

OTONOM DENİZ ARAÇLARI:

**DERİN ÖĞRENME, HİDRODİNAMİK
MODELLEME VE KONTROL ALGORİTMALARI**

EDİTÖRLER:

DR. ÖĞR. ÜYESİ FATİH ALPASLAN KAZAN
ÖĞR. GÖR. DR. YUSUF ÇAĞLAR KAĞITCI
ÖĞR. GÖR. DR. OSMAN KOCAASLAN

EĞİTİM
yayınevi

OTONOM DENİZ ARAÇLARI: DERİN ÖĞRENME, HİDRODİNAMİK MODELLEME VE KONTROL ALGORİTMALARI

Editörler: Dr. Öğr. Üyesi Fatih Alpaslan KAZAN, Öğr. Gör. Dr. Yusuf Çağlar Kağıtçı
Öğr. Gör. Dr. Osman Kocaaslan

Yayınevi Grubu Genel Başkanı: Yusuf Ziya Aydoğan (yza@egitimyayinevi.com)

Genel Yayın Yönetmeni: Yusuf Yavuz (yusufyavuz@egitimyayinevi.com)

Sayfa Tasarımı: Kübra Konca Nam

Kapak Tasarımı: Eğitim Yayınevi Tasarım Birimi

T.C. Kültür ve Turizm Bakanlığı

Yayıncı Sertifika No: 76780

E-ISBN: 978-625-385-734-9

1. Baskı, Aralık 2025

Kütüphane Kimlik Kartı

OTONOM DENİZ ARAÇLARI: DERİN ÖĞRENME, HİDRODİNAMİK MODELLEME VE KONTROL ALGORİTMALARI

Editörler: Dr. Öğr. Üyesi Fatih Alpaslan KAZAN, Öğr. Gör. Dr. Yusuf Çağlar Kağıtçı
Öğr. Gör. Dr. Osman Kocaaslan

V+120 s., 160x240 mm

Kaynakça var, dizin yok.

E-ISBN: 978-625-385-734-9

Copyright © Bu kitabın Türkiye'deki her türlü yayın hakkı Eğitim Yayınevi'ne aittir. Bütün hakları saklıdır. Kitabın tamamı veya bir kısmı 5846 sayılı yasanın hükümlerine göre kitabı yayımlayan firmanın ve yazarlarının önceden izni olmadan elektronik/mechanik yolla, fotokopi yoluyla ya da herhangi bir kayıt sistemi ile çoğaltılamaz, yayımlanamaz.

EĞİTİM
yayınevi

Yayınevi Türkiye Ofis: İstanbul: Eğitim Yayınevi Tic. Ltd. Şti., Atakent mah.
Yasemen sok. No: 4/B, Ümraniye, İstanbul, Türkiye

Konya: Eğitim Yayınevi Tic. Ltd. Şti., Fevzi Çakmak Mah. 10721 Sok. B Blok,
No: 16/B, Safakent, Karatay, Konya, Türkiye
+90 332 351 92 85, +90 533 151 50 42
bilgi@egitimyayinevi.com

Yayınevi Amerika Ofis: New York: Egitim Publishing Group, Inc.
P.O. Box 768/Armonk, New York, 10504-0768, United States of America
americaoffice@egitimyayinevi.com

Lojistik ve Sevkiyat Merkezi: Kitapmatik Lojistik ve Sevkiyat Merkezi, Fevzi Çakmak Mah.
10721 Sok. B Blok, No: 16/B, Safakent, Karatay, Konya, Türkiye
sevkiyat@egitimyayinevi.com

Kitabevi Şubesi: Eğitim Kitabevi, Şükran mah. Rampalı 121, Meram, Konya, Türkiye
+90 332 499 90 00
bilgi@egitimkitabevi.com

İnternet Satış: www.kitapmatik.com.tr
bilgi@kitapmatik.com.tr

EĞİTİM YAYINEVİ
GRUBU

EĞİTİM
yayınevi

SALON
yayıncıları

Kitapmatik
yayıncıları

kitapmatik
İnternet Kitabevi

EĞİTİM
kitabevi

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ v

BÖLÜM 1

İNSANSIZ DENİZ ARAÇLARININ (İDA) OTONOM ROTA İZLEME
PERFORMANSININ GPS ENTEGRASYONU İLE İNCELENMESİ..... 1

Beyza AKKOÇ, Hakan TERZİOĞLU

BÖLÜM 2

İNSANSIZ HAVA (İHA) VE DENİZ (İDA) ARAÇLARINDAN ELDE
EDİLEN GÖRÜNTÜLERLE DENİZ VASITALARININ DERİN
ÖĞRENME YÖNTEMLERİYLE TESPİTİ VE ÖZELLİK
ÇIKARTARAK SINIFLANDIRILMASI..... 16

Eda ÇOŞAR, Hakan TERZİOĞLU

BÖLÜM 3

SU ALTI ROKETİ İÇİN IMU DESTEKLİ PID TABANLI DERİNLİK
DENETİMİ VE KANATÇIK KONTROLLÜ U DÖNÜŞ

ALGORİTMASI..... 34

Hakan Terzioğlu, Sema Nur ECEVİT

BÖLÜM 4

OTONOM SU ALTI ARAÇLARINDA GERÇEKÇİ HİDRODİNAMİK
KOŞULLAR ALTINDA ROS TABANLI ROTA PLANLAMA
PERFORMANS ANALİZİ..... 45

Beyza Nur MURAT, Hakan TERZİOĞLU

BÖLÜM 5

SU ALTI ROKETLERİ İÇİN ÖZEL KONTROL KARTI TASARIMI VE
SAPMA DENGELEME NAVİGASYONU..... 60

Abdurrahman ZAFER

BÖLÜM 6

SU ALTI ROKET ARACI MEKANİK TASARIMI **71**

Süleyman NEŞELİ, Mehmet Resul POLAT

BÖLÜM 7

GÖMÜLÜ SİSTEMLERDE SUALTI BORU HATTI ALGILAMA VE
TAKIBI İÇİN HAFIF DERİN ÖĞRENME MİMARİLERİNİN
OPERASYONEL KARŞILAŞTIRMASI..... **88**

Yusuf NURDOĞDU

BÖLÜM 8

DC-DC BUCK KONVERTÖR **106**

Raika Sena İSEM, Beyza Nur MURAT, Elif YEŞİLAY

ÖNSÖZ

Otonom su üstü ve su altı sistemleri, savunma teknolojileri, denizcilik mühendisliği ve çevresel gözlem alanlarında giderek artan bir stratejik önem taşımaktadır. Günümüzde insansız deniz araçları (İDA), insansız hava araçları (İHA) ile birlikte çalışabilmekte; çok kaynaklı veri akışı, gelişmiş sensör füzyon yöntemleri ve yapay zekâ tabanlı işleme teknikleri sayesinde yüksek hassasiyetli algılama, konumlama ve navigasyon yeteneklerine sahip olmaktadır. Bu gelişmeler, hem askeri hem de sivil uygulamalarda otonom operasyonların güvenilirliğini ve etkinliğini önemli ölçüde artırmaktadır.

Bu kitap, su üstü ve su altı araçlarında rota planlama, algılama, sınıflandırma, kontrol ve gömülü sistem tasarımı gibi temel mühendislik problemlerinin çağdaş yöntemlerle ele alınmasına yönelik beş ayrı çalışma içermektedir. Çalışmalar; GPS destekli otonom rota izleme performansından, İHA-İDA entegre görüntüleriyle derin öğrenme tabanlı deniz aracı tespitine, su altı roketlerinde IMU destekli PID kontrol algoritmalarından, hidrodinamik koşullar altında ROS tabanlı rota planlamaya ve su altı roketlerine yönelik özel gömülü kontrol kartı tasarımına kadar geniş bir bilimsel yelpazeyi kapsamaktadır.

Bu kapsam doğrultusunda kitapta yer alan her bölüm; problem tanımı, yöntemsel yaklaşım, deneysel kurulum, veri seti ve modelleme süreçleri, performans analizleri ve sonuç değerlendirmelerini sistematik bir bilimsel çerçeveye sunmaktadır. Eserin temel amacı, otonom denizcilik alanındaki araştırmacılara, savunma sanayiinde görev yapan

mühendislere, lisansüstü öğrencilere ve ilgili alanlarda çalışma yürüten tüm bilim insanlarına nitelikli bir referans kaynağı sağlamaktır.

Bu kitabın ortaya çıkmasında katkı sağlayan tüm araştırmacılara, akademik değerlendirme sürecinde destek sunan bölüm editörlerine ve yayımlanmasını mümkün kılan yazarlarımıza teşekkür eder; çalışmanın otonom deniz sistemleri literatürüne değerli katkılar sunmasını temenni ederiz.

Editörler:

Dr. Öğr. Üyesi Fatih Alpaslan KAZAN
Öğr. Gör. Dr. Yusuf Çağlar KAĞITCI
Öğr. Gör. Dr. Osman KOCAASLAN

BÖLÜM 1

İNSANSIZ DENİZ ARAÇLARININ (İDA) OTONOM ROTA İZLEME PERFORMANSININ GPS ENTEGRASYONU İLE İNCELENMESİ

Beyza AKKOÇ**, Hakan TERZİOĞLU***

GİRİŞ

İnsansız araçların (kara, hava ve deniz) askeri ve sivil alanlardaki kullanımı son yıllarda giderek yaygınlaşmaktadır (Dağlı vd., 2013). Bu araçlar arasında yer alan insansız deniz araçları (İDA), sahip oldukları yüksek manevra kabiliyeti ve otonom yapıları sayesinde askeri, bilimsel ve ticari uygulamalarda önemli bir potansiyele sahiptir (Wang vd., 2025). Otonom hareket kabiliyetleri sayesinde insan müdahalesini en aza indiren İDA'lar, operasyonel güvenliği artırmakta ve uzun süreli görevlerde maliyetleri düşürmeleri nedeniyle giderek daha fazla ilgi görmektedir (Qu & Cai, 2023; Ekinci, Öztütüncü & Ertogan, 2024).

İnsansız araç teknolojilerindeki gelişmeler, sadece rota takibi ile sınırlı kalmayıp dron ağları için topoloji incelemelerini de kapsayacak şekilde genişlemiştir (Ağaçayak & Sungur, 2019). Ayrıca, otonom sistemlerin sivil havacılık ve denizcilikteki yerini belirleyen simülasyon temelli çalışmalar, bu araçların operasyonel sınırlarını anlamak adına kritiktir (Kazan, 2020).

** Lisans Öğrencisi, Selçuk Üniversitesi Teknoloji Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Selçuklu, Konya, akkocbeyza24@gmail.com, ORCID: 0009-0006-5725-8995

*** Dr. Öğr. Üyesi, Selçuk Üniversitesi Teknoloji Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Selçuklu, Konya, hterzioglu@selcuk.edu.tr, ORCID: 0000-0001-5928-8457

İnsansız araçların (kara, hava ve deniz) askeri ve sivil alanlardaki kullanımı son yıllarda giderek yaygınlaşmaktadır (Dağlı vd., 2013). Bu araçlar arasında yer alan insansız deniz araçları (İDA), sahip oldukları yüksek manevra kabiliyeti ve otonom yapıları sayesinde askeri operasyonlarda kritik bir rol oynamaktadır. Özellikle modern savaş doktrinlerinde, yapay zekâ kontrollü sistemlerin entegrasyonu ile bu araçların "ölümcül silah" platformlarına dönüşümü, insansız savaşlara doğru giden sürecin en önemli yapı taşlarından birini oluşturmaktadır (Güntürk, 2022). Otonom hareket kabiliyetleri sayesinde insan müdahalesini en aza indiren İDA'lar, operasyonel güvenliği artırmakta ve özellikle yüksek riskli askeri görevlerde stratejik üstünlük sağlamaktadır (Güntürk, 2022, s. 135; Qu & Cai, 2023). İDA'ların otonom operasyonlarının temelini, araca mutlak konum bilgisi sağlayan algılayıcı sistemler oluşturmaktadır. Bu kapsamda, son yıllarda geliştirilen İDA prototipleri, karmaşık görevlerde başarı gösterebilmek amacıyla GPS sensörlerinin entegrasyonu ile test edilmektedir (Specht vd., 2019). GPS, aracın anlık konum ve hız bilgisini yüksek doğrulukla sağlayarak otonom rota izleme ve seyrüsefer kabiliyetinin temel bileşenlerinden biri olarak öne çıkmaktadır (Marchel, Specht & Specht, 2020).

Düşük maliyetli sensör entegrasyonu ve bu araçların farklı çevresel koşullardaki enerji tüketim analizleri, sürdürülebilir otonom görevler için temel teşkil etmektedir (Aksoy & Kazan, 2022).

İnsansız Deniz Araçları için otonom seyrüsefer ve rota izleme, görev başarısının sağlanması açısından kritik bir öneme sahiptir. Ancak deniz ortamı; akıntı, rüzgâr ve dalga gibi dış bozucu etkilerin yoğun olarak hissedildiği dinamik bir yapıya sahiptir. Bu çevresel bozucular, aracın planlanan rotadan sapmasına neden olarak rota takip doğruluğunu düşürmekte ve enerji verimliliğini olumsuz yönde etkilemektedir (Ghassemzadeh, Xu & Guedes Soares, 2023). Bu nedenle, söz konusu bozucu etkileri etkin biçimde dengeleyebilen, sağlam ve güvenilir kontrol sistemlerinin geliştirilmesi büyük önem taşımaktadır.

Hassas ve güvenilir bir otonom navigasyonun sağlanabilmesi için İDA'nın sürekli olarak doğru konum ve yönelim bilgisine sahip olması gerekmektedir. Bu noktada GPS, aracın coğrafi konum bilgisini kesintisiz biçimde sunarak seyrüsefer sistemlerinin temelini oluşturmaktadır (Cantekin, Erol & Kartal, 2021). GPS'ten elde edilen yüksek kaliteli

konum verisi, hedef rotanın takip edilmesini sağlayan otonom kontrol algoritmalarının etkinliği açısından hayati öneme sahiptir. Literatürde, çevresel bozucu etkiler altında gelişmiş kontrol yöntemleri kullanılarak rota sapmalarının başarılı bir şekilde telafi edilebildiği gösterilmiştir (Ma vd., 2025).

Rota izleme problemine yönelik yapılan çalışmalar; PID denetleyiciler (Fossen & Pettersen, 2014), Lyapunov tabanlı kontrol yöntemleri (Do & Pan, 2006) ve Model Öngörülü Kontrol yaklaşımları (Zhang, Liu & Wang, 2021) üzerine yoğunlaşmaktadır. Bu çalışmaların önemli bir bölümü, önerilen kontrol stratejilerinin teorik performansını simülasyon ortamlarında incelemiştir (Breivik & Fossen, 2004; Aguiar & Hespanha, 2007). Bununla birlikte, konum geri bildirimi büyük ölçüde GPS verisine dayanan sistemlerin gerçek deniz koşullarında test edilmesi, çevresel bozucu etkiler altındaki performansın doğrulanması açısından kritik bir gereksinim olarak öne çıkmaktadır (Wang, Yu & Zheng, 2019). Bu doğrultuda, otonom İDA platformları üzerinde gerçekleştirilen gerçek zamanlı deneysel çalışmalar, geliştirilen kontrol algoritmalarının uygulanabilirliğini ve güvenilirliğini ortaya koymak açısından literatürde giderek daha fazla önem kazanmaktadır (Manh, Tam & Rye, 2020).

Bu çalışmanın temel amacı, GPS tabanlı bir rota izleme kontrol sistemi ile donatılmış bir İDA prototipinin, değişken çevresel koşullar altında belirlenen rotayı takip etme performansını deneysel olarak değerlendirmektir. Çalışmanın devamında, geliştirilen sistemin donanım mimarisi, uygulanan kontrol algoritması ve gerçekleştirilen saha deneylerinden elde edilen performans sonuçları ayrıntılı olarak sunulmaktadır.

MATERYAL VE METOD

Bu bölümde, İnsansız Deniz Aracı (İDA) üzerinde gerçekleştirilen GPS tabanlı otonom rota izleme deneylerinde kullanılan elektronik bileşenler ve kontrol mimarisi açıklanmaktadır. İDA'nın itki sisteminde kullanılan PMSM (Kalıcı Mıknatıslı Senkron Motor) tabanlı yapıların hız ve tork karakteristikleri, sıcaklık ve yol eğimi gibi dış etkenlerden doğrudan etkilenmektedir (Bilgin & Kazan, 2016; Kazan & Akkaya, 2021). Bu motorların kontrolünde kullanılan PI parametrelerinin optimizasyonu, rota izleme kararlılığı açısından hayati önem taşır (Kazan & Bilgin, 2020). Sensör verilerinin işlenmesi ve gürültüden arındırılması aşamasında, yapay

alg algoritmaları veya kara kanatlı uçurtma optimizasyonu gibi kümeleme yöntemleri veri kalitesini artırmak için kullanılabilmektedir (Anwer & Servi, 2021; İnan, Rasooli & Servi, 2024). Ayrıca, kontrol algoritmalarının performansını iyileştirmek amacıyla geliştirilen hibrit optimizasyon yöntemleri, değişken deniz koşullarında daha sağlam bir kontrol yapısı sunmaktadır (Şahin & Servi, 2024). Çalışmanın temel amacı, yüksek doğruluklu konumlandırma verileri ile çalışan bir otonom yönlendirme sisteminin, gerçek zamanlı olarak güvenilir rota takibi gerçekleştirmesini sağlamaktır. Bu doğrultuda, İDA'nın konumlandırma bileşenleri, kontrol birimleri ve bu bileşenlerin entegrasyonunu içeren genel sistem mimarisi aşağıda sunulmuştur.

Elektronik Bileşenler

İDA'nın otonom rota izleme kabiliyeti, konumlandırma, kontrol ve iletişim alt sistemlerinin koordineli çalışmasıyla sağlanmaktadır. Çalışmada kullanılan elektronik bileşenler aşağıda özetlenmiştir.

Jetson Orin Nano

Jetson Orin Nano platformu görüntü işleme ve gelişmiş sensör işleme kapasitesine sahip olmakla birlikte, bu çalışma kapsamında yalnızca veri kayıt görevleri için pasif şekilde kullanılmış, rota izleme algoritmaları Pixhawk üzerinde yürütülmüştür. Şekil 1'de Jetson Orin Nano'nun fotoğrafı görülmektedir.



Şekil 1. Jetson Orin Nano

Pixhawk Cube Orange+

Pixhawk Cube Orange+, 32-bit ARM STM32H757 işlemcisi, üç yedekli IMU yapısı ve yüksek örnekleme frekansına sahip sensörleriyle aracın yönelim, ivme ve açısal hız bilgilerini gerçek zamanlı olarak işler. Bu birim, GPS'ten alınan konum bilgisiyle birlikte aracın otonom seyrüsefer komutlarını üretmekte ve motor kontrolcülere gerekli sinyal çıktılarının iletilmesini sağlamaktadır. Şekil 2'de CubePilot Pixhawk Orange+ fotoğrafı görülmektedir.



Şekil 2. CubePilot Pixhawk Orange+

HERE 4 GPS Modülü

HERE4, çift bant RTK desteği sunan ve BeiDou, Galileo, GLONASS, GPS ve QZSS gibi birçok uydu sistemini eşzamanlı kullanan yüksek doğruluklu bir konumlandırma modülüdür. RTK modunda santimetre seviyesinde mutlak konum doğruluğu sağlaması, rota izleme deneylerinde konum hatasının minimal seviyede tutulmasına olanak vermektedir. Modülün DroneCAN protokolü üzerinden Pixhawk ile iletişim kurması, gecikmesiz ve güvenilir veri aktarımı sunmaktadır. Şekil 3'te HERE4 GPS modülü fotoğrafı görülmektedir.



Şekil 3. HERE4 GPS Modülü

VESC 6.0 ESC

İDA'nın iki iticisi, VESC 6.0 75A elektronik hız kontrolcüsü (ESC) üzerinden sürülmektedir. ESC, Pixhawk'tan gelen PWM veya CAN tabanlı kontrol sinyallerini motor sürme komutlarına dönüştürür. Field Oriented Control (FOC) desteği sayesinde motor torku hassas şekilde kontrol edilerek yön değişimlerinde kararlı manevra performansı elde edilir. Şekil 4'te VESC 6.0 75A ESC fotoğrafı görülmektedir.



Şekil 4. VESC 6.0 75A ESC

Utras Su Altı İtici

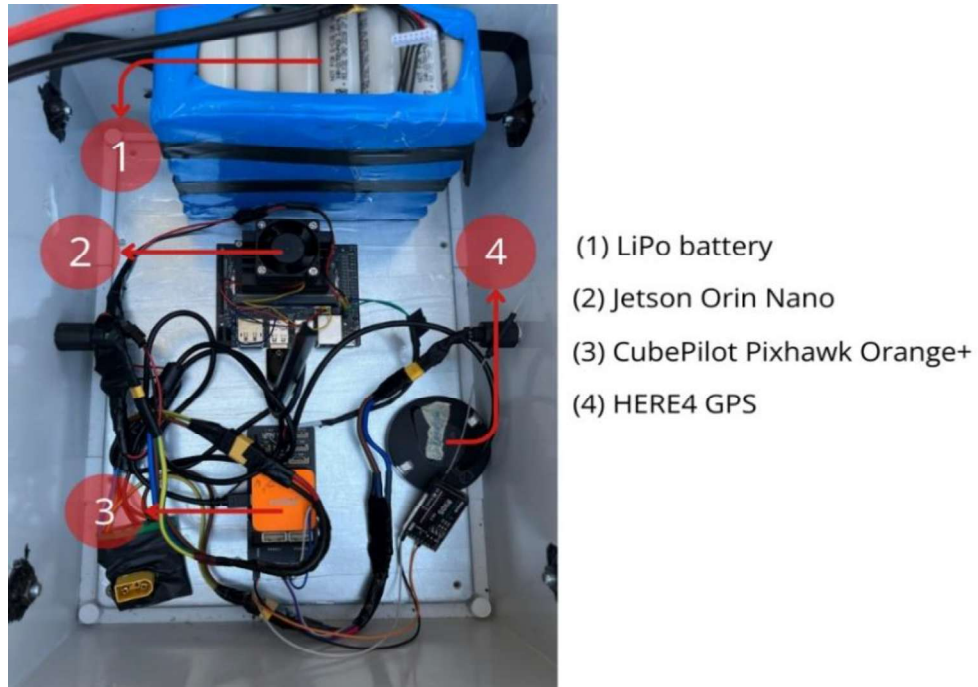
İDA'nın manevra ve hareket kabiliyetini sağlayan itki sistemi, Degz-Utras Su Altı İtici kullanılarak oluşturulmuştur. Poliüretan gövde ve pervane yapısı sayesinde darbelere ve 500 m derinliğe kadar olan basınca dayanıklı bir yapı sunmaktadır. Bu yüksek itki kapasitesi, aracın GPS tabanlı rota takibi ve engel kaçınma manevraları sırasında gerekli olan

hassas, hızlı ve kararlı kontrol performansını sağlamaktadır. Şekil 5’de Utas su altı itici fotoğrafı görülmektedir.



Şekil 5. Utras Su altı İtici

Tüm bu bileşenler, aracın modüler yapısına entegre edilerek sistemin görev çeşitliliğine ve çevresel koşullara hızlı bir biçimde uyum sağlamasına olanak tanımaktadır. Şekil 6’da, aracın aviyonik yapısı içerisinde yer alan donanım bileşenlerinin bütünleşik yerleşimi görülmektedir. Bu yapıda Jetson Orin Nano, CubePilot Pixhawk Orange+, HERE4 GPS modülü, ve güç dağıtım sistemi ortak bir aviyonik düzen içerisinde konumlandırılmıştır. Şekil 7’de İnsansız deniz aracının fotoğrafı görülmektedir.



Şekil 6. İnsansız deniz aracının aviyonik donanım yerleşimi



Şekil 7. İnsansız deniz aracı

YAZILIM MİMARİSİ VE KONTROL YÖNTEMİ

Otonom araçlar için geliştirilen kontrol algoritmaları ve PID yapıları, su üstü araçlarının yanı sıra su altı araçları için de kritik bir çalışma alanıdır (Mirjafarli & Ağaçayak, 2022; Yılmaz & Yalçın, 2024). Lojistik regresyon ve makine öğrenmesi algoritmalarının mühendislik problemlerine ve enerji tahmini gibi alanlara uygulanması, otonom sistemlerden elde edilen verilerin analizinde güçlü bir araç seti sunar (Servi vd., 2018; Servi vd., 2024). Modern görüntüleme teknikleri ve derin öğrenme modelleri, sadece araçların rotasını belirlemede değil, tarımsal ilaçlamadan gıda kalite kontrolüne kadar geniş bir spektrumda nesne tespiti ve sınıflandırma amacıyla kullanılmaktadır (Yalçın vd., 2019; Aras, Erye il & Köklü, 2025; Kılıcı, Erye il & Köklü, 2025). Özellikle derin öğrenme tabanlı sınıflandırma yaklaşımları, atık yönetimi ve sağlık bili imi gibi karmaşık veri yapılarında yüksek doğruluk oranlarına ulaşılmasını sağlamaktadır (Erye il & Taşdemir, 2023; Erye il, Kahramanlı & Taşdemir, 2025; Qanbar, Erye il & Taşdemir, 2023). Derin  ğrenme algoritmalarının sağladığı yüksek performans, sadece sürücü izleme sistemlerinde değil, aynı zamanda tarımsal  r nlerin Agtron tabanlı sınıflandırılması gibi farklı endüstriyel alanlarda da açıklanabilir yapay zekâ (XAI)  er veleriyle desteklenerek kullanılmaktadır (Aras vd., 2025). Görüntü işleme tabanlı derin öğrenme mimarileri, karmaşık uykululuk analizlerinin yanı sıra tıbbi teşhis sistemlerinde, özellikle DenseNet121 ve Grad-CAM kullanılarak gerçekleştirilen cilt kanseri tespiti çalışmalarında da yüksek doğruluk sergilemektedir (Aras, 2025).

Geliştirilen otonom navigasyon sistemi, MAVLink protokolü üzerinden Pixhawk ile haberleşen Python tabanlı bir kontrol yazılımı ile çalışmaktadır. Sistem, gerçek zamanlı GPS verilerinin işlenmesi, hedef açı hesaplaması, yönelim hatasının belirlenmesi ve motorlara diferansiyel PWM sinyali uygulanması süreçlerinden oluşmaktadır. Yazılım mimarisi modüler yapıda tasarlanmış olup her bir görev bağımsız fonksiyonlar ve çoklu iş parçacığı (threading) yapısıyla yönetilmektedir.

Pixhawk uçuş kontrolcüsünden alınan GPS, IMU ve hız bilgileri, pymavlink kütüphanesi kullanılarak 10 Hz frekansında okunmaktadır. GPS verileri, kısa süreli dalgalanmaları azaltmak amacıyla kayan ortalama (moving average) filtresinden geçirilmiş ve ardından hedef nokta ile araç konumu arasındaki mesafe d ve hedef yön açısı (bearing) hesaplanmıştır. Bearing açısı, iki konum arasındaki enlem (ϕ) ve boylam (λ) farkları kullanılarak aşağıdaki formülle elde edilir:

Gerçek zamanlı yönelim açısı (yaw), Pixhawk'ın IMU verisinden alınmış ve hesaplanan hedef açı ile karşılaştırılmıştır. Böylece aracın hedefe göre yönelme hatası belirlenmiştir.

Her bir hedef nokta için araç konumu sürekli güncellenmiş, mesafe ve açı hatası gerçek zamanlı hesaplanmıştır. Açı sapması aşağıdaki gibi tanımlanır:

Açı sapması 180° sınırları içinde normalize edilerek aracın sola mı yoksa sağa mı döneceği belirlenmiştir. Sapma değeri küçük olduğunda araç ileri yönde hızlanmakta, sapma arttığında ise dönüş manevrası uygulanmaktadır. Rota takip algoritması şu karar yapısını izlemektedir:

- $|\Delta\theta| \leq YAW_TOLERANS \rightarrow$ Araç hedef doğrultusunda ilerler.
- $|\Delta\theta| > YAW_TOLERANS \rightarrow$ Diferansiyel dönüş uygulanır.

Bu yapı sayesinde sistem, yalnızca GPS bilgisini kullanarak stabil bir rota takip performansı sergilemektedir.

Hesaplanan açı hatasına bağlı olarak iki iticinin PWM değerleri diferansiyel olarak değiştirilmiştir. Motor kontrol mekanizması şu prensiplere dayanır:

- Dönüş gerekliyse bir motorun PWM değeri artırılır, diğerinin

PWM değeri azaltılır.

- Araç doğru açıya hizalandığında iki motor aynı PWM değerini alır ve ileri hareket başlar. PWM komutları MAVLink üzerinden MAV_CMD_DO_SET_SERVO mesajı ile VESC sürücülerine iletilmiştir.

Bu kontrol mekanizması, dümen kullanılmayan diferansiyel tahrikli su araçlarında yön kontrolü için uygun bir yöntemdir.

Sistem akış şemasını anlatan görsel Şekil 1'de gösterilmektedir.



Şekil 1. Sistemin Genel Akış Şeması.

Geliştirilen otonom navigasyon sistemi, Şekil 2'de gösterilen rota takip senaryosunu gerçekleştirmek üzere, MAVLink protokolü üzerinden Pixhawk ile haberleşen Python tabanlı modüler bir yazılım ile çalışır. Yazılım, GPS, IMU ve hız verilerini 10 Hz frekansında okur, GPS konumunu kayan ortalama filtresi ile optimize eder. Ardından, aracın mevcut konumu ile hedef nokta arasındaki hedef yön açısı hesaplanır. Rota takibi için, gerçek yönelim arasındaki açı sapması belirlenir. Bu $\Delta\theta$ değeri, eğer YAW_TOLERANS değerini aşarsa diferansiyel dönüş manevrasını tetikler. Son olarak, hesaplanan açı hatasına bağlı olarak iticilerin PWM değerleri diferansiyel olarak değiştirilir ve MAVLink mesajı ile VESC sürücülerine iletilir. Bu yöntem, dümen kullanmadan yüksek hassasiyetli GPS verisiyle kararlı diferansiyel yön kontrolü sağlar. Şekil 2'de İnsansız deniz aracı'nın (İDA) GPS tabanlı otonom rota takip senaryosu görülmektedir.



Şekil 2. İnsansız Deniz Aracı'nın (İDA) GPS tabanlı Otonom Rota Takip Senaryosu.

SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, bir İDA'nın GPS entegrasyonu ile otonom rota izleme performansı deneysel olarak incelenmiştir. Elde edilen veriler, sistemin belirlenen rotayı yüksek hassasiyetle takip edebildiğini ve GPS verilerinin otonom sürüş kararları için güvenilir bir temel oluşturduğunu göstermiştir. Geleceğin harp ortamlarında yapay zekâ kontrollü ve otonom silah sistemlerinin baskın hale geleceği öngörüldüğünde (Güntürkün, 2022), İDA'ların rota izleme hassasiyetinin artırılması sadece bir navigasyon başarısı değil, aynı zamanda operasyonel etkinliğin temel şartıdır. GPS ve diğer sensör füzyon tekniklerinin geliştirilmesi, bu araçların otonom karar verme yeteneklerini güçlendirerek daha karmaşık savunma senaryolarında görev almalarına olanak tanıyacaktır. GPS tabanlı otonom navigasyon sisteminin performansına ilişkin deneysel bulgular analiz edilmiştir. Elde edilen veriler, Ortalama Yanal Sapma Hatası (XTE) gibi temel metrikler üzerinden sunulmuş ve kontrol algoritmasının etkinliği değerlendirilmiştir. Sistem, test koşullarında 0.75 metrelik ortalama XTE değeri ile stabil bir rota takip başarısı göstermiştir. Bu başarı, dümen mekanizması yerine diferansiyel itkiye dayanan kontrolcünün hızlı tepki süresi ve yeterli agresifliği ile sağlanmıştır. Testler sırasında karşılaşılan rüzgar ve akıntı gibi çevresel bozulmalar, anlık sapmalara neden olsa da, optimize edilmiş GPS verisi ve PID kontrol algoritması, aracı planlanan rotaya hızla ve

kararlı bir şekilde geri döndürerek sistemin sağlamlığını kanıtlamıştır. Bu bulgular, düşük maliyetli GNSS çözümleri kullanan diferansiyel tahrikli İDA'ların rota takibi konusunda literatüre pratik bir uygulama örneği sunmaktadı.

KAYNAKÇA

- Ağaçayak, A. C., & Sungur, C. (2019). Dron ağları için topoloji incelenmesi. M. Turhan (Ed.), *Mühendislik alanında yeni ufuklar* (1. baskı), Gece Akademi.
- Aguiar, A. P., & Hespanha, J. P. (2007). Trajectory-tracking and path-following of underactuated autonomous vehicles with parametric modeling uncertainty. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 52(8), 1362–1379. <https://doi.org/10.1109/TAC.2007.902731>
- Aksoy, S., & Kazan, F. A. (2022, 24–27 Kasım). Investigation of the effect of the drone's energy consumption of flying at different altitudes [Konferans sunumu]. Selçuk University International Technology and Innovation Student Symposium (SUTIS), Konya, Türkiye.
- Aksoy, S., & Kazan, F. A. (2022). Investigation of the effect of the drone's energy consumption of flying at different altitudes. S. Neşeli & H. Terzioğlu (Ed.), *New Trends in Engineering* (s. 129–140), Tablet Kitabevi.
- Anwer, K. İ., & Servi, S. (2021). Clustering method based on artificial algae algorithm. *International Journal of Intelligent Systems and Applications in Engineering*, 9(4), 136–151. <https://doi.org/10.18201/ijisae.2021473632>
- Arsel, İ., Yılmaz, F. A., Servi, S., Genç, A., Oturanç, G., & Yıldırım, F. N. (2024). A new approach to estimate solar radiation. *International Journal of Renewable Energy Research*, 14(3). <https://doi.org/10.20508/ijrer.v14i3.14913.g8909>
- Aras, H. H., Eryeşil, Y., & Köklü, M. (2025, Mayıs). An explainable deep learning framework for Agrtron-based coffee roast classification using Grad-CAM [Tam metin bildirisi]. 3rd International Conference on Intelligent Systems and New Applications (ICISNA'25). (Yayın No: 9876687)
- Aras, H. H. (2025). Explainable deep learning for skin cancer detection using DenseNet121 and Grad-CAM. N. Doğan (Ed.), *Innovative approaches in applied engineering fields* (1. baskı, ss. 328). Selçuk Üniversitesi Mühendislik Bilim ve Teknoloji Dergisi. ISBN: 978-975-448-246-1. (Yayın No: 9700458)
- Bilgin, O., & Kazan, F. A. (2016). The effect of magnet temperature on speed, current and torque in PMSMs. 2016 XXII International Conference on Electrical Machines (ICEM) (s. 2080–2085), IEEE.
- Breivik, M., & Fossen, T. I. (2004). Path following for marine surface vessels. *Proceedings of the IEEE Conference on Decision and Control*, 498–503.
- Cantekin, R. F., Erol, B., & Kartal, S. (2021). Bir insansız su üstü aracının dış bozucu etkisinde makine öğrenmesi ile hız kontrolü. *European Journal of Science and Technology*, 26, 431–437. <https://doi.org/10.31590/ejosat.952256>
- Dağlı, E., Civan, C., Şöhmelioglu, S., Ediş, F. E., & Tükel, D. (2013). Doğu-USV insansız deniz aracı: stereo görüş ile haritalandırma.
- Do, K. D., & Pan, J. (2006). Global tracking control of underactuated ships using Lyapunov's direct method. *Automatica*, 42(9), 1491–1504. <https://doi.org/10.1016/j.automatica.2006.04.008>
- Ekinci, T., Öztütüncü, O., & Ertogan, M. (2024). İnsansız Deniz Araçları Kapsamında Denizcilikle Alakalı Türk Mevzuatında İhtiyaç Duyulabilecek Değişikliklere Dair İnceleme. *Denizcilik Araştırmaları Dergisi: Amfora*, 3(5), 1-18.
- Eryeşil, Y., & Taşdemir, Ş. (2023). A deep learning approach for efficient waste classification. 9th International “Başkent” Congress on Physical, Engineering, and Applied Sciences.
- Eryeşil, Y., Kahramanlı, Ö. H., & Taşdemir, Ş. (2025). Optimizing solid waste classification using deep learning and grey wolf optimizer for recycling efficiency. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 23. <https://doi.org/10.1007/s13762-025-06834-2>

- Fossen, T. I., & Pettersen, K. Y. (2014). On uniform semiglobal exponential stability (USGES) of PID control with anti-windup for marine vessels. *IFAC Proceedings Volumes*, 47(3), 8253–8259.
- Ghassemzadeh, A., Xu, H., & Guedes Soares, C. (2023). Path following control using robust sliding mode for an autonomous surface vessel with ε -support vector regression-based steering model. *Ocean Engineering*, 285, 116969. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.116969>
- Güntürkün, R. (2022). *İnsansız Savaşlara Doğru Yapay Zeka Kontrollü Ölümcül Silahlar*, Ekin Basım Yayın Dağıtım, ISBN: 978-625-8235-07-4, Ekim 2022, pp-135
- İnan, O., Rasooli, A. Q., & Servi, S. (2024). Clustering with the blackwinged kite algorithm. *International Journal of Computer Science & Communications*.
- Kazan, F. A. (2020). Microcontroller based simulation of the very high frequency omnidirectional radio range (VOR). *International Journal of Aeronautics and Astronautics*, 1(1), 33–41.
- Kazan, F. A., & Akkaya, R. (2021). The effect of increases in user weight and road slope on energy consumption in disabled vehicle driven with PMSM. *Balkan Journal of Electrical and Computer Engineering*, 9(1), 1–7.
- Kazan, F. A., & Bilgin, O. (2020). Simulation of PMSM operating at different speeds and optimization of PI controller parameters. *Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Uygulamalı Bilimler Dergisi*, 4(1), 86–105.
- Kılıcı, O., Eryeşil, Y., & Köklü, M. (2025). Classification of biscuit quality with deep learning algorithms. *Journal of Food Science*. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.70379>
- Ma, L., Pang, S., He, Y., Wu, Y., Li, Y., & Zhou, W. (2025). Passivity-based sliding mode control for the robust trajectory tracking of unmanned surface vessels under external disturbances and model uncertainty. *Journal of Marine Science and Engineering*, 13(2), 364. <https://doi.org/10.3390/jmse13020364>
- Manh, T. D., Tam, N. T., & Rye, D. C. (2020). Experimental validation of an autonomous surface vessel navigation system under real marine disturbances. *Journal of Field Robotics*, 37(7), 1135–1154. <https://doi.org/10.1002/rob.21941>
- Marchel, Ł., Specht, C., & Specht, M. (2020). Assessment of the steering precision of a hydrographic USV along sounding profiles using a high-precision GNSS RTK receiver supported autopilot. *Energies*, 13(21), 5637. <https://doi.org/10.3390/en13215637>
- Mirjafarli, S., & Ağaçayak, A. C. (2022). Domestic control board design for underwater vehicle. *Selçuk University International Technology and Innovation Student Symposium*.
- Qanbar, M. M., Eryeşil, Y., & Taşdemir, Ş. (2023). Early glaucoma detection based on blood vessel using machine learning. 9th International “Başkent” Congress on Physical, Engineering, and Applied Sciences.
- Qu, Y., & Cai, L. (2023). Simultaneous planning and executing trajectory tracking control for underactuated unmanned surface vehicles from theory to practice. *Ocean Engineering*, 270, 113665.
- Servi, S., Uymaz, S. A., Yel, E., & Tezel, G. (2018). Logistic regression, as a tool and as a part of solution in engineering problems. 6th International GAP Engineering Conference (GAP2018) (s. 817–822).
- Servi, S., İnan, O., Yılmaz, F., Arsel, İ., Pekgör, A., Genç, A., & Oturanç, G. (2024). A performance comparison of different machine learning algorithms to forecast wind energy in Türkiye. *International Conference on Engineering Technologies (ICENTE'24)*.
- Specht, M., Specht, C., Lasota, H., & Cywiński, P. (2019). Assessment of the steering precision of a hydrographic unmanned surface vessel (USV) along sounding profiles using a low-cost multi-global navigation satellite system (GNSS) receiver supported autopilot. *Sensors*, 19(18), 3939. <https://doi.org/10.3390/s19183939>

- Şahin, N., & Servi, S. (2024). A novel hybrid algorithm: Enhancing tuna swarm optimization with cuckoo search for global optimization. N. Doğan, S. Alan, & Z. A. Yılmaz Acar (Ed.), Innovative approaches in applied engineering fields (1. baskı), Selçuk University Press.
- Wang, Z., Qiu, C., Dong, Z., Cheng, S., Zheng, L., & Chen, S. (2025). Trajectory tracking of unmanned surface vessels based on robust neural networks and adaptive control. *Journal of Marine Science and Engineering*, 13(7), 1341.
- Yalçın, G., Terzioğlu, H., Neşeli, S., & Ağaçayak, A. C. (2019). Tarımsal ilaçlama için drone tasarımı. I. Ulusal Mühendislikte Bilimsel ve Mesleki Çalışmalar Kongresi (UMUH BİLMES 2019) (s. 15–20).
- Yılmaz, R. H., & Yalçın, G. (2024). Otonom su altı araçları için kontrol algoritması ve PID. S. Neşeli & H. Terzioğlu (Ed.), Su altı araçlarında yenilikçi yaklaşımlar (1. baskı), Eğitim Yayınevi.

BÖLÜM 2

İNSANSIZ HAVA (İHA) VE DENİZ (İDA) ARAÇLARINDAN ELDE EDİLEN GÖRÜNTÜLERLE DENİZ VASITALARININ DERİN ÖĞRENME YÖNTEMLERİYLE TESPİTİ VE ÖZELLİK ÇIKARTARAK SINIFLANDIRILMASI

Eda COŞAR **, Hakan TERZİOĞLU ***

GİRİŞ

Deniz güvenliği; ticaret, enerji taşımacılığı ve ulusal savunma gibi kritik faaliyetlerin sürdürülebilirliği açısından stratejik bir öneme sahiptir. Modern savunma doktrinlerinde, deniz sınırlarının yasadışı faaliyetlere karşı izlenmesi ve tehditlerin anlık olarak tespit edilmesi temel bir gerekliliktir. Bu noktada İHA ve İDA'ların sunduğu gözetim kapasitesi, yapay zekâ teknolojilerinin gelişimiyle yeni bir boyuta taşınmıştır. İnsansız araçların stratejik kullanımı, sadece veri toplama ile sınırlı kalmayıp, bu platformların yapay zekâ kontrollü otonom silah sistemlerine evrildiği bir süreci de beraberinde getirmektedir (Güntürk, 2022). Bu

** Lisans Öğrencisi, Selçuk Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Konya, 223311083@ogr.selcuk.edu.tr, ORCID: orcid.org/0009-0004-6903-88134

*** Dr. Öğr. Üyesi, Selçuk Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Elektronik Mühendisliği, Konya, hterzioglu@selcuk.edu.tr, ORCID: orcid.org/0000-0001-5928-8457

dönüşüm, "insansız savaşlar" konseptinin merkezinde yer alarak, deniz araçlarının derin öğrenme yöntemleriyle tespit edilmesini navigasyonel bir araçtan öte, operasyonel bir savunma gerekliliği haline getirmiştir (Güntürk, 2022, s. 135). Deniz güvenliği; ticaret, enerji taşımacılığı, gıda temini ve rekreasyon gibi birçok kritik faaliyetin sürdürülebilirliği açısından stratejik bir öneme sahiptir. Küresel ölçekte bu alanların büyük ölçüde denizlere bağlı olması, denizlerin ulusal refah ve güvenlik açısından vazgeçilmez bir konumda yer almasına neden olmaktadır. Bununla birlikte, deniz sınırlarının uyuşturucu kaçakçılığı, yasadışı balıkçılık ve çevresel kirlilik gibi kötü niyetli faaliyetlere karşı etkin biçimde izlenmesi, deniz güvenliğinin sağlanmasında temel bir gereklilik olarak öne çıkmaktadır (Eaton vd., 2018). Literatürde, deniz araçlarının tespiti ve sınıflandırılması üzerine yapılan çalışmaların yanı sıra, insansız araçların stratejik kullanımı ve gözetim kapasiteleri üzerine de çeşitli araştırmalar mevcuttur (Ağaçayak & Sungur, 2019; Dündar & Ağaçayak, 2023). Özellikle İHA'lardan elde edilen görüntülerin analizi, deniz trafiğinin kontrolünde kritik bir bileşen haline gelmiştir (Arsel vd., 2024). Bu kapsamda deniz gözetimi ve deniz araçlarının tespitine yönelik çeşitli teknolojik ve yöntemsel çalışmalar gerçekleştirilmiştir.

Otomatik Tanımlama Sistemi (AIS), gemi çarpışmalarının önlenmesi, gemi trafiğinin düzenlenmesi ve gemi türlerinin tanımlanması gibi görevlerde uzun yıllardır etkin bir şekilde kullanılmaktadır (Tetreault, 2005). AIS'in deniz trafiğinin izlenmesi ve gemi hareketlerinin kontrolü açısından önemli avantajlar sunduğunu ortaya koymuştur. Ancak bazı gemilerde AIS vericilerinin arızalı olması ya da kaçakçılık ve terör faaliyetleri gibi nedenlerle kasıtlı olarak yanlış, sahte veya gizli kimlik sinyallerinin gönderilmesi, bu sistemin güvenilirliğini sınırlamaktadır (Li vd., 2025). Bu tür tespitten kaçınmaya yönelik faaliyet gösteren gemiler "karanlık gemiler" olarak adlandırılmakta olup, çoğunlukla AIS vericilerini kapatarak veya sinyal iletimini bilinçli olarak engelleyerek geleneksel izleme sistemlerinden saklanmaktadır.

AIS tabanlı sistemlerin bu sınırlılıkları, alternatif ve tamamlayıcı tespit yöntemlerine olan ihtiyacı artırmıştır. Bu bağlamda, deniz vasıtalarının optik görüntüler üzerinden derin öğrenme yöntemleri kullanılarak tespit edilmesi ve sınıflandırılması, etkili bir çözüm yaklaşımı olarak değerlendirilmektedir (Gabler & Koch, 2012). Derin öğrenme tabanlı yöntemler, karmaşık deniz ortamlarında farklı boyut ve türlerdeki

hedeflerin ayırt edilmesine olanak tanıyarak deniz gözetim sistemlerine önemli katkılar sunmaktadır. Derin öğrenme algoritmalarının sağladığı yüksek performans, sadece sürücü izleme sistemlerinde değil, aynı zamanda tarımsal ürünlerin Agtron tabanlı sınıflandırılması gibi farklı endüstriyel alanlarda da açıklanabilir yapay zekâ (XAI) çerçeveleriyle desteklenerek kullanılmaktadır (Aras vd., 2025). Görüntü işleme tabanlı derin öğrenme mimarileri, karmaşık uykululuk analizlerinin yanı sıra tıbbi teşhis sistemlerinde, özellikle DenseNet121 ve Grad-CAM kullanılarak gerçekleştirilen cilt kanseri tespiti çalışmalarında da yüksek doğruluk sergilemektedir (Aras, 2025).

Literatürde, insansız hava araçlarından (İHA) elde edilen görüntüler kullanılarak deniz hedeflerinin tespitine yönelik çeşitli çalışmalar yer almaktadır. Mittal et al. (2020) ,düşük irtifalı İHA görüntülerinde derin öğrenme tabanlı nesne algılama algoritmalarının uygulanabilirliğini kapsamlı bir şekilde incelemiş; küçük nesne boyutları, görüntü bulanıklığı, nesne örtüşmeleri ve sınıf dengesizliği gibi temel sorunlara dikkat çekmiştir. C. Zu vd, ise İHA görüntülerinde gemi ve deniz hedeflerinin tespiti amacıyla GrabCut tabanlı evrensel bir arka plan modeli önermiştir. Ancak söz konusu çalışma yalnızca tek bir bölgeden elde edilen verilerle test edilmiş, modern nesne tespit yöntemleri (ör. YOLO, Faster R-CNN) ile karşılaştırma yapılmamış ve farklı gemi türlerinin tespiti açısından sınırlı kalmıştır.

Derin öğrenme modellerinin başarısı, kullanılan eğitim verilerinin kalitesine ve ön işleme aşamalarına doğrudan bağlıdır. Görüntülerdeki gürültülerin temizlenmesi ve özelliklerin belirginleştirilmesi süreçleri, sınıflandırma doğruluğunu optimize etmektedir (Anwer & Servi, 2021; İnan, Rasooli & Servi, 2024). Deniz araçlarının karmaşık arka planlardan ayırt edilmesi aşamasında modern evrişimli sinir ağları (CNN) yaygın olarak tercih edilmektedir (Aksoy & Kazan, 2022; Aras, Eryeşil & Köklü, 2025).

İzala ve Becerikli'nin (2023) çalışmasında ise İHA görüntüleri kullanılarak deniz araçlarının tespiti ve sınıflandırılması amacıyla YOLOv8 ve Mask R-CNN mimarileri değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlar derin öğrenme yaklaşımlarının potansiyelini ortaya koymakla birlikte, tek veri kaynağına dayalı analizler ve sınırlı mimari çeşitliliği, mevcut çalışmaların genellenebilirliğini kısıtlayan faktörler arasında yer almaktadır.

Deniz araçlarının otonom tespiti, sadece askeri değil sivil alanlarda da geniş bir kullanım alanına sahiptir. Bu sistemlerin geliştirilmesinde kullanılan algoritmaların performans analizleri, gerçek zamanlı izleme kapasitelerini belirlemektedir (Kazan, 2020). Ayrıca, farklı sensörlerden gelen verilerin entegrasyonu ve hibrit modellerin kullanımı, sistemlerin hata payını minimize etmektedir (Kazan & Akkaya, 2021).

Genel olarak literatürdeki çalışmalar incelendiğinde; küçük hedeflerin tespitinde yaşanan zorluklar, sınıf dengesizliği, sınırlı derin öğrenme mimarilerinin kullanımı ve tek veri kaynağına dayalı yaklaşımlar öne çıkan temel kısıtlar olarak dikkat çekmektedir. Ayrıca farklı derin öğrenme modellerinden elde edilen özelliklerin istatistiksel özellik seçim yöntemleriyle optimize edilmesine yönelik çalışmaların sınırlı olduğu görülmektedir.

Bu derleme çalışması, düşük irtifalı İHA'lar ve insansız deniz araçları (İDA) üzerinden elde edilen RGB veya optik görüntüler kullanılarak deniz vasıtalarının tespiti ve sınıflandırılmasına yönelik derin öğrenme tabanlı yöntemleri kapsamlı bir şekilde incelemeyi amaçlamaktadır. Mevcut veri setleri, derin öğrenme mimarileri, özellik çıkarımı ve özellik seçimi yaklaşımları sistematik olarak ele alınarak literatürdeki mevcut durum ortaya konulmakta; karşılaşılan zorluklar ve gelecekteki araştırma yönleri tartışılmaktadır.

MATERYAL VE YÖNTEM

Görsel nesne tespiti, çeşitli denizcilik uygulamalarında kritik bir rol oynamaktadır (Shan vd., 2021). Deniz vasıtalarının tespitine yönelik gerçekleştirilen ilk çalışmalarda, genel nesne tespiti problemlerine benzer şekilde el yapımı ve basit özellik çıkarım yöntemleri kullanılmıştır. Ancak bu yaklaşımlar, karmaşık deniz ortamları ve farklı ölçeklerdeki hedeflerin varlığı nedeniyle sınırlı performans göstermiştir. Son yıllarda, görsel özellikleri otomatik olarak öğrenme ve temsil etme konusundaki üstün yetenekleri sayesinde evrimsel sinir ağları (CNN) tabanlı yöntemler deniz vasıtası tespiti alanına entegre edilmiştir (Teixeira vd., 2022).

Optik sensörler, düşük güç tüketimi gerektiren ve gemilerin ayrıntılı biçimde incelenmesini hedefleyen denizcilik uygulamalarında ekonomik ve etkili bir alternatif olarak öne çıkmaktadır. Literatürde, optik sensörlerin gemi takibi ve sınıflandırma görevlerinde yaygın olarak kullanıldığı; bu sensörlerin verimli, hızlı ve sağlam görsel algılama teknikleriyle

birleştirildiğinde deniz gözetim sistemlerinin başarısını önemli ölçüde artırdığı belirtilmektedir (Teixeira vd., 2022).

Mevcut çalışmalar incelendiğinde, optik sensör tabanlı gemi tespiti sistemlerinin genellikle dört temel aşamadan oluştuğu görülmektedir: ön işleme, özellik çıkarımı, sınıflandırma ve değerlendirme. Bu aşamaların her biri, geliştirilen sistemlerin genel performansını doğrudan etkilemektedir. Özellikle CNN tabanlı derin öğrenme modellerinin (örneğin YOLO, Faster R-CNN, ResNet) yüksek doğruluk oranları sağladığı ve farklı görüntü kaynaklarının bir arada kullanılmasının modelin genelleme kabiliyetini artırdığı literatürde vurgulanmaktadır (Teixeira vd., 2022). Bu bağlamda, derin öğrenme temelli çok aşamalı yaklaşımlar, deniz vasıtalarının tespiti ve sınıflandırılmasına yönelik çalışmalarda yaygın bir metodolojik çerçeve sunmaktadır.

Veri Kümesinin Sınıflandırılması

Deniz vasıtalarının sınıflandırılmasına yönelik yapılan literatür taramaları, gemi türlerinin operasyonel görevlerine, fiziksel yapısına ve görüntüleme açılarına bağlı olarak önemli farklılıklar gösterdiğini ortaya koymaktadır. Denizcilik uygulamalarındaki işlevsel ayrımların yanı sıra, görüntü tabanlı tespit ve sınıflandırma süreçlerinde sınıf yapısının model performansı üzerindeki etkisi, birçok çalışmada vurgulanmıştır. Bu nedenle literatürde, hem üstten hem de yandan elde edilen görüntülerde ayırt edilebilirliği yüksek olan gemi türlerinin sınıflandırılmasına öncelik verildiği görülmektedir.

Mevcut çalışmalar incelendiğinde, yolcu gemisi, kargo/yük gemisi, balıkçı gemisi, askeri gemi, konteyner gemisi, tıbbi gemi, feribot ve diğer gemiler gibi temel sınıfların deniz gözetim sistemlerinde sıklıkla ele alındığı dikkat çekmektedir. Bu sınıflar, operasyonel kullanım alanları ve görsel özellikleri bakımından farklılık göstermeleri nedeniyle literatürde yaygın biçimde kullanılmaktadır. Literatürde sıkça karşılaşılan bu gemi sınıflarına ait örnek görüntüler Tablo 1’de sunulmaktadır.

Tablo 1. Literatürde yaygın olarak kullanılan gemi sınıfları ve her sınıfa ait örnek görüntüler

Veri Kümesinin Sınıflandırması

Yolcu Gemisi



Kargo / Yük Gemisi



Balıkçı Gemisi



Askeri Gemi



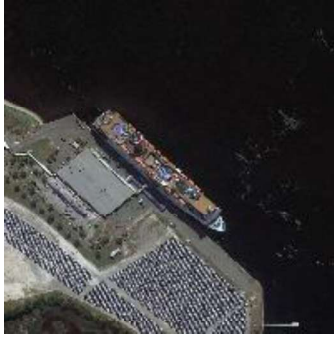
Konteyner Gemisi



Tıbbi Gemi



Feribot



Diğer Gemiler



Deniz vasıtası tespiti ve sınıflandırmasına yönelik çalışmalarda kullanılan veri kümeleri, görüntüleme açısı (üstten veya yandan), veri büyüklüğü ve sınıf çeşitliliği açısından önemli farklılıklar göstermektedir. Özellikle MARVEL veri kümesi, 29 farklı gemi sınıfı ve yaklaşık 2 milyon görüntü içeriğiyle literatürde en kapsamlı gemi sınıflandırma veri tabanlarından biri olarak öne çıkmaktadır (Mittal vd., 2020). Bu veri setinde Container Ship, Bulk Carrier, Oil Products Tanker ve General Cargo gibi gemi türlerinin yüksek sayıda örnekle temsil edildiği belirtilmektedir.

Buna ek olarak, SeaShips veri kümesi yaklaşık 7000 görüntüden oluşmakta olup cevher gemisi, dökme yük gemisi, genel kargo gemisi, konteyner gemisi, balıkçı teknesi ve yolcu gemisi olmak üzere altı farklı gemi sınıfını içermektedir (Liu vd., 2021). Bu veri kümesi, sınırlı veri boyutuna rağmen dengeli sınıf yapısı nedeniyle birçok çalışmada tercih edilmektedir.

Literatürde yaygın olarak kullanılan diğer veri kümeleri; ShipRSImageNet, HRSC2016, VAIS, SeaShips_OD ve ABOShips gibi farklı görüş açılarına ve sınıf yapılarına sahip veri setlerinden oluşmaktadır. Bu veri kümelerine ilişkin temel özellikler Tablo 2’de özetlenmiştir.

Tablo 2. Literatürde sık kullanılan sınıflar ve veri kümeleri

Veri Kümesi	Görüş Açısı	Veri Sayısı	Gemi Sınıf Sayısı
ShipRSImageNet	Üstten	17.573	50
HRSC2016	Üstten	1061	19
MARVEL	Yandan	2,000,000	29
Ship Detection from Aerial Images	Yandan	621	1
Game of Deep Learning: Ship datasets	Yandan	6252	5
Seaships_OD	Üstten	7000	6
Ships/Vessels in Aerial Images	Üstten	26.900	2
VAIS	Yandan	2865	15
ABOShips	Yandan	98880	9

İncelenen çalışmalar, farklı veri kaynaklarının ve görüş açılarının bir arada değerlendirilmesinin, gemi tespiti ve sınıflandırma sistemlerinin genellenebilirliğini artırabileceğini göstermektedir.

Veri Ön İşleme Yöntemleri

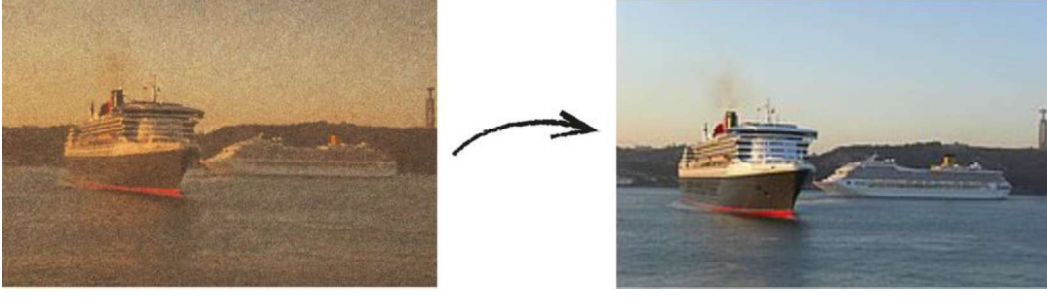
Derin öğrenme tabanlı görüntü işleme sistemlerinde elde edilen çıktıların doğruluğu, büyük ölçüde giriş verisinin kalitesine bağlıdır. Bu nedenle literatürde, deniz vasıtalarının tespiti ve sınıflandırılmasına yönelik çalışmalarda çeşitli görüntü ön işleme tekniklerinin yaygın olarak kullanıldığı belirtilmektedir (Stojnev & Stojnev Ilić, 2020). Ön işleme adımları, deniz ortamına özgü zorlukların etkisini azaltmayı ve modelin ayırt edici özellikleri daha etkin biçimde öğrenmesini amaçlamaktadır.

Literatürde en sık başvurulanan ön işleme yaklaşımlarından biri görüntü çoğaltma (data augmentation) yöntemleridir. Döndürme, yansıtma, ölçekleme ve parlaklık ayarlama gibi işlemlerle görüntü çeşitliliğinin artırılması, derin öğrenme modellerinin farklı çevresel koşullar altında daha kararlı sonuçlar üretmesine katkı sağlamaktadır. Bu tür veri artırma işlemlerinin, özellikle sınıf dengesizliği ve küçük hedef tespiti problemlerinin azaltılmasında etkili olduğu çeşitli çalışmalarda rapor edilmiştir. Literatürde yaygın olarak kullanılan döndürme tabanlı veri artırma örnekleri Şekil 1’te gösterilmektedir.



Şekil 1. Literatürde yaygın olarak kullanılan görüntü çoğaltma (data augmentation) işlemlerine örnek bir gemi görüntüsü

Deniz ortamından elde edilen görüntülerde sensör kaynaklı gürültü ve istenmeyen pikseller sıkça karşılaşılan sorunlar arasındadır. Bu problemlerin giderilmesi amacıyla morfolojik filtreleme yöntemleri (erosion, dilation, opening ve closing) ile Gaussian ve median filtre gibi gürültü giderme teknikleri literatürde yaygın biçimde kullanılmaktadır. Bu filtreleme işlemleri sayesinde gemi sınırlarının daha belirgin hale getirildiği ve nesne tespit performansının iyileştirildiği belirtilmektedir. Gürültü giderme işlemlerine ilişkin temsili bir örnek Şekil 2’de sunulmaktadır.



Şekil 2. Deniz görüntülerinde gürültü giderme amacıyla kullanılan filtreleme işlemlerine temsili bir örnek

Bunun yanı sıra, düşük çözünürlüklü veya kısmi bilgi içeren görüntüler üzerinde image restoration ve super-resolution tekniklerinin uygulanmasının, görsel detay seviyesini artırarak derin öğrenme tabanlı sistemlerin performansını olumlu yönde etkilediği literatürde vurgulanmaktadır. Bu tür ön işleme yaklaşımları, özellikle uzaktan algılama ve insansız platformlardan elde edilen görüntülerde veri kalitesinin artırılmasına yönelik önemli katkılar sunmaktadır.

Derin Öğrenme Tabanlı Özellik Çıkarımı Yaklaşımları

Derin öğrenme tabanlı yöntemler, görüntülerden ayırt edici ve yüksek boyutlu özniteliklerin otomatik olarak çıkarılabilmesi sayesinde deniz vasıtalarının tespiti ve sınıflandırılması alanında yaygın biçimde kullanılmaktadır. Özellikle evrişimli sinir ağları (CNN), manuel özellik tasarımına olan ihtiyacı ortadan kaldırarak karmaşık deniz ortamlarında daha güçlü temsil kabiliyetleri sunmaktadır. Literatürde, bu tür mimarilerin farklı ölçeklerdeki nesneleri algılayabilme yeteneğinin, deniz görüntülerinde sıkça karşılaşılan küçük hedef tespiti problemlerinin çözümünde önemli avantajlar sağladığı belirtilmektedir.

Hu vd. (2019), küçük nesnelerin tespit performansını artırmak amacıyla YOLOv3 mimarisini geliştirmiş ve çok ölçekli özellik haritalarının kullanımının doğruluk oranlarını anlamlı düzeyde iyileştirdiğini göstermiştir. Benzer şekilde, İzala ve Becerikli (2023) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, İHA görüntülerinde deniz vasıtası tespiti amacıyla YOLOv8 ve Mask R-CNN mimarileri karşılaştırılmış; farklı derin öğrenme yapılarına sahip modellerin hız, doğruluk ve genel performans açısından birbirinden farklı sonuçlar ürettiği ortaya konulmuştur. Bu çalışmalar, mimari çeşitliliğin deniz ortamına özgü zorlukların ele alınmasında kritik bir rol oynadığını göstermektedir.

Literatürde deniz vasıtası tespiti ve sınıflandırmasında kullanılan derin öğrenme mimarileri; ağ derinliği, katman yapısı ve hesaplama karmaşıklığı bakımından farklılık göstermektedir. ResNet, DenseNet, VGG, Inception, EfficientNet ve NasNet gibi CNN tabanlı mimariler, genellikle derin özellik çıkarımı amacıyla değerlendirilirken; YOLO ve R-CNN ailesine ait yöntemler, nesne tespiti ve konumlandırma yetenekleriyle öne çıkmaktadır. Bu mimarilerden elde edilen derin özelliklerin, sınıflandırma performansını doğrudan etkileyen önemli temsil bilgileri sunduğu literatürde vurgulanmaktadır.

Mevcut çalışmalar incelendiğinde, derin öğrenme tabanlı özellik çıkarımı yaklaşımlarının çoğunlukla önceden eğitilmiş ağlar üzerinden gerçekleştirildiği ve ağların ara veya sondan bir önceki katmanlarından elde edilen özniteliklerin sınıflandırma süreçlerinde kullanıldığı görülmektedir. Bu yaklaşım, hem hesaplama maliyetinin azaltılması hem de daha genellenebilir özellik temsillerinin elde edilmesi açısından literatürde yaygın bir yöntem olarak kabul edilmektedir. İncelenen derin öğrenme mimarileri ve bu mimarilerin deniz vasıtası tespitindeki potansiyel kullanım alanları Tablo 3'te özetlenmiştir.

Tablo 3. Deniz Vasıtası Tespiti ve Sınıflandırmasında Kullanılabilir Derin Öğrenme Mimarileri

NasNet-Large	GoogleNet	ResNet-50
NasNet-Mobile	VGG-19	RetinaNet
DenseNet-201	DarkNet-53	ShuffleNet
EfficientNet-b0	SRCNN	Fast R- CNN
R-CNN	YOLOv8	Mark-RCNN
Inception-v3	SqueezeNet	DarkNet-19
Xception	Faster CNN	ResNet

Özellik Seçimi ve Sınıflandırma Yaklaşımları

Özellik çıkarımı ve özellik seçimi aşamaları, derin öğrenme tabanlı nesne tanıma ve sınıflandırma çalışmalarında model performansını doğrudan etkileyen kritik adımlar arasında yer almaktadır. Literatürde, özellikle yüksek boyutlu derin özelliklerin doğrudan sınıflandırma aşamasına aktarılmasının hesaplama maliyetini artırdığı ve genelleme performansını olumsuz etkileyebildiği belirtilmektedir. Bu nedenle, derin öğrenme modellerinden elde edilen özniteliklerin uygun özellik seçimi

yöntemleriyle optimize edilmesi yaygın bir yaklaşım olarak öne çıkmaktadır.

Gümüş vd. (2024) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, güç kalitesi olaylarının sınıflandırılmasında özellik seçiminin sınıflandırma doğruluğu ve hesaplama verimliliği üzerindeki etkisi incelenmiş; uygun özellik seçimi ile sınıflandırma doğruluğunun %96 seviyelerine kadar yükseltilebildiği rapor edilmiştir. Bu tür bulgular, farklı alanlarda olduğu gibi görüntü tabanlı deniz vasıtası tespiti çalışmalarında da özellik seçiminin önemini ortaya koymaktadır.

Literatürde, derin öğrenme mimarilerinin ara veya sondan bir önceki katmanlarından elde edilen yüksek boyutlu özniteliklerin, istatistiksel özellik seçimi algoritmalarıyla işlenmesi yaygın bir yöntem olarak kullanılmaktadır. Bu kapsamda minimum tekrar–maksimum ilişki (mRMR), Chi-square (χ^2), ReliefF, ANOVA F-testi ve Kruskal–Wallis gibi yöntemler, bilgilendirici ve ayırt edici özniteliklerin belirlenmesinde sıklıkla tercih edilmektedir.

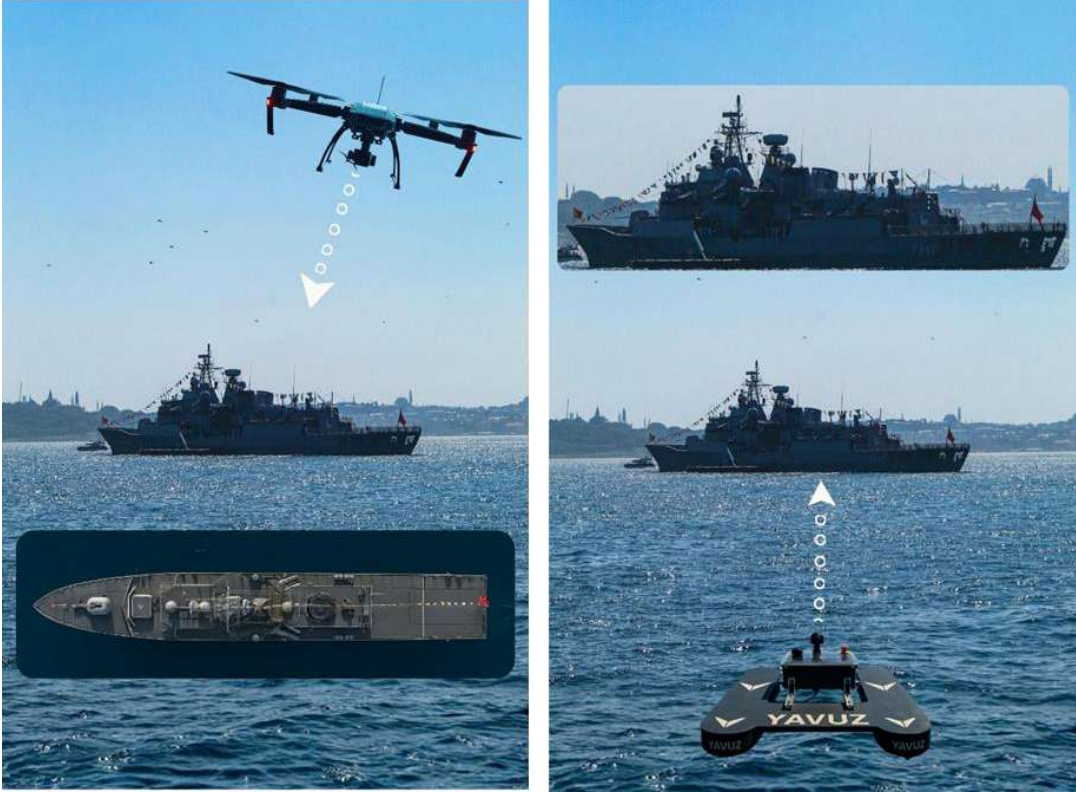
mRMR algoritması, hedef sınıfla yüksek ilişkiye sahip ancak kendi aralarında düşük korelasyona sahip özelliklerin seçilmesini amaçlayarak gereksiz tekrarların azaltılmasına katkı sağlamaktadır (Lv vd., 2022). Chi-square testi, her bir özelliğin sınıf etiketleriyle olan istatistiksel bağımlılığını ölçerek sınıflandırmaya düşük katkı sağlayan özniteliklerin elenmesini mümkün kılmaktadır (Mashhour vd., 2018). ReliefF algoritması ise sınıflar arasındaki ayırt ediciliği esas alarak, özellikle yüksek boyutlu veri kümelerinde anlamlı özelliklerin korunmasına yardımcı olmaktadır (Sarrafzadeh vd., 2012).

ANOVA F-testi, farklı sınıflar arasındaki ortalama farklılıkları analiz ederek istatistiksel olarak anlamlı özellikleri belirleyen bir yöntem olup, yüksek boyutlu veri yapılarında model kararlılığını artırdığı rapor edilmiştir (Shakeela vd., 2021). Parametrik olmayan bir yöntem olan Kruskal–Wallis testi ise, özellikle normal dağılım varsayımının sağlanmadığı durumlarda medyan farklarına dayalı olarak ayırt edici özelliklerin belirlenmesinde kullanılmaktadır (Shakeela vd., 2021).

Özellik seçimi sonrasında, literatürde yaygın olarak destek vektör makineleri, k-en yakın komşu, rastgele ormanlar ve derin öğrenme tabanlı sınıflandırıcılar gibi farklı sınıflandırma yöntemlerinin değerlendirildiği görülmektedir. Çalışmalar, uygun özellik seçimi ile desteklenen sınıflandırma modellerinin doğruluk, hesaplama verimliliği ve genelleme yeteneği açısından daha kararlı sonuçlar üretebildiğini göstermektedir. Bu bağlamda, özellik seçimi ve sınıflandırma aşamalarının birlikte ele alınması, deniz vasıtası tespiti ve sınıflandırmasına yönelik çalışmalarda önemli bir metodolojik çerçeve sunmaktadır.

SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu derleme çalışması kapsamında incelenen literatür, optik görüntüler üzerinden derin öğrenme tabanlı yöntemlerin deniz vasıtalarının tespiti ve sınıflandırılmasında giderek daha baskın hale geldiğini göstermektedir. Özellikle İHA ve İDA gibi insansız platformlardan elde edilen görüntüler, farklı görüş açılarının sağladığı tamamlayıcı bilgi nedeniyle dikkat çekmektedir. İHA görüntülerinin çoğunlukla üstten bakış açısı sunması (Şekil 3) ve İDA görüntülerinin yandan/karşıdan bakış açısı sağlaması (Şekil 3), gemi gövde yapısı ve üst yapı detayları gibi farklı ayırt edici ipuçlarının öğrenilmesine imkân tanıyabilecek bir çeşitlilik oluşturmaktadır. Literatürde tek bakış açısına dayalı çalışmaların sınırlılıkları vurgulanırken, çoklu görüş açısı kullanımının özellikle küçük hedeflerin tespiti, örtüşme/engellenme durumları ve sınıf ayrımı açısından potansiyel avantajlar sunduğu değerlendirilmektedir.



Şekil 3. İHA ve İDA platformlarından elde edilen üstten bakış ve yandan bakış açılı gemi görüntülerine temsili bir örnek.

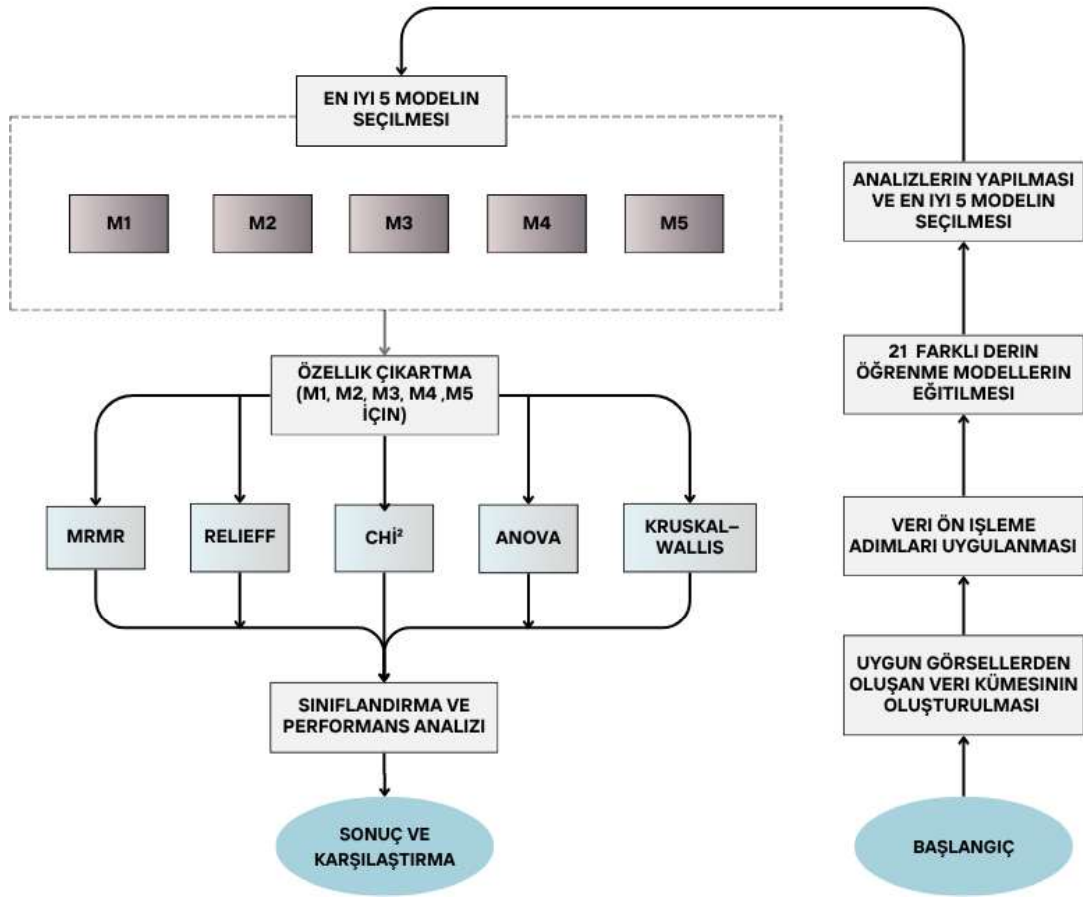
Derin öğrenme mimarileri açısından bakıldığında, YOLO ailesi gibi tek aşamalı yöntemlerin işlem hızı ve gerçek zamanlı uygulama avantajı nedeniyle deniz gözetim senaryolarında sıklıkla tercih edildiği görülmektedir. Buna karşılık, Faster R-CNN ve Mask R-CNN gibi iki aşamalı yaklaşımlar daha ayrıntılı özellik temsili ve karmaşık sahnelerde daha güçlü ayırım kabiliyeti sunabilmektedir. Bu durum, literatürde “hız-doğruluk” dengesinin uygulama gereksinimlerine göre değiştiğini ve farklı mimarilerin farklı senaryolarda öne çıktığını göstermektedir. Hu vd. (2019) küçük nesne tespiti için çok ölçekli özellik haritalarının önemini vurgularken, İzala ve Becerikli (2023) farklı mimarilerin hız ve doğruluk açısından farklı performans karakteristiklerine sahip olduğunu ortaya koymuştur.

İncelenen çalışmaların ortak bulgularından biri, veri kalitesinin ve görüntü ön işleme adımlarının performans üzerindeki belirleyici etkisidir. Deniz ortamına özgü gürültü, değişken aydınlatma, deniz yüzeyi yansımaları ve düşük çözünürlük gibi faktörler; veri artırma, gürültü giderme ve çözünürlük iyileştirme gibi adımların literatürde yaygın biçimde ele alınmasına yol açmıştır. Bu çerçevede, ön işleme aşaması yalnızca veri miktarını artıran bir adım olarak değil; aynı zamanda modelin

genelleme yeteneğini destekleyen kritik bir bileşen olarak değerlendirilmektedir.

Bununla birlikte, derin öğrenme modellerinden elde edilen yüksek boyutlu özniteliklerin doğrudan sınıflandırma aşamasına taşınmasının hesaplama maliyetini artırabildiği ve gereksiz/tekrarlayıcı özelliklerin performansı olumsuz etkileyebildiği literatürde vurgulanmaktadır. Bu nedenle mRMR, Chi-square, ReliefF, ANOVA ve Kruskal–Wallis gibi özellik seçimi yöntemlerinin, daha ayırt edici bir özellik alt kümesi oluşturmak ve hesaplama verimliliğini artırmak için kullanıldığı görülmektedir. Gümüş vd. (2024) uygun özellik seçiminin doğruluk ve verimlilik üzerinde belirgin etkiler yaratabildiğini rapor etmiştir. Bu bulgular, deniz vasıtası tespiti bağlamında da özellik seçiminin yalnızca doğruluk değil, aynı zamanda kararlılık ve maliyet açısından da kritik bir araştırma hattı olduğuna işaret etmektedir.

Bu derlemede ele alınan çalışmalar bir bütün olarak değerlendirildiğinde, literatürde yaygın yaklaşımın; (i) veri hazırlama ve ön işleme, (ii) derin öğrenme tabanlı özellik çıkarımı/tespit, (iii) özellik optimizasyonu ve (iv) sınıflandırma-değerlendirme adımlarından oluşan çok aşamalı bir iş akışına karşılık geldiği görülmektedir. Bu metodolojik yapı, Şekil 4’te kavramsal olarak özetlenmiştir. Şekil 4, literatürde sıklıkla tartışılan temel bileşenlerin bir arada düşünülmesini sağlayarak, özellikle çoklu görüş açılarının ve özellik seçimi yaklaşımlarının sistem performansındaki olası rolünü tartışmaya açmaktadır.



Şekil 4. Bu derleme çalışması kapsamında ele alınan yöntemlere dayalı kavramsal iş akışı

Genel olarak, derin öğrenme tabanlı deniz vasıtası tespitinde önemli ilerlemeler kaydedilmiş olmakla birlikte; küçük hedef tespiti, sınıf dengesizliği, tek bakış açısına bağımlılık ve veri kalitesine duyarlılık gibi konuların hâlen belirgin araştırma boşlukları oluşturduğu anlaşılmaktadır. Bu bağlamda, çoklu platformlardan elde edilen görüntülerin birlikte ele alınması ve derin özelliklerin istatistiksel özellik seçimi yöntemleriyle optimize edilmesi, gelecekteki çalışmalar için öne çıkan araştırma yönelimleri arasında değerlendirilmektedir.

KAYNAKÇA

- Ağaçayak, A. C., & Sungur, C. (2019). Dron ağırları için topoloji incelenmesi. In M. Turhan (Ed.), *Mühendislik alanında yeni ufuklar* (1st ed.). Gece Akademi.
- Aras, H. H., Eryeşil, Y., & Köklü, M. (2025, Mayıs). An explainable deep learning framework for Agron-based coffee roast classification using Grad-CAM [Tam metin bildirisi]. 3rd International Conference on Intelligent Systems and New Applications (ICISNA'25). (Yayın No: 9876687)
- Aras, H. H. (2025). Explainable deep learning for skin cancer detection using DenseNet121 and Grad-CAM. N. Doğan (Ed.), *Innovative approaches in applied engineering fields* (1. baskı, ss. 328). Selçuk Üniversitesi Mühendislik Bilim ve Teknoloji Dergisi. ISBN: 978-975-448-246-1. (Yayın No: 9700458)
- Aksoy, S., & Kazan, F. A. (2022). Investigation of the effect of the drone's energy consumption of flying at different altitudes. In S. Neşeli & H. Terzioğlu (Eds.), *New trends in engineering* (1st ed., pp. 129–140). Tablet Kitabevi.
- Aksoy, S., & Kazan, F. A. (2022, November 24–27). Investigation of the effect of the drone's energy consumption of flying at different altitudes [Conference presentation]. Selçuk University International Technology and Innovation Student Symposium (SUTIS), Konya, Türkiye.
- Anwer, K. İ., & Servi, S. (2021). Clustering method based on artificial algae algorithm. *International Journal of Intelligent Systems and Applications in Engineering*, 9(4), 136–151. <https://doi.org/10.18201/ijisae.2021473632>
- Arsel, İ., Yılmaz, F. A., Servi, S., Genç, A., Oturanç, G., & Yıldırım, F. N. (2024). A new approach to estimate solar radiation. *International Journal of Renewable Energy Research*, 14(3). <https://doi.org/10.20508/ijrer.v14i3.14913.g8909>
- Dündar, K., & Ağaçayak, A. C. (2023). Yapay zeka ve makine öğrenmesi ile insan ilişkileri analizi. In S. Neşeli & H. Terzioğlu (Eds.), *Mühendislikte yenilikçi yaklaşımlar-2* (1st ed.). Eğitim Yayınevi.
- Eaton, R. S., German, S., & Balasuriya, A. (2018). Maritime border security using sensors, processing, and platforms to detect dark vessels. In *Proceedings of the IEEE International Symposium on Technologies for Homeland Security (HST)* (pp. 1–5). <https://doi.org/10.1109/THS.2018.8574147>
- Eryeşil, Y., & Taşdemir, Ş. (2023). A deep learning approach for efficient waste classification. In 9th International “Başkent” Congress on Physical, Engineering, and Applied Sciences.
- Eryeşil, Y., Kahramanlı, Ö. H., & Taşdemir, Ş. (2025). Optimizing solid waste classification using deep learning and grey wolf optimizer for recycling efficiency. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 23. <https://doi.org/10.1007/s13762-025-06834-2>
- Gabler, R., & Koch, W. (2012). Detection and tracking of non-cooperative vessels. In *Proceedings of the NATO Symposium on Port and Regional Maritime Security (RTO-MP-SCI-247)* (pp. 1–17).
- Gümüş, B., Çoban, M., & Tezcan, S. S. (2024). Metasezgisel tabanlı özellik seçim algoritmalarının güç kalitesi olaylarının sınıflandırılmasına etkisinin incelenmesi. *International Journal of Engineering Research and Development*, 16(2), 646–658. <https://doi.org/10.29137/umagd.1423997>
- Güntürkün, R. (2022). *İnsansız Savaşlara Doğru Yapay Zeka Kontrollü Ölümcül Silahlar*, Ekin Basım Yayın Dağıtım, ISBN: 978-625-8235-07-4, pp-135

- Hu, Y., Wu, X., Zheng, G., & Liu, X. (2019). Object detection of UAV for anti-UAV based on improved YOLO v3. In *Proceedings of the Chinese Control Conference (CCC)* (pp. 8386–8390). <https://doi.org/10.23919/ChiCC.2019.8865525>
- İnan, O., Rasooli, A. Q., & Servi, S. (2024). Clustering with the blackwinged kite algorithm. *International Journal of Computer Science & Communications*.
- İzala, Y., & Becerikli, Y. (2023). Optik görüntülerdeki deniz vasıtalarının derin öğrenme yöntemleriyle tespiti ve sınıflandırılması. *International Journal of Advanced Natural Sciences and Engineering Research*, 7(6), 139–144. <https://doi.org/10.59287/ijanser.1147>
- Kazan, F. A. (2020). Microcontroller based simulation of the very high frequency omnidirectional radio range (VOR). *International Journal of Aeronautics and Astronautics*, 1(1), 33–41.
- Kazan, F. A., & Akkaya, R. (2021). The effect of increases in user weight and road slope on energy consumption in disabled vehicle driven with PMSM. *Balkan Journal of Electrical and Computer Engineering*, 9(1), 1–7.
- Kazan, F. A., & Bilgin, O. (2020). Simulation of PMSM operating at different speeds and optimization of PI controller parameters. *Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Uygulamalı Bilimler Dergisi*, 4(1), 86–105.
- Khan, S. A., Hussain, A., Basit, A., & Akram, S. (2014). Kruskal–Wallis-based computationally efficient feature selection for face recognition. *The Scientific World Journal*, 2014, Article 672630.
- Kılıcı, O., Eryeşil, Y., & Köklü, M. (2025). Classification of biscuit quality with deep learning algorithms. *Journal of Food Science*. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.70379>
- Li, F., Yu, K., Yuan, C., Tian, Y., Yang, G., Yin, K., & Li, Y. (2025). Dark ship detection via optical and SAR collaboration: An improved multi-feature association method between remote sensing images and AIS data. *Remote Sensing*, 17(13), 2201. <https://doi.org/10.3390/rs17132201>
- Liu, R. W., Yuan, W., Chen, X., & Lu, Y. (2021). An enhanced CNN-enabled learning method for promoting ship detection in maritime surveillance system. *Ocean Engineering*, 235, 109435. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2021.109435>
- Lv, C., Lu, Y., Lu, M., Feng, X., Fan, H., Xu, C., & Xu, L. (2022). A classification feature optimization method for remote sensing imagery based on Fisher score and mRMR. *Applied Sciences*, 12(17), 8845. <https://doi.org/10.3390/app12178845>
- Mashhour, E. M., El Houbay, E. M., Wassif, K. T., & Salah, A. I. (2018). Feature selection approach based on firefly algorithm and Chi-square. *International Journal of Electrical and Computer Engineering*, 8(4).
- Mittal, P., Singh, R., & Sharma, A. (2020). Deep learning-based object detection in low-altitude UAV datasets: A survey. *Image and Vision Computing*, 104.
- Mirjafarli, S., & Ağaçayak, A. C. (2022). Domestic control board design for underwater vehicle. In *Selçuk University International Technology and Innovation Student Symposium*.
- Mirjafarli, S., Terzioğlu, H., & Ağaçayak, A. C. (2022). Yapay zeka ve makine öğrenme metodlarının tıp'ta kullanım alanlarına genel bakış. In G. Yalçın & A. C. Ağaçayak (Eds.), *Mühendislikte yeni araştırmalar* (1st ed.). Tablet Kitabevi.
- Qanbar, M. M., Eryeşil, Y., & Taşdemir, Ş. (2023). Early glaucoma detection based on blood vessel using machine learning. In *9th International “Başkent” Congress on Physical, Engineering, and Applied Sciences*.
- Sarrafzadeh, A., Atabay, H. A., Pedram, M. M., & Shanbehzadeh, J. (2012). ReliefF-based feature selection in content-based image retrieval. In *Proceedings of the International MultiConference of Engineers and Computer Scientists (Vol. 1)*.

- Servi, S., İnan, O., Yılmaz, F., Arsel, İ., Pekgör, A., Genç, A., & Oturanç, G. (2024). A performance comparison of different machine learning algorithms to forecast wind energy in Türkiye. In International Conference on Engineering Technologies (ICENTE'24).
- Servi, S., Uymaz, S. A., Yel, E., & Tezel, G. (2018). Logistic regression, as a tool and as a part of solution in engineering problems. In 6th International GAP Engineering Conference (GAP2018) (pp. 817–822).
- Shakeela, S., Shankar, N. S., Reddy, P. M., Tulasi, T. K., & Koneru, M. M. (2021). Optimal ensemble learning based on distinctive feature selection by univariate ANOVA-F statistics for IDS. *International Journal of Electronics and Telecommunications*, 267–275.
- Shan, Y., Zhou, X., Liu, S., Zhang, Y., & Huang, K. (2021). SiamFPN: A deep learning method for accurate and real-time maritime ship tracking. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, 31(1), 315–325. <https://doi.org/10.1109/TCSVT.2020.2978194>
- Stojnev, D., & Stojnev Ilić, A. (2020). Preprocessing image data for deep learning. In *Proceedings of Sinteza 2020 – International Scientific Conference on Information Technology and Data Related Research* (pp. 312–317). <https://doi.org/10.15308/Sinteza-2020-312-317>
- Şahin, N., & Servi, S. (2024). A novel hybrid algorithm: Enhancing tuna swarm optimization with cuckoo search for global optimization. In N. Doğan, S. Alan, & Z. A. Yılmaz Acar (Eds.), *Innovative approaches in applied engineering fields* (1st ed.). Selçuk University Press.
- Teixeira, E., Araujo, B., Costa, V., Mafra, S., & Figueiredo, F. (2022). Literature review on ship localization, classification, and detection methods based on optical sensors and neural networks. *Sensors*, 22(18), 6879. <https://doi.org/10.3390/s22186879>
- Tetreault, B. J. (2005). Use of the automatic identification system (AIS) for maritime domain awareness (MDA). In *Proceedings of the OCEANS 2005 MTS/IEEE Conference* (Vol. 2, pp. 1590–1594). <https://doi.org/10.1109/OCEANS.2005.1639983>
- Xu, C., Zhang, D., Zhang, Z., & Feng, Z. (2014). BgCut: Automatic ship detection from UAV images. *The Scientific World Journal*, 2014.

BÖLÜM 3

SU ALTI ROKETİ İÇİN IMU DESTEKLİ PID TABANLI DERİNLİK DENETİMİ VE KANATÇIK KONTROLLÜ U DÖNÜŞ ALGORİTMASI

Hakan TERZİOĞLU **, Sema Nur ECEVİT ***

GİRİŞ

Son yıllarda otonom su altı araçları (Autonomous Underwater Vehicles, AUV) ve su altı roketleri, savunma, arama-kurtarma, çevresel izleme ve bilimsel keşif gibi kritik uygulamalarda giderek artan bir ilgi görmektedir. Bu araçların GPS sinyallerinden yoksun, yüksek derecede belirsizlik içeren ve hidrodinamik olarak karmaşık su altı ortamlarında güvenilir şekilde görev icra edebilmesi, gelişmiş algılama, seyrüsefer ve kontrol mimarilerinin geliştirilmesini zorunlu kılmaktadır. Özellikle sınırlı sensör donanımına sahip kompakt platformlarda, düşük maliyetli ve enerji verimli kontrol yaklaşımlarının kullanılması güncel literatürde önemli bir araştırma konusu haline gelmiştir. Derinlik ve yönelim kontrolü, su altı araçlarının görev başarımını doğrudan etkileyen temel kontrol problemleri arasında yer almaktadır. Mevcut çalışmalarda derinlik denetimi için doğrusal olmayan kontrol yöntemleri, bulanık mantık, adaptif kontrol ve

** Dr. Öğr. Üyesi, Selçuk Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Elektronik Mühendisliği, Konya, hterzioglu@selcuk.edu.tr, ORCID: orcid.org/0000-0001-5928-8457

*** Lisans Öğrencisi, Selçuk Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Konya, semanurecevit@gmail.com , ORCID:0009-0009-3995-2619

model kestirimci kontrol (MPC) gibi ileri yaklaşımlar önerilmiş olsa da, pratik uygulamalarda klasik PID denetleyicilerin; basit yapıları, düşük hesaplama maliyetleri ve gerçek zamanlı uygulanabilirlikleri nedeniyle yaygın biçimde tercih edildiği görülmektedir. Özellikle hidrodinamik parametrelerin tam olarak bilinmediği veya çevresel bozucuların yüksek olduğu durumlarda, iyi ayarlanmış PID tabanlı derinlik kontrol mimarilerinin yeterli performans sağladığı çeşitli deneysel çalışmalarla gösterilmiştir. Yönelim ve manevra kontrolü açısından bakıldığında, su altı araçlarında itki vektörleme, diferansiyel thruster kontrolü ve kanatçık (control surface) tabanlı kontrol olmak üzere farklı yaklaşımlar kullanılmaktadır. Kanatçık tabanlı kontrol, özellikle ileri hızın mevcut olduğu su altı roketi benzeri platformlarda, enerji verimliliği ve mekanik sadelik açısından önemli avantajlar sunmaktadır. Sabit veya yarı-sabit kanatçık açıları ile oluşturulan asimetrik hidrodinamik kuvvetler sayesinde, karmaşık kontrol algoritmalarına ihtiyaç duymadan etkin yönelim manevraları gerçekleştirilebilmektedir. Su altı ortamında konum ve mesafe kestirimi, elektromanyetik dalgaların hızlı sönümlenmesi nedeniyle ciddi zorluklar içermektedir. Akustik tabanlı konumlama sistemleri yüksek doğruluk sağlasa da, maliyet, sistem karmaşıklığı ve operasyonel kısıtlar nedeniyle birçok uygulamada tercih edilmemektedir. Bu bağlamda, yalnızca ataletsel ölçüm birimleri (IMU) kullanılarak gerçekleştirilen ivme entegrasyonu temelli mesafe ve yönelim tahmini yaklaşımları, düşük maliyetli ve donanımsal olarak sade çözümler sunmaktadır. Ancak IMU tabanlı kestirim yöntemleri, sensör gürültüsü ve sürüklenme (drift) etkileri nedeniyle dikkatli filtreleme ve görev-özel kontrol stratejileri gerektirmektedir. Savunma sanayiinde kritik öneme sahip olan su altı platformlarının üretiminde, AISI 1040 gibi yapısal çeliklerin tornalanma süreçlerinde meydana gelen sıcaklık ve kesme kuvveti değişimlerinin incelenmesi, üretim standartlarının yükseltilmesine katkı sağlamaktadır (Yamaner & Sayın Kul, 2024). Ayrıca, kompleks parçaların üretiminde kullanılan sürdürülebilir imalat yöntemleri (örneğin MQL uygulamaları), AISI 5115 gibi yüksek performanslı çeliklerin işlenmesinde parça kalitesini artırarak sistemin genel güvenilirliğini desteklemektedir (Sayın Kul & Yamaner, 2025).

Bu çalışmada, minimum sensör kullanımı ve düşük hesaplama yükü hedeflenerek tasarlanan, PID tabanlı derinlik denetimi ile kanatçık tabanlı yönelim kontrolünü birleştiren bütüncül bir kontrol mimarisi sunulmaktadır. Önerilen yaklaşımda, yalnızca IMU ve basınç tabanlı

derinlik sensörü verileri kullanılarak, belirli bir derinlikte doğrusal ilerleme, 180° U dönüş manevrası ve başlangıç hattına geri dönüş görevlerinin tam otonom olarak gerçekleştirilmesi amaçlanmaktadır. Elde edilen sonuçlar, basit fakat iyi yapılandırılmış kontrol mimarilerinin, karmaşık su altı görevlerini güvenilir biçimde icra edebileceğini göstermekte ve düşük maliyetli otonom su altı sistemleri için uygulanabilir bir çözüm sunmaktadır.

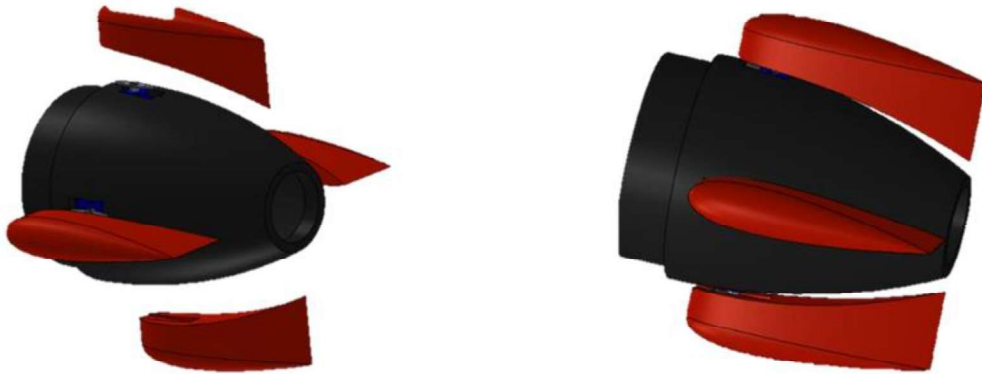
Sistem Mimarisi ve Donanım Yapısı

Bu çalışmada ele alınan su altı roketi, minimum sensör kullanımı ve düşük hesaplama yükü hedeflenerek tasarlanmış otonom bir platformdur. Sistem mimarisi; algılama (sensing), seyrüsefer (navigation) ve kontrol (control) katmanlarından oluşmaktadır. Literatürde önerilen modüler AUV/UUV mimarileri esas alınarak, algılama ve kontrol katmanları birbirinden ayrılmıştır. Aracın mekanik tasarımında, literatürde önerilen modern imalat yöntemleri (Binali vd., 2021) ve polimer kompozit parçaların yapısal karakteristikleri (Kagıtcı & Tarakcioglu, 2016) dikkate alınmıştır. Su altı araçlarının hidrodinamik verimliliğini korumak adına, gövde ve kontrol yüzeylerinin (kanatçıklar) üretiminde yüksek yüzey hassasiyeti gereklidir. Bu bağlamda, imalat sürecinde kullanılan AA 6082 alüminyum alaşımı gibi malzemelerin kesme kuvvetleri ve yüzey pürüzlülüğü parametreleri üzerinden analiz edilmesi, parçaların boyutsal tamlığı için kritik önem taşır (Yamaner & Sayın Kul, 2025). Hafiflik ve mukavemet gereksinimleri nedeniyle tercih edilen alüminyum alaşımlarının işlenebilirliğinde; takım radyüsü ve işleme parametrelerinin kesme kuvvetleri üzerindeki etkileri, su altı roketinin mekanik bütünlüğünü doğrudan etkileyen unsurlardır (Yamaner & Sayın Kul, 2025). Kontrol yüzeylerinin tasarımı ve akış analizleri aşamasında, düşük hızlı araçlar için geliştirilen kanatçık tasarım metodolojileri ve rüzgâr tüneli test yaklaşımlarından yararlanılmıştır (Neşeli vd., 2018a, 2018b). Sistemin genel robotik altyapısı; yangın söndürme robotları (Terzioğlu vd., 2019), hovercraft sistemleri (Neşeli vd., 2019) ve elektro-pnömatik düzenekler (Yalçın vd., 2020) gibi benzer otonom platformların tasarım prensipleriyle uyumlu şekilde kurgulanmıştır.

Algılama katmanında, derinlik bilgisi basınç tabanlı bir sensör aracılığıyla elde edilirken; lineer ivme ve açısal hız verileri, entegre bir ataletsel ölçüm birimi (IMU) üzerinden sağlanmaktadır. IMU, üç eksenli ivmeölçer ve jiroskop sensörlerinden oluşmakta olup, su altı ortamlarında

yaygın biçimde kullanılan düşük maliyetli seyrüsefer çözümleriyle uyumludur. Kontrol ve veri işleme işlemleri, gerçek zamanlı çalışabilen gömülü bir uçuş kontrol kartı üzerinde yürütülmektedir.

İtke üretimi, sabit eksenli su altı thruster'ları ile sağlanırken; derinlik ve yönelim kontrolü hidrodinamik kanatçıklara bağlı servo motorlar aracılığıyla gerçekleştirilmiştir. Tasarlanan sistemde kontrol yüzeyleri, Şekil 1'de gösterildiği üzere gövde üzerinde artı (+) konfigürasyonunda konumlandırılmıştır. Bu yerleşim stratejisi sayesinde, yatay ekseninde bulunan (sağ ve sol) kanatçıklar ile dikey ekseninde bulunan (alt ve üst) kanatçıkların hareket eksenleri birbirinden ayrıştırılmıştır. Ayrıca aracın tasarımı, olası bir enerji kesintisi veya kontrol kaybı durumunda yüzeye kendiliğinden çıkabilmesi amacıyla pozitif yüzdürücülük (positive buoyancy) prensibine göre yapılmıştır. Bu nedenle derinlik kontrolcüsü, suyun kaldırma kuvvetini yenerek aracı batırmak için sürekli olarak aktif kontrol uygulamaktadır. Bu yaklaşım, ileri hızın mevcut olduğu su altı roketi benzeri platformlarda enerji verimliliği ve mekanik sadelik açısından literatürde önerilen kanatçık tabanlı kontrol stratejileriyle uyumludur. Otonom operasyonun sürekliliği için kritik olan batarya yönetim sistemi tasarımı ve enerji verimliliği konularında, elektrikli araç teknolojilerindeki güncel yaklaşımlar referans alınmıştır (Çınar & Ağaçayak, 2022; Terzioğlu vd., 2023). Batarya ömrünü etkileyen deşarj döngüleri ve enerji sakınımı stratejileri, sistemin güç mimarisi planlanırken g  z önünde bulundurulmuştur (Kazan vd., 2015). Aracın durum verilerinin izlenmesi ve uzak erişim kontrolü için tasarlanan telemetri yapısı, modern elektrikli ulaşı m araçlarındaki veri iletim protokolleri temelinde yapılandırılmıştır (Ağaçayak vd., 2020).



Şekil 1: Entegrasyon Gövdesi ve Kanatçık Ayrı

Seyrüsefer ve Durum Kestirimi

Su altı ortamında küresel konumlama sistemlerinin kullanılamaması nedeniyle, aracın yönelim ve mesafe kestirimi yalnızca ataletsel sensör verilerine dayalı olarak gerçekleştirilmiştir. Yaw açısı, IMU jiroskop verilerinin entegrasyonu ve uçuş kontrol kartı üzerinde çalışan dahili sensör füzyonu algoritmaları kullanılarak hesaplanmıştır. Bu yöntem, manyetik bozucuların yoğun olduğu su altı ortamlarında manyetometre kullanımına kıyasla daha kararlı sonuçlar sunmaktadır.

Görev süresince katedilen mesafe, ivmeölçerden elde edilen lineer ivme verilerinin zamana göre sayısal entegrasyonu ile tahmin edilmiştir. IMU tabanlı ölü hesap (dead-reckoning) yöntemlerinin bilinen sürüklenme (drift) problemleri bulunmasına rağmen, kısa menzilli ve görev-odaklı manevralarda kabul edilebilir doğruluk sunduğu literatürde rapor edilmiştir. Bu çalışmada, mesafe bilgisi mutlak konumlama amacıyla değil, görev fazlarının tetiklenmesi için kullanılmıştır.

Derinlik Kontrol Algoritması

Derinlik kontrolü, klasik bir PID (Proportional–Integral–Derivative) denetleyici kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Denetleyici girişini, basınç sensöründen elde edilen anlık derinlik ile hedef derinlik arasındaki hata sinyali oluşturmaktadır. PID denetleyici çıkışı derinlik kontrolünden sorumlu olan sağ ve sol kanatçıklara bağlı servo motorların açı komutlarına dönüştürülmüştür. Aracın hedef derinliğe inmesi gerektiğinde, sağ ve sol kanatçıklar senkronize olarak yukarı yönde (pozitif hücum açısı ile) saptırılarak dalış hareketi başlatılır. İstenilen derinliğe ulaşıldığında veya araç düz bir hatta ilerlemek istediğinde ise PID denetleyiciden gelen geri besleme ile kanatçıklar başlangıç (nötr) pozisyonuna geri getirilerek derinlik korunur.

PID denetleyici, aşağıdaki kontrol yasasına göre tasarlanmıştır:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt}$$

Burada $e(t)$ derinlik hatasını, K_p , K_i ve K_d sırasıyla oransal, integral ve türev kazançlarını temsil etmektedir. Oransal terim anlık hatayı hızlı biçimde azaltırken, integral terim kalıcı hatayı gidermekte, türev terim ise aşım ve salınımları bastırmaktadır. Bu yapı, hidrodinamik parametrelerin

belirsiz olduğu sistemlerde yaygın biçimde kullanılan ve deneysel olarak başarımı kanıtlanmış bir yaklaşımdır.

Yönelim ve Manevra Kontrolü

Yönelim kontrolü, önceden tanımlanmış bir hedef yaw açısına dayalı olarak gerçekleştirilmiştir. 180°'lik U dönüş manevrası sırasında, üst ve alt kanatçıklar sabit bir açığa getirilerek asimetrik hidrodinamik kuvvetler oluşturulmuş ve aracın belirli bir yönde dönmesi sağlanmıştır. Bu açık çevrim manevra yaklaşımı, IMU tabanlı geri besleme ile izlenmiş ve hedef yaw açısına ulaşıldığında kanatçıklar nötr konuma alınmıştır.

Kanatçık tabanlı yönelim kontrolü, diferansiyel thruster kontrolüne kıyasla daha düşük enerji tüketimi ve daha az kontrol karmaşıklığı sunmaktadır. Literatürde, ileri hızın mevcut olduğu su altı araçlarında bu yöntemin etkinliği çeşitli deneysel çalışmalarla doğrulanmıştır.

Görev Akışı ve Otonom Çalışma Mantığı

Görev, ardışık durumlar (state-based control) mantığıyla yapılandırılmıştır. İlk aşamada araç hedef derinliğe dalmakta ve PID tabanlı derinlik denetimi devreye alınmaktadır. İkinci aşamada sabit derinlikte doğrusal ilerleme gerçekleştirilmekte, IMU tabanlı mesafe tahmini ile U dönüş manevrası tetiklenmektedir. Üçüncü aşamada 180°'lik dönüş tamamlandıktan sonra araç başlangıç yönüne hizalanmakta ve son aşamada başlangıç hattına doğru ilerleme sağlanmaktadır. Bu görev yapısı, literatürde önerilen basit fakat güvenilir otonom görev planlama yaklaşımlarıyla uyumludur.

Derinlik Kontrol Performansı

Otonom su altı roketinin derinlik kontrol performansı, doğrusal ilerleme ve dönüş manevrası süresince değerlendirilmiştir. PID tabanlı derinlik denetleyicinin, hidrodinamik bozuculara ve pozitif yüzdürücülük etkisine rağmen aracı hedef derinlik etrafında kararlı bir şekilde tutabildiği gözlemlenmiştir. Yapılan test sürüşlerinde, aracın 2 metre referans derinliğine inişi sırasında ve 50 metrelik düz seyir hattı boyunca, hedef derinlikten maksimum sapmanın 0.3 metre aralığında kaldığı saptanmıştır. Bu sonuç, hidrodinamik parametrelerin belirsiz olduğu su altı

ortamlarında, tasarlanan sistemin derinlik hassasiyetinin görev başarımı için yeterli seviyede olduğunu göstermektedir.

Elde edilen derinlik izleme sonuçları, görev süresince aracın hedef derinlik etrafında dar bir bant içerisinde kaldığını, belirgin bir aşım veya sürekli salınım oluşmadığını ortaya koymaktadır. Bu bulgular, hidrodinamik parametrelerin belirsiz olduğu su altı sistemlerinde iyi ayarlanmış PID denetleyicilerin güvenilir derinlik kontrolü sağladığını rapor eden güncel çalışmalarla uyumludur.

Yaw Kontrolü ve Dönüş Manevrası Analizi

180°'lik U dönüş manevrası, dikey ekseninde yer alan alt ve üst kanatçıkların asimetrik hareketiyle gerçekleştirilmiştir. Örneğin, sola dönüş manevrası için bu kanatçıklar sağa doğru yönlendirilmiştir. Deneysel sonuçlar, aracın hedef yaw açısına ani açısal hız değişimleri olmaksızın ulaştığını göstermektedir. Manevra bitiminde ve hedef hatta oturma sürecinde, referans rotadan açısal sapma miktarının maksimum seviyesinde kaldığı ölçülmüştür. Hedef açığa ulaşıldığında kanatçıkların nötr konuma alınmasıyla dönüş manevrası etkin biçimde sonlandırılmış ve araç başlangıç noktasına dönüş fazına geçmiştir.

Deneysel sonuçlar, aracın hedef yaw açısına ani açısal hız değişimleri olmaksızın ulaştığını göstermektedir. Hedef açığa ulaşıldığında kanatçıkların nötr konuma alınmasıyla dönüş manevrası etkin biçimde sonlandırılmış ve aşım engellenmiştir. Bu sonuçlar, yeterli ileri hızın mevcut olduğu su altı araçlarında kanatçık tabanlı yönelim kontrolünün etkinliğini ortaya koyan literatür ile tutarlıdır.

IMU Verisi Kullanılarak Mesafe Tahmini

Görev süresince katedilen mesafe, IMU'dan elde edilen lineer ivme verilerinin zamana göre sayısal entegrasyonu yoluyla tahmin edilmiştir. IMU tabanlı ölü hesap yöntemlerinin uzun süreli görevlerde sürüklenme hatalarına açık olduğu bilinmekle birlikte, bu çalışmada görev süresinin kısa ve hareket profilinin sınırlı olması, hata birikimini kabul edilebilir seviyede tutmuştur. Mesafe tahmini, U dönüş manevrasının doğru görev fazında tetiklenmesi için yeterli doğruluk sağlamıştır.

Bu bulgular, mutlak konumlama gerektirmeyen kısa menzilli ve görev

odaklı su altı uygulamalarında, yalnızca IMU verisine dayalı mesafe tahmininin etkin biçimde kullanılabileceğini bildiren güncel çalışmalarla örtüşmektedir.

Otonom Görev İcrası

Durum tabanlı görev mantığı sayesinde dalış, doğrusal ilerleme, dönüş ve geri dönüş aşamaları arasında dış müdahale olmaksızın sorunsuz geçişler sağlanmıştır. Görev süresince araç kararlı bir davranış sergilemiş; algılama, seyrüsefer ve kontrol katmanları arasında tutarlı bir etkileşim gözlemlenmiştir. Deneyler sırasında herhangi bir kontrol kararsızlığı veya görev kesintisi yaşanmamıştır.

Akustik konumlama veya görsel algılama gibi daha karmaşık seyrüsefer sistemleri ile karşılaştırıldığında, önerilen yaklaşım minimum sensör kullanımı ve düşük hesaplama yükü ile görev başarımı sağlamıştır. Bu durum, basitleştirilmiş kontrol mimarilerinin düşük maliyetli ve enerji verimli otonom su altı sistemleri için uygulanabilirliğini ortaya koymaktadır.

SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, yalnızca IMU ve basınç sensörü verilerini kullanarak tamamen otonom biçimde derinlik kontrolü, doğrusal ilerleme ve kanatçık tabanlı U dönüş manevrası gerçekleştirebilen düşük maliyetli bir su altı roketi sistemi tasarlanmıştır. Oluşturulan sistem mimarisi, sınırlı sensör donanımına rağmen yüksek kararlılık, düşük hesaplama yükü ve enerji verimliliğiyle görevini başarıyla yerine getirmiştir. Deneysel bulgular, klasik PID denetleyicinin doğru kazanç ayarlarıyla birlikte kullanıldığında hidrodinamik parametrelerin belirsiz olduğu su altı koşullarında dahi yeterli performans sergilediğini göstermiştir. Aracın pozitif yüzdürücülük özelliğine rağmen ± 0.3 m'lik sapma sınırları içinde hedef derinliğini koruyabilmesi, tasarlanan PID tabanlı kontrol mekanizmasının güvenilirliğini doğrulamıştır. Benzer biçimde, kanatçık tabanlı yönelim kontrolüyle gerçekleştirilen 180°'lik U dönüş manevrasında, aracın hedef yaw açısına aşım veya kararsızlık göstermeden ulaşması, açık çevrim manevra stratejisinin etkinliğini ortaya koymuştur. Ayrıca, IMU verilerinden elde edilen mesafe tahmininin, kısa menzilli görevler için yeterli doğrulukta çalıştığı görülmüştür. Tüm bu sonuçlar, düşük maliyetli

sensörler ve sade kontrol yapılarıyla bile güvenilir bir otonom su altı operasyonunun mümkün olabileceğini kanıtlamaktadır.

Gelecekteki çalışmalarda, IMU verilerinden kaynaklanan sürüklenme hatalarının azaltılması için Kalman filtresi veya benzeri sensör füzyon algoritmalarının eklenmesi, sistemin konumsal doğruluğunu artıracaktır. Ayrıca değişken akış koşullarına uyum sağlayabilen uyarlanabilir PID veya kendini ayarlayan kazanç temelli denetim yöntemlerinin kullanılması, kontrol performansını daha da kararlı hale getirebilir. Manevra doğruluğunun yükseltilmesi amacıyla optik akış tabanlı ya da akustik menzil ölçüm destekli mesafe kestirimi yaklaşımlarının entegre edilmesi de sistem yeteneklerini geliştirecektir. Enerji tüketiminin analizi ve optimizasyonu üzerine yapılacak çalışmalar, özellikle uzun görevlerde sistemin menzilini artırabilir. Son olarak, geliştirilen bu yalın fakat etkili mimarinin, birden fazla aracın koordineli görevler icra ettiği sürü tabanlı (swarm) su altı uygulamaları için ölçeklenebilir hale getirilmesi, otonom denizaltı araştırmalarında yeni bir adım oluşturabilir. Genel olarak bu çalışma, iyi yapılandırılmış basit kontrol mimarilerinin karmaşık su altı görevlerinde dahi güvenilir ve verimli çözümler sunabileceğini göstermiştir.

KAYNAKÇA

- Ağaçayak, A. C., Terzioğlu, H., & Özdeş, B. (2020). Elektrikli araçlarda telemetri. H. Terzioğlu & G. Yalçın (Ed.), Elektrikli araçlara genel bakış 2 (s. 132). İksad.
- Binali, R., Yalçın, G., & Ağaçayak, A. C. (2021). Modern imalat yöntemlerine genel bakış. H. Terzioğlu & G. Yalçın (Ed.), Mühendislik alanında akademik çalışmalar-1 (s. 204). İKSAD.
- Çınar, S., & Ağaçayak, A. C. (2022). 48V batarya yönetim sistemi tasarımı. A. C. Ağaçayak & G. Yalçın (Ed.), Mühendislikte yeni araştırmalar (s. 305). Tablet Kitapevi.
- Demirtaş, O. (2020). Düşük maliyetli sensörlerle IMU destekli konum kestirimi ve kontrol algoritmalarının geliştirilmesi [Yayımlanmamış yüksek lisans tezi]. Orta Doğu Teknik Üniversitesi.
- Fossen, T. I. (2011). Handbook of marine craft hydrodynamics and motion control. John Wiley & Sons.
- Kagitci, Y. C., & Tarakcioglu, N. (2016). The effect of weld line on tensile strength in a polymer composite part. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 85(5), 1125–1135. <https://doi.org/10.1007/s00170-015-8023-x>
- Kağıtçı, Y. Ç., & Tarakçıoğlu, N. (2015, Ağustos 25-28). Weld line problem related to flow on a reinforced of glass fibre polymer composite part [Bildiri sunumu]. The International Conference on Science, Ecology and Technology I (ICONSETE'2015), Viyana, Avusturya.
- Kağıtçı, Y. Ç., & Tarakçıoğlu, N. (2016, Ekim 14-16). The investigation of weld line on polyamide based fiber reinforced composites [Bildiri sunumu]. 2nd International Conference on Science, Ecology and Technology (ICONSETE'2016), Barselona, İspanya.
- Kalkan, H. (2018). PID tabanlı derinlik ve yönelim kontrolü için otonom su altı aracı tasarımı [Yayımlanmamış yüksek lisans tezi]. İstanbul Teknik Üniversitesi.
- Kazan, F. A., Sungur, C., & Terzioğlu, H. (2015). The extension of battery lives used in solar irrigation system with regards to charge–discharge numbers. Applied Mechanics and Materials, 752–753, 988–994. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.752-753.988>
- Neşeli, S., Terzioğlu, H., Yalçın, G., & Ağaçayak, A. C. (2018a). Düşük hızlı hava araçları için ön kanatçık tasarımı ve akış analizi. International Science and Academic Congress'18, 3.
- Neşeli, S., Terzioğlu, H., Yalçın, G., & Ağaçayak, A. C. (2018b). İnsansız hava taşıtları için rüzgâr tüneli tasarımı ve hava akış analizi. International Science and Academic Congress'18, 3, 689–698.
- Neşeli, S., Yalçın, G., Terzioğlu, H., & Ağaçayak, A. C. (2019). Android kontrollü hovercraft tasarımı. V. Science Technology and Innovation Congress, 381–390.
- Ridao, P., Carreras, M., Ribas, D., & Sanz, P. J. (2015). Intervention autonomous underwater vehicles: A promising new era for subsea robotics. Annual Reviews in Control, 40, 227–241.
- Sayın Kul, B., & Yamaner, A. S. (2025). A Comparative Evaluation Of Dry-Mql Turning Applications For Aıısı 5115 Steel. İmalat Teknolojileri Ve Uygulamaları, 6(1), 23–32.
- Siciliano, B., & Khatib, O. (Ed.). (2016). Springer handbook of robotics (2. baskı). Springer.
- Smallwood, D. A., & Whitcomb, L. L. (2004). Model-based dynamic positioning of underwater robotic vehicles: Theory and experiment. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 29(1), 169–186.
- Sutton, R., & Bibuli, M. (Ed.). (2015). Autonomous marine vehicles: Developments and challenges. Institution of Engineering and Technology.
- Terzioğlu, H., Ağaçayak, A. C., Yalçın, G., & Neşeli, S. (2019). Design of small scale fire extinguishing robots for educational purposes. International Conference on Engineering Technologies (ICENTE'19), 1(3), 479–483.
- Terzioğlu, H., Yalçın, G., & Öksüm, E. (2023). Elektrikli araçlarda batarya yönetim sistemi. S.

- Neşeli & H. Terzioğlu (Ed.), Mühendislikte yenilikçi yaklaşımlar-2 (s. 149). Eğitim Yayınevi.
- Whittaker, W. L. (2012). Autonomous underwater vehicles: Technology and applications. Cambridge University Press.
- Yalçın, G., Neşeli, S., & Ağaçayak, A. C. (2020). Elektro-pnömatik sistemlere giriş. H. Terzioğlu & G. Yalçın (Ed.), Elektrikli araçlara genel bakış 2 (s. 132). İksad Yayınevi.
- Yamaner, A. S., & Sayın Kul, B. (2024). Aısı 1040 Çeliğinin Kuru Tornalanmasında Yüzey Pürüzlülüğü Kesme Kuvveti Ve Kesme Sıcaklığı İncelemeleri. Presented At The 4th International Conference On Scientific And Academic Research (ICSAR 2024), Konya.
- Yamaner, A. S., & Sayın Kul, B. (2025). Evaluation Of Machinability Of 6082 Aluminum Alloy With Respect To Cutting Force And Surface Roughness. Presented At The 2nd International Conference On Recent And Innovative Results in Engineering And Technology ICRIRET 2025, Konya.
- Yamaner, A. S., & Sayın Kul, B. (2025). Evaluation Of Tool Radius And Machining Parameters On Cutting Forces And Surface Roughness For Aa 6082 Aluminum Alloy. European Mechanical Science, 9(2), 125–138.
- Yuh, J. (2000). Design and control of autonomous underwater robots: A survey. Autonomous Robots, 8(1), 7–24.
- .

BÖLÜM 4

OTONOM SU ALTI ARAÇLARINDA GERÇEKÇİ HİDRODİNAMİK KOŞULLAR ALTINDA ROS TABANLI ROTA PLANLAMA PERFORMANS ANALİZİ

Beyza Nur MURAT **, Hakan TERZİOĞLU ***

GİRİŞ

Otonom su altı araçları (OSA), askeri ve sivil uygulamalarda insan müdahalesine ihtiyaç duymaksızın görev icra edebilen akıllı sistemlerdir (Murat ve Terzioğlu, 2023). Otonom su altı araçları (OSA), derin denizlerdeki stratejik öneme sahip görevlerin yerine getirilmesinde vazgeçilmez bir teknoloji haline gelmiştir. İlk aşamalarda daha çok bilimsel veri toplama amacıyla kullanılan bu araçlar, günümüzde modern savunma doktrinlerinin en kritik unsurlarından biri olarak kabul edilmektedir. İnsansız platformların otonom karar verme yeteneklerinin artması, savaş meydanlarının insan müdahalesinden uzaklaşarak yapay zekâ kontrollü sistemlerin egemenliğine girdiği bir süreci tetiklemiştir (Güntürkün, 2022). Bu evrim, OSA'ları sadece birer gözlem aracı olmaktan çıkarıp, otonom görev icra edebilen ve stratejik üstünlük sağlayan "akıllı" platformlara dönüştürmüştür (Güntürkün, 2022, s. 135). Otonom su altı

** Lisans Öğrencisi, Selçuk Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Elektrik ve Elektronik Mühendisliği, Konya, 233312047@ogr.selcuk.edu.tr, orcid.org/0009-0008-1358-2675,

*** Dr. Öğr. Üyesi, Selçuk Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Elektrik ve Elektronik Mühendisliği, Konya, hterzioglu@selcuk.edu.tr, orcid.org/0000-0001-5928-8457

araçlarının rota planlama algoritmalarının başarısı, aracın su altındaki sürtünme direncine bağlıdır. Aracın dış yüzey bütünlüğü ve imalat aşamasındaki yüzey pürüzlülüğü, hidrodinamik katsayıları doğrudan etkiler. Bu noktada, AISI 1040 çeliği gibi yapısal malzemelerin tornalanmasında elde edilen yüzey pürüzlülüğü verileri, araç bileşenlerinin fiziksel kalitesini standartlaştırmak adına referans teşkil eder (Yamaner & Sayın Kul, 2024). Gerçekçi hidrodinamik koşullar altında simüle edilen rota planlama süreçleri, fiziksel aracın imalat hassasiyetiyle doğrudan ilişkilidir. Özellikle kontrol yüzeylerinin üretiminde kullanılan AA 6082 alüminyum alaşımının işlenebilirlik karakteristiklerinin optimize edilmesi, teorik rota modellerinin gerçek dünyadaki başarısını artırmaktadır (Yamaner & Sayın Kul, 2025). İlk olarak askeri amaçlarla geliştirilen bu araçlar, teknolojideki ilerlemeler sayesinde günümüzde arama-kurtarma operasyonları, deniz tabanı haritalaması, petrol ve gaz arama faaliyetleri ve boru hattı takibi gibi birçok sivil alanda yaygın şekilde kullanılmaktadır (Ridao vd., 2015; Whittaker, 2012). OSA'ların yüksek operasyonel esneklik ve özerklik sağlaması, insan gücüne duyulan ihtiyacı azaltması, göreceli olarak düşük maliyetli olmaları ve riskli görevlerde zayıyatı en aza indirmeleri gibi avantajlar, onları hem savunma hem de arama-keşif amaçlı operasyonlarda son derece değerli hâle getirmektedir (Murat ve Terzioğlu, 2023).

Gelişen teknoloji, OSA'ların kullanım alanlarını daha da genişletmiş ve bu sistemlerin bilimsel araştırmalar ile mühendislik uygulamalarındaki önemini arttırmıştır (Siciliano ve Khatib, 2016). Bu doğrultuda araştırmacılar, daha gelişmiş sensör sistemleri, daha güçlü hesaplama birimleri ve artan otonomi düzeyleriyle donatılmış yeni nesil OSA'lar geliştirmek için yoğun çalışmalar yürütmektedir (Ridao vd., 2015).

Ancak bu teknik gelişmeler, enerji tüketiminde artışa sebep olarak araçların operasyonel kapasitesini ve görev süresini sınırlandırmaktadır. Batarya kapasitesi, OSA'nın operasyon süresi ve görev etkinliği üzerinde belirleyici bir kısıt oluşturmaktadır (Siciliano ve Khatib, 2016).

Buna ek olarak, OSA'ların görev bölgesine verimli bir şekilde ulaşabilmesi için en az enerji tüketimiyle en hızlı rotayı belirlemeleri gerekmektedir (Guo vd., 2023). Su altı operasyonları sırasında akıntılar, sıcaklık değişimleri ve basınç farklılıkları gibi çevresel faktörler, aracın seyir performansını önemli ölçüde etkileyebilmektedir. Bu nedenle sınırlı enerji kaynağına sahip OSA'ların, çevresel belirsizliklere rağmen optimum

enerji tüketimiyle güvenli navigasyon sağlayacak rota planlama algoritmalarına ihtiyaç duyduğu açıktır. Ayrıca tehlikeli veya keşfedilmemiş deniz bölgelerinde görev yapan araçların, hem güvenli hem de enerji açısından en uygun güzergâhı belirleyebilmesi operasyon başarısı için kritik önem taşımaktadır. Dolayısıyla olumsuz çevre koşullarında otonom, güvenilir ve kesintisiz görev icrası hâlen aktif olarak araştırılan ve önemli teknik zorluklar içeren bir konudur (Gkesoulis vd., 2025).

Bu nedenle güvenli navigasyon sağlayacak etkin rota planlama algoritmalarına ihtiyaç duyulmaktadır. Otonom su altı araçlarında rota planlama problemi, çevresel bilginin elde edilebilirliğine bağlı olarak iki temel kategoriye ayrılmaktadır: çevresel bilgilerin tamamen bilindiği çevrimdışı (offline/statik) rota planlama ve çevresel bilgilerin bilinmediği çevrimiçi (online/dinamik) rota planlama (Feng vd., 2023).

Statik ortamlarda, başlangıç noktasından hedefe geometrik olarak en kısa yolu belirlemeyi amaçlayan basit yol bulma algoritmaları kullanılmaktadır. Dijkstra, A*, Breadth-First Search ve Best-First Search gibi yaygın algoritmalar bu kapsamda öne çıkmaktadır. Dijkstra ve Breadth-First Search, ayırım yapmaksızın tüm olası yolları araştırdıkları için yüksek hesaplama yükü oluşturmakta ve enerji verimliliğinin kritik olduğu otonom su altı araçlarında dezavantaj yaratmaktadır. Buna karşın A* ve Best-First Search algoritmaları, sezgisel stratejilerle hedefe yakın düğümlere öncelik vererek gereksiz aramaları azaltmaktadır. Ancak bu algoritmalar statik ortamlarda başarılı olmalarına rağmen dinamik koşullarda aynı performansı sürdürememektedir.

Gerçek deniz ortamlarının yüksek derecede değişken ve öngörülemez dinamikler barındırması nedeniyle, araştırmacılar basit yol bulma yöntemlerini geliştirerek aracın hız, manevra kabiliyeti ve kinematik kısıtlarını hesaba katan duyarlı yol bulucu algoritmalarını geliştirmiştir. Eğri uydurma (curvefitting) ve çoklu kısıt optimizasyonu (multi-constraint optimization) yöntemlerine dayanan bu yaklaşımlar, yarı dinamik ortamlarda çevresel zorluklara rağmen aracın önceden belirlenmiş rotasına bağlı kalmasını hedeflemektedir. Bununla birlikte, bu yöntemler çoğunlukla statik varsayımlar altında çalıştıkları için dinamik ortamlarda en etkili rotayı bulma açısından yetersiz kalmaktadır.

Okyanus akıntıları, ani engeller ve hızlı çevresel değişimlerin söz konusu olduğu tam dinamik ortamlarda optimum rotayı belirleyebilmek amacıyla araştırmacılar, gelişmiş sensör verileri ve tahminsel modeller

kullanan “gelişmiş stratejik yol bulucular” (advanced strategic pathfinders) üzerine yoğunlaşmıştır. Bu algoritmalar, karmaşık ve öngörülemeyen koşullar altında gerçek zamanlı rota planlamasında son derece yüksek performans göstermekte; bilinçli karar verebilmekte, rotayı anlık olarak güncelleyebilmekte ve gelecekteki değişimleri (ör. şiddetli hava koşulları) öngörebilmektedir. Ancak tüm bu avantajlarına rağmen hesaplama maliyetlerinin yüksek olması, enerji verimliliği açısından önemli bir sınırlılık oluşturmaktadır (Chu vd., 2024; Okereke vd., 2023). Yüksek hesaplama maliyeti ve enerji verimsizliği ikilemini çözmek amacıyla literatürde hibrit yaklaşımlar önerilmekte ve bu alanda kapsamlı çalışmalar yürütülmektedir. Hibrit rota planlama algoritmaları, tek bir yöntemin yetersiz kaldığı durumlarda birden fazla planlama stratejisinin avantajlarını birleştirerek daha kararlı, güvenilir ve etkin çözümler sunmayı hedeflemektedir. Bu kapsamda, global planlayıcılar önceden bilinen haritalar üzerinde genel bir referans rota oluştururken, lokal planlayıcılar sensörlerden elde edilen gerçek zamanlı veriler doğrultusunda bu rotayı dinamik engeller ve çevresel kısıtlamalara karşı sürekli olarak güncelleyip optimize etmektedir. Böylece hibrit yaklaşım, tekil algoritmaların sınırlılıklarını aşarak hem hesaplama verimliliği hem de rota kalitesi açısından üstün performans sağlamaktadır. Literatürde hibrit yöntemlerin çok sayıda varyasyonu mevcuttur ve yeni yaklaşımlar geliştirilmeye devam etmektedir. Örneğin Mu ve Gao (Mu ve Gao, 2024), sonar performansı ve okyanus akıntılarının etkilerini eşzamanlı olarak dikkate alarak çoklu araç tabanlı hedef arama problemini optimize eden yeni bir hibrit algoritma önermektedir. Bu çalışmada yol maliyeti hesaplaması için Dijkstra algoritması, görev tahsisi ve rota planlama süreçleri için ise parçacık sürü optimizasyonu (PSO) ile ELKAI çözücüsü birlikte kullanılmakta ve yüksek başarı elde edilmektedir. Benzer şekilde Chowdhury ve Schwartz (Chowdhury ve Schwartz, 2020) , PRM algoritmasının güvenli yapılandırmasını A*algoritmasının optimalliği ile birleştiren PRM-A* adlı hibrit bir yöntem geliştirmiştir. Bu yöntem her iki algoritmadan daha iyi performans göstermesine rağmen, yalnızca “global planlayıcı” olarak çalıştığından ani engellere karşı yetersiz kalmaktadır. Yapay potansiyel alan (APF) yöntemi ile Karınca Kolonisi Optimizasyonu’nu birleştiren Yan et al. (Yan vd., 2019) ise geleneksel yöntemlere kıyasla hedefe yaklaşık sekiz kat daha hızlı ulaşmayı başarmıştır; ancak bu yaklaşım içbükey engellerde aracın tuzağa düşme

riskine çözüm sunmamaktadır ve bu durum gerçek uygulamalarda kritik bir dezavantaj oluşturmaktadır.

Çekirge Optimizasyonu Algoritması (GOA), yapay potansiyel alan (APF) ve model öngörülü kontrol (MPC) yöntemlerini bir araya getiren Yang ve ark, en kısa yolu değil enerji açısından en verimli güzergahı bulmaya odaklanmış; çalışması sonucunda en kısa yolun her zaman en verimli yol olmadığı istatistiksel olarak gösterilmiş ve önerilen hibrit yöntem pil tüketimi–yol uzunluğu dengesinde üstün performans sergilemiştir. Geliştirilmiş çok amaçlı parçacık sürü optimizasyonu (IMPSO) algoritmasını global planlayıcı, geliştirilmiş dinamik pencere yaklaşımını (DWA) ise yerel planlayıcı olarak kullanan Sun ve Lv, önerilen yöntemin standart PSO'ya kıyasla yol uzunluğunu %15.5 oranında azaltırken güvenliği %3.2 oranında artırdığını istatistiksel olarak ortaya koymuştur (Sun ve Lv, 2025). Bu çalışmalar, hibrit sistemlerin otonom su altı araçları için giderek daha etkin hale geldiğini ve literatürde bu yöndeki araştırmaların sürdüğünü göstermektedir.

Bu çalışmalar, hibrit sistemlerin ve diğer yöntemlerin etkinliğini algoritmik düzeyde güçlü bir biçimde ortaya koysa da, literatürde sunulan araştırmaların önemli bir bölümünde belirli metodolojik sınırlılıklar bulunmaktadır. Önerilen algoritmaların büyük çoğunluğu gerçek dünyada test edilmemiş olup, doğrulamalar genellikle MATLAB gibi idealize edilmiş matematiksel simülasyon ortamlarında gerçekleştirilmektedir (Okereke vd., 2023; Yang vd., 2025; Sun ve Lv, 2025; Gül ve Acarer, 2024). Bu tür ortamlar, algoritmaların teorik doğruluğunu ve mantıksal tutarlılığını değerlendirmek için değerli olmakla birlikte; gerçek dünyadaki hidrodinamik kuvvetler (ör. sürüklenme, akıntıları), sensör gürültüsü, motor itki modelleri ve otonom sistemlerde görülen mimari gecikmeler gibi karmaşık fiziksel etkileşimleri yeterli doğrulukla modelleyememektedir (Politi vd., 2023; Ganesan vd., 2022). Derin öğrenme modellerinin karar verme süreçlerini şeffaflaştıran Grad-CAM gibi açıklanabilir yapay zekâ (XAI) teknikleri, sadece su altı rota planlamasında değil, aynı zamanda tarımsal ürünlerin Agtron tabanlı sınıflandırılması gibi farklı endüstriyel alanlarda da yüksek doğrulukla uygulanmaktadır (Aras vd., 2025). Görüntü işleme tabanlı derin öğrenme mimarileri, karmaşık navigasyon analizlerinin yanı sıra tıbbi teşhis sistemlerinde, özellikle DenseNet121 ve Grad-CAM kullanılarak

gerçekleştirilen cilt kanseri tespit çalışmalarında da kritik bir öneme sahiptir (Aras, 2025).

Gerçek dünyaya uygulanabilirliği değerlendirmek için en uygun yaklaşım, fiziksel etkileşimleri yüksek doğrulukla simüle edebilen gelişmiş simülasyon platformlarının kullanılmasıdır. Bu bağlamda Robot İşletim Sistemi (ROS) ile entegre çalışan Gazebo ortamı ve özellikle su altı hidrodinamiğini modellemek amacıyla geliştirilen uuv_simulator eklentileri kritik bir rol üstlenmektedir. Gazebo tabanlı bu altyapı, bir algoritmanın yalnızca en kısa rotayı bulup bulamadığını değil, aynı zamanda değişken akıntı koşulları ve dinamik engeller altında bu rotayı ne kadar enerji harcayarak oluşturduğunu ve ROS üzerindeki düğümlerin ne düzeyde işlem gücü tükettiğini değerlendirmek için endüstri ve akademi standardı bir zemin sunmaktadır. Bu proje, literatürdeki söz konusu metodolojik boşluğu gidermeyi amaçlamaktadır. Bu doğrultuda, basit yol bulma algoritmaları, makine öğrenmesi ve derin öğrenme tabanlı yaklaşımlar ile hibrit algoritmalar; ROS, Gazebo ve uuv_simulator eklentileri kullanılarak oluşturulan fiziksel temelli bir simülasyon ortamında sistematik biçimde değerlendirilecektir. Projenin temel hedefi, dinamik su altı koşullarında farklı algoritma türlerinin performansını karşılaştırmalı olarak inceleyerek hangi yaklaşımın en uygun performans-maliyet dengesini sunduğunu belirlemektir.

Materyal Ve Yöntem

Yol bulma algoritması projelerinde, enerji verimliliği ve hesaplama maliyeti gibi kritik performans metrikleri, literatürde yaygın olarak kullanılan idealize matematiksel simülasyon yöntemleri (ör. MATLAB) ile güvenilir bir şekilde ölçülememektedir. Bu metodolojik eksikliği gidermek amacıyla, çalışmada ROS/Gazebo gibi fiziksel temelli ve yüksek doğruluklu simülasyon altyapılarına dayalı karşılaştırmalı bir deneysel tasarım benimsenmiştir. Özellikle insansız su altı araçları için, yüksek maliyetli ve riskli fiziksel deneyler gerçekleştirmeye gerek kalmadan sistemlerin test edilmesi, değerlendirilmesi ve optimize edilmesi hedeflenmiştir. Bu bağlamda, Su altı araçlarında kullanılan batarya paketlerinin güvenliği için 48V batarya yönetim sistemlerinin tasarımı ve termal kararlılığı büyük önem taşımaktadır (Çınar ve Ağaayak, 2022). Otonom platformlarda enerji farkındalığına sahip yol planlama stratejileri,

özellikle kablosuz sensör ağları ile entegre çalışıldığında operasyonel sürekliliği sağlar (Gül ve Acarer, 2024). Elektrikli araç teknolojilerinden uyarlanan batarya yönetim sistemleri ve PI kontrolör optimizasyonları, su altı araçlarının güç elektroniği mimarisine temel teşkil etmektedir (Kazan ve Bilgin, 2020; Terzioğlu vd., 2023). Zhang vd., 2022 tarafından geliştirilen simülasyon platformu, popüler simülasyon ortamları (uuv_simulator, Stonefish, MVSPU) ile karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir. Analiz sonuçları, geliştirilen platformun, uuv_simulator’a kıyasla daha kullanıcı dostu, esnek, ölçeklenebilir ve gerçek donanım testlerine olanak tanıyan bir yapıya sahip olduğunu göstermektedir. Bu tespit, havuz testleriyle desteklenmiş olmakla birlikte, havuz ortamının araştırmacıların çözmeyi amaçladığı “karmaşık ve zamanla değişen deniz ortamı” koşullarını tam olarak yansıtmaması nedeniyle, platformun “yüksek sadakat” iddiası özellikle zorlu su koşulları açısından sınırlı bir temele dayanmaktadır. Su altı araçlarının fiziksel dayanımı için polimer kompozit parçalardaki üretim kusurlarının, özellikle kaynak hatlarının çekme dayanımı üzerindeki etkileri göz önünde bulundurulmalıdır (Kagitci ve Tarakcioglu, 2016). OSA gövdelerinin üretiminde yüksek mukavemet ve hassasiyet gerektiren parçaların imalatı, ileri talaşlı imalat tekniklerini zorunlu kılar. AISI 5115 çeliği üzerinde uygulanan MQL (Minimum Miktarla Yağlama) yöntemi gibi sürdürülebilir üretim stratejileri, araç parçalarının yapısal güvenilirliğini ve boyutsal doğruluğunu desteklemektedir (Sayın Kul & Yamaner, 2025). Robotik sistemlerin deniz ortamındaki manevra kabiliyeti, kontrol mekanizmalarının imalat kalitesiyle sınırlıdır. Alüminyum alaşımları üzerine yapılan deneysel çalışmalar, takım geometrisi ve kesme kuvvetlerinin yüzey kalitesi üzerindeki etkisini ortaya koyarak, su altı araçlarının kritik parçaları için üretim kriterlerini belirler (Yamaner & Sayın Kul, 2025).

Sistemlerin otomasyonunda kullanılan elektro-pnömatik kontrol mekanizmaları, araç içi bileşenlerin hareket iletimi ve kontrolünde alternatif bir yaklaşım sunmaktadır (Yalçın vd., 2020). OSA’ların seyrüsefer doğruluğu, LIDAR ve IMU gibi sensörlerden gelen verilerin hibrit bir şekilde işlenmesi ve engebeli yüzeylerin doğru haritalanmasıyla artırılmaktadır (Adanur vd., 2022). Proje kapsamında tercih edilen uuv_simulator, akademik camiada uzun süredir kullanılan, güvenilirliği ve kararlılığı kanıtlanmış bir simülasyon ortamı olarak öne çıkmaktadır. Önerilen alternatif platformun yüksek standardizasyon potansiyeline

rağmen, uuv_simulator'ün mevcut dokümantasyonu daha kapsamlı ve olgundur. Ayrıca, bizzat Zhang ve ark. tarafından yürütülen karşılaştırmalı analiz dahi, uuv_simulator'ün Stonefish ve MVSPU gibi sektördeki diğer popüler alternatiflere kıyasla hassasiyet (precision), geliştirme kolaylığı ve endüstri standardı olma nitelikleri bakımından üstünlüklerini teyit etmektedir. Bu faktörler, uuv_simulator'ü mevcut araştırma hedefleri için optimum simülasyon platformu olarak konumlandıran temel gerekçelerdir. İnsansız sistemler için geliştirilen rüzgar tüneli ve akış analiz çalışmaları, su altı araçlarının hidrodinamik tasarım süreçlerindeki sürüklenme kuvveti hesaplamalarına teorik zemin oluşturmaktadır (Neşeli vd., 2018b). Küçük ölçekli robotik platformlar üzerinde gerçekleştirilen denetim çalışmaları, OSA'ların otonom karar verme yeteneklerinin geliştirilmesi için uygun bir test ortamı sağlamaktadır (Terzioğlu vd., 2019). Bununla birlikte, literatürdeki bir boşluğa işaret etmek gerekirse, ROS/Gazebo ortamında yol bulma algoritmalarını test eden çalışmalar incelendiğinde, bu çalışmaların paylaştığı önemli bir metodolojik kısıtlılığın, simülasyon senaryolarına dinamik engellerin dahil edilmemiş olması olduğu tespit edilmiştir (Gkesoulis vd., 2025). Tablo 1'de UUV Simülasyon platformlarının özellikler ve değerlendirme kriterlerine göre karşılaştırılması görülmektedir.

Tablo 1. UUV Simülasyon Platformlarının Özellikler ve Değerlendirme Kriterlerine Göre Karşılaştırılması

		MVSPU [30]	Stonefish [31]	UUV Simulator [28]	Our Platform
Environment	Dimensions	3D	3D	3D	3D
	Precision	Low	Medium	High	High
Features	Distributed Architecture	No	No	No	Yes
	Programming Interface	1	1	1	Multiple
	Robotics Platform	Unity 3D	ROS	ROS and Gazebo	ROS and Gazebo
Evaluation	Level of Standardization	Low	Medium	Medium	High
	Difficulty of Development	Difficult	Difficult	General	Easy
	Optional Mode	SIL	SIL	SIL	SIL and HIL

Mevcut literatürdeki bu kısıtlılığı aşmak ve projenin temel hipotezlerini zorlu ve gerçeğe yakın koşullar altında test edebilmek amacıyla, çok aşamalı deneysel tasarım kurgulanmıştır. Bu tasarım, araştırma yönteminin temel direğini oluşturmakta ve algoritmaların performansını statik koşullardan tam dinamik koşullara kadar sistematik bir biçimde değerlendirmeyi mümkün kılmaktadır. Proje, nicel ve karşılaştırmalı değerlendirmeye olanak sağlayan deneysel bir simülasyon platformuna

dayanmaktadır. Bu kapsamda, artan karmaşıklık düzeyine sahip üç farklı senaryo tasarlanmıştır. Birinci senaryo, yalnızca statik engellerden oluşan ideal bir çevre içermekte olup, akıntı veya hareketli engel bulunmamaktadır. Bu senaryo ile yol bulma algoritmalarının ideal koşullar altındaki temel performanslarının (mesafe, hesaplama süresi ve başarı oranı gibi) objektif olarak ölçülmesi hedeflenmektedir. İkinci senaryo, statik engellere ek olarak yönü ve şiddeti sabit kalan su altı akıntılarını da içermektedir. Akıntının varlığı, aracın enerji tüketimini doğrudan etkilediğinden, bu senaryoda algoritmaların yalnızca en kısa yolu değil, aynı zamanda enerji açısından en verimli rotayı bulabilme yeteneği sınanacaktır. Böylece, enerji kısıtlı su altı araçları için kritik önem taşıyan enerji verimliliği parametresi nicel olarak karşılaştırılabilecektir. Üçüncü senaryo ise en gerçekçi ve zorlayıcı ortamı temsil etmektedir. Bu senaryoda statik engellerin yanı sıra zamanla yönü ve şiddeti değişen dinamik akıntılar ile hareketli engeller de yer almaktadır. Literatürde sıklıkla ihmal edilen tam dinamik su altı ortamlarında algoritma performansının değerlendirilmesi boşluğunu doldurmak amacıyla tasarlanan bu senaryo; algoritmaların gerçek zamanlı yeniden planlama, çevresel değişimlere adaptasyon ve reaktif engel kaçınma kabiliyetlerini kapsamlı bir şekilde test etme imkânı sunmaktadır. Bu üç aşamalı senaryo yapısı sayesinde, algoritmaların ideal koşuldan başlayarak giderek artan gerçekçilik ve zorluk seviyelerinde sistematik ve karşılaştırılabilir biçimde değerlendirilmesi mümkün kılınmıştır. Araştırma hipotezlerinin test edilmesi ile senaryoların algoritma performansları üzerindeki etkisinin sistematik biçimde değerlendirilebilmesi amacıyla çalışmada iki bağımsız değişken ve bunlara karşılık gelen bağımlı değişkenler tanımlanmıştır. Bağımsız değişkenler, çalışmada incelenen ve sistematik olarak değiştirilen faktörlerdir. İlki, algoritma türüdür ve klasik (A^* , Dijkstra), makine öğrenmesi tabanlı (Behavioral Cloning, DQN) ve hibrit (DBSCAN + A^* , A^* + DWA, A^* + DQN) olmak üzere üç ana gruba ayrılmıştır. İkincisi ise çevresel senaryodur ve artan karmaşıklık düzeyine göre statik (yalnızca sabit engeller), yarı dinamik (sabit yön ve şiddette akıntı) ve tam dinamik (zamanla değişen akıntılar ve hareketli engeller) olmak üzere üç test ortamını kapsamaktadır. Bağımlı değişkenler ise bu bağımsız değişkenlerdeki varyasyonların etkisiyle ölçümlenen performans göstergeleridir. Bağımlı değişkenler, bağımsız değişkenlerdeki varyasyonların etkisiyle ölçülen performans göstergeleri olup üç ana başlık altında toplanmaktadır: enerji verimliliği, hesaplama maliyeti, görev

başarısı ile rota kalitesi. Enerji verimliliği H1'i doğrudan test etmektedir. Görevin tamamlanması için harcanan toplam simüle edilmiş enerji tüketimi, `uuv_simulator`'un hidrodinamik modelleri üzerinden joule cinsinden hesaplanacaktır. Hesaplama maliyeti H2'yi test etmektedir. ROS düğümünün ortalama ve maksimum CPU/RAM kullanım yüzdeleri ve özellikle senaryo 3'te algılanan tehlikeye yanıt olarak yeniden planlama için gereken süre ile hesaplanmaktadır. Görev başarısı ve rota kalitesi, algoritmaların genel başarısını gösterecektir. Algoritmaların görev tamamlama oranı, kat edilen toplam mesafe ve güvenlik metrikleri elde edilecektir. Belirlenen amaç ve hedeflere ulaşmak için veri toplama sürecinde, istatistiksel anlamlılık ve sonuçların güvenilirliğini sağlamak amacıyla her bir bağımsız algoritma, her bir çevresel senaryo altında, başlangıç ve hedef noktalarıyla $N=30$ kez tekrarlanacaktır. Tüm bağımlı değişkenlere ait veriler, ROS mimarisi üzerinden `roslaunch` dosyaları kullanılarak otomatik olarak toplanacak ve kaydedilecektir. Toplanan bu veriler, projenin hipotezlerini doğrulamak veya yanlışlamak amacıyla istatistiksel yazılımlar kullanılarak analiz edilecektir. Bu çalışmada elde edilecek bağımlı değişkenlerin (enerji tüketimi, CPU/RAM kullanımı, toplam mesafe, görev başarısı vb.) analizinde, hipotezleri nicel olarak test edebilmek için sistematik bir istatistiksel süreç izlenecektir. Öncelikle, her algoritma-senaryo kombinasyonu için yürütülecek $N=30$ tekrar sonucunda elde edilen verilerin normal dağılıma uygunluğu Shapiro-Wilk testi ile değerlendirilecektir. Normallik varsayımının sağlanması durumunda, farklı algoritma türleri arasındaki ortalama farkları incelemek amacıyla Tek Yönlü ANOVA kullanılacak; anlamlı bir farklılık tespit edilirse, bu farkın kaynağını belirlemek için Tukey HSD post-hoc analizi uygulanacaktır. Verilerin normal dağılmadığı durumlarda ise ANOVA'nın parametrik olmayan karşılığı olan Kruskal-Wallis H testi tercih edilecek ve anlamlı sonuç elde edildiğinde ikili grup karşılaştırmaları Dunn post-hoc testi (Bonferroni düzeltmeli) ile gerçekleştirilecektir. H3 hipotezinin değerlendirilmesi kapsamında, idealize matematiksel simülasyon yöntemleri ile fiziksel temelli ROS/Gazebo simülasyonlarının üreteceği sonuçlar, literatürde raporlanan bulgular ile statik senaryo altındaki metriklerin karşılaştırılması yoluyla hem nitel hem nicel olarak analiz edilecektir. Elde edilen tüm istatistiksel bulgular, algoritmaların performans farklılıklarını açık bir biçimde ortaya koymak amacıyla kutu grafikleri, dağılım grafikleri, ısı haritaları ve karşılaştırmalı tablolar kullanılarak görselleştirilecektir. Son olarak, projenin metodolojik

fizibilitesini sağlamak amacıyla kapsamlı bir literatür taraması yapılmıştır. Bu tarama, uuv_simulator tercihinin gerekçelerini teyit etmenin yanı sıra, bu çalışmada ele alınacak “dinamik engelli” senaryoların mevcut literatürde belirgin bir metodolojik boşluğu dolduracağını da doğrulamıştır.

SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu araştırma, otonom su altı araçlarında kullanılan klasik rota planlama algoritmaları, makine öğrenmesi temelli yaklaşımlar ve hibrit yöntemlerin, fiziksel temelli ve yüksek doğruluklu bir simülasyon ortamında karşılaştırmalı olarak incelenmesini amaçlamaktadır. Literatürde yaygın olarak kullanılan idealize matematiksel simülasyonların, gerçek su altı ortamlarında karşılaşılan hidrodinamik etkileri ve sistem belirsizliklerini sınırlı düzeyde temsil edebilmesi, bu çalışmanın temel motivasyonunu oluşturmaktadır. Bu doğrultuda, ROS/Gazebo tabanlı ve uuv_simulator eklentileriyle desteklenen bir altyapı kullanılarak, rota planlama algoritmalarının yalnızca geometrik optimallik açısından değil, enerji tüketimi ve hesaplama maliyeti gibi kritik performans ölçütleri bakımından da değerlendirilmesi hedeflenmektedir.

Önerilen deneysel tasarımın, farklı algoritma türleri arasındaki performans farklarını dinamik su altı koşulları altında daha gerçekçi biçimde ortaya koyması beklenmektedir. Özellikle değişken akıntılar ve hareketli engeller içeren senaryolarda, algoritmaların adaptasyon kabiliyeti, yeniden planlama yeteneği ve enerji verimliliği açısından belirgin farklılıklar sergileyebileceği öngörülmektedir. Bu bağlamda, gelişmiş stratejik ve hibrit yaklaşımların, klasik yöntemlere kıyasla daha dengeli bir performans sunabileceği; ancak bu durumun hesaplama maliyeti ile birlikte ele alınması gerektiği varsayılmaktadır.

Makine öğrenmesi ve derin öğrenme tabanlı yöntemlerin çevresel belirsizliklere uyum potansiyeli yüksek olmakla birlikte, gömülü sistemlerdeki işlem gücü ve enerji kısıtları nedeniyle uygulamada sınırlamalarla karşılaşabileceği düşünülmektedir. Bu nedenle hibrit rota planlama yaklaşımlarının, global ve lokal planlama stratejilerinin avantajlarını bir araya getirerek performans ve maliyet arasında daha uygun bir denge sağlayabileceği öngörülmektedir. Çalışma kapsamında

test edilmesi planlanan hipotezlerin, bu varsayımların nicel ve istatistiksel olarak değerlendirilmesine imkân tanıyacağı değerlendirilmektedir.

Bu araştırmanın bir diğer beklenen katkısı, fiziksel temelli bir simülasyon ortamında elde edilecek sonuçların, idealize matematiksel simülasyonlara dayalı bulgularla karşılaştırılmasına olanak sağlamasıdır. Böylece simülasyon altyapısına bağlı metodolojik farklılıkların, algoritma performans değerlendirmeleri üzerindeki etkisinin daha açık biçimde ortaya konması ve literatürde daha güvenilir bir değerlendirme yaklaşımına katkı sunulması amaçlanmaktadır.

Gelecekte yürütülecek çalışmalar açısından, bu proje kapsamında kurulması planlanan simülasyon altyapısının, gerçek donanım testlerine geçiş için bir ön aşama olarak kullanılabileceği öngörülmektedir. Elde edilmesi beklenen bulgular doğrultusunda seçilecek algoritmaların, havuz testleri veya kontrollü saha deneyleri ile doğrulanması, çalışmanın doğal bir devamı niteliğinde olacaktır. Ayrıca daha ayrıntılı enerji tüketim modellerinin geliştirilmesi, çoklu otonom su altı araçlarının eşgüdümlü görev icrasını içeren senaryoların ele alınması ve çevrimiçi öğrenme temelli adaptif mimarilerin hibrit planlama yaklaşımlarına entegre edilmesi, bu araştırma çizgisinin ilerletilmesine yönelik önemli öneriler olarak değerlendirilmektedir.

KAYNAKÇA

- Adanur, F., Kabataş, M., & Benli, E. (2022). Mapping and navigation on rough surface with LIDAR and IMU. In *2022 Innovations in Intelligent Systems and Applications Conference (ASYU)* (pp. 1–5). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ASYU56188.2022.9925364>
- Ağaçayak, A. C., Terzioğlu, H., & Özdeş, B. (2020). Elektrikli araçlarda telemetri. In H. Terzioğlu & G. Yalçın (Eds.), *Elektrikli araçlara genel bakış 2* (p. 132). İksad.
- Aras, H. H., Eryeşil, Y., & Köklü, M. (2025, Mayıs). An explainable deep learning framework for Agron-based coffee roast classification using Grad-CAM [Tam metin bildirisi]. 3rd International Conference on Intelligent Systems and New Applications (ICISNA'25). (Yayın No: 9876687)
- Aras, H. H. (2025). Explainable deep learning for skin cancer detection using DenseNet121 and Grad-CAM. N. Doğan (Ed.), *Innovative approaches in applied engineering fields* (1. baskı, ss. 328). Selçuk Üniversitesi Mühendislik Bilim ve Teknoloji Dergisi. ISBN: 978-975-448-246-1. (Yayın No: 9700458)
- Binali, R., Yalçın, G., & Ağaçayak, A. C. (2021). Modern imalat yöntemlerine genel bakış. In H. Terzioğlu & G. Yalçın (Eds.), *Mühendislik alanında akademik çalışmalar-1* (p. 204). İKSAD.
- Chen, L. (2014). UUV path planning algorithm based on virtual obstacle. In *2014 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA)* (pp. 1722–1727). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICMA.2014.6885960>
- Cheng, C.-T., Fallahi, K., Leung, H., & Tse, C. K. (2012). A genetic algorithm-inspired UUV path planner based on dynamic programming. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews)*, 42(6), 1128–1134.
- Chowdhury, M. I., & Schwartz, D. G. (2020). The PRM-A* path planning algorithm for UUVs: An application to navy mission planning. In *2020 Global Oceans 2020: Singapore – U.S. Gulf Coast* (pp. 1–9). IEEE. <https://doi.org/10.1109/IEEECONF38699.2020.9389146>
- Chu, Y., Gao, Q., Yue, Y., Lim, E. G., Paoletti, P., Ma, J., & Zhu, X. (2024). Evolution of unmanned surface vehicle path planning: A comprehensive review of basic, responsive, and advanced strategic pathfinders. *Drones*, 8(10), 540. <https://doi.org/10.3390/drones8100540>
- Çınar, S., & Ağaçayak, A. C. (2022). 48V batarya yönetim sistemi tasarımı. In A. C. Ağaçayak & G. Yalçın (Eds.), *Mühendislikte yeni araştırmalar* (p. 305). Tablet Kitapevi.
- Feng, W., Ma, Y., Li, H., Liu, H., Meng, X., & Zhou, M. (2023). Optimal search path planning of UUV in battlefield ambush scene. *Ocean Engineering*, 275, Article 114138. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.114138>
- Ganesan, S., Ramalingam, B., & Mohan, R. E. (2022). A hybrid sampling-based RRT* path planning algorithm for autonomous mobile robot navigation. *Journal of King Saud University - Computer and Information Sciences*, 34(10), 10186–10203. <https://doi.org/10.1016/j.jksuci.2021.06.012>
- Gkesoulis, A. K., Georgakis, P., Karras, G. C., & Bechlioulis, C. P. (2025). Autonomous sea floor coverage with constrained input autonomous underwater vehicles: Integrated path planning and control. *Sensors*, 25(4), 1023. <https://doi.org/10.3390/s25041023>
- Gül, Ö. M., & Acarer, T. (2024). Deniz taşımacılığı izlemek için sualtı kablosuz sensör ağlarında otonom sualtı aracı ile dayanıklı ve enerji farkında yol planlama. *EMO Bilimsel Dergi*, 14(2), 71–85.
- Güntürkün, R. (2022). İnsansız Savaşlara Doğru Yapay Zeka Kontrollü Ölümcül Silahlar, Ekin Basım Yayın Dağıtım, ISBN: 978-625-8235-07-4, Ekim 2022, pp-135
- Guo, S., Chen, M., & Pang, W. (2023). Path planning for autonomous underwater vehicles based on an improved artificial jellyfish search algorithm in multi-obstacle ocean current

- environment. *IEEE Access*, 11, 31010–31023. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3257025>
- Kagıtcı, Y. C., & Tarakcioglu, N. (2016). The effect of weld line on tensile strength in a polymer composite part. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 85(5), 1125–1135. <https://doi.org/10.1007/s00170-015-8023-x>
- Kağıtcı, Y. Ç., & Tarakçıoğlu, N. (2015, Ağustos 25-28). Weld line problem related to flow on a reinforced of glass fibre polymer composite part [Bildiri sunumu]. The International Conference on Science, Ecology and Technology I (ICONSETE'2015), Viyana, Avusturya.
- Kağıtcı, Y. Ç., & Tarakçıoğlu, N. (2016, Ekim 14-16). The investigation of weld line on polyamide based fiber reinforced composites [Bildiri sunumu]. 2nd International Conference on Science, Ecology and Technology (ICONSETE'2016), Barselona, İspanya.
- Kazan, F. A. (2020). Microcontroller based simulation of the very high frequency omnidirectional radio range (VOR). *International Journal of Aeronautics and Astronautics*, 1(1), 33–41.
- Kazan, F. A., & Akkaya, R. (2021). The effect of increases in user weight and road slope on energy consumption in disabled vehicle driven with PMSM. *Balkan Journal of Electrical and Computer Engineering*, 9(1), 1–7.
- Kazan, F. A., Alpaslan, F., & Selek, M. (2015). The design of a test and development board for the training of PIC18F4550 microcontroller. In *2015 2nd International Conference on Information Science and Control Engineering* (pp. 945–949). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICISCE.2015.215>
- Kazan, F. A., & Bilgin, O. (2020). Simulation of PMSM operating at different speeds and optimization of PI controller parameters. *Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Uygulamalı Bilimler Dergisi*, 4(1), 86–105.
- Kazan, F. A., Sungur, C., & Terzioğlu, H. (2015). The extension of battery lives used in solar irrigation system with regards to charge–discharge numbers. *Applied Mechanics and Materials*, 752–753, 988–994. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.752-753.988>
- Kocaaslan, O., Güleren, K. M., Saracoğlu, B. H., & Yasa, T. (2023). Effects on injection pressure on rotating detonation engine operation. *AIAA SCITECH 2023 Forum*. <https://doi.org/10.2514/6.2023-0174>
- Kocaaslan, O., Özgören, M., Babayigit, O., & Aksoy, M. H. (2017). Numerical investigation of the effect of number of blades on centrifugal pump performance. *AIP Conference Proceedings*, 1863, 030005. <https://doi.org/10.1063/1.4992181>
- Mu, X., & Gao, W. (2024). Coverage path planning for multi-AUV considering ocean currents and sonar performance. *Frontiers in Marine Science*, 11, 1483122. <https://doi.org/10.3389/fmars.2024.1483122>
- Neşeli, S., Terzioğlu, H., Yalçın, G., & Ağaçayak, A. C. (2018a). Düşük hızlı hava araçları için ön kanatçık tasarımı ve akış analizi. *International Science and Academic Congress'18*, 3.
- Neşeli, S., Terzioğlu, H., Yalçın, G., & Ağaçayak, A. C. (2018b). İnsansız hava taşıtları için rüzgâr tüneli tasarımı ve hava akış analizi. *International Science and Academic Congress'18*, 3, 689–698.
- Neşeli, S., Yalçın, G., Terzioğlu, H., & Ağaçayak, A. C. (2019). Android kontrollü hovercraft tasarımı. *V. Science Technology and Innovation Congress*, 381–390.
- Okereke, C. E., Mohamad, M. M., Abdul Wahab, N. H., Elijah, O., Al-Nahari, A., & Hashim, S. Z. (2023). An overview of machine learning techniques in local path planning for autonomous underwater vehicles. *IEEE Access*, 11, 24894–24907. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3249966>
- Politi, E., Stefanidou, A., Chronis, C., Dimitrakopoulos, G., & Varlamis, I. (2023). Adaptive deep reinforcement learning for efficient 3D navigation of autonomous underwater vehicles.

- IEEE Access*, 11, 138699–138712. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3342340>
- Sayın Kul, B., & Yamaner, A. S. (2025). A Comparative Evaluation Of Dry-Mql Turning Applications For Aisi 5115 Steel. *İmalat Teknolojileri Ve Uygulamaları*, 6(1), 23–32.
- Shanmugaraja, M., Thangamuthu, M., & Ganesan, S. (2025). Hybrid path planning algorithm for autonomous mobile robots: A comprehensive review. *Journal of Sensor and Actuator Networks*, 14(5), 87. <https://doi.org/10.3390/jsan14050087>
- Sun, B., & Lv, Z. (2025). Multi-AUV dynamic cooperative path planning with hybrid particle swarm and dynamic window algorithm in three-dimensional terrain and ocean current environment. *Biomimetics*, 10(8), 536. <https://doi.org/10.3390/biomimetics10080536>
- Sun, M., Xiao, X., Luan, T., Zhang, X., Wu, B., & Zhen, L. (2024). The path planning algorithm for UUV based on the fusion of grid obstacles of artificial potential field. *Ocean Engineering*, 306, 118043. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.118043>
- Terzioğlu, H., Ağaçayak, A. C., Yalçın, G., & Neşeli, S. (2019). Design of small scale fire extinguishing robots for educational purposes. *International Conference on Engineering Technologies (ICENTE'19)*, 1(3), 479–483.
- Terzioğlu, H., Yalçın, G., & Öksüm, E. (2023). Elektrikli araçlarda batarya yönetim sistemi. In S. Neşeli & H. Terzioğlu (Eds.), *Mühendislikte yenilikçi yaklaşımlar-2* (p. 149). Eğitim Yayınevi.
- Yalçın, G., Neşeli, S., & Ağaçayak, A. C. (2020). Elektro-pnömatik sistemlere giriş. In H. Terzioğlu & G. Yalçın (Eds.), *Elektrikli araçlara genel bakış 2* (p. 132). İksad Yayınevi.
- Yamaner, A. S., & Sayın Kul, B. (2024). Aisi 1040 Çeliğinin Kuru Tornalanmasında Yüzey Pürüzlülüğü Kesme Kuvveti Ve Kesme Sıcaklığı İncelemeleri. Presented At The 4th International Conference On Scientific And Academic Research (Icsar 2024), Konya.
- Yamaner, A. S., & Sayın Kul, B. (2025). Evaluation Of Machinability Of 6082 Aluminum Alloy With Respect To Cutting Force And Surface Roughness. Presented At The 2nd International Conference On Recent And Innovative Results İn Engineering And Technology İcırret 2025, Konya.
- Yamaner, A. S., & Sayın Kul, B. (2025). Evaluation Of Tool Radius And Machining Parameters On Cutting Forces And Surface Roughness For Aa 6082 Aluminum Alloy. *European Mechanical Science*, 9(2), 125–138.
- Yan, Z., Jiang, L., & Wu, D. (2019). A path planning algorithm based on artificial potential field method and ant colony algorithm. In *2019 IEEE 3rd Information Technology, Networking, Electronic and Automation Control Conference (ITNEC)* (pp. 1421–1425). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ITNEC.2019.8729177>
- Yang, G., Xu, Z., Wang, F., & Zhang, X. (2025). Energy-optimized path planning and tracking control method for AUV based on SOC state estimation. *Journal of Marine Science and Engineering*, 13(6), 1074. <https://doi.org/10.3390/jmse13061074>
- Zhang, L., Yin, H., Li, A., Hu, L., & Duo, L. (2024). RSA-RRT: A path planning algorithm based on restricted sampling area. *Journal of King Saud University - Computer and Information Sciences*, 36(8), 102152. <https://doi.org/10.1016/j.jksuci.2024.102152>
- Zhang, Z., Mi, W., Du, J., Wang, Z., Wei, W., Zhang, Y., Yang, Y., & Ren, Y. (2022). Design and implementation of a modular UUV simulation platform. *Sensors*, 22(20), 8043. <https://doi.org/10.3390/s22208043>

BÖLÜM 5

SU ALTI ROKETLERİ İÇİN ÖZEL KONTROL KARTI TASARIMI VE SAPMA DENGELEME NAVİGASYONU

Abdurrahman ZAFER**

GİRİŞ

Bu çalışma, otonom su altı roketleri gibi stratejik platformların operasyonel kararlılığı ve enerji güvenliği için hayati önem taşıyan "Akıllı Kontrol ve Güç Dağıtım Sistemi"nin (GDK) yerli imkânlarla tasarımını, yazılım mimarisini ve deneysel doğrulama süreçlerini ele almaktadır. Literatürde yer alan temel korumalı pasif kartlar ile yüksek maliyetli kapalı kaynaklı ithal çözümler arasındaki teknolojik boşluğu doldurmayı amaçlayan bu proje, çift kartlı modüler bir mimari üzerine kurgulanmıştır. Sistem; güçlü işlem kapasitesine sahip ESP32-S3 mikrodenetleyici tabanlı bir Akıllı Kontrol Kartı ile yüksek akımlı yüklerin yönetimini sağlayan bir Akıllı Güç Dağıtım Kartından oluşmaktadır. Akıllı Kontrol Kartı, 9 eksenli BNO055 Yeryüzü tabanlı Ölçüm Ünitesi (IMU) verilerini kullanarak platformun dinamik stabilizasyonunu sağlayan FreeRTOS tabanlı PID (Oransal-İntegral-Türevsel) kontrol algoritmalarını icra etmektedir. Güç omurgasını oluşturan Akıllı GDK ise, MOSFET tabanlı katı hal

**Lisans Öğrencisi, Selçuk Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Elektrik elektronik Mühendisliği Bölümü, Konya, 233302110@ogr.selcuk.edu.tr ORCID: 0009-0000-1000-6543

anahtarlama teknolojisiyle ESC ve servo motorları beslemekte; entegre ACS7012 akım sensörleri vasıtasıyla her kanalı anlık izleyerek kritik telemetri verilerini 5 butonlu bir OLED ekran arayüzü üzerinden sunmaktadır. İki birim arasındaki veri akışı, CRC-16 hata denetimi ile desteklenen korumalı bir UART protokolü üzerinden gerçekleştirilmektedir. Tasarım süreci; savunma sanayii IPC-2221A standartlarına uygun PCB yerleşimini ve termal başarımlı analizlerini kapsamaktadır. Deneysel doğrulama aşamasında, programlanabilir DC elektronik yükler ve osiloskop yardımıyla sistemin arıza izolasyon süresinin hedeflenen 10 ms'nin altında olduğu ve akım/gerilim telemetri verilerinin %5'ten daha düşük hata payıyla çalıştığı kanıtlanmıştır. Bu çalışma, su altı platformları için esnek, düşük maliyetli ve yerli bir elektronik alt bileşen mimarisi sunarak, savunma sanayindeki millileşme hedeflerine TRL 3-4 seviyesinde bir kavram ispatı ile katkı sağlamaktadır.

ARAŞTIRMA ÖNERİSİNİN BİLİMSEL NİTELİĞİ

Günümüzde teknolojinin gelişmesiyle beraber savunma sanayii alanında, özellikle otonom sistemler sahasında yeni ve kritik ihtiyaçlar doğmuştur. İnsansız Hava Araçları (İHA) ve Otonom Su Altı Roket Sistemleri (SARS) gibi stratejik platformların operasyonel başarısı, sahip oldukları karmaşık elektronik alt bileşenlerin kesintisiz, stabil ve verimli bir enerji altyapısıyla desteklenmesine doğrudan bağlıdır. Bu sistemlerde, birincil güç kaynağından alınan enerjiyi farklı gerilim ve akım gereksinimlerine sahip hassas sensörlere, görev bilgisayarlarına ve yüksek akım çeken motor sürücülerine (ESC, Servo) dağıtan Güç Dağıtım Kartları (GDK) hayati bir rol oynamaktadır. Bu araştırma önerisi, Türkiye'nin 12. Kalkınma Planı'nda yer alan "savunma ve güvenlik ihtiyaçlarında dışa bağımlılığı azami ölçüde ortadan kaldırmak amacıyla başta alt bileşenler olmak üzere yerli üretim yetkinlikleri geliştirilecektir" hedefiyle tam uyum sağlamaktadır. Ayrıca 2030 Sanayi ve Teknoloji Stratejisi'nde belirtilen otonom araç teknolojileri ve güç yönetimi tümleşik devreleri (PMIC) gibi kritik alanlarda Ar-Ge yapılması vizyonu da doğrudan örtüşmektedir. Proje, bu stratejik hedefler doğrultusunda, kritik bir otonom platform olan su altı roketleri için yerli ve akıllı bir elektronik alt bileşen prototipi sunmayı amaçlamaktadır. Mevcut literatür ve pazar incelendiğinde, GDK çözümlerinin genellikle iki uçta yoğunlaştığı tespit edilmiştir:

Anlık izleme ve kontrol yeteneği bulunmayan, yalnızca temel koruma (sigorta/röle) sunan "Pasif GDK'lar".

Yüksek yetenekli ancak kapalı kaynak kodlu, esnek yapılandırmaya izin vermeyen ve yüksek maliyetli "İthal Gelişmiş Ürünler".

Bu projenin doldurmayı hedeflediği bilimsel ve teknolojik eksiklik; esnek, modüler, programlanabilir, enerji verimliliğini anlık izleyebilen ve yerli imkânlarla geliştirilmiş, fiyat-performans odaklı bir "akıllı" GDK çözümünün geliştirilmesidir. Önerilen çift kartlı modüler mimari; ESP32-S3 mikrodenetleyici tabanlı "Akıllı Kontrol Kartı" ve MOSFET tabanlı yüksek akım yönetimini gerçekleştiren "Akıllı Güç Dağıtım Kartı"ndan oluşmaktadır. Sistem, BNO055 IMU sensörü ve PID kontrol algoritmaları ile aracın dinamik stabilizasyonunu sağlarken, anlık güç telemetrisini OLED ekran arayüzü üzerinden kullanıcıya sunarak durumsal farkındalığı artırmaktadır.

Amaç ve Hedefler

Bu araştırma projesinin temel amacı; otonom su altı roketleri gibi stratejik platformlar için kritik öneme sahip olan, hem navigasyon ve stabilizasyon görevlerini yürütecek, hem de tüm elektronik alt sistemlerin enerji altyapısını akıllı ve güvenli bir şekilde yönetecek, çift kartlı modüler bir mimariye sahip, yüksek güvenilirlikli ve yerli bir "Akıllı Kontrol ve Güç Dağıtım Sistemi" prototipi geliştirmektir.

Bu sistem, platformun görev başarısı için hayati önem taşıyan güç verimliliğini, arıza toleransını ve anlık durumsal farkındalığı artırmayı hedeflemektedir.

Akıllı Kontrol Kartının Donanımsal Tasarımı

Platformun 3 eksenli hareketini (pitch, roll, yaw) yüksek hassasiyetle yönetebilmesi ve karmaşık kontrol algoritmalarını gerçek zamanlı çalıştırabilmesi amacıyla, ESP32-S3 mikrodenetleyicisinin güçlü işlem kapasitesi ve çift çekirdek mimarisinden faydalanılacaktır.

Aracın anlık konumunu ve yönelimini (oryantasyon) hassas bir şekilde belirlemek için, BNO055 gibi 9 eksenli (ivmeölçer, jiroskop, manyetometre) bir Yeryüzü tabanlı Ölçüm Ünitesi (IMU) ile PCB

tasarlanacaktır. Tasarım, sensör verilerinin minimum gürültü ile işlenmesini ve kontrol komutlarının düşük gecikmeyle üretilmesini sağlayacak şekilde optimize edilecektir.

Entegre Gömülü Yazılım, Kontrol ve İletişim Altyapısının Geliştirilmesi

Projenin yazılımı iki ana bileşenden oluşacaktır;

- a) Kontrol Yazılımı: Kontrol kartı (ESP32) üzerinde, BNO055 IMU'dan alınan ham veriler sensör füzyonu teknikleriyle işlenerek aracın anlık oryantasyonu hesaplanacak. Bu veriyi kullanarak platformu hedeflenen rotada ve dengede tutacak PID (Oransal-İntegral-Türevsel) kontrol algoritmaları geliştirilecektir
- b) Güç Yönetimi ve İletişim Yazılımı: Güç dağıtım kartı (ESP32) üzerinde, akım sensörlerinden okunan veriler sürekli analiz edilecektir.

Tanımlanan akım eşik değerleri (ör. 5 Amper üstü sürekli çekiş) aşıldığında veya ani bir kısa devre durumunda, ilgili MOSFET kanalını hedeflenen <10 milisaniyelik bir tepki süresi içinde kapatacak akıllı koruma yazılımı kodlanacaktır. İki kart arasında güvenilir ve eşzamanlı veri akışı için UART protokolü, özel bir haberleşme paketi yapısı tanımlanacak ve kodlanacaktır.

Akıllı Güç Dağıtım Kartının (GDK) Donanımsal Tasarımı

Platformun enerji omurgasını oluşturmak üzere, yüksek akım çeken ESC'ler (Elektronik Hız Kontrolcüler) ve servo motorlar için N-kanal MOSFET tabanlı katı hal anahtarlama devreleri tasarlanacaktır. Bu yaklaşım, mekanik rölelere göre çok daha hızlı, güvenilir ve uzun ömürlü bir çözüm sunar. GDK üzerinde, her bir güç hattındaki tüketimi anlık olarak izlemek amacıyla yüksek hassasiyetli akım sensörleri ACS712 yerleştirilecektir. Ekrana, sistem operatörüne anlık telemetri (anlık akım, toplam tüketim, sistem durumu) sağlamak ve olası arıza durumlarında manuel müdahaleye izin vermek için, 5 adet navigasyon butonu ile kontrol edilen bir OLED ekran arayüzü tasarlanacaktır. Metni biçimlendirmeyi bozmadan ekleyiniz. Metni biçimlendirmeyi bozmadan ekleyiniz. Metni

biçimlendirmeyi bozmadan ekleyiniz. Metni biçimlendirmeyi bozmadan ekleyiniz. Metni biçimlendirmeyi bozmadan ekleyiniz. Metni biçimlendirmeyi bozmadan ekleyiniz.

Fonksiyonel Prototip Üretimi ve Sistem Entegrasyonu

Endüstriyel standartlarda bir PCB tasarım programında (ör. Altium Designer, KiCad) tamamlanan şematik ve yerleşim tasarımları, yerli PCB üreticilerine gönderilecektir.

En az bir adet fonksiyonel prototip seti (1 adet Kontrol Kartı, 1 adet Güç Dağıtım Kartı) ürettirilecektir. Elektronik bileşenlerin PCB üzerine lehimlenmesi ve montajı yapılacak, ardından iki kart alt alta gelecek şekilde mekanik olarak birleştirilerek sistem entegrasyonu tamamlanacaktır.

Laboratuvar Ortamında Test ve Başarım Doğrulaması

Açıklama: Üretilen entegre prototip, gerçek hayattaki koşulları simüle etmek amacıyla laboratuvar ortamında kapsamlı testlere tabi tutulacaktır.

Ölçülebilir Çıktı:

- a) Doğruluk Testi: GDK'nın her bir çıkış kanalına ayarlanabilir elektronik yükler bağlanarak, akım sensörlerinin ölçüm doğruluğu doğrulanacaktır.
- b) Tepki Süresi Testi: Kasıtlı kısa devre senaryoları oluşturularak, sistemin arıza izolasyon süresinin osiloskop ile ölçülerek hedeflenen <10ms değerini karşılayıp karşılamadığı teyit edilecektir.
- c) Entegrasyon Testi: Kontrol kartından gönderilen sahte sevk komutlarının (UART üzerinden) GDK tarafından algılanıp ilgili motor/servo çıkışlarına yansıtılma süresi ve toplam sistem gecikmesi ölçülecektir.

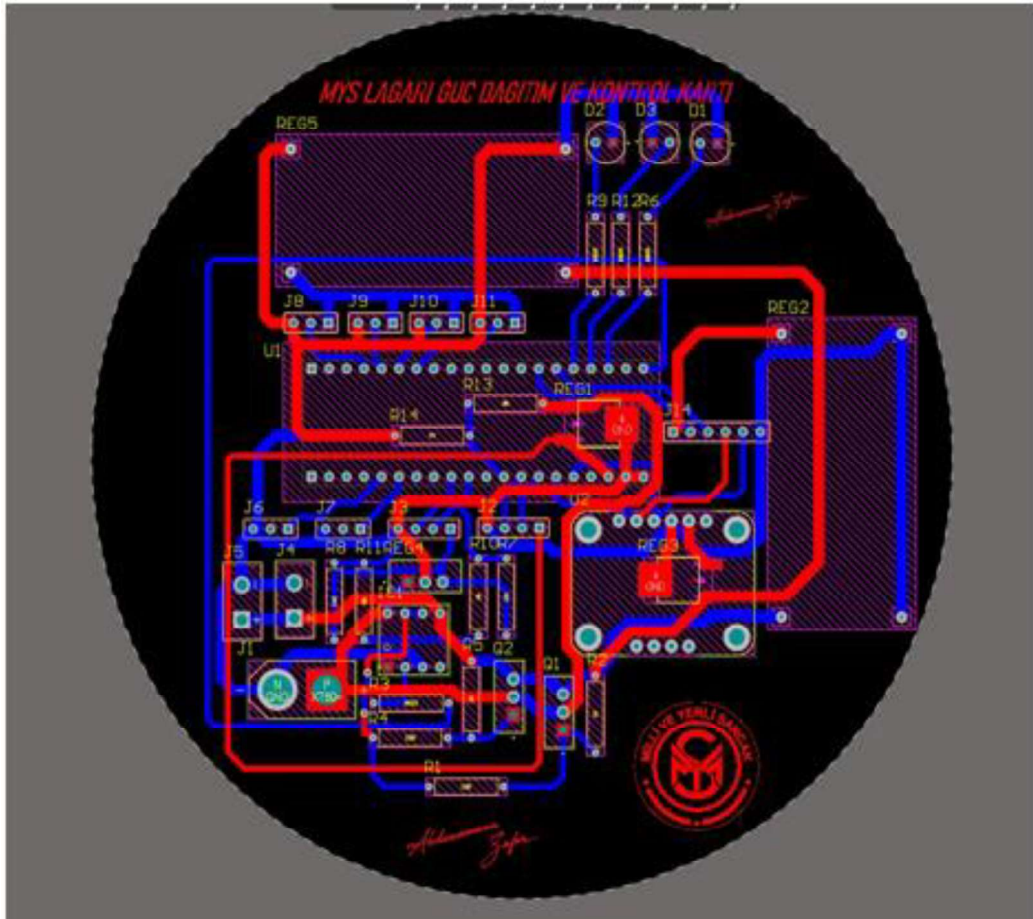
Bu testler sonucunda, geliştirilen prototipin otonom su altı roketleri için kavram ispatı gerçekleştirilmiş ve sistemin başarımı nicel verilerle belgelenmiş olacaktır.

YÖNTEM

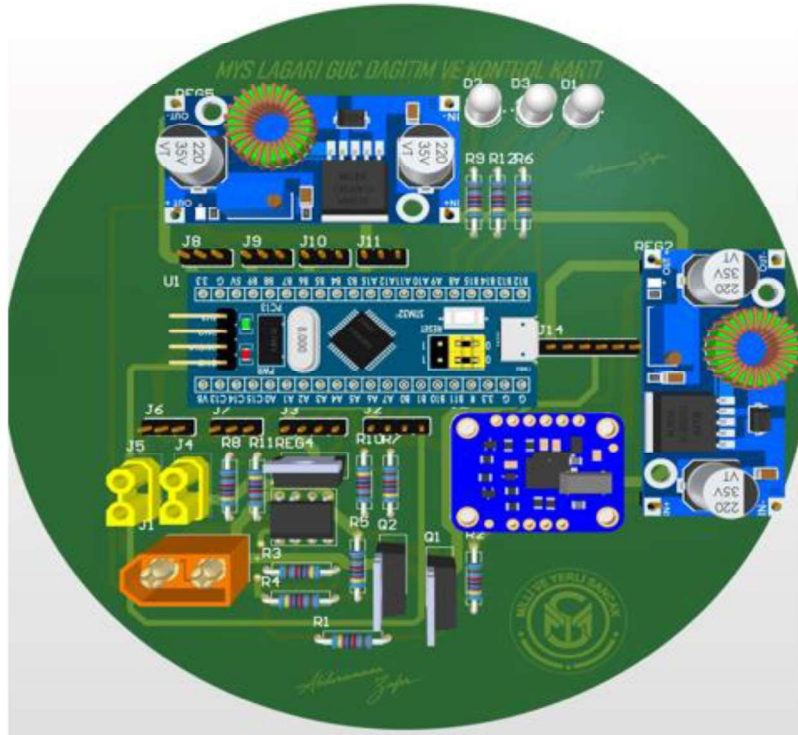
Bu araştırma projesi, teorik modelleme ve simülasyonların ötesine geçerek sistemin lineer olmayan yükler, elektromanyetik enterferans ve termal stres gibi gerçek dünya koşullarındaki davranışını deneysel olarak doğrulamayı hedefleyen uygulamalı araştırma-geliştirme (AR-GE) ve prototip doğrulama metodunu temel almaktadır. Çalışma metodolojisi; gereksinim analizi, mimari tasarım, donanım ve yazılım alt sistemlerinin detay tasarımı, implementasyon, birim testleri, entegrasyon testleri ve nihai sistem doğrulaması adımlarından oluşmaktadır. Projenin başlangıç aşamasında, otonom su altı roketinin operasyonel senaryolarına dayalı detaylı bir güç hesabı ile arıza modları ve etkileri analizi gerçekleştirilmiştir. Bu analiz sürecinde, ESC ve servo motorların yüklenme ve kararlı durum akımları ile BNO055 IMU ve ESP32 gibi hassas dijital bileşenlerin ihtiyaç duyduğu 3.3V gibi kararlı besleme gerilimleri hassasiyetle belirlenmiştir. Kontrol kartı üzerinde koşan PID döngüsünün ihtiyaç duyduğu minimum çevrim frekansı, BNO055 sensörünün veri çıkış hızı baz alınarak tanımlanmış ve integral doyumu önleme mekanizmalarını içeren bir algoritma yapısı seçilmiştir. Donanım tasarım sürecinde Altium Designer yazılımı kullanılarak, yüksek akım taşıyacak yolların genişlik ve bakır kalınlığı hesaplamaları IPC-2221A standartlarına uygun olarak icra edilmiştir. Güç Dağıtım Kartı'nın (GDK) temelini oluşturan N-Kanal MOSFET'lerin seçimi; minimum iletim kaybı için düşük $R_{DS(on)}$ hızlı anahtarlama için düşük giriş kapasitansı C_{uz} ve güvenli çalışma alanı eğrileri analiz edilerek yapılmıştır. Anahtarlama kayıplarını minimize etmek ve hızlı açma-kapama sürelerini garanti altına almak amacıyla basit BJT sürücüler yerine özel MOSFET sürücü entegreleri tercih edilmiştir. Akım algılama katmanında, ölçüm doğruluğunu maksimize etmek için düşük endüktanslı şönt dirençler üzerinde "Kelvin bağlantı" tekniği uygulanmış ve veriler INA219 benzeri I2C tabanlı hassas çözümlerle dijitalize edilmiştir. PCB yerleşiminde, yüksek akımlı güç katmanları ile hassas analog ve dijital birimler arasında ısı ve gürültü transferini engellemek için galvanik izolasyon uygulanmış; termal performansı artırmak adına MOSFET altlarına ısı transfer delikleri yerleştirilmiştir. Sinyal bütünlüğünü ve elektromanyetik uyumluluğu korumak amacıyla 4 katmanlı PCB mimarisi tercih edilerek iç katmanlar kesintisiz toprak (GND) ve besleme (VCC) düzlemleri olarak ayrılmıştır. Yazılım mimarisi, ESP32-S3 mikrodenetleyicileri üzerinde FreeRTOS gerçek zamanlı işletim sistemi tabanlı çoklu görev yapısıyla

kurgulanmıştır. Bu yapı dahilinde IMU veri okuma, PID kontrol ve güç izleme işlemleri önem sırasına göre farklı görevlere atanmış; görevler arası veri iletişimi güvenli kuyruk yapısı ile sağlanmıştır. İki kart arasındaki UART haberleşmesi, işlemci yükünü minimize etmek için DMA kanalları üzerinden yönetilmekte ve veri bütünlüğü CRC-16 hata kontrolü ile garanti altına alınmaktadır. Güvenlik katmanını ise hem yazılımsal aşırı yük kontrolünü hem de çok daha hızlı tepki gerektiren kısa devre durumları için işlemciden bağımsız çalışan donanımsal koruma devresini içermektedir. Bu donanımsal birim, mikro saniye mertebesinde tepki vererek MOSFET sürücü pinini doğrudan kesmekte ve eş zamanlı olarak işlemciye kesme sinyali göndererek durumu bildirmektedir.

Şekil 1. Kartın Şematik Gösterimi



Şekil 2. Kartın 2 Boyutlu Gösterimi



Şekil 3. Kartın 3 Boyutlu Gösterimi

SONUÇ

Bu çalışma kapsamında, otonom su altı roketleri gibi kritik ve stratejik platformların operasyonel güvenilirliğini artırmaya yönelik olarak tasarlanan Akıllı Kontrol ve Güç Dağıtım Sistemi (GDK) başarıyla geliştirilmiş, entegre edilmiş ve laboratuvar ortamında deneysel olarak doğrulanmıştır. Literatürde yer alan pasif güç dağıtım çözümleri ile yüksek maliyetli, kapalı kaynaklı ithal sistemler arasında konumlanan teknolojik boşluk; yerli, modüler, programlanabilir ve akıllı bir mimari ile doldurulmuştur.

Geliştirilen çift kartlı yapı; ESP32-S3 tabanlı Akıllı Kontrol Kartı ve MOSFET tabanlı Akıllı Güç Dağıtım Kartı bileşenlerinden oluşmakta olup, hem platformun dinamik stabilizasyonunu hem de enerji altyapısının güvenli ve verimli yönetimini bütünsel bir şekilde ele almıştır. BNO055 IMU sensöründen elde edilen verilerle çalışan FreeRTOS tabanlı PID kontrol algoritmaları sayesinde, platformun yönelim ve denge kontrolünün gerçek zamanlı olarak gerçekleştirilebildiği gösterilmiştir. Aynı zamanda, güç dağıtım katmanında yer alan akım sensörleri ve katı hal anahtarlama yapısı ile her bir yük kanalının anlık olarak izlenmesi ve kontrol edilmesi sağlanmıştır.

Laboratuvar ortamında gerçekleştirilen deneysel doğrulama testleri, sistemin tasarım hedeflerini karşıladığını nicel verilerle ortaya koymuştur. Programlanabilir elektronik yükler ve osiloskop ölçümleri sonucunda, kısa devre ve aşırı akım senaryolarında arıza izolasyon süresinin hedeflenen <10 ms sınırının altında kaldığı doğrulanmıştır. Akım ve gerilim telemetri ölçümlerinde ise hata payının %5'in altında olduğu tespit edilmiştir. UART tabanlı, CRC-16 hata denetimli haberleşme altyapısının, iki kart arasında güvenilir ve düşük gecikmeli veri aktarımı sağladığı gözlemlenmiştir. OLED ekran ve buton arayüzü sayesinde operatöre sunulan anlık telemetri bilgileri, sistemin durumsal farkındalığını artıran önemli bir katkı olarak öne çıkmıştır.

Donanım tasarımında IPC-2221A standartlarına uygun PCB yerleşimi, çok katmanlı mimari, termal yönetim önlemleri ve elektromanyetik uyumluluk yaklaşımları; sistemin savunma sanayii uygulamalarına uygunluğunu güçlendirmiştir. Yazılım tarafında ise görev önceliklendirmesi, gerçek zamanlı işletim sistemi kullanımı ve donanımsal-yazılımsal koruma mekanizmalarının birlikte ele alınması,

sistemin güvenilirliğini ve ölçeklenebilirliğini artırmıştır.

Sonuç olarak bu çalışma, otonom su altı platformları için esnek, düşük maliyetli, yerli ve akıllı bir kontrol ve güç dağıtım alt sistemi geliştirilebileceğini ortaya koymuş; savunma sanayiinde kritik elektronik alt bileşenlerin millileştirilmesine yönelik somut bir TRL 3–4 seviyesinde kavram ispatı sunmuştur. Gelecek çalışmalarda, sistemin su altı ortam koşullarında (basınç, sıcaklık ve nem) saha testleri ile doğrulanması, haberleşme altyapısının yedekli protokollerle genişletilmesi ve daha yüksek akım seviyelerine ölçeklenmesi hedeflenmektedir. Bu yönleriyle çalışma, hem akademik literatüre hem de savunma sanayii Ar-Ge ekosistemine önemli bir katkı sağlamaktadır.

KAYNAKÇA

- Axelsson, J. (2007). Serial Port Complete: The Developer's Guide (2. Baskı). Lakeview Research.
- Barry, R. (2016). Mastering the FreeRTOS Real Time Kernel: A Hands-On Tutorial Guide. Real Time Engineers Ltd.
- Fossen, T. I. (2011). Handbook of Marine Craft Hydrodynamics and Motion Control. John Wiley & Sons.
- Rashid, M. H. (2014). Power Electronics: Devices, Circuits, and Applications. Pearson Education.
- Ang, K. H., Chong, G. ve Li, Y. (2005). PID control system analysis, design, and technology. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 13 (4), 559-576.
- Yılmaz, M. ve Öztürk, S. (2020). İnsansız su altı araçları için güç yönetim sistemlerinin tasarımı ve analizi. Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, 8 (2), 145-158.
- Bosch Sensortec. (2021). BNO055: Intelligent 9-axis Absolute Orientation Sensor Datasheet (Rev. 1.4). Bosch Sensortec GmbH.
- Espressif Systems. (2023). ESP32-S3 Series Technical Reference Manual (Version 1.1). Espressif Inc.
- IPC Association. (2003). IPC-2221A: Generic Standard on Printed Board Design. IPC Association Connecting Electronics Industries.
- Texas Instruments. (2015). INA219: Zero-Drift, Bidirectional Current/Power Monitor with I2C Interface Datasheet. Texas Instruments Inc.
- Welch, G. ve Bishop, G. (2006). An Introduction to the Kalman Filter. University of North Carolina at Chapel Hill, Tech. Rep. TR 95-041.

BÖLÜM 6

SU ALTI ROKET ARACI MEKANİK TASARIMI

Süleyman NEŞELİ **, Mehmet Resul POLAT ***

GİRİŞ

Bu proje çalışması kapsamında geliştirilen SARA (Su Altı Roket Aracı), bu alanda yürütülen araştırmalara katkı sunmak amacıyla tasarlanmıştır. SARA'nın en önemli özelliği, hem yüzeyden kontrollü olarak suya girebilmesi hem de su altında belirlenen görevleri yerine getirebilmesidir. Aracın yapısal tasarımı, modüler ve sızdırmaz bir mimari üzerine inşa edilmiştir. Bu sayede suyun yüksek basıncına dayanabilecek, elektronik sistemleri koruyabilecek ve dengeli hareket sağlayabilecek bir yapı oluşturulmuştur.

SARA'da iki temel sızdırmaz bölme bulunmaktadır: birincisi burun kısmındaki roket ve ayırma sistemi, ikincisi ise arka kısımda yer alan aviyonik kontrol ünitesidir. Bu iki sistem, araca entegre edilen servo motorlar ve yönlendirme kanatçıkları ile desteklenmiştir. Servo motorların su geçirmez özellikte seçilmesi, aracın su altında uzun süre çalışabilmesini sağlamaktadır. Ayrıca, entegrasyon gövdesi sayesinde motor ve gövde arasındaki mekanik bağlantı güçlendirilmiş, aracın denge ve yön kabiliyeti artırılmıştır.

Projenin genel amacı, su altı roket sistemlerinin çalışma prensiplerini, mekanik entegrasyon süreçlerini ve kontrol mekanizmalarını uygulamalı olarak incelemektir. Bu kapsamda geliştirilen prototip, su altı görevlerinde

** Prof. Dr., Selçuk Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Konya, sneseli@selcuk.edu.tr, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1553-581X>

*** Lisans Öğrencisi, Selçuk Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Konya, mresul2442@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-0624-7888>

kullanılabilecek özgün bir itki ve yönlendirme sisteminin temelini oluşturmaktadır. Elde edilen deneyim ve teknik kazanımlar, ileride yapılacak insansız su altı aracı projelerine ve roket tabanlı itki teknolojilerinin geliştirilmesine katkı sağlayacak niteliktedir.

Yüksek hızlı yanma sistemlerinde türbülanslı akışın kontrolü için döndürücü (swirlers) parametrelerinin optimizasyonu büyük önem taşırken (Kocaaslan vd., 2021), modern itki sistemlerinde dönen patlama motorlarındaki dalga yapısının ve enjeksiyon basıncının operasyonel verimlilik üzerindeki etkileri sayısal olarak incelenmektedir (Güleren vd., 2024; Kocaaslan vd., 2023). Ayrıca, darbeli detonasyon motorlarında farklı eşdeğerlik oranlarının performans üzerindeki belirleyici etkisi literatürde vurgulanmaktadır (Kocaaslan, 2024).

YÖNTEM

AUV ve ROV Arasındaki Fark

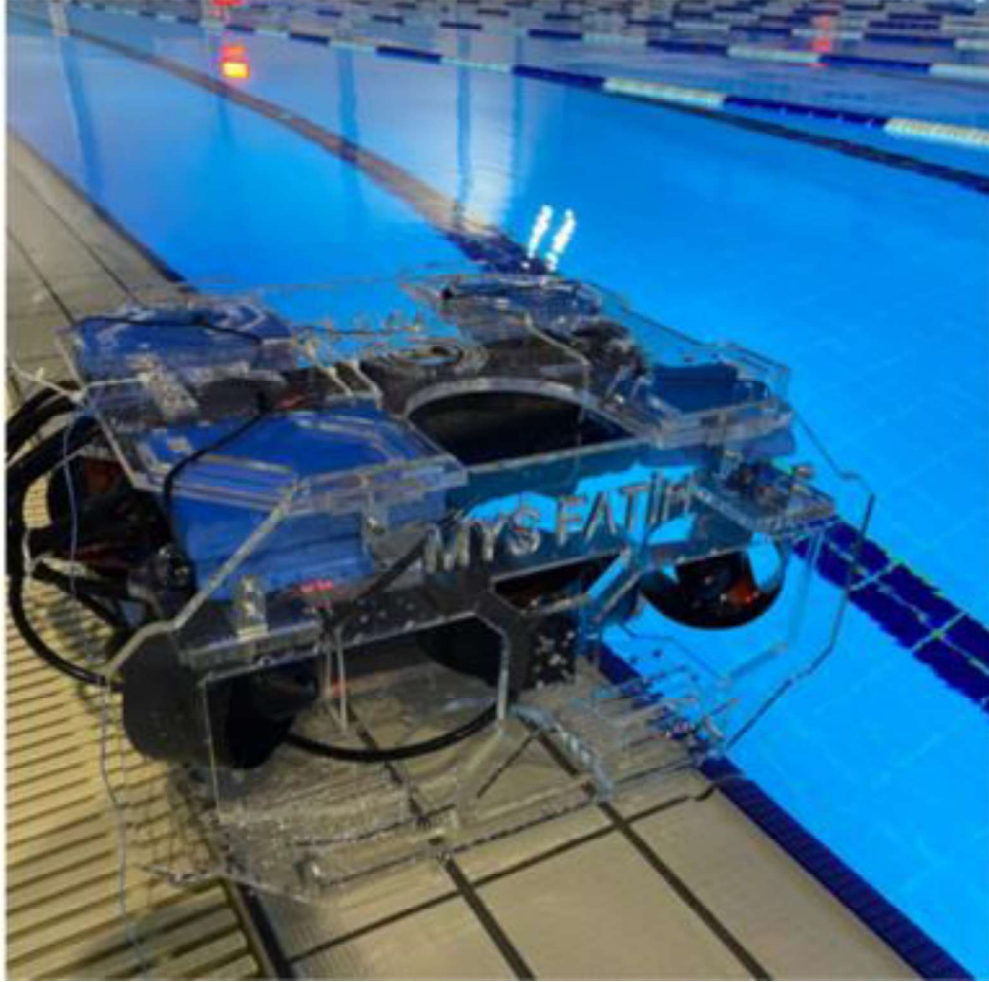
Otonom su altı araçları (AUV), dışarıdan herhangi bir müdahale olmaksızın belirlenen görevleri yerine getirebilen çok fonksiyonlu makinelerdir. AUV'lerin dışarıyla enerji transferi veya veri alışverişi sağlayan herhangi bir kablo bağlantısı bulunmaz. İçlerinde yer alan sensörler ve yapay zekâ yazılımları sayesinde, karmaşık görevleri insan müdahalesi olmadan tamamlayabilirler.

Bu araçların gövdeleri, su direncini (sürtünmeyi) azaltmak ve yüksek basınca dayanabilmek amacıyla genellikle silindirik (torpido) formda tasarlanır. Araca bağlı bir besleme kablosu olmadığı için hidrodinamik açıdan verimli olan bu gövde yapısı, daha az enerji harcanmasını ve dolayısıyla su altında daha uzun süre görev yapılmasını sağlar. Genellikle tek bir itici motorla (thruster) donatılan bu araçlar, yönlendirme işlemini kış tarafındaki kanatçıklar aracılığıyla gerçekleştirir. Verimliliğin ikinci planda olduğu özel durumlarda ise hareket kabiliyetini artırmak için kübik veya farklı formlarda, çok motorlu AUV tasarımları da tercih edilebilir.

Uzaktan kontrollü su altı araçları (ROV), gövdelerine bağlı bir kablo (tether) aracılığıyla dış dünyayla sürekli veri alışverişi ve enerji transferi gerçekleştirir. Bu bağlantı sayesinde araçlar hem yüzeyden anlık olarak kontrol edilebilir hem de kesintisiz enerji akışı sayesinde görev süreleri sınırsız hale gelebilir.

ROV'larda kullanılan kablolar, araca kıyasla daha fazla sürüklenme ve sürtünme kuvveti oluşturur. Gövde tasarımları genellikle hidrodinamik öncelikli değildir; çünkü dışarıdan sürekli enerji desteği alındığı için

tasarım aşamasında enerji verimliliğinden ziyade işlevsellik ve hareket kabiliyeti ön planda tutulur. dengesini ve iç mekanizmalarının güvenliğini doğrudan etkileyen görevler üstlenir. Şekil 1’de MYS ABDÜLHAMİD Takımı AUV Aracı görülmektedir.



Şekil 2. MYS ABDÜLHAMİD Takımı AUV Aracı

Uzaktan kontrol edilemeyen ve verilen görevleri tamamen otonom olarak icra eden AUV’larda ise hidrodinamik verimlilik esas alınmaktadır. AUV’larda güç, araç içerisinde bulunan bataryalardan sağlanmaktadır. Bataryalarda depolanan enerji sınırlı olmasından dolayı tasarım aşamasında sürtünme ve sürüklenme kuvvetleri minimum düzeyde tutulmaktadır.

Bu çalışmada üzerinde durulan su altı roket aracı otonom olarak çalışmaktadır. Su altı roket aracının mekanik tasarımını AUV araçlarının tasarım kriterleri ele alınarak yapılmıştır.

BULGULAR

Su Altı Aracı Temel Mekanik Bileşenler ve Tasarım Kriterleri

Su altı roket aracı, suyun yüksek yoğunluğu ve basıncı altında verimli çalışabilmek için iyi bir mühendislik yapısına sahip olmalıdır. Şekil 3’de Su altı roket aracı mekanik bileşenleri görülmektedir. Temel olarak bir su altı roketi; gövde ve yapısal tasarım, burun konisi, tahrik sistemi, kanatçık tasarımı ve sızdırmaz hazne olmak üzere beş ana bileşenden oluşur. Bu bileşenlerin her biri, aracın su altındaki hızını, Tasarım aşamasında CFD tabanlı yaklaşımların kullanılması, sadece motor iç bileşenlerinde değil, araç genelinde sürtünme direncini azaltmaya yönelik aerodinamik geliştirmelerde de etkin çözümler sunmaktadır (Taş vd., 2024).



Şekil 4. Su Altı Roket Aracı Mekanik Bileşenleri

Burun konisi

Su altı roketi tasarımında burun konisi geometrisinin belirlenmesi, aracın enerji verimliliği ve stabilite karakteristiklerini doğrudan etkileyen temel mühendislik yapılarından biridir. Şekil 3’de gözüken farklı geometrik yapıların sürtünme katsayısı özellikleri tablosu incelendiğinde, farklı geometrik formların akışkanlar içerisindeki sürüklenme katsayıları arasındaki farklar açıkça görülmektedir. Tablo verilerine göre küp, kısa silindir ve hatta keskin köşeli küp gibi formlar "Yüksek" veya "Çok Yüksek" sürüklenme değerlerine sahiptir; çünkü bu küp yapılar su moleküllerini yarmak yerine önlerinde büyük bir su kütlesini sürükleyerek arkalarında geniş bir türbülans ve vakum alanı oluşturur. Bu durum,

roketin ilerlemesine karşı bir direnç oluşturarak motor zorlanmasına neden olur ve bu durumda operasyonel menzil azalır.

Akış Yönü →	Şekil	Sürüklenme Katsayısı
Küre		Küçük
Yarım küre		Küçük
Koni		Küçük
Küp		Çok yüksek
Açılı küp		Yüksek
Uzun silindir		Yüksek
Kısa silindir		Çok yüksek
Akışkanlaştırılmış Gövde		Çok küçük
Akışkanlaştırılmış Yarım-gövde		Çok küçük
Akışkanlaştırılmış Yarım-gövde		Çok küçük

Şekil 5.Farklı Geometrik Yapıların Sürtünme Katsayısı Özellikleri Tablosu

Yuvarlak burun yapısı ise tablodaki en düşük sürüklenme değerinden birine sahip olan formdur. Bu geometri, suyun burun ucundan itibaren gövde boyunca pürüzsüz (laminer) bir şekilde akmasını sağlamasıdır. Diğer geometrilerde görülen ani yön değişimleri ve basınç farkları bu tasarımda minimize edildiği için, su direnci en alt seviyeye indirilmiş olur. Ayrıca konik yapılar gibi "Küçük" dirençli alternatiflerin aksine, akışkanlaştırılmış yuvarlak formlar suyun gövdeyi terk ettiği arka kısımlarda da akış ayrılmasını engellediği için roketin su altındaki yönelimini çok daha kararlı bir hale getirir.

Aynı zamanda yuvarlak burun yapısı, diğer burun tiplerine göre iç hacminin daha fazla olması sebebiyle; sensörlerin ve diğer bileşenlerin hem daha rahat hem de daha fazla sayıda yerleştirilmesine imkân verir. Şekil 6’te çalışmada kullanılan burun konisi yapısı görülmektedir.



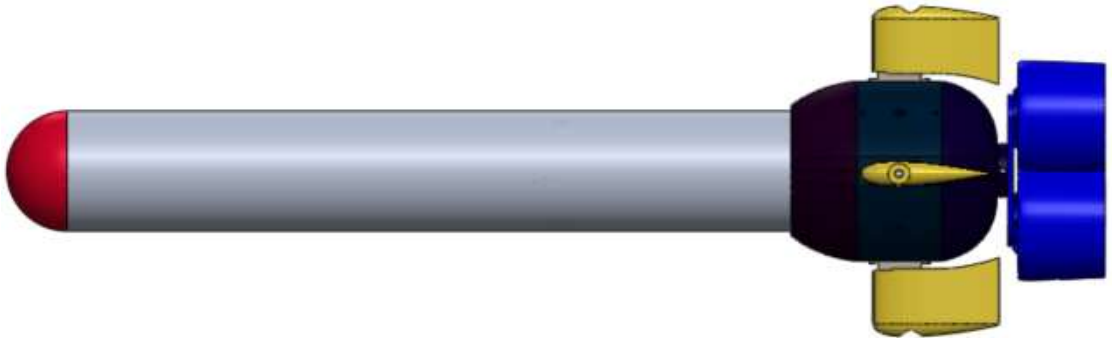
Şekil 7.Çalışmada Kullanılan Burun Konisi Yapısı

Sonuç olarak, yüksek operasyonel hızlara ulaşmak ve sınırlı enerji kaynağını en verimli şekilde kullanmak amacıyla, hidrodinamik açıdan en optimize edilmiş olan yuvarlak akışkan yapı temel tasarım kriteri olarak belirlenmiştir.

Gövde ve yapısal tasarım

Su altı araçlarının operasyonel başarısı, büyük ölçüde gövde tasarımının mukavemetine ve seçilen malzemenin çevresel koşullardaki direncine bağlıdır.

Su altı roket araçlarında gövde aracın operasyonel limitlerini belirleyen temel bileşendir. Su derinliğine bağlı olarak lineer artış gösteren hidrostatik basınç, gövde üzerinde yüksek kompresyon kuvvetleri oluşturur. Bu durum, yapısal tasarımın hem çökme riskine karşı dayanıklı olmasını hem de iç hacimdeki hassas elektronik sistemleri koruyacak tam sızdırmazlığı sağlamasını zorunlu kılar. Ayrıca, suyun yüksek yoğunluğu nedeniyle gövdenin hidrodinamik formu, sürüklenme katsayısını minimize ederek enerji verimliliğini ve manevra kabiliyetini doğrudan optimize eder. Şekil 8’de araç gövde tasarımı görülmektedir.



Şekil 9.Araç Gövde Tasarımı

Su altı platformlarında malzeme seçimi; ağırlık-mukavemet oranı, korozyon direnci ve işlenebilirlik kriterlerine göre yapılmaktadır. Proje kapsamında tercih edilen Alüminyum 6063-T6 alaşımı, bu kriterleri aşağıdaki teknik avantajlarla karşılamaktadır:

- **Korozyon Direnci:** 6063 serisi, özellikle magnezyum ve silisyum içeriği sayesinde oksidasyona karşı yüksek direnç gösterir. Bu özellik, aracın su ortamında uzun süreli kullanımında yapısal bütünlüğün korunması açısından kritiktir.
- **Mekanik Özellikler ve T6 Isıl İşlemi:** T6 temperleme işlemi, malzemeye yapay yaşlandırma yoluyla yüksek akma mukavemeti kazandırır. Bu durum, gövdenin dış basınca karşı direncini artırırken malzemenin hafiflik avantajını korumasını sağlar.
- **Yüzey Kalitesi ve Hidrodinamik Verimlilik:** Bu alaşım, ekstrüzyon ve hassas işleme süreçlerinde pürüzsüz yüzey sonuçları vermektedir. Düşük yüzey pürüzlülüğü, laminar akışı destekleyerek hidrodinamik sürtünmeyi azaltır.
- **Isıl İletkenlik:** Alüminyumun yüksek termal iletkenliği, gövde içerisindeki güç sistemlerinin ve bataryaların oluşturduğu ısıyı dış ortama (suya) tahliye edilmesini kolaylaştırarak pasif bir soğutma sistemi görevi görür.

Yapılan teknik değerlendirmeler sonucunda, Al 6063-T6 alaşımının düşük yoğunluklu yapısı ve yüksek korozyon direnci, su altı roket aracının hem dayanıklılık hem de ağırlık hedefleriyle uyum sağlamaktadır. Havacılık uygulamalarında yaygın olarak kullanılan Ti6Al4V titanyum alaşımı ve Al7075 T6 alüminyum gibi yüksek mukavemetli malzemelerin üretim süreçlerinde, kesme hızı ve kuvvetinin takım ucu sıcaklığı ve yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkileri titizlikle analiz edilmelidir (Baran ve Neşeli, 2025a, 2025b). Benzer şekilde, 25CrMo4 çeliğinin tornalanmasında işlenebilirlik parametrelerinin kesme kuvveti üzerindeki etkileri, parça kalitesini doğrudan etkilemektedir (Baran ve Neşeli, 2025c).

Gövde Basınç Hesaplaması ve Analizi

Su altında asıl tehlike iç basınç değil, suyun tüpü ezmeye çalışmasıdır (burkulma). Ancak önce malzemenin ezilme limitine bakılırsa:

Gövdenin özellikleri:

- Dış çap (Do): 160mm
- İç çap (Di): 153mm
- Et kalınlığı (t): 3mm
- Malzeme: Al6060-T5
- Akma dayanımı (σ_y): 150 MPa

Malzemenin akma sınırına ulaşması için gereken teorik dış basınç (P):

$$P=(2* \sigma_y*t)/ D_o$$

Formülünde değerler yerine yazılırsa sonuç 5.62MPa dır.

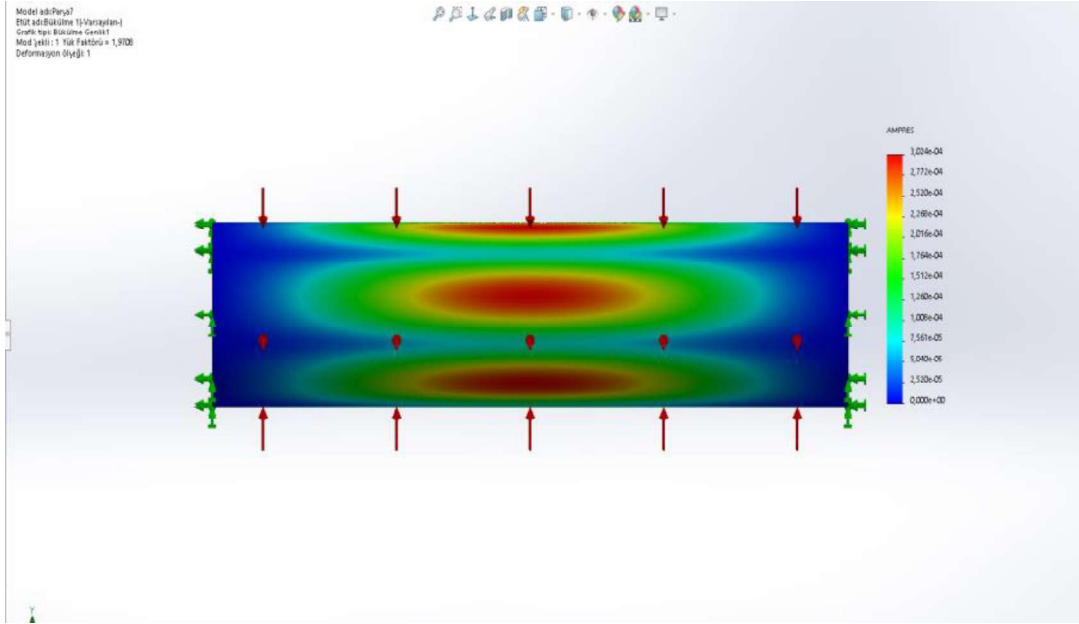
Burkulma hesaplamasına göre:

- Poission oranı (ν): 0.33
- Ortalama çap (D): 157mm
- Et kalınlığı (t): 3mm
- Elastisite modülü (E): 69000 MPa
- Uzunluk (L): 800mm

Uzun tüpler için kritik basınç (Pcr):

$$P_{cr}: [2.42*E*(t/D)^{2.5}]/[(1-\nu^2)^{3/4}*(L/D)]$$

Formülünde değerler yerine yazılırsa sonuç 1.08 MPa çıkar. Bu durum gövdenin çalışabileceği maksimum derinliktir. Güvenli çalışma derinliği olarak emniyet katsayısı ile işlem yapılmalıdır. Bu tür yüksek basınç durumlarında emniyet katsayısı 2 ile 3 arasında alınır. Bu çalışmada emniyet katsayısı 2 alınmıştır. Bu durumda gövde maksimum 0.54 MPa basınçta güvenli olarak çalışabilmektedir. Şekil 10'da gövde burkulma analizi görülmektedir.



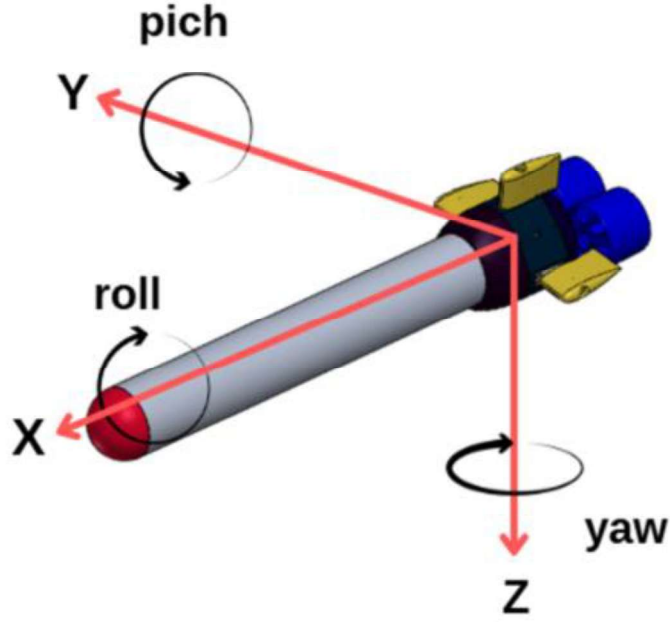
Şekil 11.Gövde Burkulma Analizi

Elle yapılan hesaplamaların doğruluğunu gözden geçirilmesi için burkulma analizi yapılmıştır. Analiz sonuçlarında 0.54 MPa basınç altında yük faktörü (emniyet katsayısı) 1.907 çıkmıştır. Bu değer el ile yapılan hesaplamadaki alınan 2 değeri ile örtüşmektedir.

Su Altı Roket Aracı Serbestlik Dereceleri

Aracın merkez noktası koordinat sistemine göre orijin kabul edilirse, araç; x, y ve z eksenleri boyunca ve bu eksenlerin etrafında gerçekleştireceği hareketlerle birlikte toplamda 6 adet serbestlik derecesine sahip olacaktır. Araç, x eksenini boyunca ileri-geri, y eksenini boyunca sağ-sol ve z eksenini boyunca yukarı-aşağı hareketlerini gerçekleştirecektir. Ayrıca, roll, pitch ve yaw hareketlerini gerçekleştirecektir. Şekil 12’de serbestlik derecelerinin gösterimi görülmektedir.

Aracın su altında sahip olduğu serbestlik derecelerinin artması, aracın çok yönlü olmasını sağlar. Ancak tasarım süreci sırasında, aracın su altında stabilitesini koruması için her bir serbestlik derecesinin nasıl kontrol edileceği düşünülmelidir.

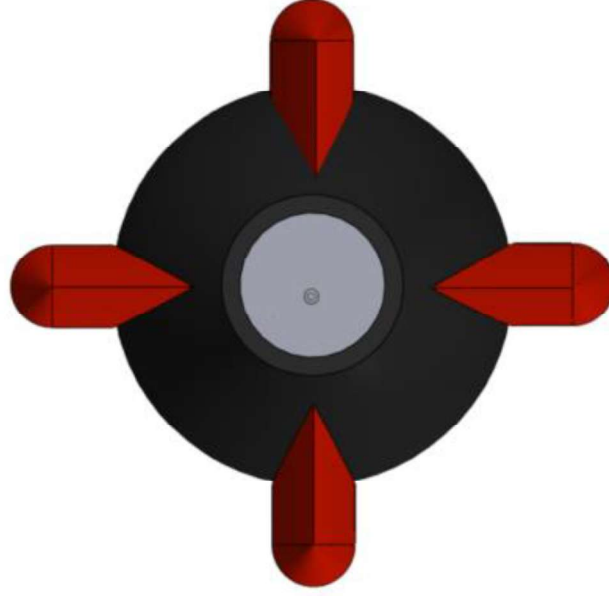


Şekil 13.Serbestlik Derecelerinin Gösterimi

Kanatçık

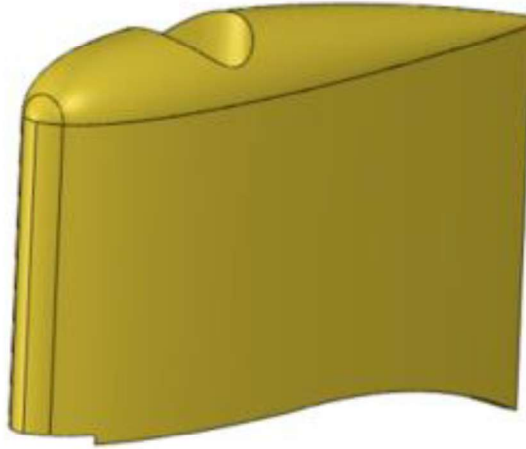
Su altı aracının hidrodinamik kararlılığını sağlamak ve daha iyi manevra kabiliyetini sağlamak amacıyla yeni bir kanatçık tasarımı yapılmıştır. Aracın 800 mm uzunluğundaki gövde yapısı ve 2 m/s operasyon hızı dikkate alınarak, toplam kanatçık yüzey alanının gövde profil alanına oranının minimum %5 ile %10 aralığında olması hedeflenmiştir. Bu alan seçimi, aracın su içerisindeki doğrusal hattını korumasına yardımcı olurken, aynı zamanda kontrol yüzeylerine verilen düşük açılarda bile etkili yönlendirme kuvveti oluşturulmasına imkan tanır. Kanatçık profili olarak akışkanlatırılmış gövde geometrisi tercih edilerek, su direnci minimum düzeye düşürülmüş ve akış ayrılmalarının önüne geçilmiştir.

Kontrol yüzeyi konfigürasyonu olarak, kontrol verimliliği sunan "+" (Artı) dizilimi seçilmiştir. Bu düzende kanatçık çiftleri birbirine dik eksenlerde (tam dikey ve tam yatay) konumlandırılarak, aracın yönelim hareketleri birbirinden bağımsız hale getirilmiştir. Dikey yerleştirilen kanatçıklar sadece sapma (yaw) hareketini kontrol ederken, yatay kanatçıklar yunuslama (pitch) ve derinlik kontrolünden sorumludur. Bu ayırım, kontrol yazılımındaki karmaşıklığı azaltmakla kalmayıp, sensör verilerine karşı sistemin tepki süresini hızlandırarak yüksek hızlarda daha kararlı bir sürüş dinamiği sağlamaktadır. Şekil 14'de artı şekilli kanatçık düzeni görülmektedir.



Şekil 15.Artı Şekli Kanatçık Düzeni

Aracın ağırlık ve hacim merkezlerinin geometrik merkezde (tam ortada) konumlandırılmış olması, statik olarak dengeli bir yapı sunsa da dinamik hareketlerde burun kısmının sapma eğilimini artırmaktadır. Bu durumu dengelemek adına kanatçıklar gövdenin en arka bölümüne yerleştirilmiştir. Bu yerleşim sayesinde, kontrol yüzeyleri tarafından üretilen kuvvetlerin moment kolu maksimum düzeye çıkarılmış, böylece daha küçük kanatçık hareketleriyle daha keskin ve enerji verimli manevralar yapılması mümkün kılınmıştır. Şekil 9’da kanatçık tasarımı gösterilmiştir.



Şekil 16. Kanatçık Tasarımı

Tahrik sistemi

İtki sistemini oluşturan su altı motorlarından beklenen temel gereksinimler; motorun, düşük enerji tüketimiyle maksimum itki (kgf) üretebilmesi, suyun viskozitesini yenecek yüksek torka sahip olması ve pervanenin oluşturabileceği kavitasyon etkilerini minimize edecek bir devir kararlılığı sergilemesi istenmektedir. Bunlara ek olarak, iticilerin elektronik kontrol birimlerinden gelen sinyallere düşük gecikme süresiyle tepki vermesidir.

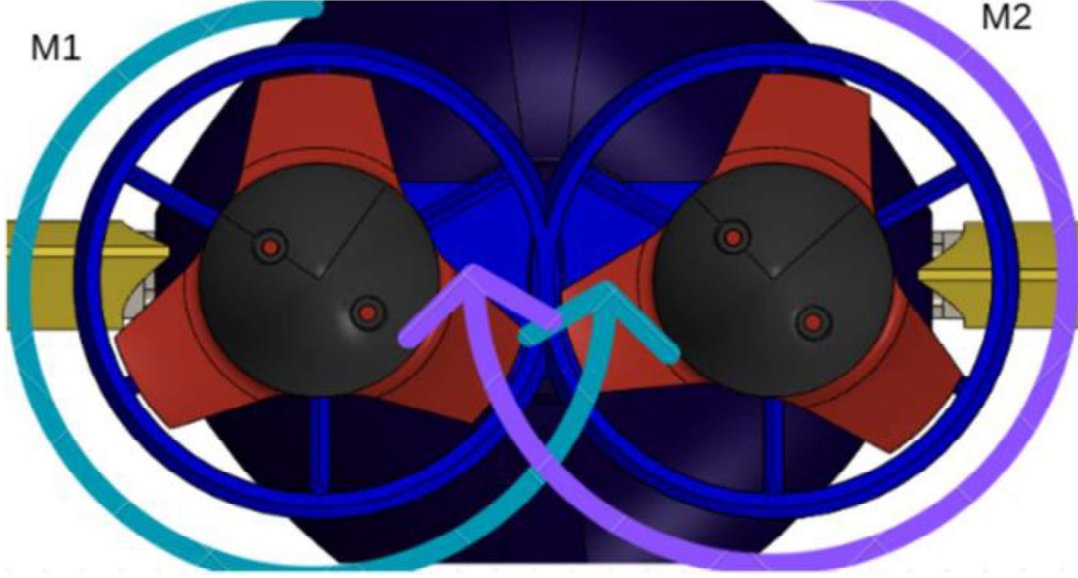
Su altı roket aracının dinamik hareket kabiliyetini sağlamak üzere, itki sisteminde Degz M5 fırçasız su altı motoru tercih edilmiştir. Bu tahrik ünitesi, 12V ile 24V aralığında geniş bir çalışma voltajına sahip olup, özellikle 6S LiPo konfigürasyonunda 650W sürekli güç çıkışı sağlayarak yüksek itki-ağırlık oranı sunmaktadır. Şekil 17’de M5 fırçasız motor fotoğrafı görülmektedir. Teknik açıdan 300KV değerine sahip olan M5 motoru, suyun yüksek viskozitesine karşı ihtiyaç duyulan torku 0.9 Nm seviyelerinde stabil bir şekilde üretebilmekte ve uygun bir pervane entegrasyonu ile 9 kgf değerine kadar itki kuvveti oluşturabilmektedir.



Şekil 18. M5 Fırçasız Motor

Sistemin yapısal bütünlüğü, korozyona dayanıklı anodize alüminyum gövde ve tamamen izole edilmiş sargı yapısı ile desteklenmiş olup, bu özellikler aracın yüksek basınçlı ve korozif su altı ortamlarında uzun ömürlü ve güvenilir bir performans sergilemesine olanak tanımaktadır. Hazır bir modül olarak sisteme entegre edilen bu motor, düşük öz ağırlığı (310g) ve yüksek verimliliği sayesinde, aracın toplam enerji bütçesini optimize ederek operasyonel süresini maksimum düzeyde tutmaktadır.

Aracın dinamik kararlılığını artırmak ve gövde üzerinde oluşabilecek istenmeyen dönme etkilerini engellemek amacıyla, itki sisteminde çift motorlu bir yapı tercih edilmiştir. Şekil 11'de görüldüğü üzere, motorlar birbirine zıt yönde dönecek şekilde konumlandırılmıştır.



Şekil 19.İtici Yerleşimi

Bu tasarım sayesinde, her bir motorun oluşturduğu zıt torklar birbirini sönmüleyerek toplam torkun sıfırlanmasını sağlamaktadır. Böylece aracın seyir esnasında kendi eksenine etrafında dönmesi engellenmiş ve daha stabil bir doğrusal hareket kabiliyeti elde edilmiştir

Sızdırmaz hazne

Su altı roket aracının operasyonel güvenilirliği için elektronik bileşenleri barındıran sızdırmaz haznenin belirli kriterlerini karşılaması gerekmektedir. Bir sızdırmaz hazneden beklenen temel öncelik, hedeflenen maksimum derinlikteki hidrostatik basınca karşı yapısal bütünlüğünü koruyabilmesi ve statik yükler altında içe doğru çökme riskini elimine etmesidir. Aynı zamanda sızdırmaz hazneler O-ring kanalları aracılığıyla hem eksenel hem de radyal sızdırmazlık sağlaması, su girişini dış basınç etkisinde tam kapasiteyle engellemesi beklenmektedir. Ayrıca, hazne içerisindeki güç elektroniğinin ürettiği ısının dış ortama verimli bir şekilde aktarılması için uygun termal iletkenlik özelliklerine sahip olması ve kablo geçiş noktalarında yapısal zayıflık oluşturmaktan sızdırmazlığı devam ettirmesi, sistemin sürdürülebilirliği açısından öneme sahiptir.

Aracın veri toplama, kontrol ve güç dağıtım birimlerini dış ortamdan izole etmek amacıyla, sızdırmazlık performansı yüksek Degz H-150 serisi su altı haznesi kullanılmıştır. 150 mm iç çapı ile geniş bir yerleşim hacmi sunan hazne, yüksek kaliteli akrilik veya opsiyonel alüminyum tüp yapısı sayesinde derin su basıncı altında yapısal formunu koruyarak iç bileşenler için güvenli bir ortam sağlamaktadır. Sistemin sızdırmazlığı, çift O-ring kanal tasarımı ile güçlendirilmiş flanş kapakları üzerine kurulu olup, bu tasarım dinamik ve statik yükler altında su girişini engellemektedir. H-150 haznesinin kapakları üzerinde yer alan çoklu kablo geçiş portları (penetratörler), M5 motorları ve sensör birimleri ile olan kablo bağlantılarının sızdırmazlığını sağlamaktadır.

Sonuç olarak, bu hazır modüler yapı, aracın ana gövde tasarımıyla uyumlu bir entegrasyon sergileyerek kritik sistem bileşenlerinin basınç ve korozyon riskinden muaf tutulmasını sağlamaktadır. Şekil 20’de H-150 sızdırmaz hazne fotoğrafı görülmektedir.



Şekil 21. H-150 Sızdırmaz Hazne

SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışma kapsamında geliştirilen Su Altı Roket Aracı, otonom su altı araçlarının tasarım kriterleri temel alınarak başarıyla hayata geçirilmiştir. Yapılan incelemelerde, yuvarlak burun yapısının su direncini en aza indirerek enerji verimliliğini ve laminar akışı optimize ettiği görülmüştür.

Aracın Alüminyum 6063-T6 alaşımından üretilen gövdesinin, 0.54 MPa basınç altında güvenli bir şekilde çalışabileceği hem matematiksel hesaplamalarla hem de bilgisayar destekli analizlerle doğrulanmıştır. Sonuç olarak; modüler mimarisi, yüksek sızdırmazlık performansı ve arka kısma konumlandırılan etkin kanatçık sistemi sayesinde araç, su altı görevleri için dengeli ve kararlı bir yapıya kavuşturulmuştur. Elde edilen bu teknik kazanımlar, ileride geliştirilecek daha gelişmiş insansız su altı platformları ve itki teknolojileri için özgün bir temel oluşturmaktadır.

KAYNAKÇA

- Alam, K., Ray, T., & Anavatti, S. G. (2017). Design optimization of an unmanned underwater vehicle using low- and high-fidelity models. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 47(11), 2794–2808.
- Baran, R., & Neşeli, S. (2025a). Al7075 T6 alüminyum alaşımı malzemenin torna tezgâhında işlenebilirliğinin kesme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğüne göre değerlendirilmesi [Konferans bildirisi]. 4th International Conference on Contemporary Academic Research.
- Baran, R., & Neşeli, S. (2025b). Effect of machinability parameters on cutting force in the turning of 25CrMo4 steel [Konferans bildirisi]. 3rd International Conference on Modern and Advanced Research (ICMAR 2025).
- Baran, R., & Neşeli, S. (2025c). Ti6Al4V titanyum alaşımı malzemenin torna tezgâhında işlenmesinde değişken kesme hızının kesme kuvveti ve takım ucu sıcaklığına etkisi [Konferans bildirisi]. 7th International Conference on Applied Engineering and Natural Sciences (ICAENS 2025).
- Bozoklu, B. (2021). Otonom su altı araçlarının (AUV) temel dizayn prensipleri ve konsept dizayn [Yayınlanmamış çalışma].
- Canlı, G. A., & Kurtoğlu, İ. (2015). Dünyada ve ülkemizde insansız sualtı araçları (İSAA-AUV & ROV) tasarım ve uygulamaları. *Gidb Dergisi*, (4), 43–75.
- Gonzalez, L. A. (2004). Design modelling and control of an autonomous underwater vehicle [Doktora tezi, Queensland University of Technology]. <https://www.kimerius.com/app/download/5785518080/Design,+modeling+and+control+of+an+autonomous+underwater+vehicle.pdf>
- Gülgün, T., Alankaya, G., Duran, M. E., Erdoğan, M., Yalçinkaya, İ., Durdu, A., & Terzioğlu, H. (2020). Low-cost unmanned underwater vehicle design. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (Özel Sayı), 363–367.
- Güleren, K. M., Kocaaslan, O., Saracoğlu, B. H., & Yasa, T. (2024). Dönen patlama motorlarındaki oluşan dalga yapısının sayısal olarak incelenmesi. *Isı Bilimi ve Tekniği Dergisi*, 44(1). <https://doi.org/10.47480/isibted.1494022>
- Hyakudome, T. (2011). Design of autonomous underwater vehicle. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 8(1), 122–130.
- Kagıtcı, Y. C., & Tarakcioglu, N. (2016). The effect of weld line on tensile strength in a polymer composite part. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 85(5), 1125–1135.
- Kağıtcı, Y. Ç., & Tarakçıoğlu, N. (2015, Ağustos 25-28). Weld line problem related to flow on a reinforced of glass fibre polymer composite part [Bildiri sunumu]. The International Conference on Science, Ecology and Technology I (ICONSETE'2015), Viyana, Avusturya.
- Kağıtcı, Y. Ç., & Tarakçıoğlu, N. (2016, Ekim 14-16). The investigation of weld line on polyamide based fiber reinforced composites [Bildiri sunumu]. 2nd International Conference on Science, Ecology and Technology (ICONSETE'2016), Barselona, İspanya.
- Kocaaslan, O. (2024). Numerical investigation on pulse detonation engine performance under different equivalence ratio. *Advanced Engineering Letters*, 3(1), 1–12. <https://doi.org/10.46793/adeletters.2024.3.1.1>
- Kocaaslan, O., Güleren, K. M., Saracoğlu, B. H., & Yasa, T. (2023). Effects on injection pressure on rotating detonation engine operation. *AIAA 2023-0174*. <https://doi.org/10.2514/6.2023-0174>
- Kocaaslan, O., Yasa, T., & Güleren, K. M. (2021). Türbülanslı yanma için döndürücünün parametrik çalışması. *Isı Bilimi ve Tekniği Dergisi*, 41(2), 205–226. <https://doi.org/10.47480/isibted.1025923>

- Lee, M. R., & Chen, Y. (2022). An innovative pose control mechanism for a small rudderless underwater vehicle. *Machines*, 10(5), 352. <https://doi.org/10.3390/machines10050352>
- Muljowidodo, K., Adi N, S., Prayogo, N., & Budiyono, A. (2009). Design and testing of underwater thruster for SHRIMP ROV-ITB [Konferans bildirisi].
- Ross, C. T. F. (2005). A conceptual design of an underwater missile launcher. *Ocean Engineering*, 32(1), 85–99.
- Ross, C. T. F. (2006). A conceptual design of an underwater vehicle. *Ocean Engineering*, 33(16), 2087–2104.
- Tangorra, J. L., Davidson, S. N., Hunter, I. W., Madden, P. G., Lauder, G. V., Dong, H., ... Mittal, R. (2007). The development of a biologically inspired propulsor for unmanned underwater vehicles. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 32(3), 533–550.
- Taş, A., Yalçın, N. K., & Kocaaslan, O. (2024). Prototip araç aerodinamiğini geliştirme: Sürtünme direncini azaltmaya yönelik CFD tabanlı bir yaklaşım. F. A. Kazan & G. Yalçın (Ed.), *Elektrikli ve hibrit araç teknolojilerinde yenilikçi yaklaşımlar* (1. baskı), Eğitim Yayınevi.
- TEKNOFEST. (2020, 10 Haziran). İnsansız sualtı sistemleri yarışması sualtı sistemleri mekanik tasarımı [Video]. YouTube. https://youtu.be/I-ZndZd6khw?list=PLCxhoYT7fQpW-d39_8KtYM6ExrL6i3CuK
- Wadoo, S., & Kachroo, P. (2011). *Autonomous underwater vehicles*. Taylor & Francis Group.
- Yılmaz, G., & Yılmaz, S. (2022). Analysis of depth and speed-dependent variation of hydrodynamic drift and lift forces in unmanned underwater vehicles (UUV) with CFD. *Uluslararası Mühendislik Araştırma ve Geliştirme Dergisi*, 14(1), 72–83.

BÖLÜM 7

GÖMÜLÜ SİSTEMLERDE SUALTI BORU HATTI ALGILAMA VE TAKIBİ İÇİN HAFİF DERİN ÖĞRENME MİMARİLERİNİN OPERASYONEL KARŞILAŞTIRMASI

Yusuf NURDOĞDU**

GİRİŞ

Deniz ve okyanus tabanları, günümüzde küresel ekonominin ve enerji arz güvenliğinin bel kemiği olan kritik altyapılara ev sahipliği yapmaktadır. Özellikle açık deniz rüzgâr santrallerinden elde edilen enerjinin anakaraya iletilmesini sağlayan su altı enerji kabloları ve kıtalararası veri akışını yöneten fiber optik hatlar, bu ekosistemin en stratejik bileşenleridir (Unal ve ark. 2024). Bu altyapıların otonom su altı araçları (AUV) ve uzaktan kumandalı araçlar (ROV) ile denetlenmesi; operasyonel maliyetlerin düşürülmesi, insan hayatının riske atılmaması ve çevresel felaketlerin önlenmesi açısından hayati bir zorunluluktur (Cossu ve ark. 2017; Cossu ve ark. 2018; Unal ve ark. 2024). Ancak su altı ortamı, kara tabanlı sistemlerin aksine, sinyal iletimi ve görsel algılama üzerinde ekstrem fiziksel kısıtlamalar uygulayan, dinamik ve kaotik bir doğaya

* Lisans Öğrencisi, Selçuk Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Konya, 233301067@ogr.selcuk.edu.tr, ORCID: 0009-0005-2410-9478

sahiptir. Şekil 1’de su altı enerji ve veri transfer hatları görülmektedir.



Şekil 1. Su altı enerji ve veri transfer hatları

Su Altında Operasyonel Kısıtlar

Su altı araçlarının otonom görev icra kapasitesi, ortamın dayattığı fiziksel ve haberleşme kısıtları nedeniyle doğrudan sınırlandırılmaktadır. Elektromanyetik dalgaların suyun iletkenliği (tuzluluk etkisi) sonucu maruz kaldığı şiddetli sönümlenme, karasal ağlarda standart olan radyo frekanslarını (RF) işlevsiz kılmakta; navigasyonu akustik veya optik sistemlere bağımlı hale getirmektedir (Lanbo ve ark. 2008). Ancak akustik sistemlerin sunduğu düşük bant genişliği ve yüksek yayılım gecikmesi, otonom bir aracın ihtiyaç duyduğu yüksek çözünürlüklü video akışının yüzeye iletilmesini imkânsız kılmaktadır (Cossu ve ark. 2018; Lanbo ve ark. 2008). Bu durum, su altı araçlarının görsel veriyi yüzeydeki güçlü istasyonlara aktarmak yerine, karar verme sürecini sistem üzerinde (on-board) ve gerçek zamanlı olarak gerçekleştirmesini zorunlu kılmaktadır. Su altı platformlarının üretiminde kullanılan Al7075 T6 alüminyum ve Ti6Al4V titanyum gibi yüksek dayanımlı alaşımların torna tezgâhında işlenebilirliği; kesme kuvveti, yüzey pürüzlülüğü ve takım ucu sıcaklığı gibi parametreler üzerinden optimize edilerek yapısal bütünlük sağlanmaktadır (Baran ve Neşeli, 2025a, 2025b). Ayrıca, 25CrMo4 çeliği gibi malzemelerin işlenmesinde kullanılan parametrelerin kesme kuvveti üzerindeki etkileri, parça kalitesini doğrudan belirlemektedir (Baran ve Neşeli, 2025c). Sistem verimliliğini artırmak amacıyla, su altı araçlarında kullanılan mekanik bileşenlerin yüzey pürüzlülüğünün karakteristik

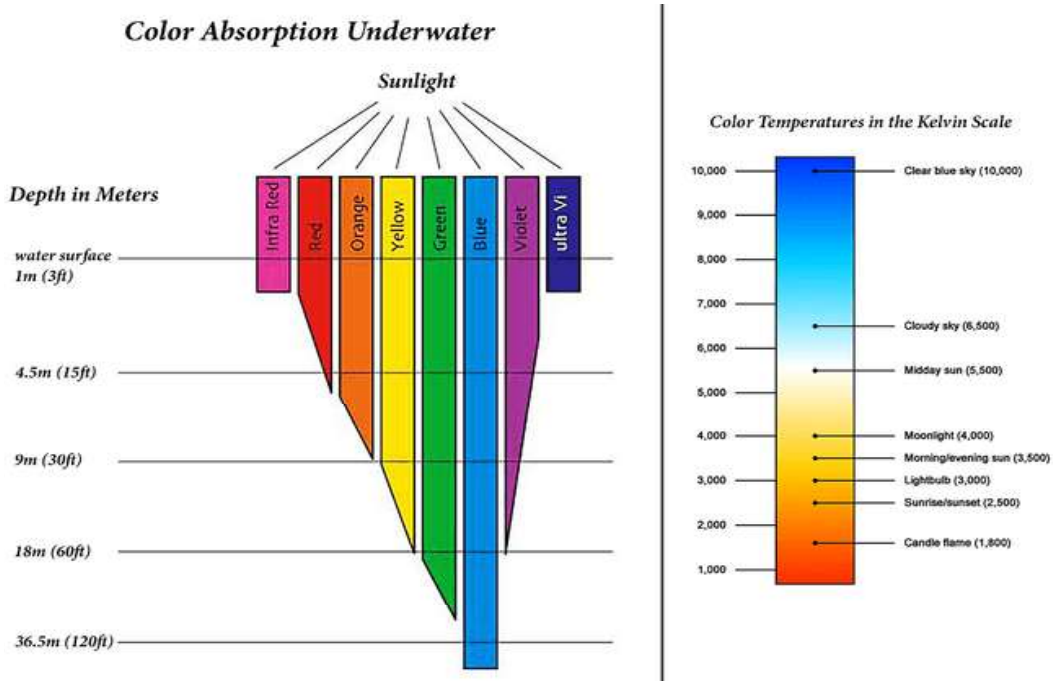
performans üzerindeki etkileri deneysel olarak analiz edilmektedir (Kocaaslan, 2013). Özellikle pompa çarkı ve gövdesindeki kaplama etkileri ile yüzey pürüzlülüğünün hidrolik verim, basma yüksekliği ve mil gücü üzerindeki değişimleri hem deneysel hem de sayısal yöntemlerle incelenmiştir (Kocaaslan vd., 2016a, 2016b). Buna ek olarak, itki sistemlerinin tasarımında kanat sayısının ve bölücü kanat (splitter blade) kullanımının performans üzerindeki etkileri, sayısal analizler yardımıyla optimize edilerek su altı operasyonlarında enerji verimliliği maksimize edilmektedir (Kocaaslan vd., 2015, 2017).

Su altı araçlarının navigasyon ve nesne tespit yetenekleri, suyun optik karakteristikleri tarafından belirlenen fiziksel bir "görüş küresi" içine hapsedilmiştir. Işığın su altındaki yayılımı; Rayleigh ve Mie saçılması prensipleri doğrultusunda hem soğurulma hem de saçılma etkilerine maruz kalmaktadır (Shashar ve ark. 2011; Lanbo ve ark. 2008). Berrak okyanus sularında dahi, nesne tespiti ve görsel navigasyon için kullanılan polarizasyon deseni gibi ileri düzey optik ipuçlarının 15 metre derinlikten sonra fiziksel olarak bozulduğu ve işlevselliğini yitirdiği kanıtlanmıştır (Shashar ve ark. 2011). Bu mesafe kısıtı, otonom bir aracın çevresini algılama ve boru hattı gibi yatay nesneleri takip etme sürecinde, geleneksel yöntemlerin neden başarısız olduğunu açıklamaktadır. Özellikle bulanık sularda, saçılan ışığın yarattığı örtücü ışık etkisi, nesne ile arka plan arasındaki kontrastı tamamen yok ederek standart yoğunluk tabanlı algoritmaları etkisiz kılmaktadır (Shashar ve ark. 2011; Breneman ve ark. 2014).

Su altı görüntüleme sistemlerinin karşılaştığı en karakteristik sorun, ışığın dalga boyuna (λ) bağlı olarak homojen olmayan bir şekilde sönümlenmesidir. Lambert-Beer yasası uyarınca, uzun dalga boyuna sahip kırmızı ışık su katmanlarında ilk birkaç metrede soğurulurken, mavi ve yeşil dalga boyları daha derinlere nüfuz edebilmektedir (Vasilescu ve ark. 2011; Peng ve ark. 2017). Bu fiziksel gerçeklik, su altı görüntülerinin baskın bir mavi-yeşil tona bürünmesine ve nesnelerin gerçek renk bilgilerinin kaybolmasına neden olur. Geleneksel yazılımsal iyileştirme yöntemleri, sensöre hiç ulaşmamış olan bu kırmızı verisini geri getirmeye çalışırken görüntüdeki gürültü seviyesini artırmaktadır (Vasilescu ve ark. 2011; Breneman ve ark. 2014).

Buna ek olarak, su içerisindeki askıda katı maddelerin ışığı kameraya doğru geri yansıtmasıyla oluşan geri saçılım etkisi, görüntüde yoğun bir

puslanma yaratarak sinyalin %50'sine kadar olan kısmını gürültüye dönüştürebilmektedir (Breneman ve ark. 2014). Görüntüdeki bu bozulmaların giderilmesi için geliştirilen restorasyon modelleri; bulanıklık, kırmızı kanal kaybı ve maksimum yoğunluk önermesi gibi hibrit derinlik tahmin ipuçlarını bir arada kullanmak zorundadır. Ancak sığ sulardaki yapay ışıklandırma ve değişken aydınlatma koşulları, tek parametrelili derinlik tahminlerini hatalı kılmakta, bu da otonom araçlar için daha adaptif ve dirençli algılama mimarilerinin geliştirilmesini zorunlu kılmaktadır (Peng ve ark. 2017). Şekil 2'de güneş ışınlarının su ortamında sönümlenim dağılımı görülmektedir.



Şekil 2. Güneş ışınlarının su ortamında sönümlenim dağılımı

Su altındaki bu ekstrem fiziksel ve optik zorluklar, otonom araçların sadece basit görüntü işleme filtreleriyle yönetilemeyeceğini açıkça ortaya koymaktadır. Görüntünün fiziksel olarak bozulduğu, haberleşme bant genişliğinin kısıtlı olduğu ve navigasyon verilerinin gürültülü olduğu bu ortamda; karmaşık sahneleri analiz edebilen transformer tabanlı modeller ve verimliliği artırılmış derin öğrenme mimarileri bir çözüm anahtarı sunmaktadır.

Bu çalışma, geleneksel yöntemlerin limitlerinden yola çıkarak, kısıtlı donanım kaynaklarına sahip platformlar üzerinde MobileNetV2 tabanlı bir segmentasyon modelinin geliştirilmesini ve su altı boru hattı takibi görevindeki başarımı üzerine odaklanmaktadır. Takip eden bölümlerde, bu

optik engellerin donanım hızlandırıcılar ve optimize edilmiş algoritmalar ile nasıl aşıldığı deneysel verilerle sunulacaktır.

MATERYAL VE METOT

Bu çalışma, kısıtlı donanım kaynaklarına sahip bir su altı aracının, değişken çevresel koşullar altında boru hattı takibi görevini otonom olarak icra edebilmesi için geliştirilen hibrit bir mimariyi kapsamaktadır. Sistem tasarımı; donanım bileşenlerinin seçimi, geleneksel görüntü işleme algoritmalarının kurulumu ve derin öğrenme tabanlı segmentasyon modellerinin optimizasyonu olmak üzere üç ana fazda ele alınmıştır.

Donanım Mimarisi

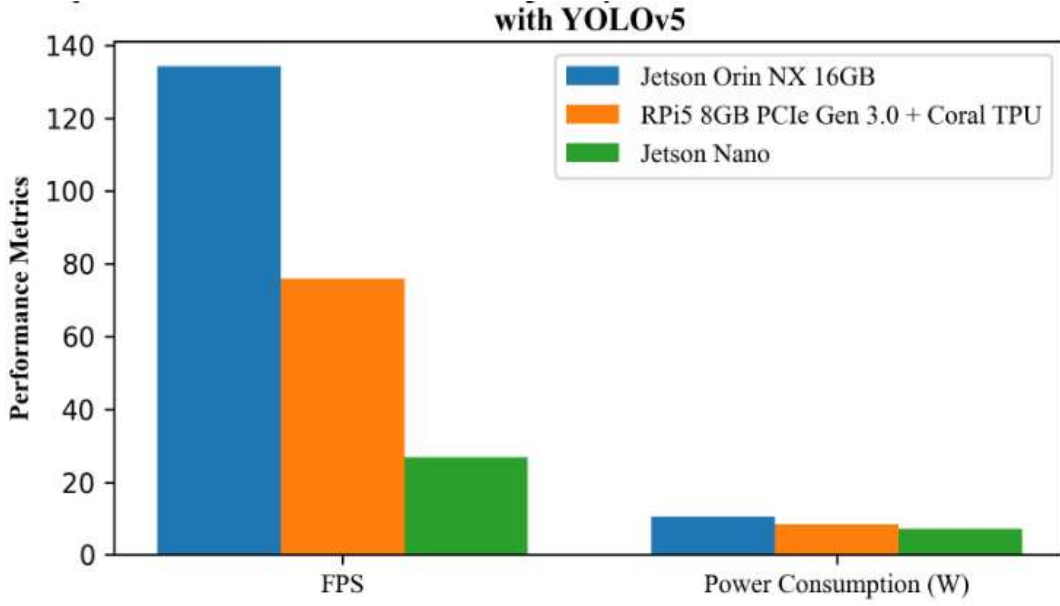
Su altı otonom sistemlerinin (AUV) operasyonel başarısı, kısıtlı bir enerji bütçesi altında yüksek hesaplama yükünü yönetebilen donanım mimarilerine bağlıdır. Bu çalışmada, boru hattı takibi gibi gerçek zamanlılık ve yüksek hassasiyet gerektiren bir görev için Raspberry Pi 5 ve Google Coral USB Accelerator tabanlı bir uç bilişim (edge computing) mimarisi tasarlanmıştır. Şekil 3’de Raspberry Pi ve Google Coral USB Accelerator fotoğrafı görülmektedir



Şekil 3. Raspberry Pi ve Google Coral USB Accelerator

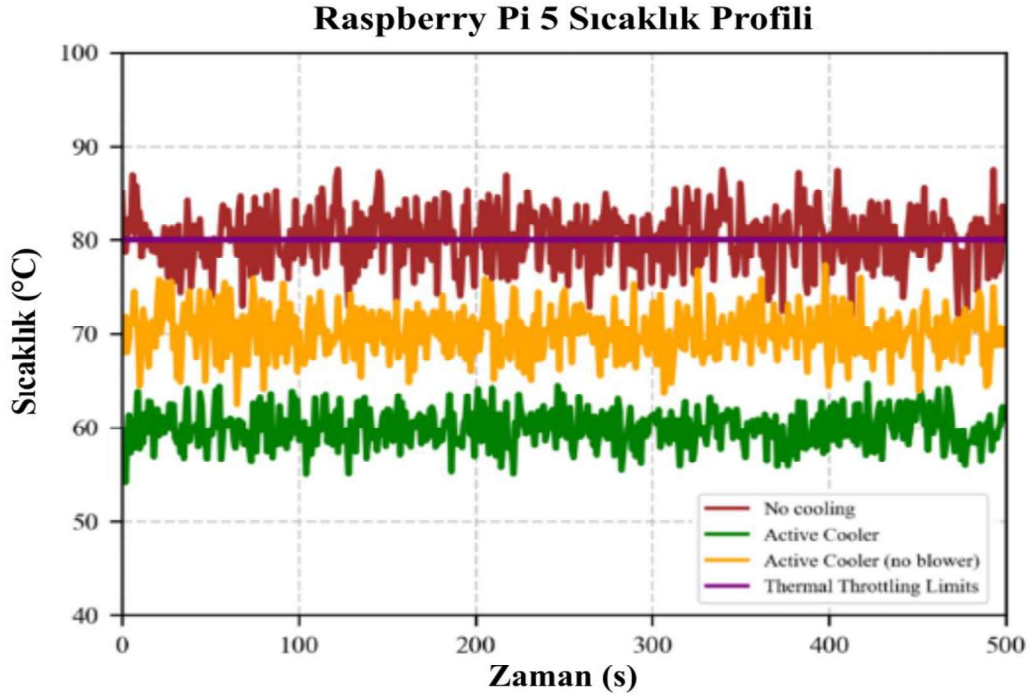
Sistemin ana kontrol ünitesi olarak tercih edilen Raspberry Pi 5, Broadcom BCM2712 yonga seti üzerine inşa edilmiştir. Bu SoC (System on Chip), 2.4 GHz hızında çalışan dört çekirdekli 64-bit Arm Cortex-A76 CPU mimarisine sahiptir ve çekirdek başına 512 KB L2 önbellek ile 2 MB paylaşımlı L3 önbellek barındırmaktadır (www.raspberrypi.com). Su altı görüntülerinin hızlı işlenmesi için bellek bant genişliği kritik bir parametredir. Cihazın kullandığı LPDDR4X-4267 SDRAM teknolojisi, görüntü karelerinin RAM ve CPU/TPU arasındaki transferinde gecikmeyi minimize etmektedir (www.raspberrypi.com). Yapılan performans kıyaslamalarında, bu mimarinin tamsayı işlem kapasitesinde önceki nesillere göre %200 artış sunduğu ve bazı özel NPU (Neural Processing Unit) birimlerinden daha yüksek saf CPU performansı sergilediği gözlemlenmiştir (Breneman ve ark. 2024; Minott ve ark. 2025; Baller ve ark. 2021). Cihaz üzerindeki iki adet USB 3.0 portu, eş zamanlı olarak 5 Gbps hızında çalışabilmektedir (www.raspberrypi.com). Bu özellik, hem yüksek çözünürlüklü kamera verisinin akışını hem de Coral TPU ile yapılan yüksek hızlı çıkarım verilerinin senkronizasyonunu darboğaz oluşmadan sağlamaktadır.

Derin öğrenme modellerinin evrimsel katmanları, yoğun matris çarpım işlemleri gerektirir. Raspberry Pi 5'in CPU gücü her ne kadar yüksek olsa da, derin öğrenme iş yüklerinde tek başına kullanımı çıkarım hızını saniyede 1.7 kare (FPS) gibi operasyonel olarak yetersiz seviyelere düşürmektedir (Narayanaswamy, 2014). Bu kısıtı aşmak için sisteme Google Coral USB Accelerator entegre edilmiştir. Coral TPU, 4 TOPS (Trillion Operations Per Second) toplam tepe performansına sahip özelleşmiş bir ASIC birimidir. Özellikle INT8 kuantizasyonu uygulanmış modellerde Watt başına 2 TOPS gibi yüksek bir verimlilik sunmaktadır. Edge TPU mimarisi, MobileNetV2 gibi güncel bilgisayarlı görüş modellerini 400 FPS'ye varan teorik hızlarda çalıştırabilmektedir (www.coral.ai/docs/accelerator/datasheet/). Ancak pratik uygulamalarda, Raspberry Pi 4 ve 5 ile yapılan testler, YOLOv5 gibi modellerle yaklaşık 21.5 FPS seviyelerinde bir çıkarım hızı elde edilebildiğini göstermektedir (Minott ve ark. 2025). Bu hız, su altı aracının otonom navigasyon döngüsü için gereken gerçek zamanlı veri ihtiyacını fazlasıyla karşılamaktadır. Şekil 4'te nesne tespiti performans karşılaştırması görülmektedir.



Şekil 4. Nesne tespiti performans karşılaştırması

Donanım mimarisinin sızdırmaz bir su altı gövdesi içerisindeki ısı karakteristiği, sistemin en kritik noktalarındandır. Raspberry Pi 5, yoğun iş yükleri altında aktif soğutma olmaksızın hızla 80°C sınırına ulaşmakta ve bu noktada performansını düşürerek (thermal throttling) sistem kararlılığını bozmaktadır (Minott ve ark. 2025; www.raspberrypi.com). Coral TPU'nun maksimum frekansta çalıştırılması durumunda cihaz yüzeyinin yüksek sıcaklıklara ulaştığı dokümanlarda belirtilmiştir (www.coral.ai/docs/accelerator/datasheet/). Arrhenius Yasası'na göre, su altı elektroniğindeki her 10°C sıcaklık artışı, bir mikrobilgisayarın arıza olasılığını (FIT) üssel olarak artırarak %3.1'den %32.6 seviyelerine çıkarabilmektedir (Xu ve ark. 2024). Coral TPU için önerilen maksimum ortam sıcaklığı, maksimum çalışma frekansında sadece 25°C'dir (www.coral.ai/docs/accelerator/datasheet/). Su altı aracının kapalı hacmindeki sıcaklık birikimi göz önüne alındığında, sistemin kararlılığı için donanımın gövdeye ısı transferini sağlayacak pasif soğutma blokları veya aktif ısıl yönetim stratejileriyle desteklenmesi mühendislik açısından zorunluluk arz etmektedir (Xu ve ark. 2024). Şekil 5. Raspberry Pi 5 model çıkarım sıcaklık performansı görülmektedir.



Şekil 5. Raspberry Pi 5 model çıkarım sıcaklık performansı

AUV sistemlerinde güç tüketimi, doğrudan görev süresini belirleyen bir faktördür. Raspberry Pi 5, tam performans için USB-C üzerinden 5V/5A (27W) değerinde bir güç kaynağına ihtiyaç duymaktadır (www.raspberrypi.com). Coral TPU, yük altında anlık olarak 900 mA pik akım çekebilmektedir (www.coral.ai/docs/accelerator/datasheet/). Toplamda Raspberry Pi 5 ve Coral TPU kombinasyonu, çıkarım sırasında yaklaşık 8.3 Watt güç tüketerek, NVIDIA Jetson Orin NX gibi 10.6 Watt tüketen yüksek performanslı sistemlere göre daha ekonomik bir profil çizmektedir (Minott ve ark. 2025). Coral TPU'nun sunduğu Watt başına performans avantajı, su altı aracındaki kısıtlı batarya kapasitesinin verimli kullanılmasını sağlar. Ancak, USB üzerinden bağlanan hızlandırıcıların bekleme modundaki (idle) güç tüketiminin, entegre çözümlere göre daha yüksek olduğu da literatürde belirtilen operasyonel bir kısıttır (Narayanaswamy, 2014).

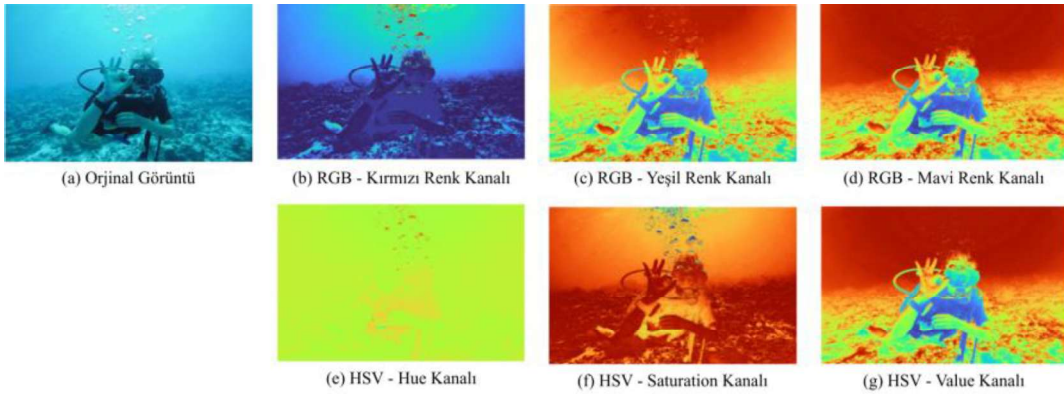
Yazılım Metodolojisi

Su altı boru hattı takip görevi için sistem tasarımı, iki farklı metodolojik yaklaşımın performansını kıyaslamak üzere kurgulanmıştır. Bu yaklaşım, düşük işlem gücü gerektiren geleneksel yöntemler ile yüksek genelleştirme yeteneğine sahip derin öğrenme modelleri arasındaki verimlilik farklarını

ortaya koymayı amaçlar.

Su altı ortamı; ışığın saçılması ve kırmızı dalga boyunun hızla emilmesi nedeniyle düşük kontrastlı ve mavi-yeşil tonların hâkim olduğu bir karakter sergiler. Bu durum, boru hattı gibi nesnelerin ayırt edilmesini zorlaştıran pus (haze) etkisine neden olur.

Geleneksel yöntemler renk ve şekil özelliklerine dayanarak tespit yapan algoritmalarlardır. Derin öğrenme modellerinin gerektirdiği eğitim sürecine ihtiyaç duymadan, doğrudan piksel manipülasyonu ile çalışırlar. Literatürde, RGB renk uzayının su altındaki ışık değişimlerine karşı hassas olduğu ve bu nedenle insan renk algısına daha yakın olan HSV uzayının tercih edilmesi gerektiği vurgulanmaktadır. Bu çalışmada, boru hattı rengini izole etmek amacıyla HSV (Hue, Saturation, Value) uzayı kullanılmıştır. (Dewangan ve ark. 2017) tarafından önerilen hibrit yaklaşıma paralel olarak, parlaklık (Value) kanalı üzerinde kontrast germe işlemleri uygulanarak görüntüdeki detay miktarı (Entropi) artırılmıştır. Yapılan analizler, bu tür bir renk iyileştirmenin sinyal kalitesini (PSNR) 63 dB seviyelerine kadar çıkarabildiğini göstermektedir (Dewangan ve ark. 2017). Şekil 6'da RGB ve HSV renk uzayı kanal değerleri örneği görülmektedir.



Şekil 6. RGB ve HSV renk uzayı kanal değerleri örneği

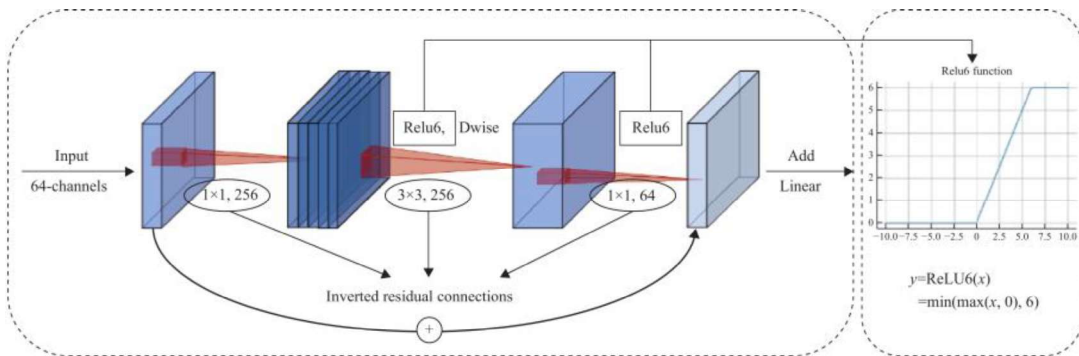
Geleneksel yöntemlerle yapılan renk maskeleme ve kontur analizi, literatürde "el yapımı özellik çıkarma" olarak tanımlanır. Ancak bu yöntemler, uzman yorumuna dayalı eşik değerleri gerektirdiği için değişken su altı koşullarında kırılgan hale gelmektedir (Hegde ve ark; 2019). Bu çalışmada, geleneksel yöntemler sadece aday bölgeleri belirlemek için ön işleme aşamasında tutulmuş; nihai karar mekanizması, özellikleri kendi kendine öğrenebilen derin öğrenme modellerine

devredilmiştir.

Derin öğrenme mimarisi olarak, kısıtlı kaynaklara sahip bir platform olan Raspberry Pi 5 ve Edge TPU üzerinde gerçek zamanlı segmentasyon yapabilmek için MobileNetV2 mimarisi tercih edilmiştir. Bu mimari, Xception gibi ağır modellerin hesaplama maliyetini düşürmek amacıyla geliştirilen prensipler üzerine kurulmuştur (Hasan ve ark. 2024).

Standart konvolüsyon işlemlerinin aksine, MobileNetV2 uzamsal (spatial) ve kanallar arası (cross-channel) özellikleri ayrı ayrı öğrenir (Hasan ve ark. 2024). Sandler ve arkadaşlarının (Sandler ve ark. 2018) çalışmasında belirtildiği üzere, bu teknik, parametre sayısını ve işlem yükünü yaklaşık 8 ila 9 kat düşürerek modelin 3.4M parametre gibi kompakt bir boyutta kalmasını sağlar. Mimari, bellek verimliliğini artırmak için "dar-geniş-dar" yapısındaki blokları kullanır. Düşük boyutlu katmanlarda veri kaybını önlemek amacıyla ReLU gibi doğrusal olmayan aktivasyon fonksiyonları yerine Doğrusal Darboğazlar (Linear Bottlenecks) kullanılmıştır (Sandler ve ark. 2018). Bu yapı, su altı görüntülerindeki düşük kaliteli özneteliklerin derin katmanlara bilgi kaybı olmadan aktarılmasını sağlar.

MobileNetV2 mimarisindeki iş yükünün %90'ından fazlası 1x1 (noktasal) konvolüsyonlardan oluşmaktadır. Bu mimari tercih, donanım seviyesinde veri hareketini minimize ederek enerji tüketimini düşürmekte ve Edge TPU gibi hızlandırıcıların 3.13 TOPS/W gibi yüksek verimlilik değerlerine ulaşmasına olanak tanımaktadır (Chong ve ark. 2021). Şekil 7'de MobileNet mimari yapısı görülmektedir.



Şekil 7. MobileNet mimari yapısı

Eğitilen MobileNetV2 modelinin otonom navigasyon döngüsüne (>20 FPS) entegre edilebilmesi için TensorFlow Lite çerçevesi kullanılarak optimizasyon yapılmıştır. Modelin 32-bit kayan noktalı (Float32) ağırlıkları 8-bit tam sayı formatına dönüştürülmüştür. Bu işlem, model

boyutunu küçültmenin yanı sıra, Edge TPU donanımının çalışma prensibiyle tam uyum sağlayarak bellek darboğazlarını ortadan kaldırır (Chong ve ark. 2021). Boru hattını sadece bir nesne kutusu içine alan nesne tespiti modellerinin aksine, segmentasyon yaklaşımı her pikseli sınıflandırır. Bu, aracın boru hattının merkez eksenini (centerline) ve yönelim açısını (heading) milimetrik hassasiyetle hesaplamasını sağlayarak, basit bir tespitten öte hassas navigasyon kabiliyeti sunar.

Modelin dayanıklılığını artırmak için kullanılan veri seti, sadece temiz havuz görüntülerini değil; puslu, yansımali ve renk bozulmasına uğramış gerçek deniz ortamlarını simüle eden verilerle zenginleştirilmiştir. Veri artırma aşamasında yapay pus ve renk kayması efektleri uygulanmıştır. Şekil 8’de kullanılan veri setinden örnekleri görülmektedir.



Şekil 8. Kullanılan veri setinden örnekler

BULGULAR

Bu bölümde; geliştirilen hibrit sistemin çıkarım performansı, tespit doğruluğu ve ısı kararlılığına dair elde edilen deneysel veriler sunulmuş ve literatürdeki benzer çalışmalarla kıyaslanarak tartışılmıştır. Sistemin gerçek zamanlı çalışma kabiliyeti, saniyedeki kare sayısı (FPS) ve çıkarım süresi üzerinden değerlendirilmiştir. Yapılan testler sonucunda elde edilen veriler Tablo 1’de özetlenmiştir.

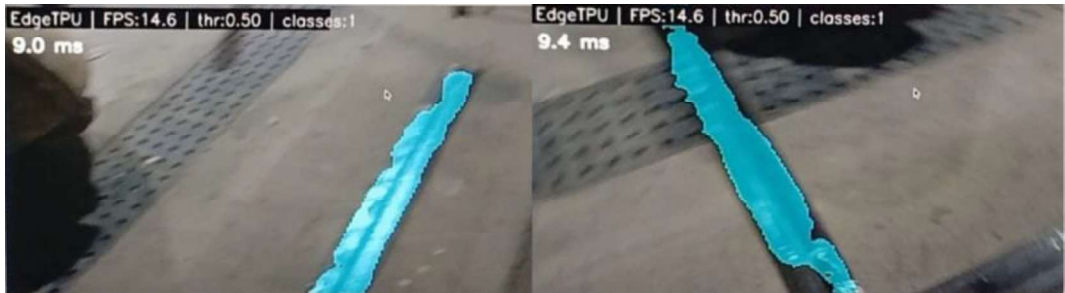
Tablo 1. Algoritma-Donanım performans karşılaştırması

Konfigürasyon	Algoritma	Ortalama FPS	Çıkarım Süresi (ms)
RPi 5 (CPU)	Geleneksel Görüntü İşleme	~15.5	~65 ms
RPi 5 (CPU)	MobileNetV2 + FPNLite (Quant)	~4	~250 ms
RPi 5 + Coral TPU	MobileNetV2 + FPNLite (Quant)	~15	~9 ms

Geleneksel görüntü işleme yöntemleri, düşük hesaplama maliyeti sayesinde Raspberry Pi 5 üzerinde 15-16 FPS ile stabil bir çalışma sergilemiştir. Ancak, derin öğrenme modelinin (MobileNetV2 + FPNLite) sadece CPU üzerinde koşturulması, FPS değerini 4 seviyesine düşürerek otonom navigasyon için gereken gerçek zamanlılık kriterinin altında kalmıştır. Google Coral TPU entegrasyonu ile bu değer tekrar 15 FPS seviyesine yükseltilmiştir. Şekil 9’da görüntü işleme ile kablo hattı tespiti ve şekil 10’da da MobileNetV2 modeli ile kablo tespiti görülmektedir.



Şekil 9. Görüntü işleme ile kablo hattı tespiti

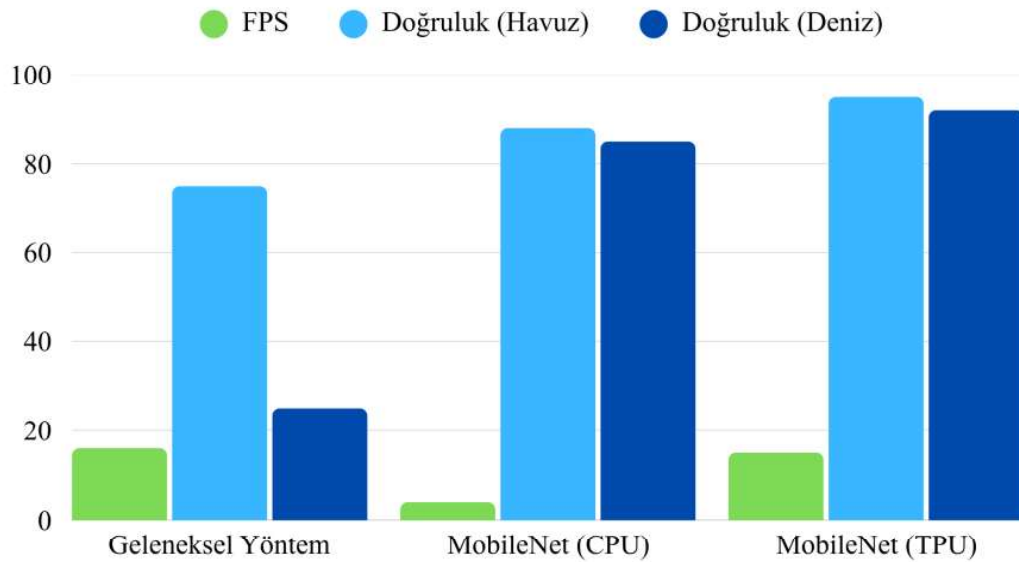


Şekil 10. MobileNetV2 modeli ile kablo tespiti

Yapılan teknik analizde, MobileNetV2 modelinin Edge TPU üzerindeki saf çıkarım süresinin 9 ms olduğu ölçülmüştür. Teorik olarak bu süre saniyede 100 karenin üzerinde bir işlem kapasitesine işaret etse de, sistem

geneli 15 FPS’de sınırlı kalmıştır. Bu durum, görüntünün kamera sensöründen alınması, ön işlemeden geçirilmesi ve USB 3.0 yolu üzerinden TPU’ya transfer edilmesi süreçlerinde oluşan veri yolu gecikmesi ve işlemci üzerindeki I/O yükünden kaynaklanmaktadır. Bu bulgu, uç bilişim cihazlarında sadece model hızının değil, donanım bileşenleri arasındaki veri akış hızının da toplam sistem performansı üzerinde belirleyici olduğunu kanıtlamaktadır (Narayanaswamy, 2014; Chong ve ark. 2021).

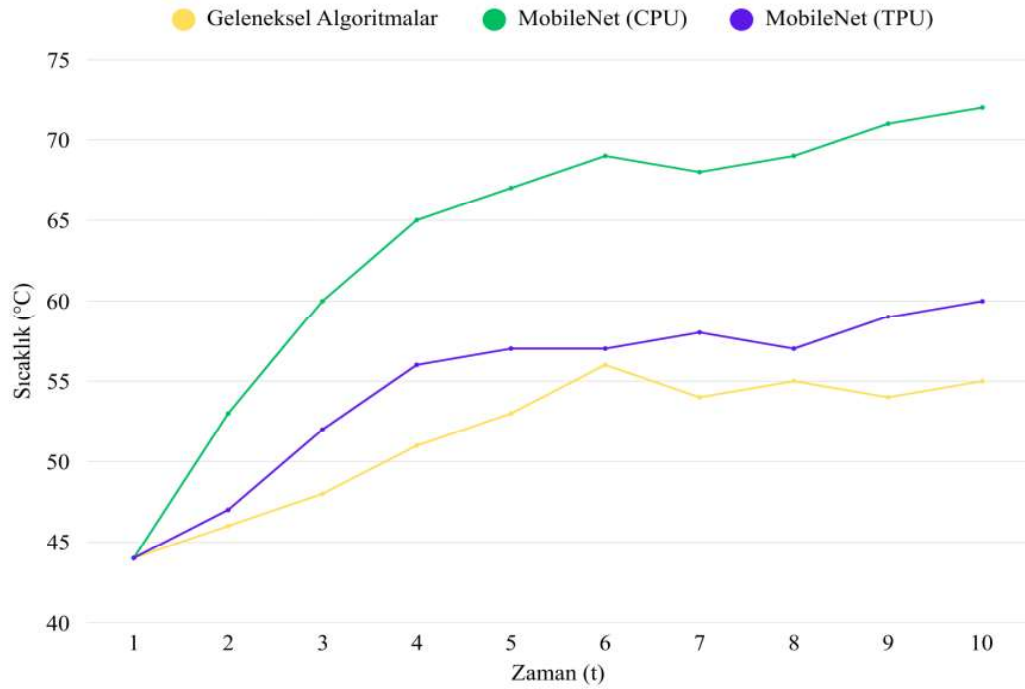
Algoritmaların başarısı; kontrollü havuz ortamı ve yüksek bulanıklığa sahip su senaryoları altında test edilmiştir. Renk tabanlı maskeleye yöntemi, havuz ortamında %70-80 oranında başarı sergilese de; bulanık su ve değişken ışık koşullarında bu oran %20-30 seviyelerine kadar gerilemiştir. Bu durum, suyun ışığı soğurma karakteristiği nedeniyle boru hattı renginin (H/S kanalları) arka planla karışmasından kaynaklanmaktadır (Dewangan ve ark. 2017). MobileNetV2 + FPNLite modeli, karmaşık ve bulanık görüntülerde dahi özellik haritaları üzerinden nesne formunu tanıyarak %92 oranında bir doğruluk değerine ulaşmıştır. Bu sonuç, derin öğrenmenin sualtındaki optik bozulmaları kompanse etme konusunda geleneksel yöntemlere göre çok daha dayanıklı bir çözüm sunduğunu göstermektedir (Hegde ve ark; 2019). Şekil 11’de kullanılan yöntemlerin FPS ve doğruluk karşılaştırma grafiği görülmektedir.



Şekil 11. Kullanılan yöntemlerin FPS ve doğruluk karşılaştırma grafiği

Sualtı aracının kapalı gövdesi içerisinde donanımın ısısal karakteristiği,

uzun süreli operasyonlar için takip edilmiştir. Geleneksel görüntü işleme aşamasında CPU sıcaklığı 50-55°C seviyelerinde seyrederken, derin öğrenme modelinin Edge TPU ile kullanımı sırasında sıcaklık 60-65°C aralığında ölçülmüştür. Ölçülen bu değerler, Raspberry Pi 5'in termal kısıtlama sınırı olan 80°C'nin oldukça altındadır. Şekil 12'de Raspberry Pi 5 yönteme bağlı sıcaklık değişim grafiği görülmektedir. Coral TPU kullanımı, yoğun matris işlemlerini işlemciden devralarak hem CPU üzerindeki yükü hafifletmiş hem de ısı dağılımının sistem geneline yayılmasını sağlayarak operasyonel güvenilirliği artırmıştır. Bu bulgular, Narayanaswamy (Narayanaswamy, 2014) tarafından belirtilen sualtı elektroniğinde sıcaklık kontrolü gerekliliği ile tam uyum sağlamaktadır.



Şekil 12. Raspberry Pi 5 yönteme bağlı sıcaklık değişim grafiği

SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, kısıtlı donanım kaynaklarına sahip otonom sualtı araçları (AUV) için geliştirilen, derin öğrenme tabanlı ve donanım hızlandırmalı bir boru hattı takip sistemi tasarlanmış ve test edilmiştir. Elde edilen bulgular, sistemin hem operasyonel verimliliğini hem de akademik geçerliliğini ortaya koymaktadır.

Çalışma kapsamında Raspberry Pi 5 ve Google Coral TPU entegrasyonu ile oluşturulan uç bilişim mimarisi, sualtı görevleri için

optimize edilmiş bir performans sergilemiştir. Geleneksel görüntü işleme yöntemlerinin havuz gibi kontrollü ortamlarda düşük işlem yüküyle başarılı sonuçlar verdiği görülse de, gerçek deniz ortamlarını temsil eden bulanık ve düşük kontrastlı senaryolarda bu yöntemlerin başarısının %20-30 seviyelerine düştüğü saptanmıştır. Buna karşın, MobileNetV2 ve FPNLite tabanlı segmentasyon modeli, aynı zorlayıcı koşullar altında %92 doğruluk oranına ulaşarak görsel dayanıklılığını kanıtlamıştır.

Yapılan deneysel çalışmalar, otonom sualtı navigasyonu gibi yüksek işlem yükü gerektiren görevlerde donanım hızlandırmanın opsiyonel bir tercih değil, operasyonel bir zorunluluk olduğunu ortaya koymuştur. Raspberry Pi 5'in yüksek CPU frekansına rağmen, anlamsal segmentasyon modellerinin sadece merkezi işlem birimi üzerinde koşturulması, saniyede yalnızca 4 karelik (FPS) bir hız sunabilmiştir. Bu hızın, bir sualtı aracının dinamik çevresel koşullara tepki vermesi için gereken gerçek zamanlılık eşiğinin çok altında kaldığı tespit edilmiştir. Ancak, Google Coral TPU hızlandırıcısının sisteme entegrasyonu ile çıkarım hızı yaklaşık 4 kat artarak otonom karar verme döngüsüyle uyumlu hale getirilmiştir. Bu bulgu, kısıtlı donanım kaynaklarında derin öğrenme tabanlı segmentasyonun, doğru donanım-yazılım eşleşmesiyle (co-design) sürdürülebilir olduğunu kanıtlamaktadır.

Çalışmanın en dikkat çekici mühendislik bulgularından biri, Edge TPU üzerindeki saf model çıkarım süresinin 9 ms (teorik olarak 111 FPS) gibi oldukça düşük bir değerde ölçülmesine rağmen, uçtan uca sistem performansının 15 FPS seviyelerinde sınırlı kalmasıdır. Bu durum, sualtı görüntüleme sistemlerinde toplam gecikme süresinin sadece yapay zekâ çıkarım süresinden ibaret olmadığını; görüntünün kamera sensöründen yakalanması, ön işlemeden geçirilmesi ve USB 3.0 yolu üzerinden bellek hattına aktarılması süreçlerinde önemli bir veri yolu gecikmesi yaşandığını göstermektedir. Bu tespit, gelecekteki otonom araç tasarımlarında sadece işlemci gücüne odaklanmak yerine, veri transfer protokollerinin ve bellek bant genişliğinin de sistem mimarisinin merkezine konulması gerektiğini bilimsel olarak doğrulamaktadır.

Sualtı araçlarının sızdırmaz gövdeleri içerisindeki ısı birikim, elektronik bileşenlerin ömür ve performans kararlılığını doğrudan etkileyen kritik bir parametredir. Geliştirilen hibrit mimarinin, yoğun yapay zekâ yükü altında dahi 50-55°C sıcaklık aralığında stabil kalması, sistemin sualtı kapsülleri için gereken ısı limitler dahilinde güvenle

çalışabileceğini ispatlamıştır. Coral TPU kullanımı, yoğun matris hesaplamalarını CPU'dan devralarak hem merkezi işlemcinin termal yükünü hafifletmiş hem de toplam sistem güç tüketimini 8.3W seviyelerinde tutmuştur. Bu düşük güç profili, AUV platformlarının en büyük kısıtı olan batarya ömrünü korumakla kalmayıp, görev sürelerinin maksimize edilmesine olanak tanımaktadır.

Elde edilen tecrübeler ışığında, sistemin kabiliyetlerini artırmak üzere bir dizi geliştirme önerisi sunulmaktadır. İlk olarak, USB 3.0 arayüzünden kaynaklanan iletişim darboğazının aşılması için Raspberry Pi 5'in sunduğu PCIe 2.0 genişleme hattı üzerinden M.2 formatındaki Edge TPU birimlerinin sisteme doğrudan entegre edilmesi planlanmaktadır. Bu donanımsal yükseltmenin, veri transfer hızını artırarak FPS değerlerini 30+ seviyelerine taşıyacağı öngörülmektedir. Yazılım tarafında ise, doğruluk oranını %92'nin üzerine çıkarmak amacıyla, model çıkarım süresini etkilemeyecek şekilde optimize edilmiş "Karanlık Kanal Önermesi" (DCP) gibi gelişmiş ön işlem katmanlarının eklenmesi hedeflenmektedir. Ayrıca, bu düşük maliyetli ve yüksek verimli algılama biriminin, birden fazla aracın koordineli çalıştığı sürü robotik görevlerinde merkezi olmayan birer zeki düğüm olarak kullanılması, sualtı araştırmalarında yeni bir perspektif sunacaktır.

KAYNAKÇA

- Baller, S. P., Jindal, A., Chadha, M., ve Gerndt, M. (2021, Ekim). DeepEdgeBench: Benchmarking deep neural networks on edge devices [Bildiri sunumu]. 2021 IEEE International Conference on Cloud Engineering (IC2E), 20–30.
- Baran, R., & Neşeli, S. (2025). Al7075 T6 alüminyum alaşımı malzemenin torna tezgâhında işlenebilirliğinin kesme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğüne göre değerlendirilmesi [Conference presentation]. 4th International Conference on Contemporary Academic Research.
- Baran, R., & Neşeli, S. (2025). Ti6Al4V titanyum alaşımı malzemenin torna tezgâhında işlenmesinde değişken kesme hızının kesme kuvveti ve takım ucu sıcaklığına etkisi [Conference presentation]. 7th International Conference on Applied Engineering and Natural Sciences (ICAENS 2025).
- Baran, R., & Neşeli, S. (2025). Effect of machinability parameters on cutting force in the turning of 25CrMo4 steel [Conference presentation]. 3rd International Conference on Modern and Advanced Research (ICMAR 2025).
- Breneman IV, J., Blasinski, H., ve Farrell, J. (2014, Mart). The color of water: Using underwater photography to estimate water quality [Bildiri sunumu]. Digital Photography X (Cilt 9023, ss. 224-234). SPIE.
- Chong, Y. S., Goh, W. L., Ong, Y. S., Nambiar, V. P., ve Do, A. T. (2021, Mayıs). An energy-efficient convolution unit for depthwise separable convolutional neural networks [Bildiri sunumu]. 2021 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS), 1–5.
- Coral. (2025, 9 Aralık). USB Accelerator datasheet. <https://www.coral.ai/docs/accelerator/datasheet/>
- Cossu, G., Sturniolo, A., Messa, A., Grechi, S., Costa, D., Bartolini, A., ... ve Ciaramella, E. (2018). Sea-trial of optical ethernet modems for underwater wireless communications. *Journal of Lightwave Technology*, 36(23), 5371-5380.
- Cossu, G., Sturniolo, A., Messa, A., Scaradozzi, D., ve Ciaramella, E. (2017). Full-fledged 10Base-T ethernet underwater optical wireless communication system. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 36(1), 194-202.
- Dewangan, S. K. (2017, Mayıs). Visual quality restoration & enhancement of underwater images using HSV filter analysis [Bildiri sunumu]. 2017 International Conference on Trends in Electronics and Informatics (ICEI), 766-772.
- Hasan, M. A., ve Dey, K. (2024). Depthwise separable convolutions with deep residual convolutions. arXiv. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2411.07544>
- Hegde, R. B., Prasad, K., Hebbar, H., ve Singh, B. M. K. (2019). Comparison of traditional image processing and deep learning approaches for classification of white blood cells in peripheral blood smear images. *Biocybernetics and Biomedical Engineering*, 39(2), 382-392.
- Kocaaslan, O. (2013). An experimental investigation of surface roughness influence on centrifugal pump characteristics. *Experimental Fluid Mechanics*.
- Kocaaslan, O., Özgören, M., Aksoy, M. H., ve Babayiğit, O. (2016a). Experimental and numerical investigation of coating effect on pump impeller and volute. *Journal of Applied Fluid Mechanics*, 9(5), 2475–2487.
- Kocaaslan, O., Özgören, M., Babayiğit, O., ve Aksoy, M. H. (2015). Numerical investigation of splitter blade effects on centrifugal pump performances [Bildiri sunumu]. International Conference on Science, Ecology and Technology I (ICONSETE).
- Kocaaslan, O., Özgören, M., Babayiğit, O., ve Aksoy, M. H. (2016b). Numerical investigation of the surface roughness effect on the hydraulic efficiency head and shaft power for a single stage centrifugal pump [Bildiri sunumu]. 8th Ege Energy Symposium and Exhibition.
- Kocaaslan, O., Özgören, M., Babayiğit, O., ve Aksoy, M. H. (2017). Numerical investigation of the effect of number of blades on centrifugal pump performance. American Institute of

- Physics (AIP) Conference Proceedings, 1863. <https://doi.org/10.1063/1.4992181>
- Lanbo, L., Shengli, Z., ve Jun-Hong, C. (2008). Prospects and problems of wireless communication for underwater sensor networks. *Wireless Communications and Mobile Computing*, 8(8), 977-994.
- Minott, D., Siddiqui, S., ve Haddad, R. J. (2025, Mart). Benchmarking Edge AI Platforms: Performance Analysis of NVIDIA Jetson and Raspberry Pi 5 with Coral TPU [Bildiri sunumu]. *SoutheastCon 2025*, 1384-1389.
- Narayanaswamy, v. (2014). A review of thermal and humidity management needs and feasible solutions for next generation subsea electric systems. *Underwater Technology*, 32(2), 129-143.
- Peng, Y. T., ve Cosman, P. C. (2017). Underwater image restoration based on image blurriness and light absorption. *IEEE Transactions on Image Processing*, 26(4), 1579-1594.
- Raspberry Pi. (2025, 9 Aralık). Raspberry Pi 5. <https://www.raspberrypi.com/products/raspberry-pi-5/>
- Sandler, M., Howard, A., Zhu, M., Zhmoginov, A., ve Chen, L. C. (2018). MobileNetV2: Inverted residuals and linear bottlenecks [Bildiri sunumu]. *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 4510-4520.
- Shashar, N., Johnsen, S., Lerner, A., Sabbah, S., Chiao, C. C., Mäthger, L. M., ve Hanlon, R. T. (2011). Underwater linear polarization: Physical limitations to biological functions. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 366(1565), 649-654.
- Taipalmaa, J., Passalis, N., ve Raitoharju, J. (2020, Ekim). Different color spaces in deep learning-based water segmentation for autonomous marine operations [Bildiri sunumu]. *2020 IEEE International Conference on Image Processing (ICIP)*, 3169-3173.
- Unal, P., Hatipoglu, O. I., Turker, A., Unal, A. F., Deveci, B. U., Kirci, P., ve Ozbayoglu, M. (2024). Comparative analysis and performance evaluation of underwater cable detection and tracking techniques: A comprehensive survey. *International Transactions on Electrical Energy Systems*, 2024(1), 5548146.
- Vasilescu, I., Detweiler, C., ve Rus, D. (2011). Color-accurate underwater imaging using perceptual adaptive illumination. *Autonomous Robots*, 31(2), 285-296.
- Xu, S. S., ve Shue, S. (2024, Ekim). Real-Time Object Detection Algorithm Performance on Edge Computing Devices [Bildiri sunumu]. *2024 International Symposium on Networks, Computers and Communications (ISNCC)*, 1-5.

BÖLÜM 8

DC-DC BUCK KONVERTÖR

Raike Sena İSEM**, Beyza Nur MURAT**, Elif YEŞİLAY***

GİRİŞ

Günümüzde güç elektroniği sistemleri, enerji dönüşümünün verimli, güvenilir ve kompakt biçimde gerçekleştirilmesini sağlayan temel teknolojiler arasında yer almaktadır. Özellikle DC-DC dönüştürücüler, farklı gerilim seviyeleri arasında yüksek verimle dönüşüm yapabilme özellikleri sayesinde endüstride yaygın biçimde kullanılmaktadır. Geleneksel lineer regülatörler, gerilim düşürme işlemini dirençsel kayıplar üzerinden gerçekleştirirken önemli ölçüde enerji israfına neden olmaktadır. Rahman (M. S. Rahman,2007), “24V girişten 12V çıkış elde etmek isteyen bir lineer regülatörün yaklaşık %50 verimle çalıştığını ve 120W’lık ısı kaybı oluşturduğunu” belirtmiştir. Buna karşı anahtarlamalı güç kaynakları (SMPS), %80-95 arasında değişen verimlilik değerlerine ulaşarak hem ısı yönetimini kolaylaştırmakta hem de daha küçük yapılarla daha fazla güç

** Lisans Öğrencisi, Selçuk Üniversitesi Teknoloji Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Selçuklu, Konya, raikesenaisem@gmail.com, ORCID: 0009-0000-5452-4916

** Lisans Öğrencisi, Selçuk Üniversitesi Teknoloji Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Selçuklu, Konya, beyzaburmuratt@gmail.com, ORCID: 0009-0008-1358-2675

*** Lisans Öğrencisi, Selçuk Üniversitesi Teknoloji Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Selçuklu, Konya, aliffyesilay@gmail.com, ORCID: 0009-0002-1749-1507

sağlayabilmektedir (M. S. Rahman,2007). Bu fark, enerji verimliliği kritik olan sistemlerde buck konvertörlerin tercih edilmesinin temel nedenidir.

Buck konvertörler, yüksek DC gerilimleri daha düşük ve kararlı DC seviyelerine dönüştürme yetenekleri nedeniyle endüstride en çok kullanılan DC-DC topolojilerden biridir. Rahman, “buck konvertörün güç yönetimi ve mikroişlemci gerilim regülatörü (VRM) uygulamalarında en yaygın topoloji olduğunu, hızlı yük geçişlerine yanıt verebilmesi ve yüksek verimi nedeniyle tercih edildiğini” vurgulamıştır (M. S. Rahman 2007). Benzer şekilde Ürgün ve arkadaşları (Ürgün, S. ve ark. 2014), “düşürücü tip DC-DC dönüştürücülerin güç elektronığının farklı uygulama alanlarında geniş yer bulduğunu” ifade etmiş ve bu yapıların “yüksek verim, küçük hacim ve düşük maliyet avantajları” ile öne çıktığını belirtmiştir.

Buck konvertörlerin kullanım alanı yalnızca geleneksel güç kaynaklarıyla sınırlı değildir. Bu dönüştürücüler, yüksek verimlilikleri sayesinde endüstriyel uygulamalarda, DC motor sürücülerinde ve yenilenebilir enerji sistemlerinde (özellikle fotovoltaik kaynaklarda) yaygın olarak kullanılmaktadır (S. Samosir 2023). Bu kullanım alanlarına ek olarak elektrikli araç şarj istasyonlarında, lityum-iyon batarya sistemlerinde, LED sürücülerde, mikro şebekelerde ve güneş enerjisi sistemlerinde de buck konvertörler kullanılmaktadır (H. Sucu ve ark. 2021). Bu bulgular, buck konvertörlerin hem yenilenebilir enerji hem de endüstriyel kontrol alanlarında kilit öneme sahip olduğunu ortaya koymaktadır.

Modern güç elektronığı sistemlerinde yalnızca verimlilik değil, aynı zamanda kararlılık ve dinamik tepki süresi de kritik parametrelerdir. Yüksek akım ve düşük çıkış gerilimi gerektiren uygulamalarda buck konvertörün kararlılığı ve dinamik tepki performansı, sistemin kontrol yapısına doğrudan bağlıdır. Abbasi (M. U. Abbasi 2017) ve Feldman (R. Feldman 2023), dijital kontrol ve kompanzasyon ağlarının, özellikle mikrodenetleyici veya DSP (Digital Signal Processing) tabanlı sistemlerde kararlılığı artırmak ve ani yük değişimlerine hızlı yanıt sağlamak için kritik önemde olduğunu vurgulamıştır. Bu doğrultuda, STM tabanlı mikrodenetleyiciyle kontrol edilen buck konvertör tasarımları, endüstriyel sistemlerde daha hassas voltaj ve akım kontrolü sağlayarak güvenliği ve enerji verimliliğini artırmaktadır.

Güç elektroniği sistemlerinin gelişimiyle birlikte DC-DC dönüştürücüler üzerine yapılan araştırmalar artış göstermiştir. Literatürde, bu yapılar üzerinde gerçekleştirilen çalışmalar, farklı kontrol yöntemleri kullanılarak dönüştürücülerin verimliliğini ve kararlılığını artırmayı amaçlamaktadır. Gelişen mikrodeneleyici teknolojileriyle birlikte bu dönüştürücüler, artık yalnızca analog kontrol yöntemleriyle değil; dijital, bulanık mantık tabanlı veya kablosuz kontrol stratejileriyle de yönetilmektedir. Literatürde bu alanda yapılan çalışmalar, kontrol yapılarının performans, maliyet ve sistem kararlılığı üzerindeki etkilerini çeşitli yönleriyle incelemiştir.

Sucu, Göktaş ve Arkan (H. Sucu ve ark. 2021), dijital PI kontrol tabanlı bir buck dönüştürücü tasarlayarak, hem simülasyon hem de deneysel düzeyde yüksek kararlılığa sahip bir sistem geliştirmiştir. Çalışmalarında mikrodeneleyici tabanlı kontrolün, hızlı geçici tepki süresi ve düşük çıkış dalgalanması sağladığını göstermişlerdir. Ürgün ve arkadaşları (Ürgün, S. ve ark. 2014) da, benzer şekilde mikrodeneleyici temelli bir kontrol yapısı kullanarak düşük maliyetli bir buck dönüştürücü gerçekleştirmiştir. Bu araştırmada, sürekli akım modunda çalışan yapının kararlılık açısından avantajlı olduğu ve sayısal kontrolün devre karmaşıklığını azalttığı vurgulanmıştır.

PID temelli kontrol sistemleri üzerine yapılan araştırmalar (M. S. Rahman 2007), (N. Abbas 2019), klasik lineer denetim yöntemlerinin halen endüstrideki önemini koruduğunu göstermektedir. Rahman (M. S. Rahman 2007), PID kontrolün geçici durum cevabı üzerindeki etkisini incelemiş ve kazanç parametrelerinin uygun seçiminin kararlılığı belirlediğini ifade etmiştir. Benzer biçimde diğer araştırmacılar (N. Abbas 2019), PID katsayılarının analitik olarak hesaplanmasına yönelik pratik bir yaklaşım geliştirerek, dönüştürücü sistemlerin optimizasyonunu kolaylaştırmıştır.

Bulanık mantık tabanlı denetim yöntemleri, özellikle doğrusal olmayan sistemlerin kontrolünde klasik PI/PID yapılarına alternatif olarak öne çıkmaktadır. Bu alandaki çalışmalar (E. Yılmaz 2019), yük değişimlerine karşı daha kararlı bir gerilim regülasyonu sağladığını ve sistemin geçici durum tepkisini iyileştirdiğini ortaya koymuştur. Böylece bulanık mantık kontrolünün, geleneksel lineer yöntemlere kıyasla daha yüksek adaptasyon yeteneği sunduğu görülmüştür.

Enerji akışının iki yönlü olması gereken sistemlerde, senkron buck-boost dönüştürücüler üzerine yapılan çalışmalar

(R. Feldman 2023), (S. K. Mazumder ve ark. 2005) dikkat çekicidir. Bu araştırmalarda, PWM tabanlı kontrol stratejileriyle hem enerji depolama hem de boşaltma işlemlerinin yüksek verimle yapılabileceği gösterilmiştir. Ayrıca dönüştürücü parametrelerinin teorik ve deneysel uyumluluğu doğrulanarak, senkron kontrolün sistem dinamiklerine sağladığı katkılar ortaya konmuştur.

Kontrol teknolojilerindeki ilerlemelerle birlikte, kablosuz ve dağıtık yapılar da literatürde önem kazanmaktadır. Mazumder ve çalışma arkadaşları (G. R. Walker ve ark. 2002), paralel bağlı buck dönüştürücülerde kablosuz PWM kontrol yaklaşımını deneysel olarak test etmiş ve modüller arasında RF tabanlı sinyal iletiminin başarılı bir senkronizasyon sağladığını göstermiştir. Bu yöntem, fiziksel bağlantı ihtiyacını ortadan kaldırarak sistem güvenilirliğini ve ölçeklenebilirliğini artırmıştır. Walker ve Sernia, fotovoltaik sistemler için her modüle ayrı bir DC-DC dönüştürücü entegre ederek, her panelin kendi maksimum güç noktasını (MPPT) takip edebilmesini sağlamıştır. Bu yaklaşım, gölgeleme ve panel farklılıklarının sistem verimi üzerindeki olumsuz etkilerini önemli ölçüde azaltmıştır.

Endüstriyel ölçekte yapılan araştırmalar da dönüştürücü verimliliğinin artırılmasına odaklanmıştır. Infineon Technologies (H. Wang ve ark. 2021), yarı iletken anahtarların seçimi ve anahtarlama kayıplarının azaltılması üzerine kapsamlı bir analiz sunmuştur. Abbasi (M. U. Abbasi 2017), dönüştürücü kararlılığını artırmak için devre parametrelerinin optimizasyonunu ele alırken; Feldman (R. Feldman 2023), sistem verimini yükseltmeye yönelik tasarım iyileştirmeleri önermiştir.

Bu çalışmaların genel değerlendirmesi, DC-DC dönüştürücülerin gelişim sürecinin analog kontrol yöntemlerinden dijital, akıllı ve kablosuz sistemlere doğru evrildiğini göstermektedir. PI ve PID temelli kontrol sistemleri, basit yapıları ve düşük maliyetleriyle hâlen yaygın olarak kullanılmakta; ancak günümüzde bulanık mantık, dijital ve kablosuz kontrol yaklaşımları, daha yüksek dinamik performans ve adaptif davranış özellikleriyle öne çıkmaktadır. Bu doğrultuda, mevcut literatür modern kontrol stratejilerinin hem teorik hem de uygulamalı yönlerden

olgunlaşmakta olduğunu ve enerji dönüşüm sistemlerinde yeni nesil yaklaşımların temelini oluşturduğunu göstermektedir.

Bu projede ise, 12–24V aralığındaki giriş gerilimini kararlı bir şekilde 5V'a düşürerek 10A çıkış akımı sağlayabilen, yüksek verimli bir buck konvertör tasarlanması ve üretilmesi planlanmaktadır. Geliştirilecek konvertör, lineer regülatörlere kıyasla çok daha yüksek enerji verimliliği sunarak güç kayıplarını minimuma indirecek, aynı zamanda kompakt ve güvenilir bir güç çözümü oluşturacaktır. Projenin temel hedefi, hem yüksek akım gerektiren gömülü sistemlerin hem de motor sürücüleri ve yenilenebilir enerji uygulamalarının ihtiyaç duyduğu kararlı 5V besleme hattını sağlayabilecek bir dönüştürücü geliştirmektir.

Projede öncelikle buck konvertörün donanım tasarımı gerçekleştirilecektir. Bu kapsamda, yüksek akım taşıyabilen MOSFET'ler, hızlı anahtarlama sağlayan sürücü devreleri, düşük ESR'li filtre elemanları ve uygun soğutma çözümleri seçilecektir. Devrenin baskı devre (PCB) tasarımı, ısı dağılımı ve elektromanyetik girişim (EMI) etkileri dikkate alınarak optimize edilecektir. Tasarlanan devre test edilerek verimlilik, gerilim kararlılığı ve yük tepkisi gibi performans kriterleri değerlendirilecektir.

Donanımın yanı sıra, sisteme entegre edilecek STM tabanlı dijital kontrol sistemi sayesinde çıkış gerilimi ve akım sürekli olarak izlenecek ve geri besleme kontrolü sağlanacaktır. Bu kontrol yapısı, ani yük değişimlerinde gerilim kararlılığını koruyacak, aşırı akım veya sıcaklık durumlarında koruma mekanizmalarını devreye sokacaktır. Böylece proje sonucunda, hem donanım hem de gömülü yazılımı içeren, yüksek performanslı ve güvenilir bir güç dönüştürücü prototipi elde edilmesi hedeflenmektedir.

MATERYAL VE METOD

Bu çalışmada, giriş gerilimi 12V–24V aralığında değişen doğru akım (DC) kaynaklarından, yüksek akım gerektiren yükler için kararlı 5V çıkış sağlayabilen bir DC–DC buck dönüştürücü kontrol sistemi tasarlanmış ve uygulanmıştır. Sistem, kapalı çevrim çalışma prensibine sahip olup, çıkış gerilimi ve akımını gerçek zamanlı geri besleme yoluyla düzenleyen bir

mikrodenetleyici tabanlı kontrol mimarisi üzerine inşa edilmiştir. Kapalı çevrim kontrolün uygulanması, yük dalgalanmaları veya giriş gerilimindeki değişimlere rağmen çıkışın kararlı şekilde regüle edilmesine olanak tanımaktadır. Şekil 1’de tasarlanan STM32 tabanlı dijital kontrollü DC-DC konvertör sisteminin blok şeması görülmektedir.

Sistemin enerji beslemesi, 1 numaralı güç kaynağı tarafından sağlanmakta olup bu kaynak 12V–24V aralığında değişen bir giriş gerilimi üretmektedir. Bu gerilim, kontrol ünitesinin güvenli ve kararlı biçimde çalışabilmesi için 2 numaralı regülatör modülü aracılığıyla 3.3V seviyesine düşürülmüştür. STM32 mikrodenetleyici, sistemin tüm kontrol ve algılama işlemlerini gerçekleştiren merkezi birim olarak konumlandırılmıştır.

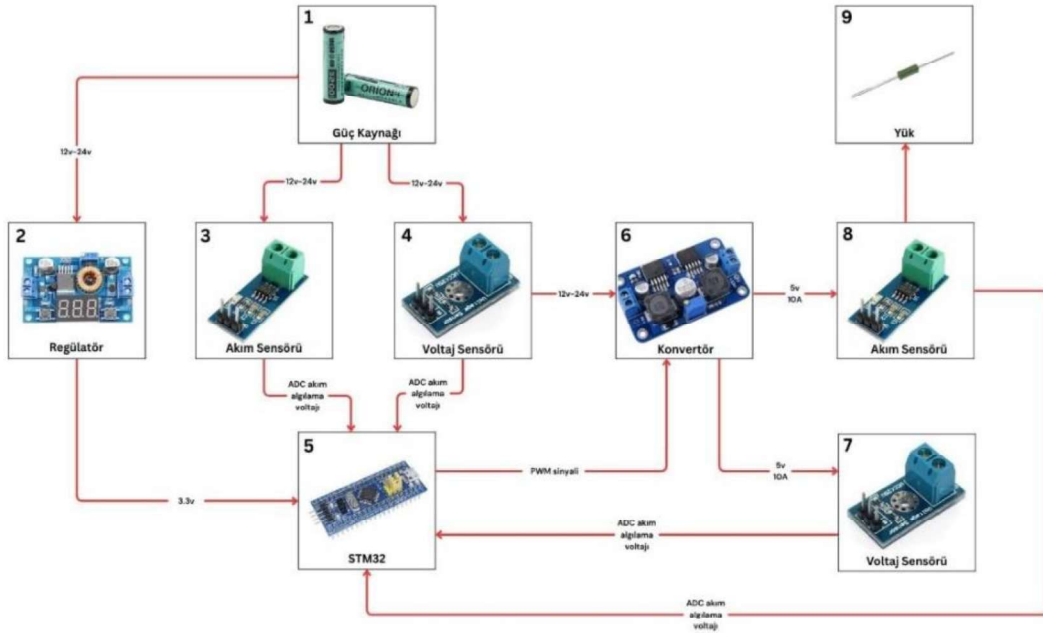
Giriş hattında yer alan 3 numaralı akım sensörü ve 4 numaralı voltaj sensörü, güç kaynağından çekilen akım ve gerilim değerlerini sürekli olarak izlemekte ve ölçtükleri büyüklükleri analog sinyal olarak STM32 mikrodenetleyicisinin analog-dijital çevirici (ADC) girişlerine aktarmaktadır. Bu sensörler aracılığıyla, sistemi besleyen kaynağın anlık durumu ve yük profiline ilişkin ön değerlendirme yapılabilir.

Mikrodenetleyici, giriş bilgilerini ve çıkış geri besleme sensörlerinden elde edilen verilere dayalı olarak, sistemde kullanılan 6 numaralı buck dönüştürücü modülünü sürmek üzere optimize edilmiş bir darbe genişlik modülasyonu (PWM) sinyali üretmektedir. Buck dönüştürücü, anahtarlama güç elektroniği prensiplerine uygun şekilde, PWM sinyali ile sürülen MOSFET yapısı üzerinden giriş gerilimini hedeflenen 5V çıkış seviyesine düşürmektedir. Bu süreçte indüktör ve kapasitör gibi enerji depolama elemanları, çıkışın istenen gerilim kararlılığında tutulmasına katkı sağlamaktadır.

Sistemin kapalı çevrim kontrol yapısının bir parçası olarak, dönüştürücünün çıkış hattında 7 numaralı voltaj sensörü ve 8 numaralı akım sensörü konumlandırılmıştır. Bu sensörler, 9 numaralı yük üzerinden çekilen akım ve oluşan çıkış gerilimini gerçek zamanlı olarak ölçmekte ve analog geri besleme sinyallerini STM32 mikrodenetleyicisine iletmektedir. Mikrodenetleyici, bu geri besleme sinyallerini referans çıkış değeri (5V) ile sürekli olarak karşılaştırmakta ve hesapladığı hata miktarına göre PWM sinyalinin görev döngüsünü dinamik biçimde ayarlamaktadır. Böylece, giriş gerilimindeki dalgalanmalara veya yükteki ani değişimlere rağmen

çıkış gerilimi ve akımı istenen düzeyde korunmaktadır.

Bu çalışma ile, yüksek doğrulukta ölçüm ve gerçek zamanlı kontrol kabiliyeti sunan STM32 mikrodenetleyici (şekil 1) ile tam geri besleme kontrollü bir buck dönüştürücü prototipi başarıyla tasarlanmış ve kapalı çevrim yapısının güç elektroniği uygulamalarında sağladığı kararlılık ve hassasiyet açık biçimde ortaya konmuştur.



Şekil 1. Tasarlanan STM32 tabanlı dijital kontrollü DC-DC konvertör sisteminin blok şeması

Buck dönüştürücüler üç temel çalışma moduna sahiptir: CCM (Continuous Conduction Mode), BCM (Boundary Conduction Mode) ve DCM (Discontinuous Conduction Mode). CCM modunda indüktör akımı hiçbir zaman sıfıra düşmemekte, sürekli akmakta ve bu sayede çıkış gerilimi doğrudan görev oranıyla orantılı olmaktadır. Akım ve gerilim dalgalanmaları düşük kalmakta, verim yüksek olmakta ve sabit frekansta kontrol oldukça kararlı bir şekilde gerçekleştirilmektedir.

BCM modunda indüktör akımı her çevrim sonunda tam sıfıra inmektedir; bu durum CCM ile DCM arasındaki sınır koşulu olarak tanımlanmaktadır. Teorik olarak anahtarlama kayıpları azaltılabilmekte, ancak frekansın yük akımına göre değişmesi kontrol devresini karmaşık hâle getirmektedir.

DCM modunda indüktör akımı sıfıra inmekte ve bir süre sıfırda

kalmaktadır. Bu mod genellikle düşük yüklerde veya küçük indüktans değerlerinde ortaya çıkmakta, çıkış gerilimi görev oranına doğrusal olarak bağlı olmaktan çıkmakta ve regülasyon zayıflamaktadır. Bu nedenle dalgalanma seviyeleri artmaktadır.

5 V / 10 A gibi yüksek akım gerektiren bir sistem için en mantıklı seçim CCM modu olmaktadır. Bu mod, sabit frekanslı, düşük dalgalanmalı, kararlı ve yüksek verimli bir çalışma sağlamaktadır. Ayrıca kontrolün bir mikrodenetleyici (örneğin STM serisi) ile gerçekleştirilmesi bu modda çok daha kolay olmaktadır; sabit anahtarlama frekansı sayesinde PWM, akım sınırlama ve kompanzasyon yapıları düzgün şekilde tasarlanabilmektedir. Şekil 2’de Buck konvertörün sürekli (CCM), Sınır (BCM) ve Süresiz (DCM) çalışma modları için kullanılan temel analiz formülleri görülmektedir. BCM ve DCM gibi değişken frekanslı modlar ise bu güç seviyesinde gereksiz karmaşıklık ve yüksek tepe akımı getirmektedir.

BUCK ÇEVİRİCİSİ FORMÜL TABLOSU			
	$L_{crit} = \frac{R(1-D)}{2f_s}$	$R_{crit} = \frac{2Lf_s}{(1-D)}$	$D_{crit} = 1 - \frac{2Lf_s}{R}$ $K = \frac{2Lf_s}{R}$ $(i_L)_{T_s} = I_o = \frac{V_o}{R}$
	CCM $L > L_{crit} , R < R_{crit} , D > D_{crit}$	BCM $L = L_{crit} , R = R_{crit} , D = D_{crit}$	DCM $L < L_{crit} , R > R_{crit} , D < D_{crit}$
$\frac{V_o}{V_d}$	D	D	$\frac{2}{1 + \sqrt{1 + \frac{4K}{D^2}}}$
I_o	$I_o D = \frac{V_o D}{R}$	$I_o D = \frac{V_o D}{R}$	$\frac{2I_o}{1 + \sqrt{1 + \frac{4K}{D^2}}} = \frac{2V_o}{R \left(1 + \sqrt{1 + \frac{4K}{D^2}}\right)}$
D	V_o/V_d	V_o/V_d	$\sqrt{\frac{K}{\left(\frac{V_d}{V_o}\right)\left(\frac{V_d}{V_o} - 1\right)}}$
Δ_1	$1 - D$	$1 - D$	$\frac{D}{2} \left(\sqrt{1 + \frac{4K}{D^2}} - 1 \right)$
Δ_2	0	0	$1 - D - \Delta_1$
Δi_L	$\frac{(V_d - V_o)D}{Lf_s} = \frac{V_o(1-D)}{Lf_s}$	$\frac{(V_d - V_o)D}{Lf_s} = \frac{V_o(1-D)}{Lf_s} = 2I_o = \frac{2V_o}{R}$	$\frac{(V_d - V_o)D}{Lf_s} = \frac{V_o\Delta_1}{Lf_s}$
$i_{L,max}$	$I_o + \frac{\Delta i_L}{2} = \frac{V_o}{R} + \frac{\Delta i_L}{2}$	$2I_o = \frac{2V_o}{R}$	$\frac{(V_d - V_o)D}{Lf_s} = \frac{V_o\Delta_1}{Lf_s}$
$i_{L,min}$	$I_o - \frac{\Delta i_L}{2} = \frac{V_o}{R} - \frac{\Delta i_L}{2}$	0	0
Δv_o	$\frac{(V_d - V_o)D}{8LCf_s^2} = \frac{V_o(1-D)}{8LCf_s^2}$	$\frac{(V_d - V_o)D}{8LCf_s^2} = \frac{V_o(1-D)}{8LCf_s^2}$	Dalga şekli üzerinden hesaplanması daha kolaydır.

Şekil 2. Buck konvertörün Sürekli (CCM), Sınır (BCM) ve Süresiz (DCM) çalışma modları için kullanılan temel analiz formülleri

Bu kısımda, tasarlanan DC-DC buck dönüştürücünün yüksek verimli, kararlı ve düşük dalgalanmalı (ripple) bir çıkış sağlaması için kritik öneme sahip olan giriş (C_{in}) ve çıkış (C_{out}) kondansatörlerinin değerleri hesaplanmaktadır. Kapasitörlerin doğru seçimi, hem dönüştürücünün giriş gerilim dalgalanmasını (Δ V_{in}) sınırlamak hem de

çıkış gerilim dalgalanmasını (ΔV_{out}) belirlenen toleranslar içinde tutmak için hayati öneme sahiptir.

Hesaplamalar, dönüştürücünün belirlenen çalışma parametreleri (Giriş gerilimi $V_{in} = 12V$, Çıkış gerilimi $V_{out} = 5V$, Çıkış akımı $I_{out} = 10A$) ve Sürekli İletim Modu (CCM) varsayımı ile gerçekleştirilmektedir. CCM, yüksek akım gerektiren bu tip sistemler için en uygun, düşük dalgalanmalı ve sabit frekanslı kontrol sağlayan moddur.

Giriş kondansatörünün hesaplanmasında, anahtarlama anlarında oluşacak yüksek RMS akım dayanımı ($I_{CIN(rms)}$) gereksinimi öncelikli olarak ele alınmaktadır. Çıkış kondansatörünün hesaplanmasında ise, hem kapasitif etki (ΔV_C) hem de kondansatörün Eşdeğer Seri Direnci (ESR) kaynaklı dalgalanma ($\Delta V(ESR)$) bileşenleri dikkate alınmaktadır. Hesaplanan teorik değerlere ek olarak, yüksek akım uygulamaları için pratikte önerilen, düşük

ESR'ye sahip (low-ESR) elektrolitik ve seramik kapasitörlerin paralel kullanımı da belirtilmektedir.

Tablo 1. - Tasarlanan DC-DC Düşürücü Dönüştürücünün Temel Çalışma Parametreleri

Parametre	Sembol	Tahmini Değer
Giriş gerilimi	V_{in}	12 V
Çıkış gerilimi	V_{out}	5 V
Çıkış akımı	I_{out}	10 A
Anahtarlama frekansı	f_s	100 kHz
İndüktör akım dalgalanması	ΔI_L	30 % (I_{out}) ≈ 3 A
Verim	η	≈ 0.9

Öncelikle giriş kondansatörünün taşınması gereken RMS akımı, anahtarlama çevrimi boyunca giriş akımının darbeli yapısından kaynaklanan zorlanmayı temsil etmektedir. Buck topolojisinde bu değer, aşağıdaki eşitlik ile hesaplanır:

$$I_{Cin(rms)} = I_{out} \times \sqrt{D(1 - D)}$$

$$I_{Cin(rms)} = 10 \times \sqrt{0,417 \times 0,583} \approx 4,96A$$

$$D = \frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{5}{12} = 0,417$$

Burada görev döngüsü olup, hesaplamalarda 12 V giriş ve 5 V çıkış koşulları esas alınmıştır. Yapılan hesaplamalar sonucunda dönüştürücünün giriş kondansatörünün en az 5 A seviyesinde bir RMS akım kapasitesine sahip olması gerektiği sonucuna ulaşılmıştır.

Girişte izin verilen gerilim dalgalanmasının belirlenmesinin ardından, gerekli minimum giriş kapasitansı şu ifade ile elde edilmiştir:

$$\Delta V_{in} = \frac{I_{out} \times D(1 - D)}{f_s \times C_{in}}$$

$$C_{in} = \frac{I_{out} \times D(1 - D)}{f_s \times \Delta V_{in}} = \frac{10 \times 0,417 \times 0,583}{100000 \times 0,5} = 48,6\mu F$$

Bu bağıntıdan teorik olarak yaklaşık 50 μF 'lık bir kapasite gereksinimi ortaya çıkmakla birlikte, yüksek akım seviyeleri ve giriş hattındaki ani akım çekişleri göz önünde bulundurulduğunda, pratik tasarımlarda bu değerin yaklaşık beş katı tercih edilir. Bu nedenle, düşük ESR'li 220–470 μF aralığında bir giriş elektrolitik kondansatörün, paralel birkaç seramik kondansatör ile desteklenmesi uygun bulunmuştur.

Çıkış kondansatörünün boyutlandırılmasında ise, indüktör akımındaki dalgalanmayı bastırmak ve istenen çıkış gerilim kararlılığını sağlamak temel kriterlerdir. Çıkıştaki toplam ripple, kapasitif etki ve kondansatör ESR'inin oluşturduğu bileşenlerin toplamı olarak hesaplanır:

$$\Delta V_{out} \approx \Delta VC + \Delta Vesr$$

Burada kapasitif bileşen,

$$\Delta V_c = \frac{\Delta I_L}{8f_s C_{out}}$$

şeklinde ifade edilirken, ESR kaynaklı bileşen,

$$\Delta V_{esr} = \Delta I_L \times ESR$$

şeklindedir. Hedeflenen çıkış kapasitansı için:

$$\Delta V_{out} \leq 0.05 \times V_{out} = 0.25 \text{ V (\%5 ripple)}$$

$$\frac{3}{8 \times 100000 \times C_{out}} + 3 \times ESR \leq 0,25$$

Varsay $ESR = 0.02 \Omega$ (low-ESR kapasitör):

$$\frac{3}{800000 \times C_{out}} + 0,06 \leq 0,25$$

$$\frac{3}{800000 \times C_{out}} \leq 0,19$$

$$C_{out} \geq \frac{3}{800000 \times 0,19} = 19,7 \mu F$$

Hedeflenen çıkış gerilim dalgalanması ($<0.25 \text{ V}$) dikkate alındığında, teorik olarak $20 \mu F$ mertebesinde bir çıkış kapasitansının yeterli olduğu görülmektedir. Ancak 10 A çıkış akımı ve düşük ripple gereksinimi nedeniyle, pratik uygulamalarda bu değerin en az 5–10 katı seçilmekte olup, bu kapsamda $220\text{--}470 \mu F$ aralığında düşük ESR’li bir çıkış kondansatörü, paralel birkaç $10 \mu F$ X7R seramik kondansatör ile birlikte önerilmektedir. Böylece hem yüksek frekanslı ripple bileşenleri bastırılmakta hem de yük geçişlerine karşı daha kararlı bir çıkış gerilimi elde edilmektedir.(Silva-Ortigoza ve ark. 2014), (Ajami, A. 2014), (Babaei, E. 2016).

Tablo 2. Tasarım Parametrelerine Göre Hesaplanan Kapasitör Değerleri ve Teknik Gereksinimler

Parametre	Formül / Not	Önerilen Değer
C_{in}	$\frac{I_{out} \times D(1 - D)}{f_s \times \Delta V_{in}}$	220–470 μ F
$I_{Cin(rms)}$	$I_{out} \times \sqrt{D(1 - D)}$	≥ 5 A
C_{out}	$\frac{\Delta I_L}{8f_s \Delta V_C}$	220–470 μ F
ESR_{max}	$\frac{\Delta V_{ESR}}{\Delta I_L}$	$\leq 0.02 \Omega$
Seramik ekler	Ripple'ı azaltır	2–3 $\times$ 10 μ F X7R paralel

SONUÇ

Bu proje, enerji verimliliği yüksek, kompakt, güvenilir ve dijital olarak kontrol edilebilen bir güç dönüştürücü tasarımı gerçekleştirmeyi amaçlamaktadır. Geleneksel lineer regülatörlerde görülen enerji kayıplarını minimize etmek ve modern elektronik sistemlerin ihtiyaç duyduğu yüksek verimli güç yönetimi çözümlerini geliştirmek projenin temel hedeflerindendir. Özellikle endüstride ve akademik çalışmalarda, yüksek akım gerektiren sistemlerde enerji kaybının minimize edilmesi ve sistem kararlılığının artırılması kritik öneme sahiptir. Bu bağlamda buck konvertörler, hem verimliliği hem de kararlılığı nedeniyle yaygın olarak tercih edilmektedir. Proje kapsamında da 12-24V aralığındaki giriş gerilimini 5V/10A seviyesine dönüştürebilen, yüksek verimli ve mikrodenetleyici kontrollü bir güç dönüştürücüsü geliştirmeye odaklanılmıştır.

Proje sürecinde öncelikle buck konvertörün teorik temelleri incelenmiş ve literatürde yer alan benzer çalışmalar analiz edilmiştir. Ardından STM32 mikrodenetleyici tabanlı kapalı çevrimli kontrol sistemi tasarlanmıştır. Tasarlanan devrede MOSFET anahtarlama elemanının PWM (Pulse With Modulation) sinyali ile sürülmesi planlanmıştır. Çıkış

gerilimi ve akımının sensörler aracılığıyla sürekli olarak izlenmesi ve bu verilerin mikrodenetleyicinin ADC (Analog-to-Digital Converter) birimleri üzerinden okunması hedeflenmektedir. Elde edilen geri besleme verileri doğrultusunda PWM sinyalinin dinamik olarak ayarlanması öngörülmektedir. Bu kapalı çevrimli kontrol yaklaşımı sayesinde, sistemin kararlı bir çıkış gerilimini üretebilmesi amaçlanmaktadır.

Devrenin tasarımı sürecinde, kullanılacak komponentler ısı dağılımı, verimlilik, anahtarlama frekansı ve EMI (Elektromanyetik Girişim) etkileri dikkate alınarak yapılan hesaplamalar sonucunda belirlenmiştir. Bu kapsamlı analizler sonucunda, tasarımın hem teorik olarak yüksek verimlilik sağlayana hem de uygulamaya aktarılmaya hazır bir yapıya ulaşması hedeflenmiştir.

KAYNAKÇA

- M. S. Rahman, Buck Converter Design Issues, Linköping University, 2007.
- Ürgün, S. vd., “Design and Implementation of DC-DC Buck Converter,” Kocaeli Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi, 2014.
- A. S. Samosir vd., “Simple formula for designing the PID controller of a DC-DC buck converter,” IJPEDS, 2023.
- H. Sucu, S. Gökteş ve M. Arkan, “Design of Buck Converter,” Balkan J. Electrical & Computer Engineering, vol. 9, no. 2, 2021.
- M. U. Abbasi, “Digital Control Of A Buck Converter Using An 8 Bit STM Microcontroller,” Int. J. Scientific & Technology Research, vol. 6, no. 4, Apr. 2017.
- R. Feldman, “Step-by-Step Process to Calculate a DC-to-DC Compensation Network,” Analog Devices Technical Note, May 2023.
- A. Kumar, “Simple Formula for Designing the PID Controller,” International Journal of Control Systems and Applications, vol. 8, no. 2, pp. 23–29, 2016.
- N. Abbas, “DC-DC Buck Converter Using Fuzzy Logic Controller,” IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 34, no. 5, pp. 4720–4728, 2019.
- E. Yılmaz, “DEAL-BDR DC-DC Buck Dönüştürücüsünün Genel Tasarımı,” Teknik Dergi, vol. 30, no. 2, pp. 150–158, 2019.
- S. K. Mazumder, M. Tahir, S. L. Kamisetty, “Wireless PWM Control of a Parallel DC–DC Buck Converter,” IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 20, no. 6, pp. 1280–1287, 2005.
- G. R. Walker, P. C. Sernia, “Cascaded DC–DC Converter Connection of Photovoltaic Modules,” IEEE Power Electronics Conference, pp. 24–30, 2002.
- Infineon Technologies, DC-DC Converter Design Guide, Technical Report, 2018.
- H. Wang and Y. Liu, “Design and Implementation of a High-Efficiency Synchronous Buck Converter with Digital Control,” IEEE Access, vol. 9, pp. 145220–145230, 2021.
- X. Li, J. Chen, and M. Luo, “Modeling and Analysis of Bidirectional DC–DC Converters for Renewable Energy Systems,” IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 36, no. 8, pp. 9025–9038, 2021.
- P. K. Jain and S. Bhattacharya, “Performance Evaluation of Fuzzy and PID Controllers for DC–DC Buck Converter,” Journal of Electrical Systems and Information Technology, vol. 6, no. 3, pp. 530–538, 2019.
- L. Zhang, H. Zhang, and T. Zhang, “Improved MPPT Control of PV Systems Using Cascaded DC–DC Converters,” Renewable Energy, vol. 182, pp. 1021–1032, 2022.
- J. Lee, H. Cho, and K. Park, “Digital Implementation of a High-Frequency DC-DC Buck Converter with Enhanced Transient Response,” IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 68, no. 9, pp. 8724–8733, 2021.
- P. Singh and R. K. Tripathi, “Comparative Study of PID and Fuzzy Controllers for DC-DC Buck Converter,” International Journal of Power Electronics and Drive Systems (IJPEDS), vol. 14, no. 3, pp. 1421–1429, 2022.
- L. Chen, M. Sun, and Q. Zhu, “Design and Analysis of a Bidirectional DC-DC Converter for Energy Storage Applications,” IEEE Access, vol. 10, pp. 56012–56020, 2022.
- Y. Zhang, T. Wu, and S. Chen, “Wireless Control of Distributed DC-DC Converters for Microgrid Systems,” IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 13, no. 2, pp. 1015–1027, 2023.
- Guldemir, H. (2011). Study of sliding mode control of dc-dc buck converter. Energy and power Engineering, 3(04), 401406.
- Silva-Ortigoza, R., Hernández-Guzmán, V. M., Antonio-Cruz, M., & Munoz-Carrillo, D. (2014). DC/DC buck power converter as a smooth starter for a DC motor based on a hierarchical control. IEEE Transactions on Power Electronics, 30(2), 1076-1084.

- Ajami, A., Ardi, H., & Farakhor, A. (2014). Design, analysis and implementation of a buck–boost DC/DC converter. *IET Power Electronics*, 7(12), 2902-2913.
- Babaei, E., Varesi, K., & Vosoughi, N. (2016). Calculation of critical inductance in n-input buck dc–dc converter. *IET Power Electronics*, 9(12), 2434-2444.
- Başkurt, F. (t.y.). Buck-Boost çevirici formül tablosu [Elektronik formül tablosu]. İstanbul Teknik Üniversitesi. Erişim adresi: https://web.itu.edu.tr/baskurtf/files/formul_tablo.pdf