{d^2(X, X_o)} \quad (3.3)$$

$$F_{rep2}(X) = \frac{n}{2} k_{rep} \left( \frac{1}{d(X, X_o)} - \frac{1}{d_0} \right)^2 d^{n-1}(X, X_g) \quad (3.4)$$

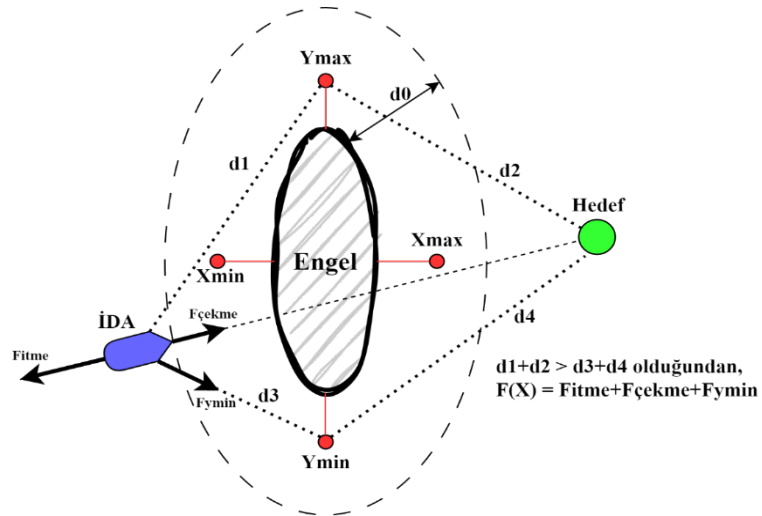
Önerilen yöntemle gerçekleştirilen harita üzerinde başlangıç [180,240] ve hedef [270,185] noktası arasındaki yol planlama görüntüsü, Şekil 3.9’da gösterilmiştir.



Şekil 3.9 : Hedefin engele yakın olması problemi çözümü (a) Grafiks gösterim (b) Harita gösterim

### 3.3.2. Yerel Minimuma Takılma Probleminin İyileştirilmesi

Geliştirilen yöntemle itme ve çekme kuvvetinin aynı doğrultuda olması durumunu önlemek amacıyla, aracın bir engelle karşılaşması halinde engelin tüm minimum ve maksimum noktaları tespit edilerek aracın yaklaştığı yöne göre min. veya max. noktalarının birinden araca ilave çekme kuvveti uygulanır. Hedef saptırarak engelin uç noktalarının birinden ikinci bir çekme kuvveti uygulanır. Böylelikle araç üzerindeki kuvvetlerin bileşkesi hiçbir zaman aynı doğrultu üzerine toplanmayacağından yerel minimuma düşmeyecektir. Araca uygulanan ikinci çekme kuvvetinin hangi noktadan uygulanması gerektiği hususunda ise tamamen sezgisel bir kısa yol bulma yaklaşımı uygulanmıştır. Önerilen yöntemin görsel olarak ifadesi Şekil 3.10'da gösterilmiştir.



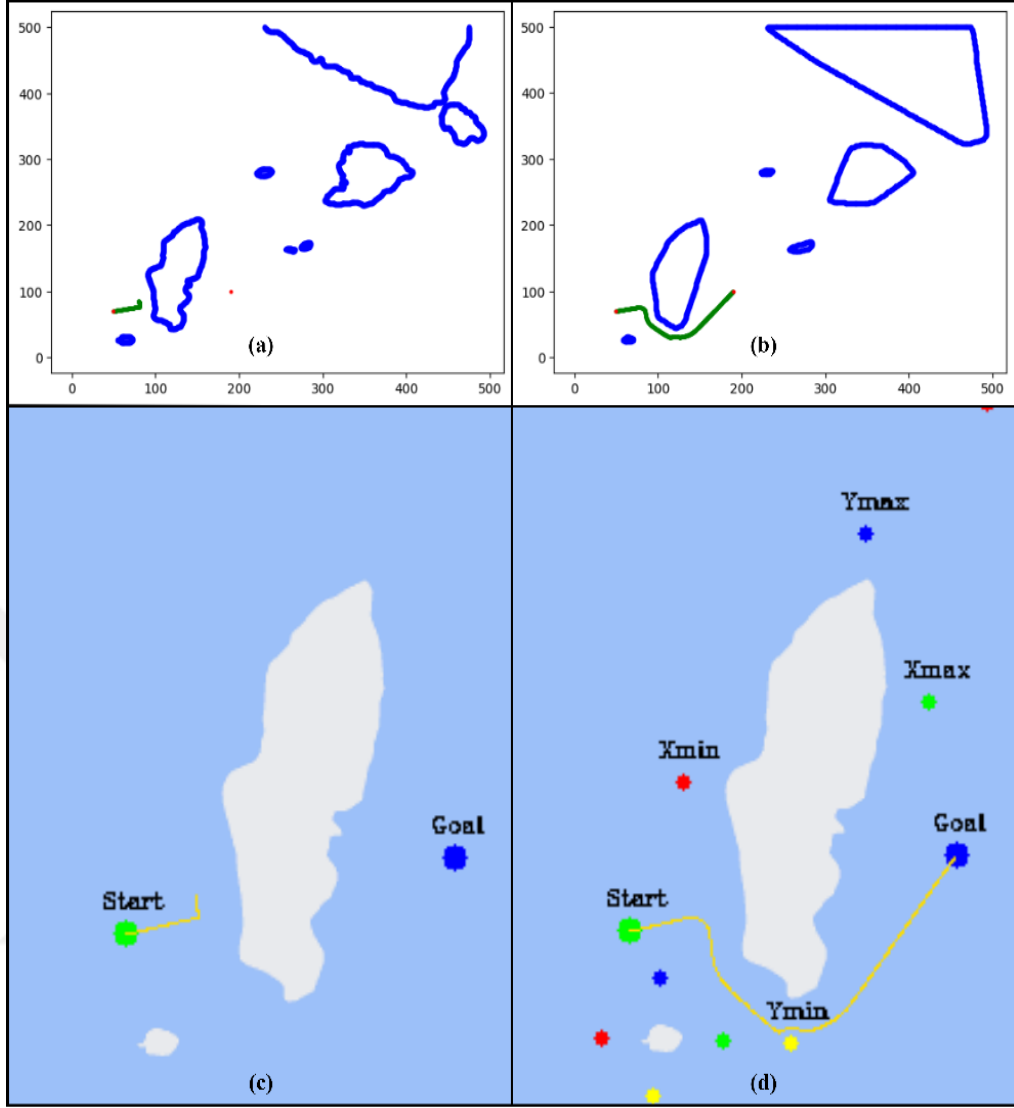
Şekil 3.10 : Yerel minimum problemi çözümü

Şekil 3.9’da görüldüğü üzere insansız deniz aracı engele sol taraftan  $d_0$  emniyetli geçiş mesafesi kadar yaklaşmıştır. Bu noktaya gelene kadar, araç üzerine sadece çekme kuvveti etki etmektedir. Burada  $d_1$  uzunluğu araç ile  $Y_{max}$  noktası arasındaki öklid mesafesini,  $d_2$  uzunluğu  $Y_{max}$  ile hedef noktası arasındaki öklid mesafesini,  $d_3$  uzunluğu araç ile  $Y_{min}$  noktası arasındaki öklid mesafesini ve  $d_4$  mesafesi ise  $Y_{min}$  ile hedef noktası arasındaki öklid mesafesini ifade etmektedir. Engele  $d_0$  mesafesi kadar yaklaşıldığından sonra araca geleneksel yapay potansiyel alan yaklaşımı uygulandığında, görüldüğü üzere aynı doğrultu üzerine düşen itme ve çekme kuvvetleri nedeniyle yerel minimum problemi ortaya çıkmaktadır. Ancak önerilen yöntemle araca  $Y_{min}$  noktasından da çekme kuvveti uygulanmaktadır.  $Y_{min}$  noktasından çekme kuvveti uygulanmasının nedeni görselden de anlaşıldığı üzere  $d_3$  ve  $d_4$  toplamının  $d_1$  ve  $d_2$  toplamından küçük olmasıdır. Böylece araç hem yerel minimuma takılmadan hem de daha kısa olan güzergah üzerinden engeli aşarak hedefe doğru ilerleyecektir. Geliştirilen yöntemin matematiksel ifadesi denklem 3.5 ve 3.6’da gösterilmiştir.

$$F_{uçatt}(X) = \begin{cases} k_{att2} \cdot d(X, X_{uç}) , & d(X, X_o) \leq d_0 \\ 0 , & d(X, X_o) > d_0, \end{cases} \quad (3.5)$$

$$F(X) = F_{att}(X) + F_{uçatt}(X) + F_{rep}(X) \quad (3.6)$$

Burada  $X_{uç}$  ifadesi, uygulanan sezgisel kısa yol bulma yaklaşımı sonucunda belirlenen engel üzerindeki  $Y_{min}$ ,  $Y_{max}$ ,  $X_{min}$  ve  $X_{max}$  noktalarından uygun olanını temsil etmektedir ve  $F_{uçatt}(X)$  ifadesi bu noktadan uygulanan çekme kuvvetinin değeridir. Çalışmada kullanılan harita üzerinde yerel minimum probleminin çözümü için yapılan simülasyon görüntüleri, Şekil 3.11’de gösterilmiştir.

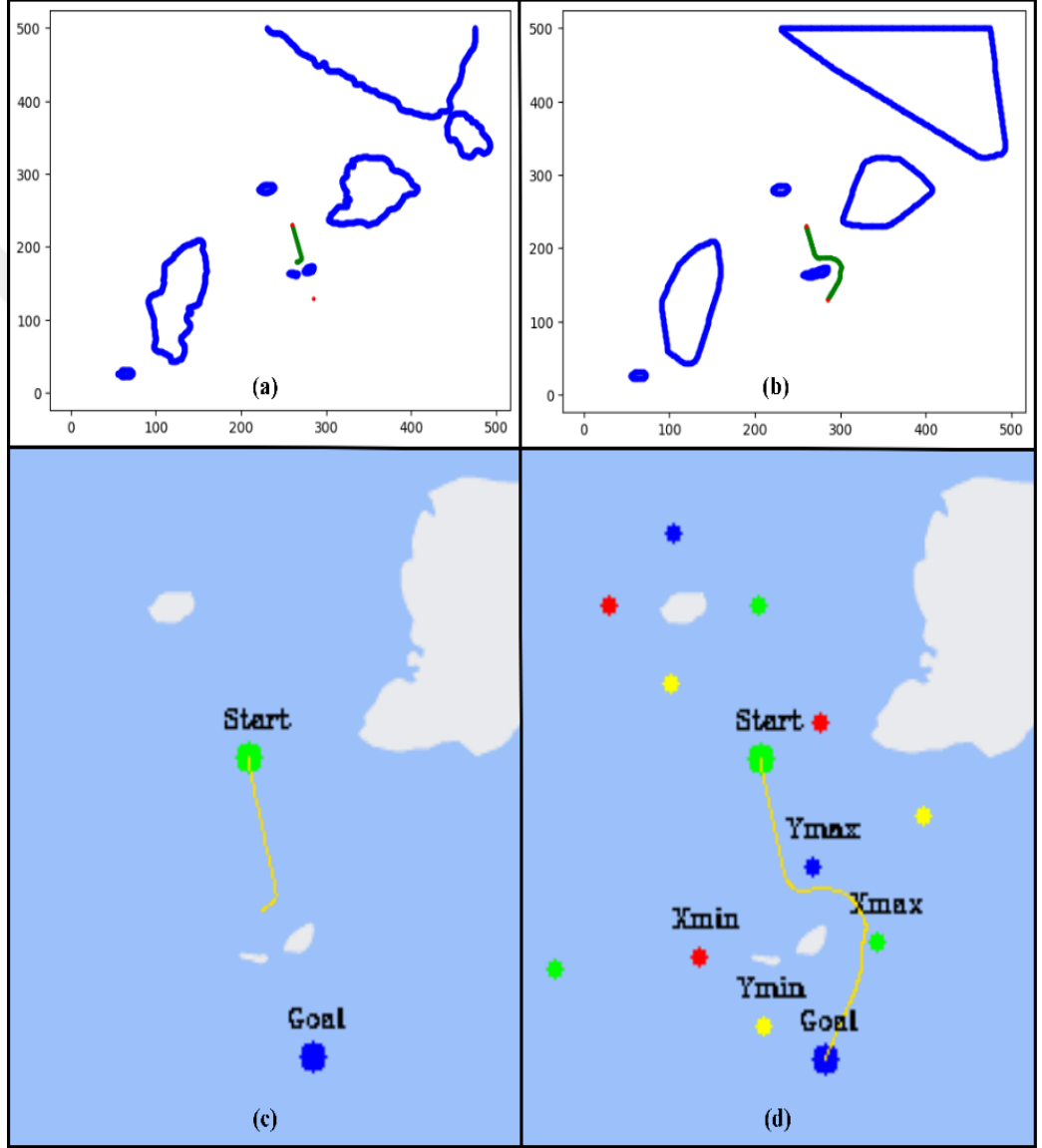


Şekil 3.11 : Yerel minimum probleminin çözümü ve karşılaştırma görüntüleri (a) Geleneksel APF ile yerel minimum probleme takılma grafik gösterimi (b) Geliştirilmiş APF ile yerel minimum problemi çözümü grafik gösterimi (c) Geleneksel APF ile yerel minimum probleme takılma harita gösterimi (d) Geliştirilmiş APF ile yerel minimum problemi çözümü harita görüntüsü

Şekilde görüldüğü üzere önerilen yöntem, yerel minimuma takılmadan engeli aşmayı başarmış ve hedefe ulaşmıştır. Ancak geleneksel yöntemde yerel minimuma takılması nedeniyle engeli aşamamış ve rotada bir ilerleme yapamamıştır.

Önerilen yöntem, tek bir engel karşısında başarılıdır ancak Şekil 2.13 (b)'de gösterilen iki yakın engelin arasından geçme durumlarında etkili değildir. Böyle durumlar için görüntü işleme tekniklerinde bahsedilen Convex Hull işlemi, harita üzerinde bulunan tüm engeller üzerindeki girintilerin yumuşatılması ve birbirine  $d_0$  emniyetli geçiş mesafesinden daha yakın olan tüm engelleri birleştirmek amacıyla uygulanması yoluna

gidilmiştir. Bu sayede insansız deniz aracı birbirine emniyetli geçiş mesafesinden ( $d_0$ ) daha yakın engeller arasından geçme teşebbüsünde bulunmadan rota çizecektir. Aynı zamanda tek engel ile karşılaşması durumunda engel üzerindeki girintilerden kaynaklı yol ve zaman kaybına neden olmayacaktır. Önerilen yöntemin yerel minimum problemi karşısındaki etkinliği, harita üzerinde yapılan simülasyon deneyleri ile doğrulanmıştır ve elde edilen görüntüler, Şekil 3.12’de gösterilmiştir.



Şekil 3.12 : Geliştirilmiş APF yönteminin yerel minimum problemi çözümü (a) Geleneksel APF'nin yerel minimuma takılmasının grafiksel gösterimi (b) Geliştirilmiş APF ile yerel minimum probleminin çözümü grafiksel gösterimi (c) Geleneksel APF'nin yerel minimuma takılmasının harita gösterimi (d) Geliştirilmiş APF ile yerel minimum probleminin çözümü harita gösterimi



Şekilden de anlaşıldığı üzere geleneksel yapay potansiyel alan yaklaşımında, iki engelin arasında yerel minimuma takıldığından rota çizimi ilerleyememiştir. Geliştirilen yöntemle iki engel, görüntü işleme tekniği kullanılarak tek bir engele dönüştürülmüş ve yerel minimuma takılma problemi ortadan kaldırılmıştır.

### 3.3.3. Dinamik Engelli Ortamda Engellerden Kaçınma

Yapay potansiyel alan algoritması kullanarak hareketli engellerin bulunduğu ortamda DÇÖY'e göre manevra yapabilen algoritma geliştirilmiştir. Hareketli engellerle karşılaşılması durumunda DÇÖY kurallarına göre yapılması gerekli olan manevranın yönü engel tarafından uygulanan ikinci bir itme kuvveti ile sağlanmaktadır. Önerilen yöntemin matematiksel ifadesi denklem 3.7, 3.8 ve 3.9'da gösterilmiştir.

$$F_{rep}(X) = \begin{cases} F_{rep1}(X) + F_{rep2}(X) , & d(X, X_o) \leq d_0, \\ 0 , & d(X, X_o) > d_0 \end{cases} \quad (3.7)$$

$$F_{rep1}(X) = k_{rep} \left( \frac{1}{d(X, X_o)} - \frac{1}{d_0} \right) \frac{d(X, X_g)}{d^2(X, X_o)} \quad (3.8)$$

$$F_{rep2}(X) = \frac{1}{2} k_{rep2} \left( \frac{1}{d(X, X_o)} - \frac{1}{d_0^2} \right)^2 \quad (3.9)$$

## BÖLÜM 4. SİMÜLASYON SONUÇLARI

Çalışmanın bu kısmında geliştirilen yapay potansiyel alan algoritmasıyla gerçekleştirilen simülasyonların sonuçları ortaya konmuştur. Algoritmanın statik ve dinamik engellerin bulunduğu ortamda gerçekleştirdiği yol planlamalarının bilgileri hem görsel hem de grafiksel olarak ortaya konmuştur. Ardından algoritmanın çalışmasıyla ilgili genel bir değerlendirmede bulunulmuştur. Geliştirilen algoritmanın parametre değerleri, Tablo 4.1’de gösterilmiştir.

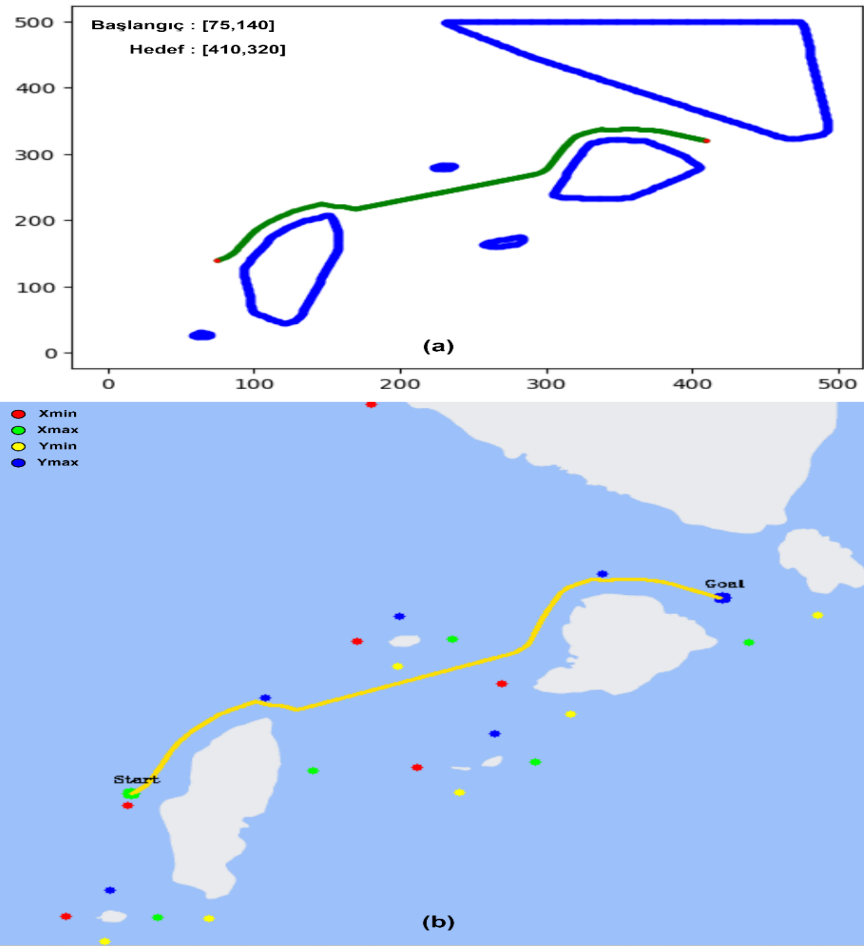
Tablo 4.1 : Geliştirilmiş APF parametreleri

Parametre	Değeri
Engel Emniyetli Geçiş Mesafesi (d0) :	20.0
Dinamik Engel Emniyetli Geçiş Mesafesi :	20.0
Çekim Potansiyel Alan Sabiti (Katt) :	0.47
İtme Potansiyel Alan Sabiti (Krep) :	1550
2. Çekim Potansiyel Alan Sabiti (Katt2) :	0.45
2. İtme Potansiyel Alan Sabiti (Krep2)	450

### 4.1. Geliştirilmiş Yapay Potansiyel Alan ile Statik Engelli Ortamda Yol Planlama

Çalışmada geliştirilen yöntemle, üzerinde sabit kara parçaları bulunan Uluabat Gölü haritasını kullanarak çeşitli başlangıç ve hedef noktaları arasında rota çizdirme işlemleri başarı ile yapılmıştır. Ayrıca geleneksel ve önerilen yöntem ile yapılan rota planlamaları süre ve yol maliyeti açısından karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar, tablo şeklinde ortaya konmuştur.

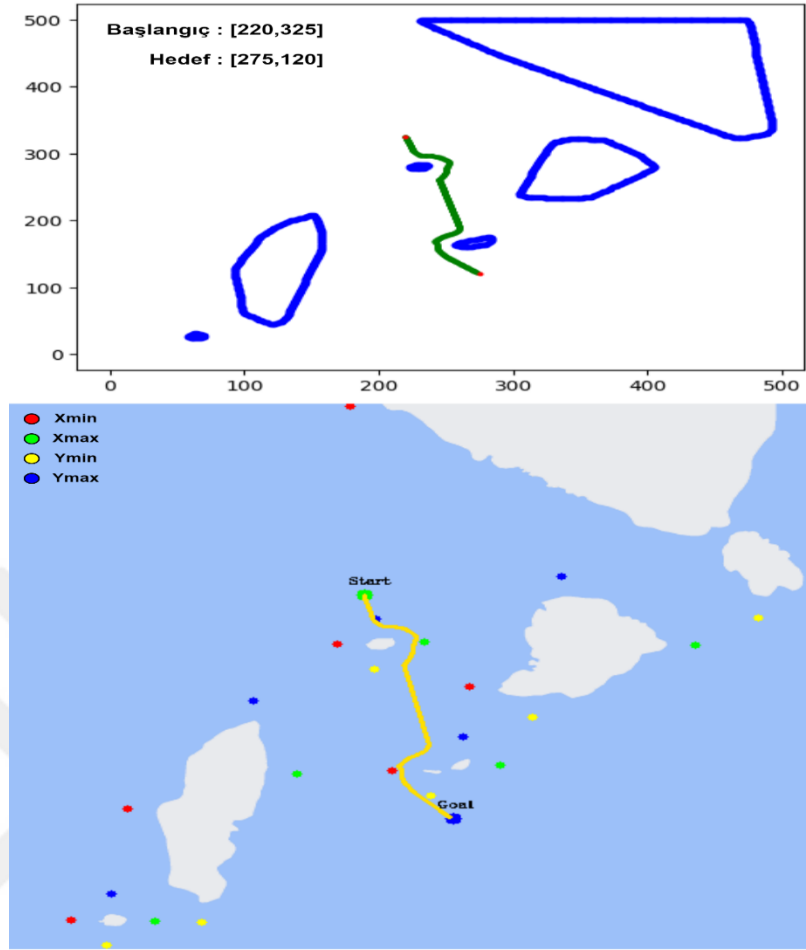
Önerilen yöntemle harita üzerinde başlangıç [75,140] ve hedef [410,320] noktası arasındaki yol planlama görüntüsü Şekil 4.1’de gösterilmiştir.



Şekil 4.1 : Geliştirilmiş Yapay Potansiyel Alan ile statik engelli ortamda yol planlama 1 (a) Grafiksel gösterim (b) Harita gösterimi

Şekil 4.1’de görüldüğü gibi 34 sn süre ve 733 birim yol maliyeti ile başarılı bir rota çizimi gerçekleştirilmiştir.

Önerilen yöntemle harita üzerinde başlangıç [220,325] ve hedef [275,120] noktası arasındaki yol planlama görüntüsü, Şekil 4.2’de gösterilmiştir.

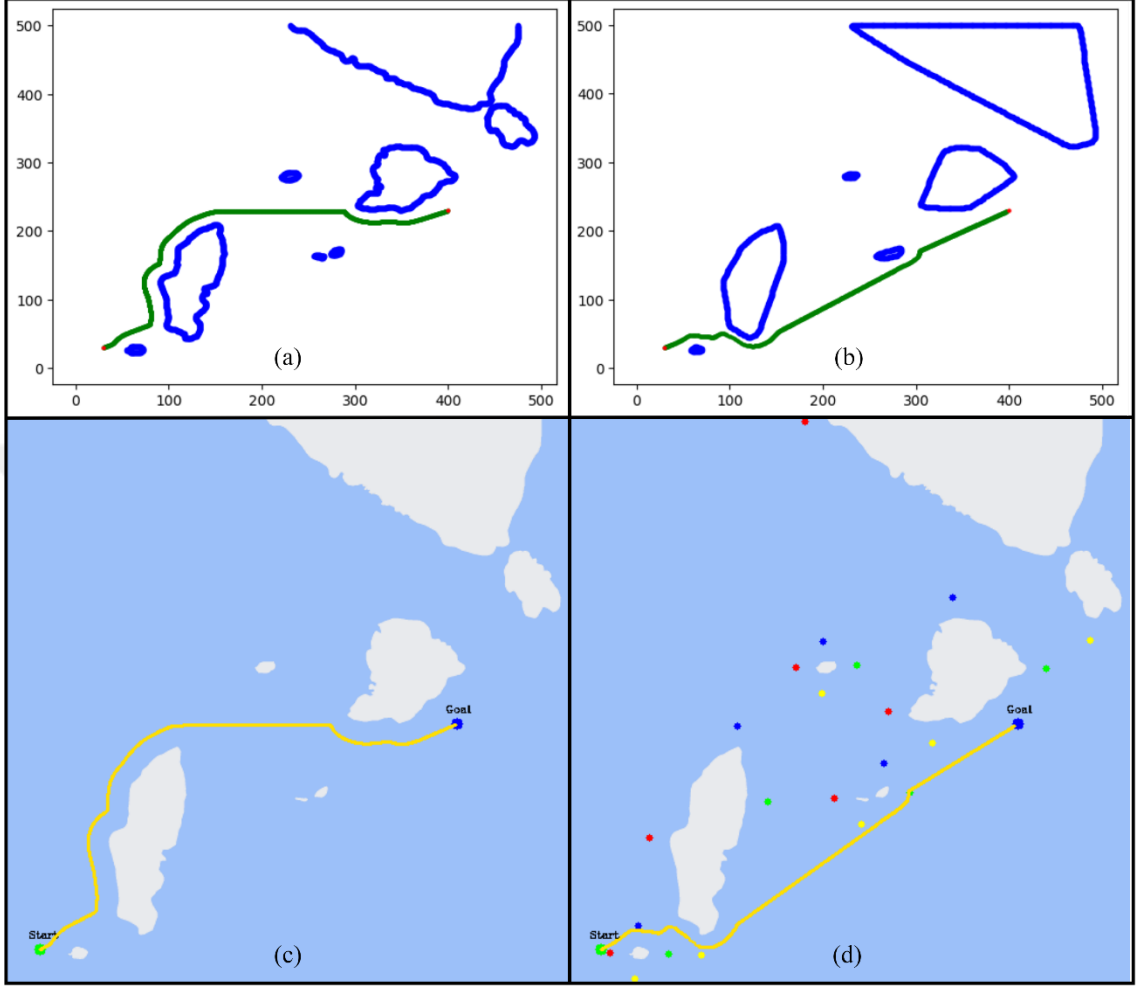


Şekil 4.2 : Geliştirilmiş Yapay Potansiyel Alan ile statik engelli ortamda yol planlama 2 (a) Grafiks gösterim (b) Harita gösterimi

Şekil 4.2’de görüldüğü gibi 13 sn süre ve 432 birim yol maliyeti ile başarılı bir rota çizimi gerçekleştirilmiştir.

Şekil 4.1 ve 4.2’de görüldüğü üzere geliştirilen yöntem, çizilen yol planlamasında engelle karşılaşılmaması durumunda, hedefin hangi tarafından geçmesi gerektiğini sezgisel kısa yol bulma yöntemi sayesinde mantıklı tercih yaparak belirlemektedir. Yapılan görüntü işleme teknikleri ile algoritma desteklenmektedir. Böylelikle önerilen yöntemin geleneksel yöntemle göre süre ve yol maliyeti açısından daha iyi bir yol planması gerçekleştirdiği simülasyon ortamında farklı başlangıç ve hedef noktaları arasında gerçekleştirilen denemeler ile doğrulanmıştır. Gerçekleştirilen simülasyon deneylerinin sonuçları Tablo 4.2’de gösterilmiştir. Ayrıca gerçekleştirilen simülasyonlardan başlangıç [30,30] ve hedef [200,230] noktası arasındaki geleneksel ve geliştirilmiş

yöntemle yapılan yol planlama görüntülerinin karşılaştırılması Şekil 4.3'te gösterilmiştir.



Şekil 4.3 : Geleneksel ve Geliştirilen yöntem karşılaştırması 2 (a) Geleneksel yöntemle rota çizimi grafiksel gösterimi (b) Geliştirilen yöntemle rota çizimi grafiksel gösterimi (c) Geleneksel yöntemle rota çizimi harita gösterimi (d) Geliştirilen yöntemle rota çizimi harita gösterimi

Şekilde görüldüğü üzere başlangıç ve hedef noktaları arasında geleneksel ve geliştirilen yapay potansiyel alan algoritmasıyla rota çiziminde farklı yollardan yol planlaması yapılmıştır. Geleneksel yöntemle gerçekleştirilen yol planlamasının hesaplama süresi 1 dakika 25 saniye sürmüştür ve yol maliyeti 781 piksel birimdir. Ancak geliştirilen yöntemle gerçekleştirilen yol planlamasının hesaplama süresi 12 saniye sürmüştür ve yol maliyeti 411 birimdir. Geliştirilen yöntemin süre ve maliyet açısından daha avantajlı olduğu görülmektedir. Ayrıca yol maliyetleri arasında iki katından daha fazla bir avantaj elde edilmesinin tek sebebi geliştirilen yöntemin daha kısa yolu tercih etmesi değildir. Geleneksel yöntemde itme ve çekme potansiyel alan kuvvetleri nedeniyle küçük adımlar

halinde ileri ve geri hareketlerin çok sık olmasından kaynaklı maliyet fazla çıkmaktadır. Geliştirilen yöntemde itme ve çekme kuvveti nedeniyle ortaya çıkan bu maliyet probleminin olumsuz etkisi yumuşatılmıştır.

Tablo 4.2 : Simülasyon Deneyleri

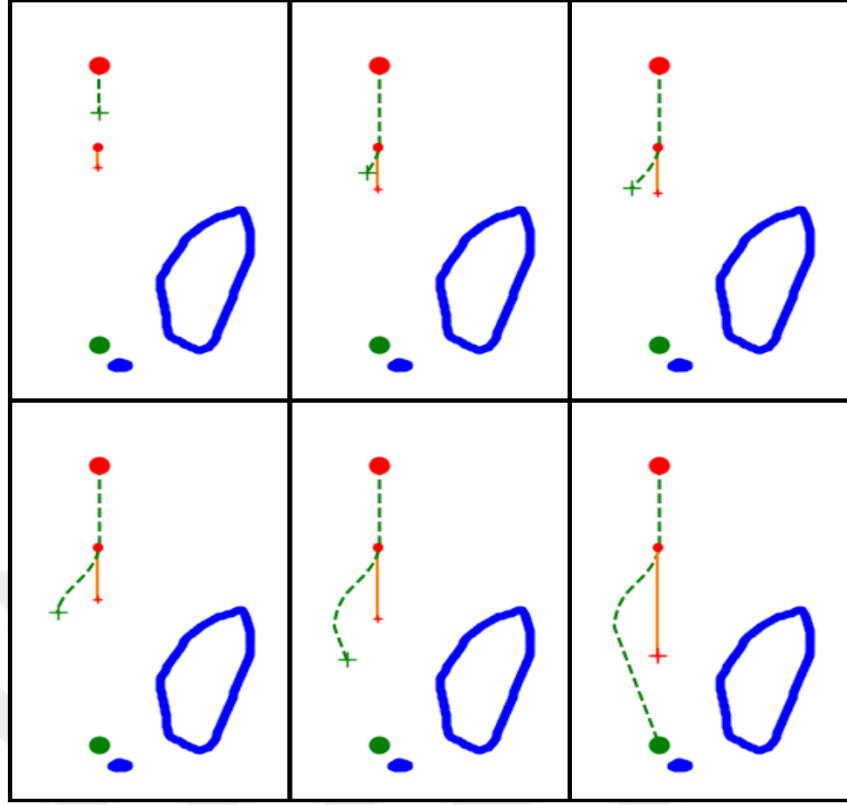
Başlangıç Noktası	Hedef Noktası	Geleneksel APF		Geliştirilmiş APF	
		Hesaplama Süresi	Yol Maliyeti	Hesaplama Süresi	Yol Maliyeti
[420,290]	[200,230]	49 sn	960 piksel	12 sn	411 piksel
[30,30]	[400,230]	1 dk 40 sn	1892 piksel	25 sn	781 piksel
[270,100]	[220,320]	47 sn	847 piksel	19 sn	636 piksel
[80,180]	[320,140]	45 sn	812 piksel	15 sn	492 piksel
[80,180]	[375,350]	36 sn	680 piksel	18 sn	571 ksel

## 4.2. Geliştirilmiş Yapay Potansiyel Alan ile Dinamik Engelli Ortamda Yol Planlama

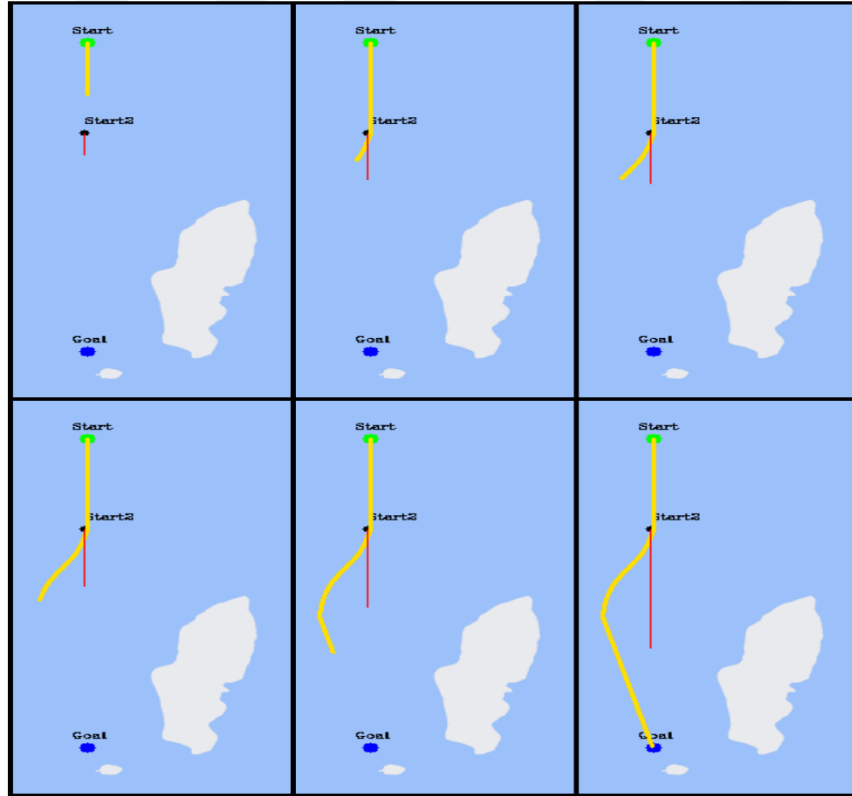
Çalışmada rota planlaması yapılırken hareketli engellerle karşılaşılması durumunda insansız deniz aracının DÇÖY kurallarına göre manevra yapmasını sağlayacak yöntem geliştirilmiştir. Önerilen yöntemle yönergede 3 temel yetişme, pruva pruvaya gelme ve aykırı geçiş durumları için belirlenmiş kurallara göre manevra yapılması sağlanmıştır ve algoritmanın etkinliği her bir durum için simülasyon ortamında benzetimi yapılan deney sonuçlarıyla doğrulanmıştır.

### 4.2.1. Yetişme Durumu

Yönerge gereğince bir geminin başka bir gemiye yetişmesi durumunda yetişilen geminin yolundan ayrılması gerekmektedir (kural 13). Yetişme durumu senaryosunda, insansız deniz aracının DÇÖY kurallarına göre gerçekleştirdiği rota planlamasının görüntüleri, Şekil 4.4 ve 4.5'te görülmektedir.



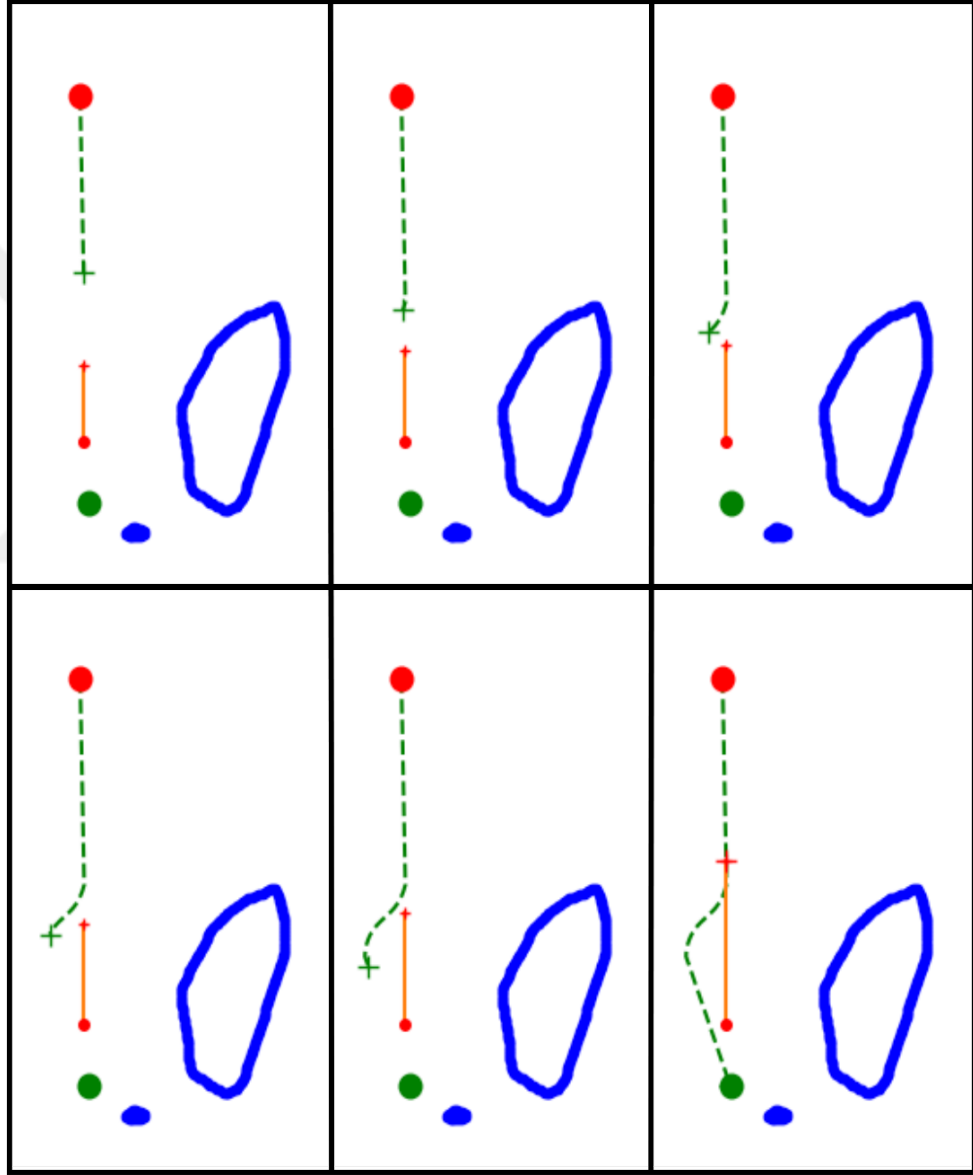
Şekil 4.4 : Yetişme durumu manevrasının grafik gösterimi



Şekil 4.5 : Yetişme durumu manevrasının harita gösterim

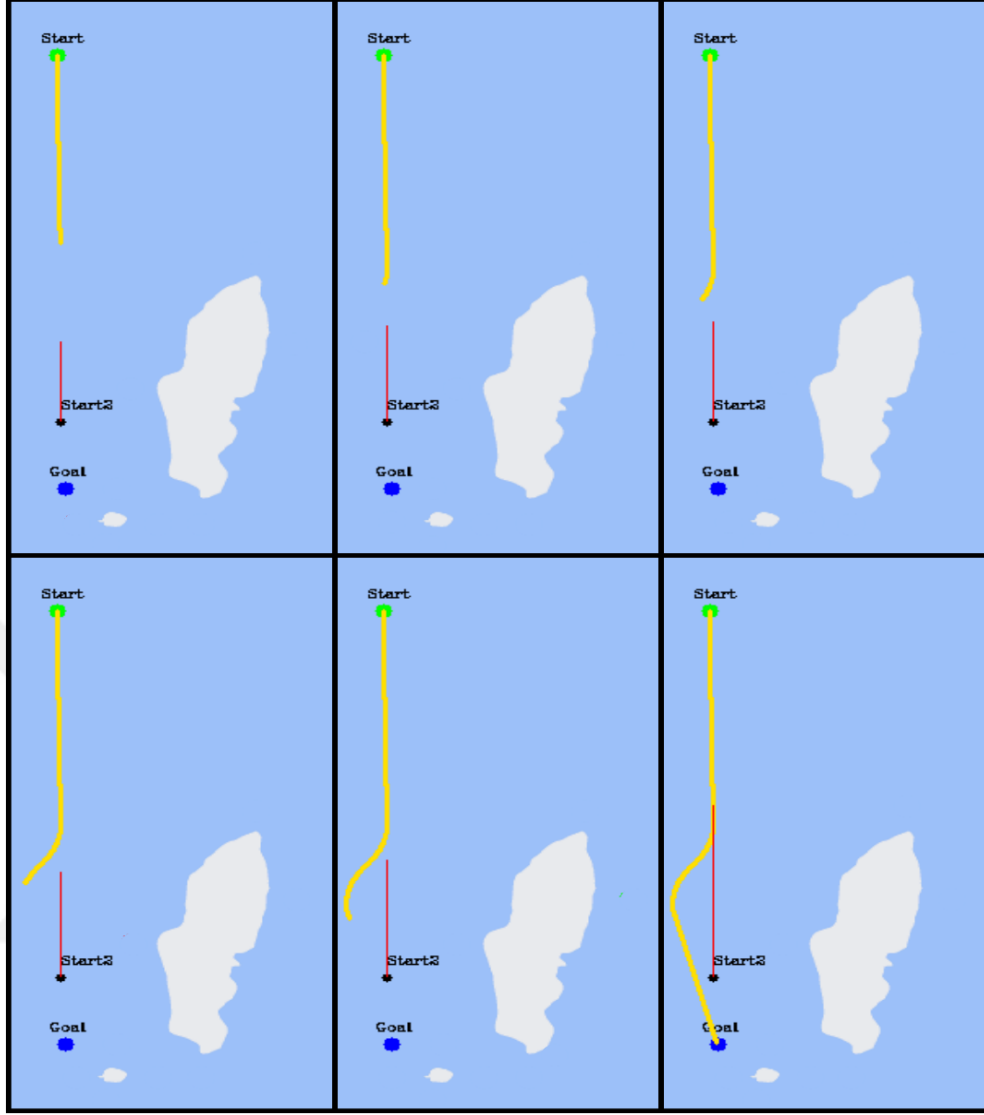
#### 4.2.2. Pruva Pruvaya Geliş Durumu

Yönerge gereğince iki geminin pruva pruvaya gelmesi durumunda her iki gemi de diğer gemiyi iskele tarafında görecek şekilde rotasını sancağa doğru çevirmesi gerekmektedir (Kural 14). Pruva pruvaya geliş durumu senaryosunda, insansız deniz aracının DÇÖY kurallarına göre gerçekleştirdiği rota planlamasının görüntüleri, Şekil 4.6 ve 4.7’de görülmektedir.



Şekil 4.6 : Pruva pruvaya geliş durumu manevrasının grafik gösterimi

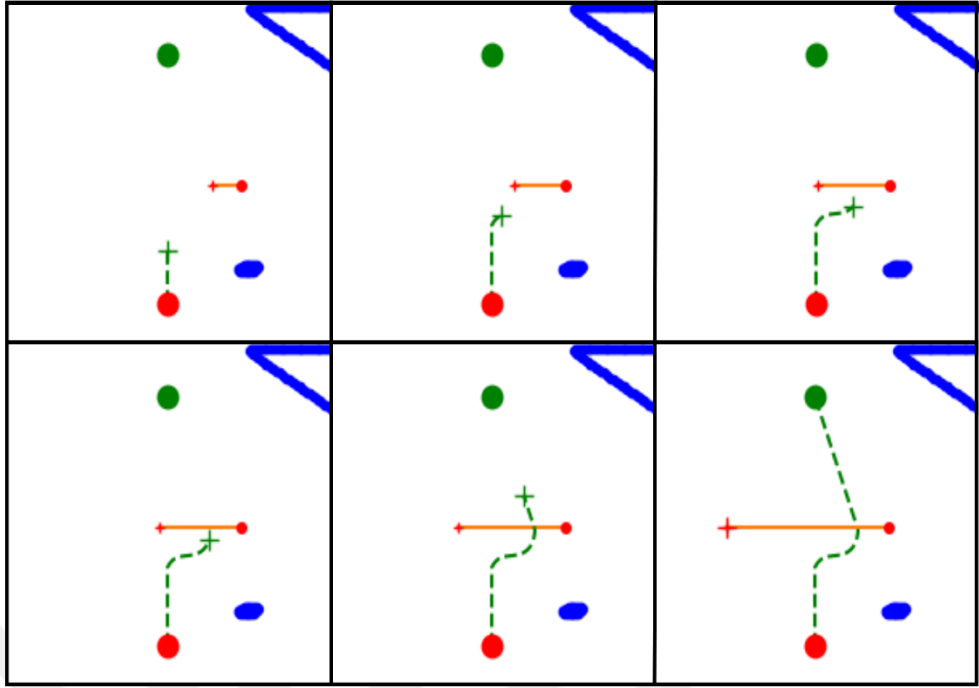




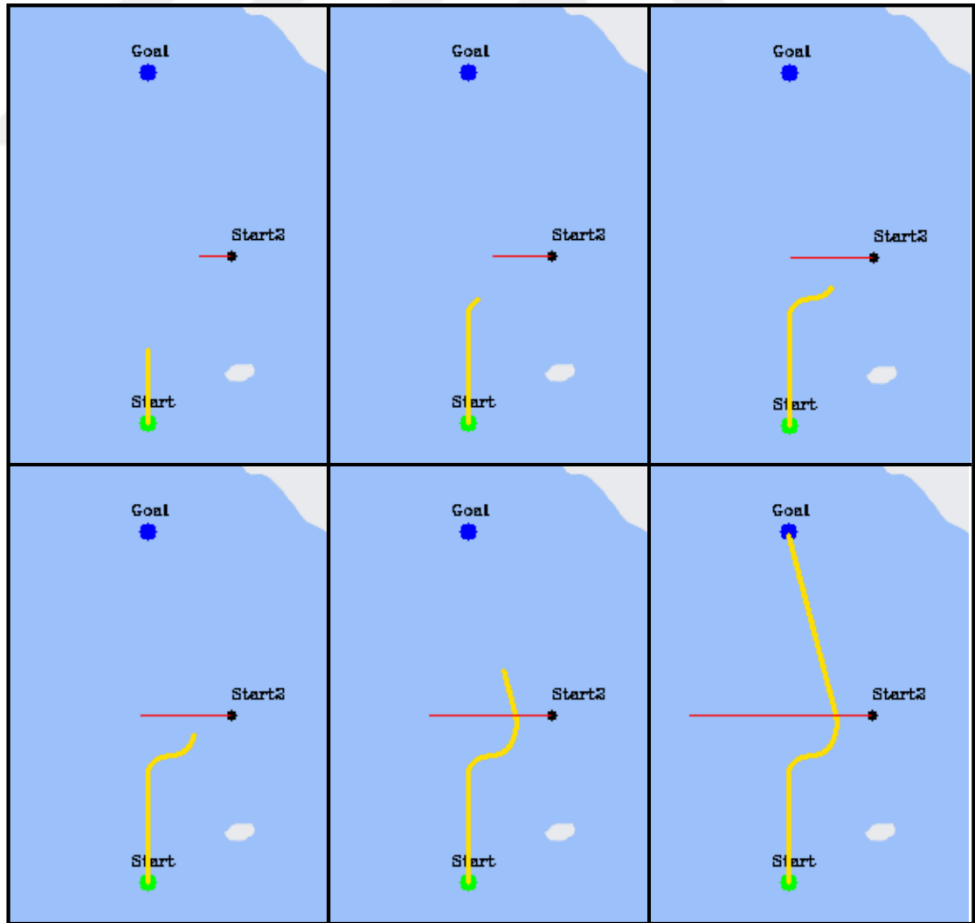
Şekil 4.7 : Pruva pruvaya geliş durumu manevrasının harita gösterimi

#### 4.2.3. Aykırı Geçiş Durumu

Yönerge gereğince aykırı geçiş durumunda iki gemiden diğerini sancak tarafında gören geminin, yol vermesi ve diğer geminin pruvasından kaçınması gerekmektedir (Kural 15). Aykırı geçiş durumu senaryosunda, insansız deniz aracının DÇÖY kurallarına göre gerçekleştirdiği rota planlamasının görüntüleri, Şekil 4.8 ve 4.9'da görülmektedir.



Şekil 4.8 : Aykırı geçiş durumu manevrasının grafik gösterimi



Şekil 4.9 : Aykırı geçiş durumu manevrasının harita gösterimi

## BÖLÜM 5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, insansız deniz araçlarının operatör tarafından belirlenen başlangıç ve hedef noktaları arasında statik ve dinamik engellerden kaçınarak yol planlaması yapabilmesi için yapay potansiyel alan yaklaşımına dayalı algoritma geliştirilmiştir. Dinamik engeller karşısında DÇÖY kurallarına uygun manevraların gerçekleştirilmesi sağlanmıştır. Yapay potansiyel alan algoritmasının hedefin engele yakın olması ve yerel minimuma takılma problemlerine çözüm getirilmiştir. Önce Uluabat Gölü harita görüntüsü Google Haritalar internet sitesi üzerinden alınarak görüntü işleme aşamalarından geçirilmiştir. Gerçekleştirilen görüntü işleme teknikleriyle sabit kara parçaları üzerindeki girinti ve çıkıntılar yumuşatılmıştır ve birbirine emniyetli geçiş mesafesinden ( $d_0$ ) daha yakın kara parçaları birleştirilmiştir. Görüntü işleme sonunda elde edilen harita verisi geliştirilen algoritmaya verilerek simülasyon ortamında çeşitli başlangıç ve hedef noktaları ile denemeler gerçekleştirilmiştir.

Sonuç olarak tez çalışmasında geliştirilen algoritmanın etkinliği yapılan simülasyon deneyleri ile doğrulanmıştır. Geliştirilen algoritma ile insansız deniz aracı statik ve dinamik engellerden kaçınarak başarılı bir yol planlaması gerçekleştirmiştir. Önerilen sezgisel kısa yol bulma yöntemi sayesinde yol maliyetinden önemli derecede kazanç elde edilmiştir. Dinamik engeller karşısında DÇÖY kurallarına göre manevra yapabildiği çeşitli senaryolar ile gerçekleştirilen simülasyon görüntüleriyle doğrulanmıştır. Geleneksel ve geliştirilen yöntemle gerçekleştirilen simülasyon sonuçları karşılaştırıldığında önerilen yöntemin hesaplama süresi ve yol maliyeti açısından daha avantajlı olduğu ortaya konmuştur.

Gelecek çalışmalarda önerilen yöntem daha da geliştirilerek zorlu çevre koşulları ve okyanus gibi ortamlarda otonom seyrüsefer uygulamalarında kullanılabileceği değerlendirilmektedir. Tez çalışmasında görüntü işleme yöntemleri kullanılmasının yol planlama probleminin çözüme önemli katkılar sağlaması nedeniyle görüntü işlemenin bu alanda daha sık kullanılabileceği değerlendirilmektedir. İnsansız deniz araçlarında

yol planlaması üzerine çözümler üretilirken ortamda bulunan diğler gemi veya araçların emniyetli seyir icra edebilmeleri için DÇÖY kurallarına göre hareket planlamasının yapılması gerektiğı değerlendirilmektedir. Bu tez çalışmasının otonom araçların yol planlama problemi üzerine gerçekleştirilecek ARGE çalışmaları için faydalı olabileceğı değerlendirilmektedir.



## KAYNAKLAR

- [1] Zhou, C., Gu, S., Wen, Y., Du, Z., Xiao, C., Huang, L. & Zhu, M. (2020). The review unmanned surface vehicle path planning: Based on multi-modality constraint. *Ocean Engineering*, 200.
- [2] Budak, G. (2022). A Collision Avoidance System Based on COLREGs Rules for Autonomous Surface Vessels. *Gemi ve Deniz Teknolojisi*, 221, 75-85.
- [3] Yorulmaz, M. & Karabulut, K. (2021). Deniz Taşımacılığında Akıllı Gemiler: Gemi Kaptanlarının Bakış Açısı. *Journal of Economics Business and Finance Research*, 3(1), 40-54.
- [4] Kurowski, M., Thal, J., Damerius, R., Korte H. & Jeinsch, T. (2019). Automated Survey in Very Shallow Water using an Unmanned Surface Vehicle. In A, Kim (Ed.), *12th IFAC Conference on Control Applications in Marine Systems, Robotics, and Vehicles CAMS 2019*, 52(21), (pp.146-151), Republic of Korea, September 18–20.
- [5] Dabit, A. S., Lianto, A. E., Branta, S. A., Laksono, F. B., Prabowo, A. R. & Muhayat, N. (2020). Finite Element Analysis (FEA) on Autonomous Unmanned Surface Vehicle Feeder Boat subjected to Static Loads. In A. R. Prabowo (Ed.), *The 6th International E-Conference on Industrial, Mechanical, Electrical and Chemical Engineering (ICIMECE 2020)*, 27, (pp.163-170), Indonesia, October 20.
- [6] Ryu, J. H. (2022), Prototyping a Low-Cost Open-Source Autonomous Unmanned Surface Vehicle for Real-Time Water Quality Monitoring and Visualization, *HardwareX*, 12.
- [7] Han, J., Kim, S. Y. & Kim, A. J. (2021). Enhanced Target Ship Tracking With Geometric Parameter Estimation for Unmanned Surface Vehicles. *IEEE Access*, 9, 39864-39872.
- [8] Atalı, G., Garip, Z., Karayel, D. & Özkan, S. S. (2018). Localization of Mobile Robot using Odometry, Camera Images and Extended Kalman Filter. *Acta Physica Polonica Series a*, 134(1), 204-207.
- [9] Savitz, S., Blickstein, I., Buryk, P., Button, R. W., DeLuca, P., Dryden, J., Mastbaum, J., Osburg, J., Padilla, P., Potter, A., Price, C. C., Thrall, L., Woodward, S. K., Yardley, R. J. & Yurchak, J. M. (2013). *U.S. Navy Employment Options for Unmanned Surface Vehicles (USVs)* (Rapor No: 0704-0188). Santa Monica: Rand Corporation National Defense Research Institute.

- [10] Yang, S. M. & Lin, Y. A. (2021). Development of an Improved Rapidly Exploring Random Trees Algorithm for Static Obstacle Avoidance in Autonomous Vehicles. *Sensors*, 21(6), 2244.
- [11] Kurdi, H., Almuhalhel, S., Elgibreen, H., Qahmash, H., Albatati, B., Al-Salem, L. & Almoaiqel, G. (2021). Tide-Inspired Path Planning Algorithm for Autonomous Vehicles. *Remote Sensing*, 13(22), 4644.
- [12] Wang, P., Yang, J., Zhang, Y., Wang, Q., Sun, B. & Guo, D. (2022). Obstacle-Avoidance Path-Planning Algorithm for Autonomous Vehicles Based on B-Spline Algorithm. *World Electric Vehicle Journal*, 13(12), 233.
- [13] Jian, X., Zou, T., Vardy, A. & Bose, N. (2020). A Hybrid Path Planning Strategy of Autonomous Underwater Vehicles. *2020 IEEE/OES Autonomous Underwater Vehicles Symposium (AUV)*, Canada, September 30 – October 02.
- [14] Atalı, G. (2022). Prototyping of a Novel Thruster for Underwater ROVs. *International Journal of Applied Mathematics Electronics and Computers*, 10(1), 11-14.
- [15] Garip, Z. B., Atalı, G., Karayel, D. & Özkan, S. S. (2018). In T. ÖZSEVEN (Ed.), Path Planning for Multiple Mobile Robots in Static Environment using Hybrid Algorithm. *2018 2nd International Symposium on Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies (ISMSIT)*, Ankara, October 19-21.
- [16] İnan, T. & Baba, A. F. (2020). Gemi çarpışmalarının önlenmesi için melez algoritma tabanlı bir karar destek sisteminin. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 35(3), 1213-1230.
- [17] Xia, G., Sun, X. & Xia, X. (2021). Multiple Task Assignment and Path Planning of a Multiple Unmanned Surface Vehicles System Based on Improved Self-Organizing Mapping and Improved Genetic Algorithm. *Journal of Marine Science and Engineering*, 9(6), 556.
- [18] Kim, H. G., Yun, S. J., Choi, Y. H., Ryu, J. K. & Suh, J. H. (2021). Collision Avoidance Algorithm Based on COLREGs for Unmanned Surface Vehicle. *Journal of Marine Science and Engineering*, 9(8), 863.
- [19] Singh, Y., Sharma, S., Sutton, R., Hatton, D. & Khan, A. (2018). A constrained approach towards optimal path planning for an unmanned. *Ocean Engineering*, 169, 187-201.
- [20] Guo, X., Ji, M., Zhao, Z., Wen, D., & Zhang, W. (2020). Global path planning and multi-objective path control for unmanned surface vehicle based on modified particle swarm optimization (PSO) algorithm. *Ocean Engineering*, 216, 107693.
- [21] Jiang, F., Jin, C., Liao, H., Li, H., Wu, Y., Liu, Y., Peng, J. & Huang, Z. (2020). An Artificial Potential Field-Based Lithium-ion Battery SOC Equilibrium Method in Electric Vehicles. *21st IFAC World Congress*, 57(2), (pp.12682-12687), Germany, July 11–17.
- [22] Zhang, H., Zhu, Y., Liu, X., & Xu, X. (2021). Analysis of Obstacle Avoidance Strategy for Dual-Arm Robot Based on Speed Field with Improved Artificial Potential Field Algorithm. *Electronics*, 10(15), 1850.

- [23] Song, J., Hao, C., & Su, J. (2020). Path planning for unmanned surface vehicle based on predictive artificial potential field. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 17(2), 1729881420918461.
- [24] Chen, J., Tan, C., Mo, R., Zhang, H., Cai, G., & Li, H. (2021). Research on path planning of three-neighbor search A\* algorithm combined with artificial potential field. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 18(3).
- [25] Fan, X., Guo, Y., Liu, H., Wei, B., & Lyu, W. (2020). Improved Artificial Potential Field Method Applied for AUV Path Planning. *Mathematical Problems in Engineering*, 2020, 6523158.
- [26] Raheem, F. A., & Badr, M. M. (2017). Development of Modified Path Planning Algorithm Using Artificial Potential Field (APF) Based on PSO for Factors Optimization. *American Scientific Research Journal for Engineering*, 37(1), 316-328.
- [27] Gözüyeşil, F. F. (2021). Denizde Çatışmanın Önlenmesine Dair Uluslararası Kurallar Bağlamında İnsansız Ve Otonom Gemilerde İyi Gemicilik İlkesi Ve Gözcülük Görevi. *Adalet Dergisi* (66), 193-225.
- [28] Url-1 <<https://www.imo.org/en/MediaCentre/PressBriefings/Pages/08-MS-C-99-MASS-scoping.aspx>>, erişim tarihi 28.04.2023.
- [29] Michal, C. (2016). Analysis of the Legal Status of Unmanned Commercial Vessels in U.S. Admiralty and Maritime Law. *Journal of Maritime Law & Commerce*, 47(2), 123-170.
- [30] Allen, C. H. (2018). Determining the legal status of unmanned maritime vehicles: Formalism vs functionalism. *Journal of Maritime Law & Commerce*, 49(4), 477-514.
- [31] Yuste, A. P. (2008). Early Developments of Wireless Remote Control: The Telekino of Torres-Quevedo. *Proceedings of the IEEE*, 96(1), 186-190.
- [32] Bolat, F., & Koşaner, Ö. (2021). İnsansız Gemilerin Güncel Statüleri. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (23), 341-358.
- [33] Doğan, K. (2019). İnsansız Suüstü Araçlarının Tarihsel Gelişimi. *Mavi Vatan*, (1), 42-45.
- [34] Breivik, M. (2010). *Topics in Guided Motion Control of Marine Vehicles*, (Doktora Tezi). Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, Norway.
- [35] STM ThinkTech (2022). *İnsansız Hava, Deniz ve Sualtı Araçları İçin Otonom ve Yarı Otonom Gemiler*. Ankara: STM ThinkTech.
- [36] Vallejo, D. (2015). Electric Currents: Programming Legal Status into Autonomous Unmanned Maritime Vehicles. *Case Western Reserve Journal of International Law*, 47(1), 25.
- [37] Liu, Z., Zhang, Y., Yu, X., & Yuan, C. (2016). Unmanned surface vehicles: An overview of developments and challenges. *Annual Reviews in Control*, 41, 71-93.
- [38] Url-2 <<https://www.china-arms.com/2020/01/>>, erişim tarihi 30.04.2023.

- [39] Url-3 <<https://maritime-executive.com/article/china-reports-first-autonomous-containership-entered-service>>, erişim tarihi 30.04.2023.
- [40] Caccia, M. (2006). Autonomous Surface Craft: prototypes and basic research issues. *14th Mediterranean Conference on Control and Automation*. Ancona, Italy, June 28-30.
- [41] Url-4 <<https://www.rolls-royce.com/media/press-releases/2018/03-12-2018-rr-and-finferries-demonstrate-worlds-first-fully-autonomous-ferry.aspx>>, erişim tarihi 30.04.2023.
- [42] Url-5 <<https://www.ship-technology.com/analysis/crewless-cargo-the-worlds-first-autonomous-electric-cargo-ship/>>, erişim tarihi 30.04.2023.
- [43] Yan, R. J., Pang, S., Sun, H.-b., & Pang, Y. J. (2010). Development and missions of unmanned surface vehicle. *Journal of Marine Science and Application*, 9, 451-457.
- [44] Url-6 <<https://mavivatan.net/aselsan-albatros-s-ida-surusu-sistemi/>>, erişim tarihi 30.04.2023.
- [45] Url-7 <<https://mavivatan.net/aselsan-albatros-s-ida-surusu-sistemi/>>, erişim tarihi 30.04.2023.
- [46] Url-8 <<https://mavivatan.net/mavi-vatanin-insansiz-muhafizi-ulaq/>>, erişim tarihi 01.05.2023.
- [47] Url-9 <<https://mavivatan.net/mavi-vatanin-insansiz-muhafizi-ulaq/>>, erişim tarihi 01.05.2023.
- [48] Dağlı, E., Civan, C., Şöhmelioglu, S., Ediş, F. E., & Tükel, D. (2013). Doğuş-USV İnsansız Deniz Aracı: Stereo Görüş İle Haritalandırma. *15. Otomatik Kontrol Ulusal Toplantısı Bildiriler Kitabı: TOK2013*. Malatya, Eylül 26-28.
- [49] Url-10 <<https://www.facebook.com/DogusUsv/>>, erişim tarihi 01.05.2023.
- [50] Url-11 <<https://www.hurriyet.com.tr/ekonomi/insansiz-deniz-araci-goreve-hazir-15203036>>, erişim tarihi 01.05.2023.
- [51] Url-12 <<https://www.teknolojigundem.com/haber/bir-yerli-silah-daha-dunyanin-obur-ucundan/1275587>>, erişim tarihi 01.05.2023.
- [52] Url-13 <<https://www.globalteknik.com.tr/>>, erişim tarihi 01.05.2023.
- [53] COLREG. (1972). *Convention on the International Regulations for Preventing Collisions at Sea*, Lloyd's Register Rulefinder.
- [54] Url-14 <<https://www.imo.org/en/About/Conventions/Pages/COLREG.aspx>>, erişim tarihi 26.04.2023.
- [55] Cockcroft, A. N., & Lameijer, J. N. (2004). *A Guide to Collision Avoidance Rules*. Bodmin, Cornwall: MPG Books Ltd.
- [56] Url-15 <<http://www.ozcanozverim.com/tr/blog/sailing/denizde-yol-verme-kurallari/>>, erişim tarihi 30.04.2023.
- [57] Canny, J. (1986). A Computational Approach to Edge Detection. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 8(6), 679-698.



- [58] Brenda, Irawan, B., & Setianingsih, C. (2021). Pak Choy Leaf Width Detection using Image Processing with Canny Edge Detection Extraction Method. *2021 IEEE International Conference on Industry 4.0, Artificial Intelligence, and Communications Technology (IAICT)*. Bandung, Indonesia, July 27-28.
- [59] Aгаian, S., Almontashri, A., & Papagiannakis, A. (2009). An Improved Canny Edge Detection Application for Asphalt Concrete. *2009 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*. San Antonio, TX, USA, October 11-14.
- [60] Thanikkal, J. G., Dubey, A. K., & Thomas, M. T. (2018). Advanced Plant Leaf Classification Through Image Enhancement and Canny Edge Detection. *2018 7th International Conference on Reliability, Infocom Technologies and Optimization (Trends and Future Directions) (ICRITO)*. Noida, India, August 29-31.
- [61] Jayaram, M. A., & Fleyeh, H. (2016). Convex Hulls in Image Processing: A Scoping Review. *American Journal of Intelligent Systems*, 6(2), 48-58.
- [62] Url-16 <[https://scikit-image.org/docs/stable/auto\\_examples/edges/plot\\_convex\\_hull.html](https://scikit-image.org/docs/stable/auto_examples/edges/plot_convex_hull.html)>, erişim tarihi 05.05.2023.
- [63] Eyübođlu, M. (2022). *Çok Yönlü İşbirlikçi Mobil Robotlar için Eş Zamanlı Hareket Planlama Algoritmasının Geliştirilmesi ve Uygulaması* (Yüksek Lisans tezi). Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Sakarya.
- [64] Hart, P. E., Nilsson, N. J., & 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.
- [65] Liang, C., Zhang, X., Watanabe, Y., & Deng, Y. (2021). Autonomous Collision Avoidance of Unmanned Surface Vehicles Based on Improved A Star And Minimum Course Alteration Algorithms. *Applied Ocean Research*, 113, 102755.
- [66] He, Z., Liu, C., Chu, X., Negenborn, R. R., & Wu, Q. (2022). Dynamic anti-collision A-star algorithm for multi-ship encounter situations. *Applied Ocean Research*, 118.
- [67] Kennedy, J., & Eberhart, R. (1995). Particle swarm optimization. *Proceedings of ICNN'95 - International Conference on Neural Networks*. November 27 - December 01, Perth, Australia.
- [68] Garip, Z., Karayel, D., & Çimen, M. E. (2021). Parçacık Sürü Optimizasyon Tabanlı Mobil Robotlarda Global Yol Planlama. *Journal of Smart Systems Research*, 2(1), 18-26.
- [69] Karabođa, D. (2020). *Yapay Zeka Optimizasyon Algoritmaları*. Ankara: Nobel.
- [70] Özsađlam, M. Y., & Çunkaş, M. (2008). Optimizasyon Problemlerinin Çözümü için Parçacık Sürü Optimizasyonu Algoritması. *Politeknik Dergisi*, 11(4), 299-305.
- [71] Fox, D., Burgard, W., & Thrun, S. (1997). The dynamic window approach to collision avoidance. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 4(1), 23-33.
- [72] Özdemir, A. (2016). *Mobil Robot Navigasyon Sistemi Geliştirilmesi* (Yüksek Lisans tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

- [73] Atalı, G. (2018). *Dağıtık Mobil Robotlar için Yeni Bir Otonom Yol Planlama ve Engel Tespit Sisteminin Tasarımı* (Doktora Tezi). Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- [74] Khatib , Q. (1985). Real-time obstacle avoidance for manipulators and mobile robots. *1985 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Stanford, March 25-28.
- [75] Ge, S. S., & Cui, Y. J. (2002). Dynamic Motion Planning for Mobile Robots Using Potential Field Method. *Autonomous Robots*, 13, 207-222.
- [76] Shankar, M., & Sushnigdha, G. (2022). A Hybrid Path planning approach combining Artificial Potential Field and Particle Swarm Optimization for Mobile Robot. *22nd IFAC Symposium on Automatic Control in Aerospace ACA 2022*. 55(22), (pp.242-247), Mumbai, India, November 21-25
- [77] Url-17 <[https://github.com/AtsushiSakai/PythonRobotics/blob/master/PathPlanning/DynamicWindowApproach/dynamic\\_window\\_approach.py](https://github.com/AtsushiSakai/PythonRobotics/blob/master/PathPlanning/DynamicWindowApproach/dynamic_window_approach.py)>, erişim tarihi 20.05.2023.