

# Deniz Taşımacılığı İzlemek için Sualtı Kablosuz Sensör Ağlarında Otonom Sualtı Aracı ile Dayanıklı ve Enerji Farkında Yol Planlama

## Robust and Energy-Aware Path Planning by Autonomous Underwater Vehicle in Underwater Wireless Sensor Networks for Monitoring Maritime Transportation

Ömer Melih Gül 

Bilişim Enstitüsü

İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul

Email: [omgul@itu.edu.tr](mailto:omgul@itu.edu.tr)

 Tayfun Acarer

Denizcilik, Ulaştırma ve İşletme Yüksekokulu

Piri Reis Üniversitesi, İstanbul,

tacarer@hotmail.com

**Özetçe**—Daha ucuz olması nedeniyle uluslararası ve kıtalararası ticarete denizyolu en yoğun kullanılan taşıma şeklidir. Ancak deniz kazaları gemiler için olağan tehlikelerdir. Bu amaçla sualtı kablosuz sensör ağları (SKSA), deniz trafiği risklerini azaltmak ve deniz ortamını izlemek için geliştirilmiştir. Bu sistemlerin enerjisi, sınırlı güce sahip olumsuz bölgelerdeki SKSA'lar için hayati öneme sahiptir. SKSA'nın uzun süre dayanabilmesi için, sürekli çevresel izleme ve gözetleme verilerinin toplanması ve iletişimini sağlamak amacıyla enerji kısıtlamalarının ele alınması gerekmektedir. Su altı sensör düğümleri için yol planlama ve enerji tasarruflu otonom su altı aracı (OSA) şarjı, SKSA enerji ve pil değiştirme sorunlarını çözmek için kullanılmaktadır. Bu makalede, OSA ile enerjiye duyarlı yol planlama problemini çözmek için en yakın komşu algoritması kullanılmaktadır. OSA yol planlama simülasyonları, en yakın komşu algoritmasının genetik algoritmaya ve Grey-Wolf eniyileştirme algoritmasına göre daha hızlı yakınsadığını ve daha iyi bir çözüm ürettiğini göstermektedir. Yapılan çalışmada sensör verilerini daha az enerjiyle hızlı bir şekilde toplamak için sağlam ve enerji açısından verimli yol planlama algoritmaları sunarak izleme sisteminin gemilerin maruz kalabilecekleri tehlikelere daha hızlı yanıt vermesi hedeflenmektedir. Temin edilen veriler sensörlerin daha yakından iletişim kurması sonucu enerji kullanımının en aza indirildiğini ve SKSA ağının ömrünü artırdığını göstermektedir.

**Anahtar Kelimeler** —otonom su altı aracı; su altı kablosuz sensör ağları; enerjiye duyarlı yol planlaması deniz haberleşmesi; gemi yönetim sistemleri; denizcilik otoritesi için güvenli seyir planlaması; denizcilik endüstrisi; deniz ticareti.

**Abstract**—Since it's cheaper, sea transportation has been preferred for international and intercontinental trade. However, ship mishaps are possible dangers. Underwater wireless sensor networks (UWSN) can monitor the maritime environment to reduce maritime traffic risks. Energy is crucial for UWSNs in adverse areas with limited power. So

UWSN can last, energy constraints must be handled to enable continuous environmental monitoring and surveillance data gathering and communication. Path planning and energy-saving autonomous underwater vehicle (AUV) charging for underwater sensor nodes can solve UWSN energy and battery replacement issues. This paper uses nearest neighbour algorithm to solve the energy-aware path planning problem with AUV. AUV path planning simulations show that the nearest neighbour algorithm converges faster and produces a better solution than the genetic algorithm and grey wolf optimizer algorithm. We offer robust and energy-efficient path planning algorithms to swiftly collect sensor data with less energy, allowing the monitoring system to respond faster to ship disaster hazards. Communicating sensors closer minimises their energy usage and improves UWSN network lifetime.

**Keywords** —autonomous underwater vehicle; underwater wireless sensor networks; energy-aware path planning; water monitoring; ship management systems; safe sailing planning for maritime authority; maritime industry; maritime commerce

### I. GİRİŞ

Tarihsel olarak denizcilik ve uluslararası ticaret birbiriyle doğrudan ilişkili kavramlardır. Bunun temel nedeni, deniz taşımacılığının uluslararası ticaretin ve kıtalararası geçişin birincil tercihi olmasıdır [1]. Deniz taşımacılığının en büyük özelliği demiryolundan 3,5 kat, karayolundan 7 kat, havayolundan ise 22 kat daha ucuz olmasıdır. Deniz taşımacılığının maliyet avantajı, artan ilgisini ve hacmini de artırmaktadır [2]. Uluslararası Deniz Ticaret Odası (ICS), küresel trafiğin %90'ının deniz yoluyla gerçekleştirildiğini bildirmektedir [3]. Birleşmiş Milletler Ticaret ve Kalkınma Konferansı, küresel deniz ticaretinde 2018'den 2023'e kadar yıllık %3,8'lik bir büyüme olacağını öngörmektedir.[4]. Artan dünya deniz ticareti, denizyolu kaza riskini artıran yoğun deniz trafiğine neden olmaktadır. Geçmiş veriler, kazaların

genellikle en yoğun deniz rotası yollarında meydana geldiğini göstermektedir [5].



Şekil 1. Dünya Denizcilik Ticaretinin Ana Rotası ve Bağlantı noktaları için Harita [6]

Günümüzde kargo hacmi ve değeri arttıkça deniz taşımacılığı kazaları daha fazla zarara yol açmaktadır. Ölümcül kazaların maliyetini ise parasal değerlerle ölçülemek mümkün değildir [7]. Günümüzde Süveyş Kanalı ulaşımının aksaması ve meydana gelen gemi kazaları [8]–[10], Çin filosunun nakliye masrafları da dahil olmak üzere dünya çapındaki tedarik zincirleri üzerinde önemli olumsuz ekonomik etkileri olmaktadır [11]. [12]'de kısıtlı Süveyş Kanalı vaka çalışması, senaryo analizi yoluyla gözlemlenen sonuçları açıklamaktadır. Süveyş Kanalı'nın tıkanması gibi kazaları önlemek amacıyla hazırlanan bulguların kaza soruşturması için geriye dönük risk kaynaklarını değerlendirmesi ve sınırlı su yolu kazalarının önlenmesine yönelik ileriye yönelik riskleri tahmin etmek için kullanılması mümkündür.

Son dönemde endüstride temin edilen gelişmeler birçok sektöre de yansımaktadır. Bu gelişmeler geleneksel yapıları önemli ölçüde değiştirmekte, iş süreçlerini ve personel rollerini dönüştürmektedir [13]. Bu değişiklikler birçok sektörde olduğu gibi denizcilik şirketlerini ve gemi işletmeciliğini de etkilemektedir. Bu gelişmeler son yıllarda gemilerin uluslararası sularda yönetimi ve güvenli geçişine yönelik pek çok önemli verinin elde edilmesini mümkün kılmıştır. Güvenli navigasyon büyük ölçüde deniz durumu verilerine dayanmaktadır. Günümüzde deniz verileri yüzey verilerinin yanı sıra deniz tabanı verilerini de içermektedir. Güvenli deniz yolculuğu için, deniz yatağı hareketlerinin ve verilerinin anında tespit edilip önemli denizcilik kuruluşlarına iletilmesi çok önemlidir. Bu veriler aynı zamanda güvenli deniz yolu taşımacılığı ve gemi navigasyonu için de gereklidir. Bu amaçla alınacak önlemler için de bu veriler çok önemlidir.

Deniz haberleşmesi, deniz araçlarını desteklemek için gemiler, kara birimleri ve uçaklar arasındaki iletişimi içermektedir [14]. Son dönemde veri taşıma ve iletişim teknolojileri ve gemi sistemleri, deniz tabanı ve yüzey verilerini çok uzak mesafelerden izleyebilecek ve gerektiğinde müdahale edebilecek noktaya gelmiştir.

#### A. Güdüleme

Sualtı kablosuz sensör ağlarının (SKSA), hızlı gelişimlerinden dolayı okyanus verilerinin toplanması,

kaynak keşfi ve navigasyon için çok önemlidir [15]. Son veriler, çeşitli kullanımlara sahip akıllı okyanus sualtı Nesneleri İnterneti'nin (Nİ) [16] potansiyelini öne çıkarmaktadır. Bu konuda yapılan bir çalışmada birkaç su altı sensör düğümü çevresel verileri bir veri merkezine göndermektedir. Zorlu deniz ortamlarında pille çalışan düğümler pahalı ve karmaşık pil değişimini gerektirmektedir. Bu nedenle Sınırlı enerji ve kısa ömür nedeniyle enerji verimliliğinin artırılması SKSA performansı ve güvenilirliği için çok önemlidir [17].

SKSA'da yol planlaması için önerilen yapay zeka tabanlı meta-sezgisel algoritma, bir yandan enerji tasarrufu sağlarken sensör verilerinin toplanmasını hızlandırmakta, diğer yandan sistemin gemi kazası tehlikelerine karşı daha hızlı tepki vermesini sağlar. Sensörlerin daha yakın iletişim kurması enerji tüketimini en aza indirmekte, bu durum ise gemi kazalarını önlemek için su altı ortamını izleyen SKSA'nın ömrünü uzatmaktadır.

Yapılan çalışmada bunu düzeltmek için çeşitli deneyimlerde bulunuldu. İlk olarak, SKSA'ların veri iletimi için çok fazla enerjiye ihtiyacı olduğu görüldü. Bu amaçla sensör verilerinin, iletimi ve enerji tüketiminin azaltılması için sıkıştırma ve optimize yapılmıştır [18]. İkinci olarak da ve yönlendirme ile, SKSA enerji verimliliğini artırabildiği tespit edildi. Dağıtım ve yönlendirme yaklaşımlarının iyileştirilmesi sonucu enerji tüketiminin azaltılabildiği ve sensör düğümleri arasındaki eşit olmayan mesafe ve enerji harcaması nedeniyle ağ ömrünün artırabildiği görüldü [19].

Bu yaklaşımlarda dahi pilin ömrü bittiğinde değiştirilmesi gerektiği tespit edilmiştir. Günümüzde Su altı sensörlerinin, pil değişimine gerek kalmadan uzun süreli izleme ve veri iletimi için enerji aktarım teknolojileri kullanılarak şarj edilebilmesi mümkün hale gelmiştir [20]. DeMauro ve ark. [21], su altında kullanıma yönelik, yüksek su basıncını ve kısa devreleri ele alan şarj edilebilir bir lityum iyon pil modülü geliştirmiştir. Yapılan çalışma sonucunda enerji aktarım mesafesi sınırlamaları nedeniyle, otonom sualtı araçlarının (OSA) şarj edilmesine yardımcı olması ve rota planlaması yapılmasının gerekli olduğu görülmüştür.

OSA, insan müdahalesi olmadan orta düzeyde faaliyetler gerçekleştirebilen, kendinden tahrikli bir denizaltıdır [22]. OSA'lar deniz yatağı araştırması, arama, tanımlama ve kurtarmada ekonomik olmaları ve güvenlikleri nedeniyle deniz altı araştırmalarında, çevresel izlemede ve deniz güvenliğinde yaygın olarak kullanılmaktadır [23]. OSA'nın sınırlı güç taşıma kapasitesi ve şarj alanı, ardışık düğümlerden veri kaybını sorunlu hale getirmektedir. Bu, OSA'nın özellikle deniz koşullarında daha geniş tespit bölgeleri için kullanılabilirliğini garanti etmeyi zorlaştırmaktadır.

Kablosuz şarj edilebilir sensör ağları için manyetik olarak şarj edilmiş arabalar [24]'te önerilmektedir. SKSA'lar, yer tabanlı kablosuz şarj edilebilir sensör

ağlarından farklı olarak üç boyutlu bir yapıya sahiptir ve su altı mesafesiyle iletim gücünü artırmaktadır.

Bu makalede yol planlama problemine en kısa yolla çözüm arayarak, daha kısa yoldan çözüm daha az enerji tüketimini sağladığı için 'enerji farkında' tasarım hedeflenmektedir. Su altı cihazlarının hesaplama kapasitesi ve enerji tüketimini de gözönünde bulundurarak hesaplama yükü az olan her koşulda çalışabilecek yani her koşula 'dayanıklı' çözümler hedeflenmektedir.

### B. Önemli Katkıları

Bu makalenin literatüre ana katkıları şu şekildedir:

- Bu çalışma, SKSA'daki veri toplama sorunlarına yönelik bir OSA tarafından 3 boyutlu yol planlamasına yönelik bir problemi incelemiş ve yapay zeka tabanlı algoritmaları uygulamıştır.
- Bu çalışmada incelenen probleme uygulanan algoritmaların başardığı en az yol uzunluklarının yanında hesaplama sınırlamalarını ve çözüme ulaşma süreleri de dikkate alınmaktadır.
- Bu yol planlama problemi için diğer algoritmalara göre daha pratik bir algoritma olan en yakın komşu algoritması uygulanmış, özellikle sensör sayısı arttıkça diğer algoritmalarından daha kısa yolu çok daha hızlı sunduğu görülmüştür.

### C. Teşkil

Bu makalenin geri kalanı şu şekilde teşkil edilmiştir. Bölüm II ilgili literatürü sunmaktadır. Bölüm III sistem modelini sunup problemi tanımlamaktadır. Bölüm IV, üç boyutlu yol planlama problemini gezici satıcı problemi olarak ele alıp çeşitli algoritmalar önermektedir. Bölüm V'te önerilen algoritmaların performansları değerlendirmektedir. Bölüm VI makaleyi sonlandırmakta ve gelecekteki araştırma yönlerini sunmaktadır.

## II. İLGİLİ LİTERATÜR

Bu bölümde SKSA'daki yol planlama problemine yönelik ilgili literatür ele alınmaktadır.

İletişim teknikleri pil gücü limitleri nedeniyle enerji tasarrufu sağlamaktadır. Lee ve ark. ağ topolojisi tabanlı enerji tasarruflu SKSA MAC teknikleri üzerinde çalışmıştır. [25]. [26]'da enerji verimli ve güvenilir SKSA MAC ve yönlendirme algoritmaları incelenmiştir. [27] Kanal kalitesini iyileştirmek ve fazlalığı azaltmak için bir paket gönderme yöntemi sunmaktadır. Su ve diğerleri tarafından sualtı akustik sensör ağları (SASA) için hibrit kodlamaya duyarlı bir yönlendirme şeması. [28] iletim yükünü azaltmakta ve güvenilirliği artırmaktadır.

Kümeleme su altı sensör ağlarında enerji verimliliğini, veri toplamayı, kaynak yönetimi ve ömrünü artırmaktadır [29]. Ağ, gereksiz aktarımları azaltmak için her biri bilgi aktaran bir küme başına (KB) sahip kümeler halinde düzenlenmiştir [30]. Sınırlı iletişim kaynaklarına sahip sualtı alanında enerji ve bant genişliği tasarrufu vardır [31].

Güneş ve ark. [32] kümeleme tabanlı iletişim protokolü, sensör düğümü enerji kullanımını azaltmaktadır. [33]'te SYTA'lar için topoloji yönetimi çözümü, kapsamı ve uzun ömürlülüğü geliştirerek güvenilir bağlantı sağlamaktadır. [34], SKSA ağ kapsamını geliştirmek için sanal kuvvet tabanlı dağıtılmış düğüm konuşlandırma stratejisi sunmaktadır. [35]'teki ağ topolojisi kontrol modeli, veri iletimini optimize etmekte ve sağlamlık, enerji tüketimi dengesi ve topoloji gibi su altı yönlerini dikkate alarak SKSA ömrünü uzatmaktadır.

Sensör donanımlı OSA'lar jeoloji, su kalitesi ve deniz yaşamı verilerini toplamaktadır. [36]'da, OSA'nın enerji tasarrufu verilerini gezerek toplamasıyla OSA destekli iletişim test edilmiştir. [37]'de, OSA veri toplama ve yol planlaması için K-ortalama önerilmiştir [38]. OSA'lar veri toplama ve su altı tespiti için kullanılmaktadır [39], [40].

OSA'lar su altında ağ kurabilmekte ve iletişim yapabilmektedir. OSA'lar veya merkezi istasyonlar, mobil veya sabit sensörlerden veri alabilmektedir. Böylece su altı aktivitelerini canlı olarak koordine edilebilmektedirler. Kan ve ark. [41] sahada konuşlandırılabilir üç fazlı kablosuz şarj sistemi, OSA'lari hızlı ve kolay bir şekilde şarj etmektedir. 0-100 m okyanus derinliklerinde OSA navigasyonu için dinamik sistem teorisinin kullanılması, pil ömrünün daha hızlı tüketilmesine yol açmaktadır [42].

Otonom yerleştirme ve pil şarj eden OSA oluşturma işlevi insan müdahalesi olmadan uzun süreli çalışmaya izin vermektedir. Bağlantı istasyonu, sensör düğümlerini ve OSA pillerini şarj etmektedir. Verimlilikleri ve bağımsızlıkları, yeniden şarj edilmeden artmaktadır.

Bu şekilde OSA yol planlama kullanılarak verimliliğin artırılması mümkün hale gelmiştir. Cheng ve diğerleri, OSA rotalarını planlamak, engellerden kaçınmak ve enerji tasarrufu ve ağ ömrü için enerji kullanımını değerlendirmek için kinematik ve dinamik modelleri uygulamıştır [43]. Kumar ve meslektaşları [44], OSA menzillerini önemli ölçüde kısıtlayan hibrit bir su altı keşif tekniği önermektedir. [45]'de keşif bölgesi veri alma noktaları ile daha küçük parçalara ayrılmıştır. Bu şekilde hazırlanan yollar veri toplarken OSA enerjisini korumakta ve şarj edilebilir bir SKSA yol planlama yöntemi [46] ile ağ ömrü uzatılmaktadır.

SKSA enerji kısıtlamalarının ve pil değiştirme zorluklarının, OSA'ları kullanan su altı sensör düğümü şarjı için bir yol planlaması ve enerji tasarrufu stratejisi ile ele alınması mümkündür [47]. Ağ boyutunu ve iletim güvenilirliğini en üst düzeye çıkarmak için, çok sayıda OSA sensör ağ düğümlerini şarj ederken bir genetik algoritma optimum OSA yolunu belirlemektedir. Simülasyon, OSA yol planlama yönteminin standart yöntemlere göre daha hızlı yakınsadığını ve enerji dengeleyici düğüm yoğunluğunu ve ağ boyutunu kullanırken SKSA ömrünü artırdığını göstermektedir. Yol planlamamız, yüksek yoğunluklu ağlarda keşif amaçlı OSA enerjisinden %15 tasarruf sağlamaktadır.

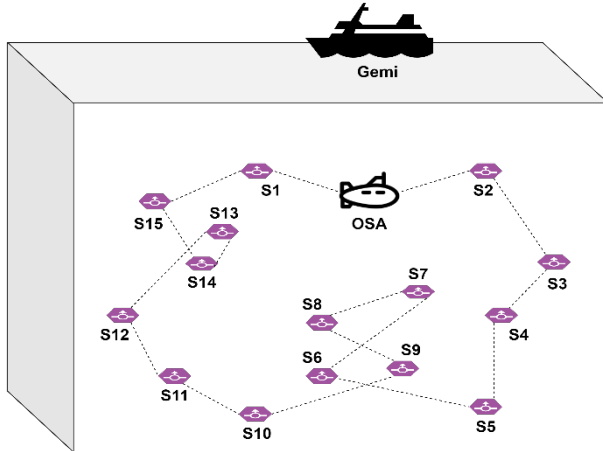
[48]'de bu problemin çözümü için farklı metasezgisel algoritmalar uygulanmıştır. Ayrıca sensörler arası iletişim ve ulaşımın çok zor olduğu bir durum da incelenip güvenlik farkında genetik algoritma metasezgisel algoritması önerilmiştir.

### III. SİSTEM MODELİ VE PROBLEM TANIMI

Bu çalışma, su altı OSA sensör ziyaretleri için enerji bilinçli yol planlama sorununu ele almaktadır. Bu bölüm motive edici bir senaryo vermekte ve probleme buna göre çözüm getirmektedir. Burada öncelikle SKSA sistem modeli incelenmiştir. Enerji bilinçli yol planlama problemi daha sonra daha açık bir şekilde tanımlanmıştır.

#### A. Sistem Modeli

Şekil 2'de Ağ modeli gösterilmiştir. Her sensör düğümü, bir su altı akustik ağı aracılığıyla gemi düğümlerine veri göndermektedir. Manyetik rezonans kuplaj OSA'ları dinlenmek üzere bir şarj istasyonuna dönmeden önce her bir sensör düğümünü şarj etmektedir. Verileri mobil olarak toplanmaktadır. Su altı sensörlerinin enerji tüketimi dengesi bir SKSA sorunudur. Çeşitli araştırmalarda [34, 35, 36], su altı verilerini toplayan OSA'lar farklı enerji kullanımını ele almıştır. OSA, enerji kullanımını dengeleme stratejisine göre her sensör düğümünü ziyaret etmektedir.



Şekil 2. OSA'nın, gemi kazalarını önlemek amacıyla anormallik/risk tespiti için denizi izleyen on beş sensörden (S1, S2, ..., S15) veri topladığı SKSA sistem modeli. Tüm verileri topladıktan sonra gemideki veri merkezine iletilir.

#### B. Problem Tanımı

OSA kullanımı yoluyla enerji bilinçli yol planlama problemi, gezici satıcı problemi (GSP) [49]–[51] olarak sınıflandırılmaktadır. Akıllı Evrimsel Algoritma ve Klasik Arama Algoritması, GSP'nin çözümlenmesi sürecinde genellikle kullanılan iki temel yaklaşımdır. Açgözlü algoritma, yapay potansiyel alan yaklaşımı ve hızlı ilerleme algoritmasının tümü, daha önce bahsedilen kategoriye giren algoritma örnekleridir. Genetik algoritma

gibi biyolojik algoritma ve en yakın komşu algoritması gibi yöntemler ikinci kategoriye girmektedir.

Bu bölümde, her bir sensör düğümü çifti arasındaki mesafeyi içeren OSA'nın enerji bilinçli yol planlama problemi ele alınmıştır. En belirgin NP-zor optimizasyon problemi GSP'dir [50], [51]. GSP, bir satıcı için evden başlayan, bir dizi lokasyonu ziyaret eden ve her şehir bir kez ziyaret edildiğinde minimum yolculuk mesafesiyle orijinal yere dönen bir rota bulur [52].

$m$  tane sensör düğümünün olduğu bir GSP probleminde  $i$ . düğümün  $j$ . düğüme uzaklığı  $c_{ij}$  ile gösterilsin. Ayrıca,  $x_{ij}$   $i$ . Düğümün ardından  $j$ . Düğümün ziyaret edilirse 1, ziyaret edilmezse 0 değeri alabilen ikili (binary) bir değişken olsun. Bu durumda bu makalede incelenen enerji farkında yol planlaması problemi, NP-zor bir GSP problemi olarak şu şekilde ele alınabilir [53]:

$$\min_{x_{ij}} \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^m c_{ij} x_{ij}$$

öyleki

$$\sum_{i=1}^m x_{ij} = 1, j = 1, \dots, m$$

$$\sum_{j=1}^m x_{ij} = 1, i = 1, \dots, m$$

$$\sum_{i \in K} \sum_{j \in K} x_{ij} \leq |K| - 1, \forall K \subset \{1, \dots, m\}$$

### IV. ÖNERİLEN ENERJİ FARKINDA YOL PLANLAMASI

Bu problemi bir GSP problemi olarak ele alarak şu algoritmalar sunulmuştur. Bunlar; En Yakın Komşu (EYK) Tabanlı Yaklaşım, Grey Wolf Optimizer (GWO) Tabanlı Yaklaşımı ve Genetik Algoritma (GA) Tabanlı Yaklaşımıdır.

#### A. En Yakın Komşu (EYK) Tabanlı Yaklaşımı

Bu problem bir TSP olarak ele alınmakta ve bir yaklaşım (approximation) algoritması olan En Yakın Komşu Algoritmasına dayalı bir 3 boyutlu yol planlama çözümü önerilmektedir [54].

#### B. Grey Wolf Optimizer (GWO) Tabanlı Yaklaşımı

Bu problem bir TSP olarak ele alınmakta ve Grey Wolf Optimizer Algoritmasına dayalı bir 3 boyutlu yol planlama çözümü önerilmektedir [55]. GWO, GA'ya göre daha sadedir fakat zayıf yakınsama hızı, düşük çözüm hassasiyeti ve yerel en iyi eğilim dezavantajları da vardır.

#### C. Genetik Algoritma (GA) Tabanlı Yaklaşımı

Bu problem bir GSP olarak ele alınmıştır ve Genetik Algoritmayı [56], [57] temel alan bir 3 boyutlu yol planlama çözümü önerilmektedir. Genetik algoritmaların temel prensibi karmaşık optimizasyon problemlerini biyolojik evrimi taklit ederek çözmektir. GSP sorunlarının üstesinden gelmek için genetik algoritmanın uygulanmasındaki ilk adımlar, GSP çözümünün bireylerini tanımlamak ve popülasyonu başlatmaktır. Popülasyonun her üyesi bir uygunluk fonksiyonuna göre

derecelendirilmekte ve seçim, çaprazlama ve mutasyon gibi genetik süreçler için en uygun bireyler seçilmektedir. Genetik algoritmanın sonlandırma kriteri seçilen maksimum yineleme sayısıdır. Bu işe bireysel uygunluk, toplam rota boyutu veya toplam OSA enerji tüketimidir. Tüm algılama düğümlerinin mesafelerini toplayarak, bu durumda her bireyin uygunluğunu belirlenebilir.

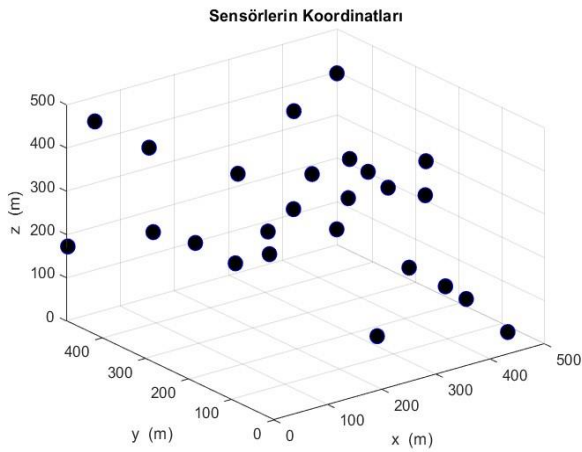
## V. SAYISAL SONUÇLAR

Bu bölümde, her sensör düğümü çifti arasındaki mesafeyi içeren OSA'nın 3 boyutlu enerji duyarlı yol planlama problemi için algoritmaların performansını değerlendirilmektedir. Simülasyonlar için sensör düğümlerini rastgele konumlandırarak  $500\text{ m} \times 500\text{ m} \times 500\text{ m}$  'lık bir alan oluşturulmuştur (İlgili çalışmalarda benzer boyut uzunluğu ve mesafe aralığı seçilmektedir).

İlk alt bölümde OSA ve 25 sensörden oluşan bir senaryoyu ele alınmaktadır. İkinci alt bölümde OSA ve 50 düğüm içeren bir senaryoyu ele alınmaktadır. Üçüncü alt bölümde OSA ve 75 sensörden oluşan bir senaryoyu ele alınmaktadır. Son alt bölümde OSA ve 100 düğüm içeren bir senaryoyu ele alınmaktadır.

### A. 25-sensörlü senaryo

Bu alt bölümde 25 düğüm ve tek bir OSA içeren bir senaryoyu ele alacağız. Şekil 3,  $500\text{ m} \times 500\text{ m} \times 500\text{ m}$  alandaki 25 düğümün konumunu göstermektedir.



Şekil 3. Sensör düğümlerinin koordinatları

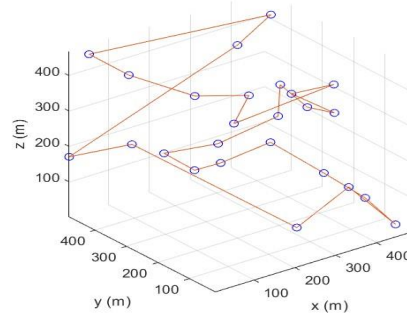
25 düğümün konumları şu şekildedir:  $\{(147, 269, 390), (164, 118, 455), (251, 330, 191), (59, 29, 453), (369, 66, 148), (449, 419, 445), (484, 66, 2), (361, 465, 36), (400, 152, 307), (483, 294, 43), (25, 448, 469), (428, 393, 104), (41, 342, 453), (314, 42, 468), (300, 159, 393), (163, 388, 168), (373, 297, 241), (391, 227, 292), (260, 417, 73), (294, 324, 457), (451, 392, 259), (474, 150, 42), (204, 17, 114), (55, 350, 249), (3, 483, 171)\}$

Bu parametrelerin farklı alt kümelerini dikkate alarak elde edilen rota bulma sorununu bir GSP problemi olarak ele alarak; aşağıdaki “En Yakın Komşu (EYK) Tabanlı Yaklaşım, Grey Wolf Optimizasyon Algoritması (GWO) Tabanlı Yaklaşım ve Genetik Algoritma (GA) Tabanlı Yaklaşım” algoritmalarının başarımları incelenmektedir.

### 1. En Yakın Komşu (EYK) Tabanlı Yaklaşım

Bu alt bölümde, 3D GSP problemi için EYK tabanlı bir çözümün performansını değerlendirilmektedir.

Şekil 4, Şekil 3'teki 25 düğümü ziyaret etmek için EYK'nin 1000 yinelemede elde ettiği yol planlama çözümünü göstermektedir.



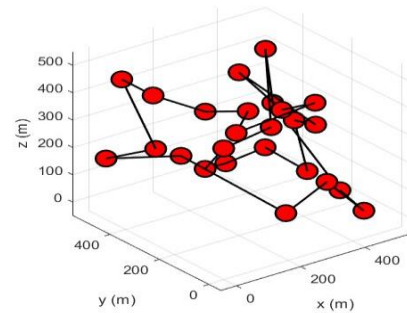
Şekil 4. En Yakın Komşu (EYK) tarafından 1000 yinelemede elde edilen yol planlama çözümü

Bu çözüme göre toplam yol uzunluğu  $4407\text{ m}$ 'dir.  $0.080580$  saniyede bu çözüme ulaşılmaktadır.

### 2. Grey Wolf Optimizasyon Algoritması (GWO) Tabanlı Yaklaşım

Bu alt bölümde, 3 boyutlu GSP problemi için GWO tabanlı bir çözümün performansını değerlendirilmektedir.

Şekil 5, Şekil 3'teki 25 düğümü ziyaret etmek için GWO'nin 1000 yinelemede elde ettiği yol planlama çözümünü göstermektedir.



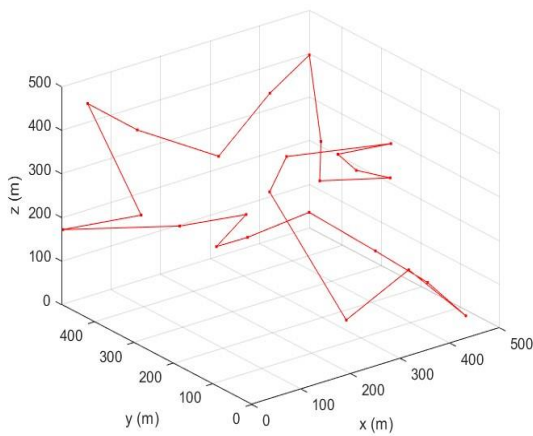
Şekil 5. Grey Wolf Optimizasyon Algoritması tarafından 1000 yinelemede elde edilen yol planlama çözümü

Bu çözüme göre toplam yol uzunluğu 4663 m'dir. 9.028811 saniyede bu çözüme ulaşılmaktadır.

### 3. Genetik Algoritma (GA) Tabanlı Yaklaşım

Bu alt bölümde, 3 boyutlu GSP problemi için GA tabanlı bir çözümün performansını değerlendirilmektedir.

Şekil 6, Şekil 3'teki 25 düğümü ziyaret etmek için GA'nin 1000 yinelemede elde ettiği yol planlama çözümünü göstermektedir.

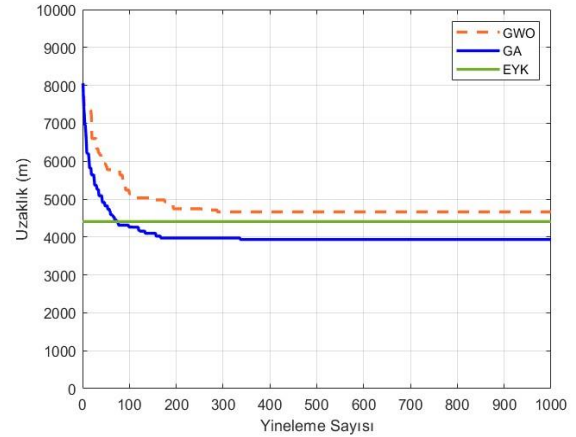


Şekil 6. Genetik Algoritma tarafından 1000 yinelemede elde edilen yol planlama çözümü

Bu çözüme göre toplam yol uzunluğu 3934 m'dir. 2.321449 saniyede bu çözüme ulaşılmaktadır.

### 4. Karşılaştırma

Şekil 7, Şekil 3'te verilen 25 sensör düğümü ziyaret etmek için OSA'nın farklı algoritmalarla (EYK Tabanlı Yaklaşım, GWO Tabanlı Yaklaşım ve GA Tabanlı Yaklaşım) kat ettiği toplam mesafeyi göstermektedir. Şekil 7'den 25 düğüm senaryosu için hazırlanan algoritmaların performansı amacıyla aşağıdaki gözlemler yapılabilmektedir. Genel eğilim göz önüne alındığında, EYK tabanlı yaklaşım ve GA Tabanlı Yaklaşım, GWO Tabanlı Yaklaşım göre daha iyi performans göstermektedir. EYK tabanlı yaklaşım, GA tabanlı Yaklaşım göre biraz daha uzun bir yol önerse de, EYK tabanlı Yaklaşım, GA tabanlı yaklaşımın çözüme ulaşma süresine (2.321449 sn) göre çözüme çok daha kısa sürede (0.080580 sn) ulaşmaktadır (28.8 kat hızlı).



Şekil 7. 25 düğümün tüm algoritmalar (GWO tabanlı Yaklaşım ve GA tabanlı Yaklaşım) tarafından 1000 yinelemede ziyaret edilmesi için elde edilen yol uzunlukları (EYK tabanlı yaklaşım yinelemeli olmasa da diğer algoritmaların farklı yineleme sayılarında performansı ile ilgili kıyaslama için bu şekle eklendi)

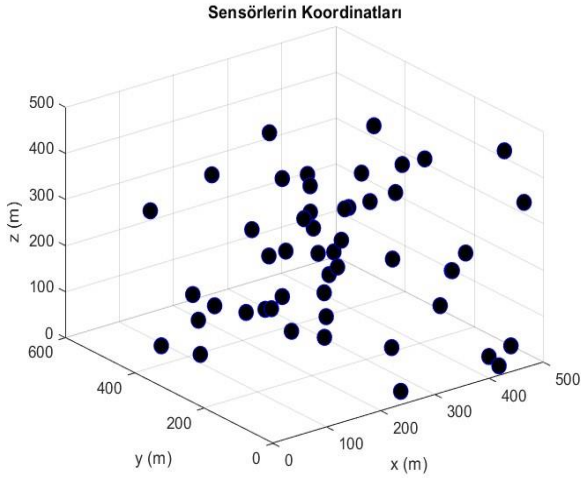
Tablo 1'den aşağıdaki gözlemlerin yapılması mümkündür. İlk yinelemede GA ve GWO 8 km gibi yüksek yol uzunlukları ile başlarken EYK 4.41 km civarı çözümü çok hızlı elde etmiştir. 100.ncü yinelemede GA tabanlı yaklaşım, GWO tabanlı yaklaşımdan önemli ölçüde daha iyi sonuçlar elde etmektedir (0.88 Km, yani GWO tabanlı yaklaşımdan %17 daha az). 100.ncü yinelemeden itibaren, GA tabanlı yaklaşım, GWO ve EYK tabanlı yaklaşımlardan daha iyi sonuçlar elde etmektedir. 1000.nci yinelemede de, GA tabanlı yaklaşım GWO tabanlı yaklaşımlardan önemli ölçüde daha iyi bir performans sergilerken (730 m, yani GWO tabanlı yaklaşımdan %15.7 daha az), EYK'dan kısa bir yolu elde etmekte iken EYK çok daha hızlı ve pratik bir çözüm sunmaktadır.

TABLO I. YİNELEME SAYISINA GÖRE ALGORİTMALAR (GWO TABANLI YAKLAŞIM VE GA TABANLI YAKLAŞIM) TARAFINDAN 25 DÜĞÜMÜN ZİYARET EDİLMESİ İÇİN (KM CİNSİNDEN) TOPLAM MESAFE (EYK TABANLI YAKLAŞIM YİNELEMELİ OLMASA DA DİĞER ALGORİTMALARIN FARKLI YİNELEME SAYILARINDA PERFORMANSI İLE İLGİLİ KIYASLAMA İÇİN BU ŞEKLE EKLENDİ)

yine	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
GWO	5.14	4.74	4.66	4.66	4.66	4.66	4.66	4.66	4.66	4.66
GA	4.26	3.97	3.97	3.93	3.93	3.93	3.93	3.93	3.93	3.93
EYK	4.41	4.41	4.41	4.41	4.41	4.41	4.41	4.41	4.41	4.41

### B. 50-sensörlü senaryo

Bu alt bölümde 50 düğüm ve tek bir OSA içeren bir senaryoyu ele alacağız. Şekil 8, 500 m × 500 m × 500 m alandaki 50 düğümün konumunu göstermektedir.



Şekil 8. Sensör düğümlerin koordinatları

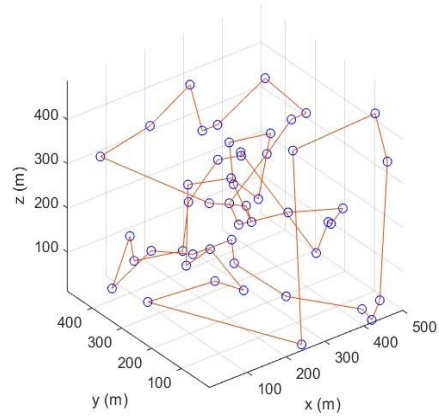
50 düğümün konumları şu şekildedir: { (440, 20, 472), (500, 57, 325), (283, 289, 65), (292, 309, 106), (55, 147, 388), (452, 20, 45), (236, 381, 178), (423, 9, 16), (157, 461, 36), (75, 28, 450), (141, 72, 153), (290, 354, 346), (2, 213, 111), (146, 175, 125), (156, 207, 283), (447, 261, 360), (106, 139, 228), (448, 482, 170), (426, 110, 221), (487, 279, 21), (257, 240, 184), (323, 160, 225), (139, 20, 384), (294, 106, 400), (412, 353, 409), (437, 60, 12), (239, 5, 27), (256, 270, 219), (317, 388, 242), (207, 297, 388), (167, 154, 441), (148, 463, 94), (185, 103, 278), (270, 445, 26), (346, 261, 303), (387, 232, 380), (397, 414, 211), (29, 368, 61), (150, 118, 369), (205, 65, 489), (116, 350, 124), (223, 359, 458), (458, 201, 137), (13, 98, 242), (338, 186, 18), (58, 445, 314), (428, 152, 166), (212, 156, 281), (208, 330, 93), (100, 333, 420) }

Bu parametrelerin farklı alt kümelerini dikkate alarak elde edilen rota bulma sorununu bir GSP problemi olarak ele alarak; aşağıdaki “En Yakın Komşu (EYK) Tabanlı Yaklaşım, Grey Wolf Optimizasyon Algoritması (GWO) Tabanlı Yaklaşım ve Genetik Algoritma (GA) Tabanlı Yaklaşım” algoritmalarının performansları değerlendirilmektedir.

### 1. En Yakın Komşu (EYK) Tabanlı Yaklaşım

Bu alt bölümde, 3D GSP problemi için EYK tabanlı bir çözümün performansını değerlendirilmektedir.

Şekil 9, Şekil 8'deki 50 düğümü ziyaret etmek için EYK'nin 1000 yinelemede elde ettiği yol planlama çözümünü göstermektedir.



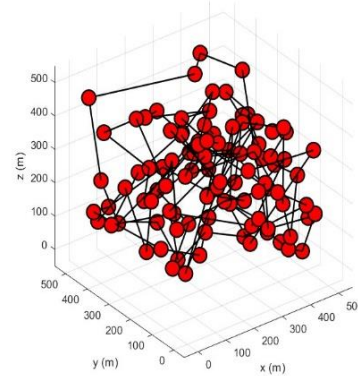
Şekil 9. En Yakın Komşu (EYK) tarafından 1000 yinelemede elde edilen yol planlama çözümü

Bu çözüme göre toplam yol uzunluğu 6358 m'dir. 0.107617 saniyede bu çözüme ulaşılmaktadır.

### 2. Grey Wolf Optimizasyon Algoritması (GWO) Tabanlı Yaklaşım

Bu alt bölümde, 3 boyutlu GSP problemi için GWO tabanlı bir çözümün performansını değerlendirilmektedir.

Şekil 10, Şekil 8'deki 50 düğümü ziyaret etmek için GWO'nin 1000 yinelemede elde ettiği yol planlama çözümünü göstermektedir.



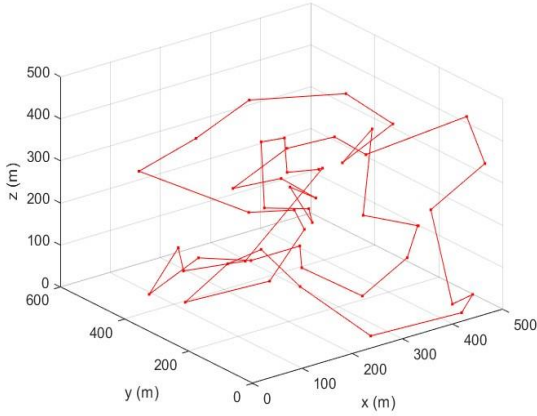
Şekil 10. Grey Wolf Optimizasyon Algoritması tarafından 1000 yinelemede elde edilen yol planlama çözümü

Bu çözüme göre toplam yol uzunluğu 8837 m'dir. 9.689545 saniyede bu çözüme ulaşılmaktadır.

### 3. Genetik Algoritma (GA) Tabanlı Yaklaşım

Bu alt bölümde, 3 boyutlu GSP problemi için GA tabanlı bir çözümün performansını değerlendirilmektedir.

Şekil 11, Şekil 8'deki 50 düğümü ziyaret etmek için GA'nin 1000 yinelemede elde ettiği yol planlama çözümünü göstermektedir.

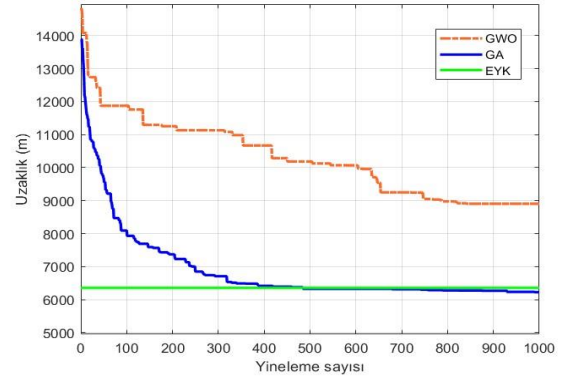


Şekil 11. Genetik Algoritma tarafından 1000 yinelemede elde edilen yol planlama çözümü

Bu çözüme göre toplam yol uzunluğu 6421 m'dir. 3.689545 saniyede bu çözüme ulaşılmaktadır.

### 4. Karşılaştırma

Şekil 12, Şekil 8'te verilen 50 sensör düğümü ziyaret etmek için OSA'nın farklı algoritmalarla (EYK Tabanlı Yaklaşım, GWO Tabanlı Yaklaşım ve GA Tabanlı Yaklaşım) kat ettiği toplam mesafeyi göstermektedir. Şekil 12'den 50 düğüm senaryosu için hazırlanan algoritmaların performansı amacıyla aşağıdaki gözlemler yapılabilmektedir. Genel eğilim göz önüne alındığında, EYK tabanlı yaklaşım ve GA Tabanlı Yaklaşım, GWO Tabanlı Yaklaşım göre daha iyi performans göstermektedir. EYK tabanlı yaklaşım, 500.ncü yinelemeye kadar GA tabanlı Yaklaşım'dan daha iyi sonuç vermeye kalmamakta, aynı zamanda EYK tabanlı Yaklaşım, GA tabanlı yaklaşımın çözüme ulaşma süresine (3.689545 sn) göre çözüme çok daha kısa sürede (0.107617 sn) ulaşmaktadır (34.3 kat hızlı).



Şekil 12. 50 düğümün tüm algoritmalar (GWO tabanlı Yaklaşım ve GA tabanlı Yaklaşım) tarafından 1000 yinelemede ziyaret edilmesi için elde edilen yol uzunlukları (EYK tabanlı yaklaşım yinelemeli olmasa da diğer algoritmaların farklı yineleme sayılarında performansı ile ilgili kıyaslama için bu şekle eklendi)

Tablo 2'den aşağıdaki gözlemlerin yapılması mümkündür. İlk yinelemede GA ve GWO 14-15 km gibi yüksek yol uzunlukları ile başlarken EYK 6.36 km civarı çözümü çok hızlı elde etmiştir. 100.ncü yinelemede GA tabanlı yaklaşım, GWO tabanlı yaklaşımdan önemli ölçüde daha iyi sonuçlar elde etmektedir (3.00 Km, yani GWO tabanlı yaklaşımdan %32 daha az). 300.ncü yinelemede, EYK tabanlı yaklaşım, GWO ve GA tabanlı yaklaşımlardan daha iyi sonuçlar elde etmektedir. 600.ncü yinelemede, GA tabanlı yaklaşım, EYK tabanlı yaklaşımdan daha iyi sonuçlar elde etmektedir. 1000.ncü yinelemesinde, GA tabanlı yaklaşım GWO tabanlı yaklaşımlardan önemli ölçüde daha iyi bir performans sergilerken (2610 m, yani GWO tabanlı yaklaşımdan %29,5 daha az), EYK'dan kısa bir yolu elde etmekte ve EYK çok daha hızlı ve pratik bir çözüm sunmaktadır.

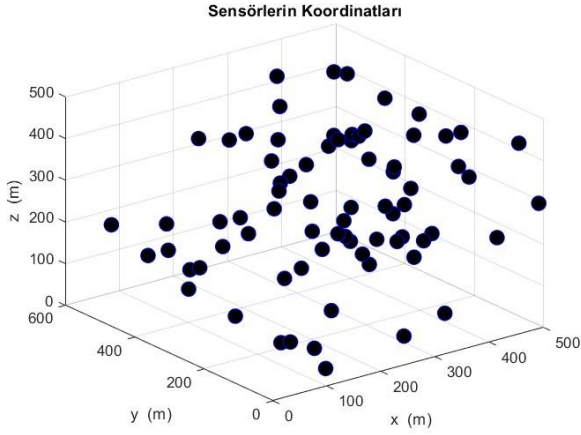
TABLO II. YİNELEME SAYISINA GÖRE ALGORİTMALAR (GWO TABANLI YAKLAŞIM VE GA TABANLI YAKLAŞIM) TARAFINDAN 50 DÜĞÜMÜN ZİYARET EDİLMESİ İÇİN (KM CİNSİNDEN) TOPLAM MESAFE (EYK TABANLI YAKLAŞIM YİNELEMELİ OLMASA DA DİĞER ALGORİTMALARIN FARKLI YİNELEME SAYILARINDA PERFORMANSI İLE İLGİLİ KIYASLAMA İÇİN BU ŞEKLE EKLENDİ)

yine	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
GWO	11.9	11.3	11.1	10.7	10.2	9.97	9.25	8.98	8.84	8.84
GA	8.09	7.38	6.71	6.42	6.33	6.33	6.31	6.28	6.27	6.23
EYK	6.36	6.36	6.36	6.36	6.36	6.36	6.36	6.36	6.36	6.36



### C. 75-sensörlü senaryo

Bu alt bölümde 75 düğüm ve tek bir OSA içeren bir senaryoyu ele alacağız. Şekil 13, 500 m × 500 m × 500 m alandaki 75 düğümün konumunu göstermektedir.



Şekil 13. Sensör düğümlerinin koordinatları

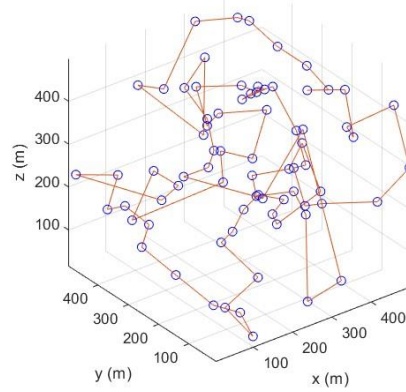
75 düğümün konumları şu şekildedir: {(307, 202, 142), (75, 84, 235), (206, 180, 222), (126, 45, 16), (477, 324, 396), (357, 335, 129), (277, 224, 211), (160, 490, 71), (405, 98, 382), (412, 298, 190), (363, 392, 359), (299, 168, 218), (357, 330, 387), (137, 27, 342), (218, 494, 164), (497, 278, 354), (429, 394, 278), (293, 270, 420), (443, 46, 218), (252, 373, 291), (436, 116, 339), (497, 10, 295), (475, 33, 438), (357, 445, 111), (256, 42, 276), (374, 476, 164), (133, 185, 22), (107, 276, 60), (10, 318, 236), (268, 95, 336), (309, 218, 455), (470, 412, 403), (9, 375, 202), (250, 41, 457), (125, 27, 162), (346, 293, 401), (91, 92, 74), (338, 324, 189), (412, 430, 475), (413, 470, 464), (105, 147, 410), (286, 189, 179), (123, 189, 345), (54, 296, 187), (414, 422, 157), (456, 340, 103), (164, 137, 16), (61, 190, 345), (366, 346, 363), (193, 428, 394), (81, 434, 230), (322, 489, 326), (117, 101, 238), (181, 498, 375), (311, 438, 262), (22, 278, 154), (445, 298, 239), (298, 88, 17), (433, 270, 89), (322, 492, 477), (335, 89, 232), (147, 375, 175), (230, 340, 495), (323, 158, 375), (108, 173, 471), (443, 234, 156), (220, 415, 165), (118, 262, 499), (455, 169, 419), (323, 9, 93), (297, 304, 390), (4, 473, 240), (353, 456, 268), (327, 132, 305), (412, 238, 401) }

Bu parametrelerin farklı alt kümelerini dikkate alarak eldeki rota bulma sorununu bir GSP problemi olarak ele alarak; aşağıdaki “En Yakın Komşu (EYK) Tabanlı Yaklaşım, Grey Wolf Optimizasyon Algoritması (GWO) Tabanlı Yaklaşım ve Genetik Algoritma (GA) Tabanlı Yaklaşım” algoritmalarının performansları değerlendirilmektedir.

### 1. En Yakın Komşu (EYK) Tabanlı Yaklaşım

Bu alt bölümde, 3D GSP problemi için EYK tabanlı bir çözümün performansını değerlendirilmektedir.

Şekil 14, Şekil 13'teki 75 düğümü ziyaret etmek için EYK'nin 1000 yinelemede elde ettiği yol planlama çözümünü göstermektedir.



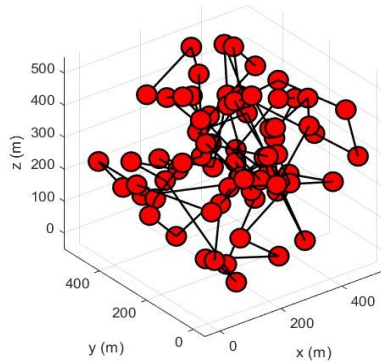
Şekil 14. En Yakın Komşu (EYK) tarafından 1000 yinelemede elde edilen yol planlama çözümü

Bu çözüme göre toplam yol uzunluğu 7372 m'dir. 0.133651 saniyede bu çözüme ulaşılmaktadır.

### 2. Grey Wolf Optimizasyon Algoritması (GWO) Tabanlı Yaklaşım

Bu alt bölümde, 3 boyutlu GSP problemi için GWO tabanlı bir çözümün performansını değerlendirilmektedir.

Şekil 15, Şekil 13'teki 75 düğümü ziyaret etmek için GWO'nin 1000 yinelemede elde ettiği yol planlama çözümünü göstermektedir.



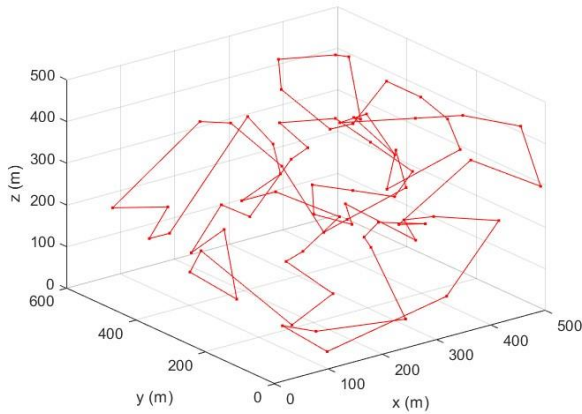
Şekil 15. Grey Wolf Optimizasyon Algoritması tarafından 1000 yinelemede elde edilen yol planlama çözümü

Bu çözüme göre toplam yol uzunluğu 12879 m'dir. 10.610287 saniyede bu çözüme ulaşılmaktadır.

### 3. Genetik Algoritma (GA) Tabanlı Yaklaşım

Bu alt bölümde, 3 boyutlu GSP problemi için GA tabanlı bir çözümün performansını değerlendirilmektedir.

Şekil 15, Şekil 13'teki 75 düğümü ziyaret etmek için GA'nin 1000 yinelemede elde ettiği yol planlama çözümünü göstermektedir.

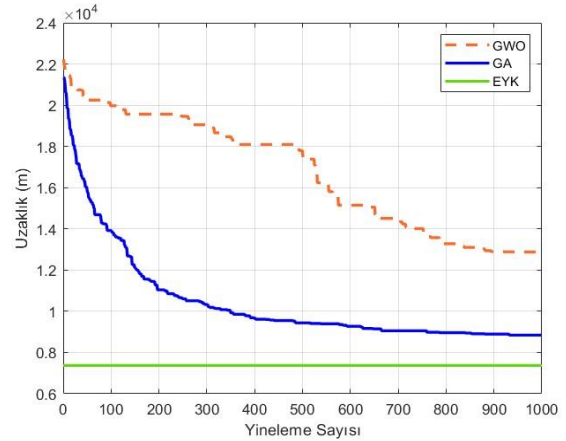


Şekil 16. Genetik Algoritma tarafından 1000 yinelemede elde edilen yol planlama çözümü

Bu çözüme göre toplam yol uzunluğu 8844 m'dir. 4.879424 saniyede bu çözüme ulaşılmaktadır.

### 4. Karşılaştırma

Şekil 17, Şekil 13'te verilen 75 sensör düğümü ziyaret etmek için OSA'nın farklı algoritmalarla (EYK Tabanlı Yaklaşım, GWO Tabanlı Yaklaşım ve GA Tabanlı Yaklaşım) kat ettiği toplam mesafeyi göstermektedir. Şekil 17'den 75 düğüm senaryosu için hazırlanan algoritmaların performansı amacıyla aşağıdaki gözlemler yapılabilmektedir. Genel eğilim göz önüne alındığında, EYK tabanlı yaklaşım ve GA Tabanlı Yaklaşım, GWO Tabanlı Yaklaşım göre daha iyi performans göstermektedir. EYK tabanlı yaklaşım, yalnızca GA tabanlı Yaklaşım'dan daha iyi sonuç vermekle kalmamakta, aynı zamanda EYK tabanlı Yaklaşım, GA tabanlı yaklaşımın çözüme ulaşma süresine (4.879424 sn) göre çözüme çok daha kısa sürede (0.133651 sn) ulaşmaktadır (36.5 kat hızlı). Tüm bunlar göz önüne alındığında sensör düğüm sayısının 50 düğüm'den 75 düğüm'e çıkarılması, EYK yaklaşımında önemli bir fark yaratmaktadır.



Şekil 17. 75 düğümün tüm algoritmalar (GWO tabanlı Yaklaşım ve GA tabanlı Yaklaşım) tarafından 1000 yinelemede ziyaret edilmesi için elde edilen yol uzunlukları (EYK tabanlı yaklaşım yinelemeli olmasa da diğer algoritmaların farklı yineleme sayılarında performansı ile ilgili kıyaslama için bu şekle eklendi)

Tablo III'den aşağıdaki gözlemlerin yapılması mümkündür. İlk yinelemede GA ve GWO 22 km gibi yüksek yol uzunlukları ile başlarken EYK 7.37 km civarı çözümü çok hızlı elde etmiştir. 100.ncü yinelemede GA tabanlı yaklaşım, GWO tabanlı yaklaşımdan önemli ölçüde daha iyi sonuç elde etmektedir (6.10 Km fark, yani GWO tabanlı yaklaşımdan %30 daha az). 300.ncü yinelemede, GA tabanlı yaklaşım, GWO tabanlı yaklaşımdan neredeyse iki kat iyi sonuç elde etmektedir (8.80 Km fark, yani GWO tabanlı yaklaşımdan %46 daha az). 600.ncü yinelemede, GA tabanlı yaklaşım, GWO tabanlı yaklaşımdan daha iyi sonuç elde etmektedir (5.83 Km fark, yani GWO tabanlı yaklaşımdan %39 daha az). 1000.ncü yinelemesinde, GA tabanlı yaklaşım GWO tabanlı yaklaşımlardan önemli ölçüde daha iyi bir performans sergilemektedir (4.06 km, yani GWO tabanlı yaklaşımdan %31,5 daha az).

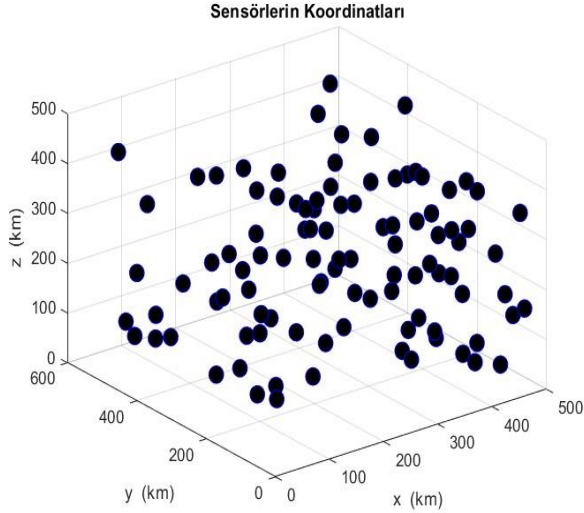
Diğer yandan, GA, 1000. Yineleme sayısında dahi EYK'nın başardığından (7.37 km) kısa bir yolu elde edememiştir. Bunun yanında, EYK GA'ya ve GWO'ya göre de çok daha hızlı ve pratik bir çözüm sunmaktadır.

TABLO III. YİNELEME SAYISINA GÖRE ALGORİTMALAR (GWO TABANLI YAKLAŞIM VE GA TABANLI YAKLAŞIM) TARAFINDAN 75 DÜĞÜMÜN ZİYARET EDİLMESİ İÇİN (KM CİNSİNDEN) TOPLAM MESAFE (EYK TABANLI YAKLAŞIM YİNELEMELİ OLMASA DA DİĞER ALGORİTMALARIN FARKLI YİNELEME SAYILARINDA PERFORMANSI İLE İLGİLİ KIYASLAMA İÇİN BU ŞEKLE EKLENDİ)

yine	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
GWO	20.0	19.6	19.1	18.1	17.8	15.1	14.5	13.3	12.9	12.9
GA	13.9	11.0	10.3	9.67	9.44	9.27	9.05	8.96	8.89	8.84
EYK	7.37	7.37	7.37	7.37	7.37	7.37	7.37	7.37	7.37	7.37

#### D. 100-sensörlü senaryo

Bu alt bölümde 100 düğüm ve tek bir OSA içeren bir senaryo ele alınmıştır. Şekil 18,  $500\text{ m} \times 500\text{ m} \times 500\text{ m}$  alandaki 100 düğümün konumunu göstermektedir.



Şekil 18. Sensör düğümlerinin koordinatları

100 düğümün konumları şu şekildedir:

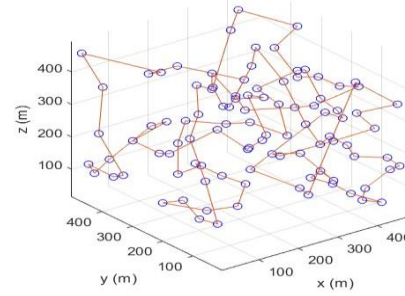
{ (408, 82, 323), (453, 398, 190), (64, 156, 406), (457, 265, 267), (317, 83, 176), (49, 301, 470), (140, 132, 438), (274, 328, 276), (479, 345, 312), (483, 375, 294), (79, 226, 104), (486, 42, 151), (479, 115, 236), (243, 457, 116), (401, 77, 423), (71, 413, 98), (211, 270, 113), (458, 499, 86), (397, 40, 114), (480, 222, 218), (328, 54, 156), (18, 481, 462), (425, 3, 216), (467, 388, 93), (340, 409, 453), (379, 435, 490), (372, 43, 220), (197, 200, 56), (328, 130, 130), (86, 401, 205), (354, 216, 298), (16, 456, 132), (139, 91, 302), (24, 132, 356), (49, 73, 111), (412, 69, 59), (348, 435, 149), (159, 290, 160), (476, 275, 213), (18, 73, 254), (220, 427, 43), (191, 312, 132), (383, 176, 401), (398, 257, 15), (94, 201, 465), (245, 38, 366), (223, 120, 245), (324, 62, 290), (355, 92, 119), (378, 120, 230), (139, 209, 482), (340, 25, 274), (328, 452, 261), (82, 473, 116), (60, 246, 245), (250, 245, 313), (480, 169, 340), (171, 451, 198), (293, 185, 184), (112, 56, 494), (376, 391, 19), (128, 195, 443), (253, 121, 457), (350, 202, 399), (446, 49, 50), (480, 66, 131), (274, 472, 168), (70, 479, 340), (75, 288, 69), (129, 30, 361), (421, 118, 54), (128, 177, 327), (408, 411, 248), (122, 8, 390), (465, 22, 358), (175, 85, 452), (99, 325, 446), (126, 366, 168), (309, 324, 350), (237, 226, 99), (176, 274, 16), (416, 149, 373), (293, 373, 251), (275, 95, 240), (459, 344, 453), (143, 92, 305), (379, 185, 309), (377, 313, 430), (191, 391, 403), (284, 41, 289), (38, 465, 92), (27, 388, 120), (266, 244, 444), (390, 218, 15), (468, 224, 245), (65, 154, 84), (285, 255, 490), (235, 256, 357), (6, 409, 251), (169, 398, 236) }

Bu parametrelerin farklı alt kümeleri dikkate alınarak bu problemi bir GSP problemi olarak ele alınmış ve “En Yakın Komşu (EYK) Tabanlı Yaklaşım ve Genetik Algoritma (GA) Tabanlı Yaklaşım” algoritmalarının performansı kriterlerine göre değerlendirilmiştir.

#### 1. En Yakın Komşu (EYK) Tabanlı Yaklaşım

Bu alt bölümde, 3 boyutlu GSP problemi için EYK tabanlı bir çözümün performansını değerlendirilmektedir.

Şekil 19, Şekil 18’deki 100 düğümü ziyaret etmek için EYK’nin 1000.nci yinelemede elde ettiği yol planlama çözümünü göstermektedir.



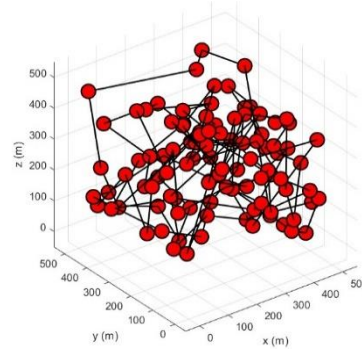
Şekil 19. En Yakın Komşu algoritması tarafından 1000 yinelemede elde edilen yol planlama çözümü

Bu çözüme göre toplam yol uzunluğu 9045 m’dir. 0.173103 saniyede bu çözüme ulaşılmaktadır.

#### 2. Grey Wolf Optimizasyon Algoritması (GWO) Tabanlı Yaklaşım

Bu alt bölümde, 3 boyutlu GSP problemi için GWO tabanlı bir çözümün performansını değerlendirilmektedir.

Şekil 20, Şekil 18’teki 100 düğümü ziyaret etmek için GWO’nin 1000 yinelemede elde ettiği yol planlama çözümünü göstermektedir.



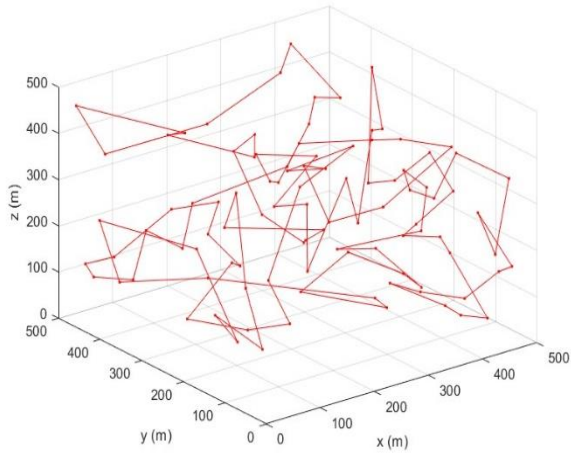
Şekil 20. Grey Wolf Optimizasyon Algoritması tarafından 1000 yinelemede elde edilen yol planlama çözümü

Bu çözüme göre toplam yol uzunluğu 17794 m'dir. 11.294668 saniyede bu çözüme ulaşılmaktadır.

### 3. Genetik Algoritma (GA) Tabanlı Yaklaşım

Bu alt bölümde, 3 boyutlu GSP problemi için GA tabanlı bir çözümün performansını değerlendirilmektedir.

Şekil 21, Şekil 18'deki 100 düğümü ziyaret etmek için GA'nin 1000.nci yinelemede elde ettiği yol planlama çözümünü göstermektedir.

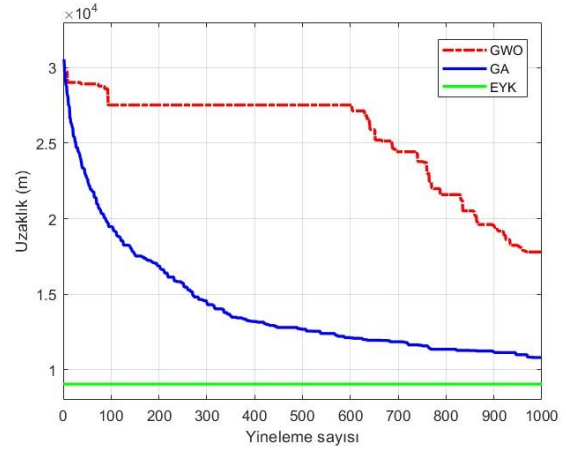


Şekil 21. Genetik Algoritma tarafından 1000.nci yinelemede elde edilen yol planlama çözümü

Bu çözüme göre toplam yol uzunluğu 10837 m'dir. 6.294668 saniyede bu çözüme ulaşılmaktadır.

### 4. Karşılaştırma

Şekil 20, Şekil 17'de verilen 100 sensör düğümü ziyaret etmek için OSA'nın farklı algoritmalarla (EYK Tabanlı Yaklaşım, GWO Tabanlı Yaklaşım ve GA Tabanlı Yaklaşım) kat ettiği toplam mesafeyi göstermektedir. Şekil 20'den, 100 sensör senaryosu için algoritmaların performansını aşağıdaki gözlemleri yapabiliriz. Genel eğilim göz önüne alındığında, EYK Tabanlı Yaklaşım, GWO ve GA Tabanlı Yaklaşım göre daha iyi performans göstermektedir. EYK tabanlı yaklaşım, yalnızca GWO tabanlı yaklaşımdan ve GA Tabanlı Yaklaşımdan daha iyi sonuç vermemekle kalmaz, aynı zamanda EYK tabanlı Yaklaşım, GA tabanlı yaklaşımın çözüme ulaşma süresine (6.294668 sn) göre çözüme çok daha kısa sürede (0.173103 sn) ulaşmaktadır (36.4 kat hızlı). Tüm bunlar göz önüne alındığında sensör düğüm sayısının 100 düğüme çıkarılması, EYK yaklaşımında önemli bir fark yaratmaktadır.



Şekil 22. 100 düğümün tüm algoritmalar (GWO tabanlı Yaklaşım ve GA tabanlı Yaklaşım) tarafından 1000 yinelemede ziyaret edilmesi için elde edilen yol uzunlukları (EYK tabanlı yaklaşım yinelemeli olmasa da diğer algoritmaların farklı yineleme sayılarında performansı ile ilgili kıyaslama için bu şekle eklendi)

Tablo IV'den aşağıdaki gözlemleri yapabiliriz. İlk yinelemede GA ve GWO 28-30 km gibi yüksek yol uzunlukları ile başlarken EYK 9.05 km civarı çözümü çok hızlı elde etmiştir. 100.ncü yinelemede GA tabanlı yaklaşım, GWO tabanlı yaklaşımdan önemli ölçüde daha iyi sonuçlar elde etmektedir (8.00 Km, yani GWO tabanlı yaklaşımdan %29 daha az). 300.ncü yinelemede, EYK tabanlı yaklaşım, GWO ve GA tabanlı yaklaşımlardan daha iyi sonuçlar elde etmektedir. 600.ncü yinelemede, GA tabanlı yaklaşım, EYK tabanlı yaklaşımdan daha iyi sonuçlar elde etmektedir. 1000.nci yinelemesinde, GA tabanlı yaklaşım, GWO tabanlı yaklaşımdan önemli ölçüde daha iyi bir performans sergilerken (7.00 km, yani GWO tabanlı yaklaşımdan %39,3 daha az), EYK tabanlı yaklaşım, GWO ve GA'dan kısa bir yolu elde ederken çok daha hızlı ve pratik bir çözüm önermektedir.

TABLO IV. YİNELEME SAYISINA GÖRE ALGORİTMALAR (GWO TABANLI YAKLAŞIM VE GA TABANLI YAKLAŞIM) TARAFINDAN 100 DÜĞÜMÜN ZİYARET EDİLMESİ İÇİN (KM CİNSİNDEN) TOPLAM MESAFE (EYK TABANLI YAKLAŞIM YİNELEMELİ OLMASA DA DİĞER ALGORİTMALARIN FARKLI YİNELEME SAYILARINDA PERFORMANSI İLE İLGİLİ KIYASLAMA İÇİN BU ŞEKLE EKLENDİ)

yine	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
GWO	27.5	27.5	27.5	27.5	27.5	27.5	24.4	21.6	19.5	17.8
GA	19.5	16.9	14.5	13.2	12.7	12.1	11.8	11.3	11.2	10.8
EYK	9.05	9.05	9.05	9.05	9.05	9.05	9.05	9.05	9.05	9.05

## VI. SONUÇ

Günümüzde araştırmalar daha uzun menzile ve daha geniş keşif aralıklarına odaklanmaktadır. Bu araştırmada, sualtı kablosuz sensör ağı (SKSA) şarj etmek için sınırlı batarya gücüne sahip otonom bir su altı aracı kullanarak verimli bir yol planlama yaklaşımı sunulmakta ve toplam enerji kullanımını teorik olarak analiz edilmektedir.

SKSA'nın sınırlı enerji tedariki nedeniyle sorun şarj perspektifinden ele alınmıştır. Birkaç OSA, keşif ağını genişletmek ve SKSA'yı şarj etmek için iyi bir yaklaşımdır. Ayrıca, uygun dalış bölgeleri seçilerek düğümün konumu ve veri akışını dikkate alan bir yol tasarlanarak şarj verimliliği ve keşif menzilinönemli ölçüde artırılabilmesi mümkündür. Otonom sualtı araçlarına (OSA) ilişkin veri toplama sorunları, Genetik Algoritma Tabanlı Yaklaşım, Grey Wolf Optimizer Tabanlı Yaklaşım, En Yakın Komşu Temelli Yaklaşım algoritmalarıyla çözülebilmektedir. Benzetimler, özellikle de sensör sayısı arttıkça OSA rota planlama sisteminin En Yakın Komşu Algoritması tabanlı bir yaklaşım kullanarak önceki algoritmalara göre daha iyi bir çözümü çok daha kısa bir sürede bulunduğunu göstermektedir.

#### KAYNAKLAR

- [1] Acarer T., The Turkish Model For Improving Imo Survey Results And Reducing Ship Accidents, Dokuz Eylül University Maritime Faculty Journal, Vol:11, Issue:1, Year:2019.
- [2] Aygün, C. (2012). Türkiye ile Avrupa Birliği'nde Uygulanan Deniz Ulaştırma Politikaları ve Ekonomiye Etkileri, T.C: İstanbul Üniversitesi Deniz Bilimleri ve İşletmeciliği Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.
- [3] International Chamber of Shipping, (2020). Description of the Subject International Chamber of Shipping (ICS). <http://en.reingex.com/Chamber-Shipping.shtml#:~:text=The%20purpose%20of%20the%20International,transporting%20all%20types%20of%20cargo>
- [4] UNCTAD/ RMT/ 2018: REVIEW OF MARITIME TRANSPORT 2018, United Nations publication issued by the United Nations Conference on Trade and Development, ISBN 978-92-1- 112928-1, UNCTAD: Geneva, Switzerland, 2018, [https://unctad.org/en/PublicationsLibrary/rmt2018\\_en.pdf](https://unctad.org/en/PublicationsLibrary/rmt2018_en.pdf).
- [5] Butt N., Johnson D., Pike K., Pryce-Roberts N., Vigar., N., (2012): 15 Years of Shipping Accidents: A review for WWF, Southampton Solent University
- [6] Rodrigue J.P., (2017): The Geography of Transport Systems, The spatial organization of transportation and mobility, Chapter 5 – Transportation Modes, Maritime Transportation, Main Maritime Shipping Routes, 2017. [https://transportgeography.org/?page\\_id=2067](https://transportgeography.org/?page_id=2067)
- [7] Kodak, G., Acarer, T. (2021). İstanbul Boğazı'nda deniz trafik düzenlemelerinin kaza oranına etkisinin değerlendirilmesi. Aquatic Research, 4(2), 181-207. <https://doi.org/10.3153/AR21015>
- [8] BBC News, "Egypt's Suez Canal blocked by huge container ship", 24 March 2021, available at <https://www.bbc.com/news/world-middle-east-56505413>
- [9] J. M. Lee, E. Y. Wong. Suez Canal blockage: an analysis of legal impact, risks and liabilities to the global supply chain. MATEC Web Conf. 339 01019 (2021).
- [10] O. Ozkanlısoy, E. Akkartal, The Effect of Suez Canal Blockage on Supply Chains. Dokuz Eylül Üniversitesi Denizcilik Fakültesi Dergisi. Haziran 2022;14(1):51- 79.
- [11] Tianhang Gao & Jing Lu (2019). The impacts of strait and canal blockages on the transportation costs of the Chinese fleet in the shipping network, Maritime Policy & Management, 46:6, 669-686.
- [12] S. Fan, Z. Yang, J. Wang, J. Marsland, "Shipping accident analysis in restrictedwaters: Lesson from the Suez Canal blockage in 2021", Ocean Engineering, vol. 266, Part 5, 2022, 113119.
- [13] T. Acarer. Endüstri'deki Gelişmelerin Denizcilik İşletmelerine Ait Gemilerin Yönetiminde Temin Ettiği Yeni Olanaklar ve İnsansız Gemiler, Mersin Üniversitesi Denizcilik ve Lojistik Araştırmaları Dergisi, Cilt:5 Sayı:2 Yıl:2023, Sayfa:122-153.
- [14] Acarer Tayfun, VHF Kısa Mesafe Deniz Haberleşmesinin Data İletişimine Dönüşmesinin Deniz İşletmelerinin Gemi Yönetimleri İçin Temin Edeceği Olanaklar, Denizcilik Araştırmaları Dergisi: Amfora, Cilt 2 – Sayı 3 – Haziran 2023 / Volume 2 - Issue 3 - June 2023.
- [15] Felemban, E.; Shaikh, F.K. Underwater sensor network applications: A comprehensive survey. Int. J. Distrib. Sens. Netw. 2015, 11, 896832–896845.
- [16] Qiu, T.; Zhao, Z. Underwater Internet of Things in Smart Ocean: System Architecture and Open Issues. IEEE Trans. Ind. Inform. 2020, 16, 4297–4307.
- [17] Akyildiz, I.F.; Pompili, D. Underwater acoustic sensor networks: Research challenges. Ad Hoc Netw. 2005, 3, 257–279.
- [18] Li, Q.; Du, X. Energy-efficient data compression for underwater wireless sensor networks. IEEE Access 2020, 8, 73395–73406.
- [19] Cheng, F.; Wang, J. Energy-efficient routing protocols in underwater wireless sensor networks: A survey. IEEE Commun. Surv. Tutor. 2014, 16, 277–294.
- [20] Khan, A.U.; Somasundaraswaran, K. Wireless charging technologies for underwater sensor networks: A comprehensive review. IEEE Commun. Surv. Tutor. 2018, 20, 674–709.
- [21] Pendergast, D.R.; DeMauro, E.P. A rechargeable lithium-ion battery module for underwater use. J. Power Sources 2011, 196, 793–800.
- [22] Blidberg, D.R. The development of autonomous underwater vehicles (AUV); a brief summary. In Proceedings of the IEEE ICRA, Seoul, Republic of Korea, 21–26 May 2001; Volume 4, pp. 122–129.
- [23] Ghafoor, H.; Noh, Y. An overview of next-generation underwater target detection and tracking: An integrated underwater architecture. IEEE Access 2019, 7, 98841–98853.
- [24] Xie, L.; Shi, Y. Rechargeable sensor networks with magnetic resonant coupling. Recharg. Sens. Netw. Technol. Theory Appl. Introd. Energy Harvest. Sens. Netw. 2014, 9, 31–68.
- [25] Lee, J.; Yun, N. A focus on comparative analysis: Key findings of MAC protocols for underwater acoustic communication according to network topology. In Proceedings of the Multimedia, Computer Graphics and Broadcasting: International Conference, Jeju Island, Korea, 8–10 December 2011.

- [26] Zenia, N.Z.; Aseeri, M. Energy-efficiency and reliability in MAC and routing protocols for underwater wireless sensor network: A survey. *J. Netw. Comput. Appl.* 2016, 71, 72–85.
- [27] Khan, M.T.R.; Ahmed, S.H. An energy-efficient data collection protocol with AUV path planning in the internet of underwater things. *J. Netw. Comput. Appl.* 2019, 135, 20–31.
- [28] Su, Y.; Xu, Y. HCAR: A Hybrid-Coding-Aware Routing Protocol for Underwater Acoustic Sensor Networks. *IEEE Internet Things J.* 2023, 10, 10790–10801.
- [29] Kumar, V.; Sandeep, D. Multi-hop communication based optimal clustering in hexagon and voronoi cell structured WSNs. *AEU-Int. J. Electron. Commun.* 2018, 93, 305–316.
- [30] Xie, R.; Jia, X. Transmission-efficient clustering method for wireless sensor networks using compressive sensing. *IEEE Trans. Parallel Distrib. Syst.* 2013, 25, 806–815.
- [31] Yadav, S.; Kumar, V. Hybrid compressive sensing enabled energy efficient transmission of multi-hop clustered UWSNs. *AEU-Int. J. Electron. Commun.* 2019, 110, 152836–152851.
- [32] Sun, Y.; Zheng, M.; Han, X.; Li, S.; Yin, J. Adaptive clustering routing protocol for underwater sensor networks. *Ad Hoc Netw.* 2022, 136, 102953–102965.
- [33] Fan, R.; Jin, Z. A time-varying acoustic channel aware topology control mechanism for cooperative underwater sonar detection network. *Ad Hoc Netw.* 2023, 149, 103228.
- [34] Liu, C.F.; Zhao, Z. A distributed node deployment algorithm for underwater wireless sensor networks based on virtual forces. *J. Syst. Archit.* 2019, 97, 9–19.
- [35] Wei, L.; Han, J. Topology Control Algorithm of Underwater Sensor Network Based on Potential-Game and Optimal Rigid Sub-Graph. *IEEE Access* 2020, 8, 177481–177494.
- [36] Zhu, R.; Boukerche, A. A trust management based secure routing protocol with AUV-aided path repairing for Underwater Acoustic Sensor Networks. *Ad Hoc Netw.* 2023, 149, 103212–103225.
- [37] Yan, Z.; Li, Y. Data collection optimization of ocean observation network based on AUV path planning and communication. *Ocean Eng.* 2023, 282, 114912–114927.
- [38] Shen, G.; Zhu, X. Research on phase combination and signal timing based on improved K-medoids algorithm for intersection signal control. *Wirel. Commun. Mob. Comput.* 2020, 2020, 3240675.
- [39] Gjanci, P.; Petrioli, C. Path finding for maximum value of information in multi-modal underwater wireless sensor networks. *IEEE Trans. Mob. Comput.* 2017, 17, 404–418.
- [40] Yan, J.; Yang, X. Energy-efficient data collection over AUV-assisted underwater acoustic sensor network. *IEEE Syst. J.* 2018, 12, 3519–3530.
- [41] Kan, T.; Mai, R. Design and analysis of a Three-Phase wireless charging system for lightweight autonomous underwater vehicles. *IEEE Trans. Power Electron.* 2018, 33, 6622–6632.
- [42] Ramos, A.G.; García-Garrido, V.J. Lagrangian coherent structure assisted path planning for transoceanic autonomous underwater vehicle missions. *Sci. Rep.* 2018, 8, 4575.
- [43] Cheng, C.; Sha, Q. Path planning and obstacle avoidance for AUV: A review. *Ocean Eng.* 2021, 235, 109355–109368.
- [44] Kumar, S.V.; Jayaparvathy, R. Efficient path planning of AUVs for container ship oil spill detection in coastal areas. *Ocean Eng.* 2020, 217, 107932–107945.
- [45] Golen, E.; Mishra, F. An underwater sensor allocation scheme for a range dependent environment. *Comput. Netw.* 2010, 54, 404–415.
- [46] Yi, Y.; Yang, G.S. Energy balancing and path plan strategy for rechargeable underwater sensor network. In *Proceedings of the 2022-4th International Conference on Advances in Computer Technology, Suzhou, China, 22–24 April 2022*. 8
- [47] Cui Y, Zhu P, Lei G, Chen P, Yang G. Energy-Efficient Multiple Autonomous Underwater Vehicle Path Planning Scheme in Underwater Sensor Networks. *Electronics*. 2023; 12(15):3321.
- [48] Acarer, T. (2024). Energy-Aware Path Planning by Autonomous Underwater Vehicle in Underwater Wireless Sensor Networks for Safer Maritime Transportation. *International Journal of Interactive Multimedia and Artificial Intelligence*.
- [49] P. C. Pop, O. Cosma, C. Sabo, C. P. Sitar, "A comprehensive survey on the generalized traveling salesman problem", *European Journal of Operational Research*, Volume 314, Issue 3, 2024, pp. 819-835.
- [50] Davendra, D.: Travelling Salesman Problem, Theory and Applications. InTech (2010)
- [51] Johnson, D.S., McGeoch, L.A.: The Traveling Salesman Problem: A Case Study, Local Search in Combinatorial Optimization, pp. 215–310. JohnWiley & Sons (1997)
- [52] Gutin, G., Punnen, A. (eds.): The Traveling Salesman Problem and Its Variations. *Combinatorial Optimization*, vol. 12. Kluwer, Dordrecht (2002)
- [53] Hoffman, K.L., Padberg, M. (2001). Traveling salesman problem . In: Gass, S.I., Harris, C.M. (eds) *Encyclopedia of Operations Research and Management Science*. Springer, New York, NY. [https://doi.org/10.1007/1-4020-0611-X\\_1068](https://doi.org/10.1007/1-4020-0611-X_1068)
- [54] G. Gutin, A. Yeo and A. Zverovitch, Exponential Neighborhoods and Domination Analysis for the TSP, in *The Traveling Salesman Problem and Its Variations*, G. Gutin and A.P. Punnen (eds.), Kluwer (2002) and Springer (2007)
- [55] Mirjalili, S.; Mirjalili, S.M.; Lewis, A. grey wolf optimizer. *Adv. Eng. Softw.* 2014, 69, 46–61.
- [56] D.E. Goldberg, *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*, Addison- Wesley Longman Publishing Co., Inc., 1989.
- [57] Bonabeau, E., Dorigo, M., & Theraulaz, G. (1999). *Swarm intelligence: from natural to artificial systems* (No. 1). Oxford university press.

## Özgeçmişler



**Ömer Melih Gül (S'17, M'21)**, Orta Doğu Teknik Üniversitesi (ODTÜ) Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü'nden lisans, yüksek lisans ve doktora derecelerini sırasıyla 2012, 2014 ve 2020 yıllarında aldı. Bu esnada aynı bölümde araştırma görevlisi olarak da görev yaptı. Uluslararası yayınları 11 dergi makalesi, 16 konferans bildirisi ve 4 kitap bölümünü kapsarken ulusal yayınları 3 dergi makalesi ve 3 konferans bildirisini kapsamaktadır.

IEEE Computer Society tarafından 2019 Lance Stafford Larson Üstün Öğrenci Makale Ödülü'nde (2019 Lance Stafford Larson Outstanding Student Paper Award) üçüncülük ödülüne layık görülmüştür. 2021 IEEE Rising Stars Global Konferansı'nda poster yarışmasında üçüncülük ödülüne layık görülmüştür. 2022 yılında Kanada'da Ottawa Üniversitesi Elektrik Mühendisliği ve Bilgisayar Bilimleri Okulu'nda doktora sonrası araştırmacı olarak çalıştı. 2022 yılında 48. Kablosuz Dünya Araştırma Forumu'nda (WWRF) en iyi konferans bildirisi ödülünü aldı. Mevcut durumda, İstanbul'da Bahçeşehir Üniversitesi Bilgisayar Mühendisliği Bölümü'nde Dr. Öğr. Üyesi olarak görev yapmaktadır.

2021'den bu yana IEEE Computer Society'de Region 8 (Avrupa, Orta Doğu ve Afrika Bölgesi) Koordinatörü olarak görev yapmaktadır. Nisan 2023'ten beri IEEE Computer Society Member&Geographic Activities (MGA) Board'da Özel Üye (Member-at-Large) olarak görev yapmaktadır. 2022 IEEE MGA Genç Profesyoneller Başarı Ödülü'ne (2022 IEEE MGA Young Professionals Achievement Award) layık görülmüştür. 2020-2021 yıllarında başkanlığını yaptığı IEEE Türkiye Genç Profesyonel Grup ile 2021 IEEE Region 8 Outstanding Young Professionals Affinity Group Award ve 2022 IEEE MGA Young Professionals Hall of Fame Honorable Mention ödülleri kazanmıştır.



**Tayfun Acarer**, İstanbul Teknik Üniversitesi Elektronik ve Haberleşme Bölümünden 1980 yılında mezun olan Tayfun ACARER yaklaşık iki yıl özel bir Şirket de Elektronik Mühendisi olarak çalıştıktan sonra sırasıyla PTT Telsiz İşletme Müdürlüğü'nde Müdür, Türk Telekom AŞ'de Müstakil Ünite Müdürü, Kıyı Emniyeti Genel Müdürlüğü'nde Yönetim Kurulu Üyesi ve Genel Müdür Yardımcısı, Bilgi Teknolojileri ve İletişim Üst Kurulunda (BTK) 2 dönem Kurul Başkanı olarak görev yapmıştır.

Tayfun ACARER 1990 yılında İstanbul Üniversitesi İşletme İktisadi Enstitüsünde İhtisas, daha sonra aynı Üniversitede Yüksek Lisans ve Doktora eğitimlerini tamamlayarak 1995 yılında Dr. Müh., 2016 yılında İstanbul Bilgi Üniversitesi'nde Dr. Öğretim Üyesi ünvanını almıştır. Bu tarihten itibaren başta İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul Üniversitesi, İstanbul Bilgi Üniversitesi, Piri Reis Üniversitesi, Galatasaray Üniversitesi, Bahçeşehir Üniversitesi, İstanbul Sabahattin Zaim Üniversitesi ve İstanbul Aydın Üniversitesilerinde Deniz Haberleşme (GMDSS), Elektronik Seyir, Gemi Elektroniği, Bilişim Sistemleri Alt Yapıları, Bilişim Sektöründe Eğilim, Yeni Nesil Bilişim Teknolojileri ve Bilişim Sektöründe Düzenlemeler konularında Yüksek Lisans ve Lisans Dersleri vermiştir. Bu derslerin önemli bir kısmı halen devam etmektedir.

Bilişim Sektörü ve Deniz Haberleşme (GMDSS) alanlarında yayınlanmış 7 adet Kitabı olan Tayfun ACARER'in yurt içi ve yurt dışındaki konferans, seminer ve dergilerde yayınlanmış çok sayıda makale ve bildirisi bulunmaktadır.

Halen Piri Reis Üniversitesinde Dr. Öğr. Üyesi, Ulaştırma Altyapı Bakanlığında Ulaşım Emniyeti İnceleme Komisyonu Üyesi ve İstanbul Teknik Üniversitesi Arı Teknopark Değerlendirme Kurulu Üyesi olarak görev yapmaktadır. Bugüne kadar Piri Reis Üniversitesi dışında bir çok üniversitede Yüksek Lisans ve Lisans Dersleri de veren Tayfun ACARER bu derslerine devam etmektedir. Tayfun ACARER evli ve 2 çocuk sahibi olup, iyi derece İngilizce bilmektedir.