

GELECEĞİN SAVUNMA ALGILAYICILARI:

RADAR, ENERJİ VE AKILLI SİSTEMLER

EDİTÖRLER:

**DR. ÖĞR. ÜYESİ HAKAN TERZİOĞLU
ARŞ. GÖR. RAMAZAN BARAN**

EĞİTİM
yayınevi

GELECEĞİN SAVUNMA ALGILAYICILARI: RADAR, ENERJİ VE AKILLI SİSTEMLER

Editörler: Dr. Öğr. Üyesi Hakan Terzioğlu, Arş. Gör. Ramazan Baran

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: 978-625-385-733-2

1. Baskı, Aralık 2025

Kütüphane Kimlik Kartı

GELECEĞİN SAVUNMA ALGILAYICILARI: RADAR, ENERJİ VE AKILLI SİSTEMLER

Editörler: Dr. Öğr. Üyesi Hakan Terzioğlu, Arş. Gör. Ramazan Baran

IV+140 s., 160x240 mm

Kaynakça var, izin yok.

E-ISBN: 978-625-385-733-2

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
İnternetteki kitaplarınız

EĞİTİM
kitabevi

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ.....	iv
------------	----

BÖLÜM 1

ELEKTRONİK HARP SİSTEMLERİYLE RADAR KİMLİKLENDİRME: YÖNTEMLER, PARAMETRİK ANALİZ VE ALGILAMA TEORİSİ TEMELLİ DEĞERLENDİRMELER.....	1
--	---

Ali Rıza TORUN, Fatih Alpaslan KAZAN

BÖLÜM 2

DÜŞÜK YAKALANMA OLASILIKLI RADARLARIN ALGILANMASI İÇİN BİLİŞSEL ELEKTRONİK HARP YÖNTEMLERİ.....	27
---	----

Zeynep HASALAN, Fatih Alpaslan KAZAN

BÖLÜM 3

FMCW RADAR DALGA BİÇİMİ PARAMETRELERİNİN PERFORMANSA ETKİSİNİN MODELLENMESİ VE ANALİZİ.....	50
---	----

Elif Sude KİPER, Hakan TERZİOĞLU

BÖLÜM 4

DİJİTALLEŞEN MUHAREBE SAHASINDA ELEKTRİFİKASYON VE HİBRİT ENERJİ SİSTEMLERİNİN ROLÜ	69
--	----

Abdullah Cem AĞAÇAYAK

BÖLÜM 5

ASKERİ PLATFORMLARDA DEKARBONİZASYON: BE VE HFC SİSTEMLERİNİN PWR, MENZİL VE KÜTLE PARAMETRELERİ ÜZERİNDEN TEKNİK SİMÜLASYONU	103
---	-----

Abdullah Cem AĞAÇAYAK

ÖNSÖZ

Savunma teknolojilerinde yaşanan hızlı dönüşüm, algılama, karar verme ve müdahale süreçlerinde kullanılan radar sistemleri, sensör mimarileri, elektronik harp uygulamaları ve enerji yönetimi bileşenlerinin çok daha entegre, güvenilir ve yüksek performanslı yapılara evrilmesini zorunlu kılmaktadır. Bu kapsamda, modern platformların tasarımında hem teorik modellemelerin hem de sahaya dayalı uygulamaların bütüncül bir çerçevede değerlendirilmesi kritik önem taşımaktadır.

Bu kitap, radar sistemlerinin temel prensiplerinden başlayarak sensör füzyonu, parazit ve işaret işleme teknikleri, platform seviyesinde enerji yönetimi, performans analizleri, karşılaştırmalı değerlendirmeler ve simülasyon tabanlı doğrulama süreçlerine kadar uzanan geniş bir yelpazeyi kapsayacak şekilde hazırlanmıştır. İçerik; akademik literatür, uygulamalı mühendislik deneyimi ve savunma sanayi projelerinde edinilen pratik bilgi birikiminin derli toplu bir sunumunu içermektedir.

Kitabın amacı, radar ve sensör sistemlerine ilişkin temel kavramları, gelişmiş analiz yöntemlerini, mimari yaklaşımları ve operasyonel gereksinimleri sektöre, araştırmacılara ve akademik paydaşlara güvenilir, nesnel ve kolay erişilebilir bir referans kaynağı olarak sunmaktır. Ayrıca, platform geliştirme süreçlerinde ihtiyaç duyulan teknik değerlendirmeleri sistematik bir çerçeveye oturtarak hem mühendislik yaklaşımlarına hem de karar süreçlerine katkı sağlaması hedeflenmiştir.

Savunma teknolojilerinin sürdürülebilir gelişimi; bilimsel araştırmalar, çok disiplinli mühendislik birikimi ve güçlü kurumsal iş birliklerinin ancak eşgüdüm içinde ilerlemesiyle mümkün olacaktır. Bu çalışmanın, radar ve sensör sistemleri alanında çalışan tüm paydaşlara değer katmasını ve yürütülen projelere yapıcı katkılar sunmasını temenni ederim.

Bu vesileyle, hazırlanma sürecinde katkılarını ve desteklerini esirgemeyen tüm kurumlara, meslektaşlara ve öğrencilere teşekkür ederiz.

Editörler

Dr. Öğr. Üyesi Hakan TERZİOĞLU

Arş. Gör. Ramazan BARAN

BÖLÜM 1

ELEKTRONİK HARP SİSTEMLERİYLE RADAR KİMLİKLENDİRME: YÖNTEMLER, PARAMETRİK ANALİZ VE ALGILAMA TEORİSİ TEMELLİ DEĞERLENDİRMELER*

Ali Rıza TORUN**, Fatih Alpaslan KAZAN***

GİRİŞ

Modern muharebe ortamı, hava, deniz, kara ve uzaydaki platformların oluşturduğu son derece karmaşık, dinamik ve yoğun bir elektromanyetik ortamdır. Bu ortamda dost ve düşman unsurlarını saniyeler içinde birbirinden ayırt edebilme kabiliyeti, hayatta kalma ve operasyonel başarının temel taşıdır. Bu kritik ihtiyaç, radar kimliklendirme sistemlerini stratejik bir varlık haline getirmiştir.

* Bu çalışma 17–20 Aralık 2025 tarihleri arasında Konya’da düzenlenen *The International Conference on Defense Technologies and Future Strategies (SATEGS 25)* isimli konferansta “*Radar Identification with Electronic Warfare Systems: Methods, Parametric Analysis and Detection Theory-Based Assessments*” başlığıyla sunulmuş ve konferans özet kitabında özeti yayımlanmıştır. Çalışmanın genişletilmiş ve tam metin hâli ilk kez bu kitap bölümünde yayımlanmaktadır.

** Yüksek Lisans Öğrencisi, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Savunma Teknolojileri ABD, Konya, Türkiye, ali.rtorun@gmail.com, ORCID: orcid.org/0009-0005-2468-7366

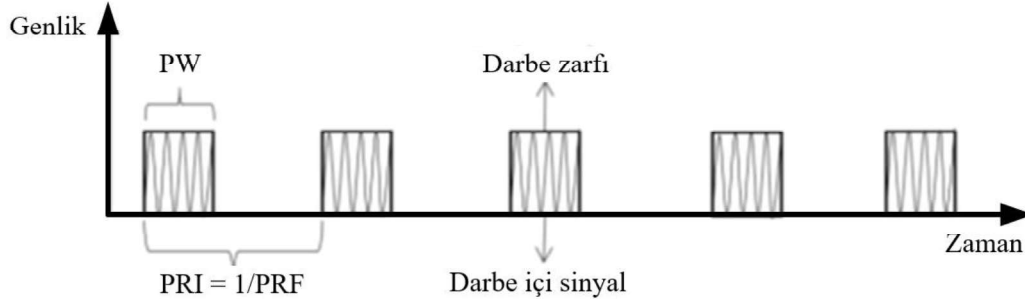
*** Dr. Öğr. Üyesi, Selçuk Üniversitesi, Sivil Havacılık Yüksekokulu, Havacılık Elektrik Ve Elektronik Bölümü, Konya, Türkiye, akazan@selcuk.edu.tr, ORCID: orcid.org/0000-0002-5461-0117

Radar teknolojileri, modern muharebe sahasının yanı sıra sivil havacılıkta da hayati bir rol oynamaktadır. Özellikle uçuş güvenliğini artırmak amacıyla kullanılan Trafik Uyarı ve Çarpışma Önleme Sistemleri (TCAS), radar tabanlı algılama mekanizmalarının stratejik birer örneğidir (Aka & Kazan, 2024). Bu sistemlerin otonom yapıları ve farklı irtifalardaki operasyonel verimlilikleri, enerji tüketimi ve çevresel etkilerle birlikte değerlendirilmektedir (Aksoy & Kazan, 2022).

Gelişmiş elektronik harp (EH) ortamı, radar sistemlerinin giderek daha karmaşık hâle gelmesiyle birlikte tehdit tespiti ve tanımlamasında yüksek hassasiyetli ve çok boyutlu analizleri zorunlu kılmaktadır. Özellikle elektronik destek önlemleri (Electronic Support Measures, ESM) ve elektronik istihbarat (Electronic Intelligence, ELINT) sistemleri, düşman radarlarının operasyonel davranışlarının anlaşılmasında ve bu radarların kimliklendirilmesinde kritik bir rol üstlenmektedir. Radar kimliklendirme, temel olarak bir radar emisyonunun kaynağını, tipini ve fonksiyonunu belirlemeye yönelik sistematik bir süreç olup, ölçülen sinyallerin hem fiziksel hem de davranışsal özelliklerinin bütüncül olarak değerlendirilmesini gerektirir.

Geleceğin savunma konseptlerinde, otonom insansız hava araçlarının (İHA) oluşturduğu ağ yapılarının topolojik analizi, bu platformların radar görünürlüğü ve EH direnci açısından kritik bir çalışma alanıdır (Ağaçayak & Sungur, 2019; Ağaçayak vd., 2020). Modern hava muharebe sahasında üstünlük sağlamak amacıyla geliştirilen beşinci nesil savaş uçakları, düşük görünürlük (stealth) özellikleri ve gelişmiş aviyonik sistemleri sayesinde operasyonel avantaj elde etmektedir (Güntürkün, 2023b). Hava platformlarında sistem performansının analizi ve olası arızaların tespiti için kullanılan uçuş veri kaydedicileri, karmaşık elektronik harp senaryolarında elde edilen verilerin değerlendirilmesi açısından da kritik bir role sahiptir (Güntürkün, 2023a).

ESM/ELINT bağlamında radar kimliklendirme, ilk aşamada taşıyıcı frekansı olarak da isimlendirilen radyo frekansı (Radio Frequency, RF), darbe genişliği (Pulse Width, PW), darbe tekrarlama aralığı (Pulse Repetition Interval, PRI), darbe tekrarlama frekansı (Pulse Repetition Frequency, PRF), genlik (Pulse Amplitude, PA) ve geliş açısı (Angle of Arrival, AOA) gibi temel RF parametrelerinin elde edilmesiyle başlar. Bu parametrelerden bazıları Şekil 1'deki radar darbe sinyali zaman diyagramında görülmektedir.



Şekil 1. Radar Darbe Sinyali Zaman Diyagramı

Bu parametreler radar emisyonlarının hızlı bir ön sınıflandırmasını mümkün kılarken, radarın taktik ortamda nasıl çalıştığına ilişkin ilk göstergeleri sunar. Ardından darbe sırası analizi (Pulse Sequence Analysis, PSA) gerçekleştirilerek radarın kendine özgü PRI desenleri analiz edilir. Radarın darbe içi modülasyon tipi, frekans çevikliği davranışı ve emisyonlarının istatistiksel özellikleri incelendiğinde radarın fonksiyonel ve teknolojik seviyesi hakkında daha detaylı bilgiler elde edilir. Daha ileri düzey bir yaklaşım olan spesifik yayıcı kimliklendirmesi (Specific Emitter Identification, SEI) ise radar vericisinin fiziksel bileşenlerinden kaynaklanan mikro-imzaları kullanarak aynı modele sahip farklı radarların dahi ayırt edilmesini sağlar. Bu yöntemlerin yanı sıra zaman-frekans tabanlı analiz teknikleri ve modern makine öğrenmesi modelleri radar kimliklendirme süreçlerini hızlandırmakta ve doğruluğunu artırmaktadır.

Bu bağlamda radar kimliklendirme, yalnızca ölçülen parametrelerin değerlendirilmesine dayanan bir süreç olmaktan çıkmış, temel RF ölçümleri, darbe-içi ve darbe-dizisi analizleri, mikro-imza temelli teknikler, istatistiksel çıkarım ve yapay zekâ tabanlı sınıflandırmanın bir arada kullanıldığı çok katmanlı bir yapıya dönüşmüştür. ESM/ELINT sistemlerinin etkinliği, bu yöntemlerin bütüncül bir şekilde uygulanmasına ve radar emisyonlarının karmaşık davranışlarının doğru şekilde modellenmesine bağlıdır. Bu nedenle radar kimliklendirme yöntemlerinin bilimsel ve sistematik bir çerçevede değerlendirilmesi, modern elektronik harp ortamının anlaşılması ve tehditlerin doğru şekilde tanımlanması açısından kritik bir öneme sahiptir. Radar sinyallerinin yakalanması, analiz edilmesi ve kimliklendirilmesi baz alınarak yapılan literatür taramasında ulaşılabilen veri kaynaklarında elde edilen çalışmalar aşağıda özetlenmiştir.

Radar yayınlarını sınıflandırma yöntemlerinden olan kümeleme, histogram tabanlı ayrıştırma ve sürekli dalgacık dönüşümüne dayalı ayrıştırma tekniklerinin birleştirilerek EH sistemlerinde kullanılabilecek

yeni bir yöntemin geliştirilmesi (Aslan, 2006); doppler radar verileri üzerinde çeşitli makine öğrenmesi ve derin öğrenme yöntemleri kullanarak hedef sınıflandırma performansının artırılması (Erdoğan & Yıldız, 2024); radar sinyallerinin sınıflandırılmasında kullanılan Naive Bayes, destek vektör makineleri, rastgele orman ve ortak vektör yaklaşımı gibi yöntemlerin performanslarının değerlendirilmesi (Kısalar, 2016); düşük yakalanma olasılığına (Low Probability of Intercept, LPI) sahip radar sinyallerinin gürültülü koşullarda tespit edilmesi ve zaman-frekans düzleminde analiz edilmesi için gelişmiş filtreleme tekniklerinin kullanılması (Gülüm, 2016); kimliklendirme sırasında radar sinyallerinin darbe içi modülasyonlarının kullanılması, bu sınıflandırmanın da çeşitli dönüşümlerden geçirilerek bilgisayar ortamında üretilen radar sinyalleri ile evrişimli sinir ağları kullanılarak yapılması (Akbnar & Yüksekaya, 2023); yer gözetleme radar yayın parametrelerinin radar uyarı alıcısı sistemi tarafından tespit edilmesi ve bu yayıcının konumunun bulunması kapsamında Matlab’da simülasyon yapılması (Nasıroğlu, 2023); EH ve bilgi kavramları arasındaki ilişkilerin irdelenmesi (Koçman, 2023); gelişmiş sürücü yardım sistemleri radarlarının kilitlenebileceği ve önemli performans düşüşleri meydana gelebileceğinin bir analizle gösterilmesi (Cemil & Ünlü, 2022); radar darbe dizilerinin ayrıştırılmasında yapay sinir ağı (YSA) ve bulanık ART (Adaptive Resonance Theory) yöntemlerinin performanslarının değerlendirilmesi (Gençol, 2015); radar ESM sistemlerinde radar yayınlarının kimliklendirilmesinde kullanılan deinterleaving yöntemi algoritmalarının incelenmesi (Chan vd., 2002); ESM sistemlerinde kullanılabilecek yeni bir ayrıştırma algoritması ve uygulaması (Olgun, 2008); radar yayıcılarının belirlenmesi için kümeleme tekniklerinin araştırılması (Güven, 1994); az sayıda darbe dizisine ait sinyalin kimliklendirilmesi için algoritma önerisi (Kocamış vd., 2016); geleneksek darbe ayrıştırma yöntemlerinin yerine yeni bir PRI ayrıştırma ve histogramlama yönteminin kullanılması (Ge vd., 2019); radar sinyallerinden PRI’ları hesaplamak için karmaşık değerli otokorelasyon benzeri integral algoritmasının bir varyasyonunun geliştirilmesi (Nishiguchi & Kobayashi, 2000); radar sinyallerinin ayrıştırılmasında ayırık zamanlı stokastik dinamik doğrusal model kullanılması (Moore & Krishnamurthy, 2002); sinyal sınıflandırması ve verici tanımlaması için üç katmanlı bir vektör sinir sistemi ile denetimli öğrenme algoritmasına sahip bir ağ önerilmesi (Shieh & Lin, 2002); sonlu sayıdaki darbe treninden radar sinyal frekansının hesaplanması (Orsi vd., 2002); darbe varış zamanları

kullanılarak Toeplitz matrisleriyle PRI'ların hesaplanması (Ray, 2002) ; YSA ile radar kimliklendirmede kullanılan PRI'nın hesaplanması (Noone, 1999); radar verilerini analiz etmek ve bu verilerden nesne sınıflandırması yapmak üzere YSA modeli tasarlanması (Lee vd., 2019); radar yayıcılarının sınıflandırılmasını iyileştirmek için kendini organize eden farklı sinir ağı modellerinin uygulanması (Anjaneyulu vd., 2008); radar teknolojisinin tarihsel gelişimi, temel çalışma prensipleri, sistem bileşenleri, sinyal işleme teknikleri ve modern uygulama alanlarının incelenmesi (Kayacan & Kazan, 2025).

Yapılan bu çalışma modern elektronik harp ortamında radar kimliklendirmeye dair kapsamlı bir inceleme sunmayı amaçladığı için ilk olarak radar kimliklendirmenin dost-düşman ayrımı, durum farkındalığı ve angajman kararlarındaki stratejik önemi ele alınacaktır. Ardından, zaman, frekans, uzamsal ve istatistiksel özelliklere dayalı başlıca radar kimliklendirme yöntemleri sistematik bir şekilde incelenecek ve bu yöntemlerin güçlü ve zayıf yönleri değerlendirilecektir. Çalışmanın devamında, taşıyıcı frekansı, darbe tekrarlama aralığı, darbe genişliği ve anten tarama karakteristikleri gibi temel parametrelerin kimliklendirme doğruluğuna olan katkısı parametrik yöntemler bağlamında detaylandırılacaktır. Ayrıca, radar algılama teorisinin temelini oluşturan tespit ve yanlış alarm olasılıklarının teorik çerçevesi çizilerek, bu metriklerin sinyal-gürültü oranı (Signal-to-Noise Ratio, SNR) ve eşik belirleme stratejileri ile olan ilişkisi tartışılacaktır. Sonuç bölümünde ise, sunulan tüm analiz ve değerlendirmeler özetlenerek, gelecekteki araştırma yönelimleri için öneriler sunulacaktır.

RADAR KİMLİKLENDİRMENİN MODERN ELEKTRONİK HARPTEKİ STRATEJİK ÖNEMİ

Radar kimliklendirme, modern elektronik harp doktrinlerinde hem operasyonel farkındalığın sağlanması hem de tehdit ortamının doğru modellenmesi açısından temel bir bileşen hâline gelmiştir. Günümüz muharebe sahası, LPI radarlar, frekans çevikliği yeteneğine sahip sensörler, çok modlu arama-izleme sistemleri ve gelişmiş elektronik korunma teknikleriyle donatılmış platformların yoğun olarak görev yaptığı son derece karmaşık bir elektromanyetik spektrum yapısına sahiptir. Bu nedenle radar emisyonlarının yalnızca tespit edilmesi değil, aynı zamanda bu emisyonların hangi radara ve platforma ait olduğunun doğru şekilde belirlenmesi stratejik bir gereklilik hâline gelmiştir. Radar kimliklendirme

özellikle yüksek yoğunluklu sinyal ortamlarında dost-düşman ayrımı, tehdit önceliklendirmesi ve durumsal farkındalığın sürekli güncellenmesi için kritik önem taşımaktadır.

Radar kimliklendirme sürecinin stratejik önemi, ESM ve ELINT faaliyetlerinin etkinliğini doğrudan belirlemesinden kaynaklanmaktadır. Kimliği doğru belirlenmiş bir radar; düşman hava savunma mimarisinin menzil kapasitesi, hedef izleme performansı, angajman yetenekleri ve taktik kullanım alışkanlıkları hakkında yüksek değerli çıkarımlar yapılmasına imkân tanır. RF, PW, PRI ve darbe-içi modülasyon parametrelerinin analizi, radarın görev modunun anlaşılmasını ve tehdit seviyesinin doğru tahmin edilmesini sağlar. Özellikle karmaşık PRI tipleri, çok modlu çalışma ve frekans çevikliği davranışı, radarın fonksiyonunu ve teknoloji seviyesini işaret eden kritik parametrelerdir.

Sinyal ayırıştırma ve kimliklendirme süreçlerinde kullanılan öznitelik uzayının optimize edilmesi, sistemin gerçek zamanlı performansını doğrudan etkiler. Bu kapsamda kullanılan yapay alg algoritmaları ve kara kanatlı uçurtma optimizasyonu gibi modern kümeleme yaklaşımları, sinyal karmaşasını gidermede yenilikçi çözümler sunmaktadır (Anwer & Servi, 2021; İnan, Rasooli & Servi, 2024).

Modern elektronik harp operasyonları, çok sayıda radarın eşzamanlı olarak faaliyet gösterdiği geniş spektrumlu bir sinyal ortamında yürütüldüğünden, radar kimliklendirme elektronik taarruz ve elektronik korunma döngüsünün ayrılmaz bir bileşeni hâline gelmiştir. Bir arama, izleme veya güdüm radarının doğru şekilde ayırt edilmesi, uygulanacak karıştırma tekniğini, kendi kendini koruma sistemlerinin tehdit önceliklendirmesini ve platform manevra kararlarını doğrudan etkiler. Yanlış veya eksik kimliklendirme ise elektronik taarruz kaynaklarının yanlış yönlendirilmesine veya etkisiz karşı tedbir uygulanmasına yol açarak operasyonel başarının düşmesine neden olabilir.

Radar kimliklendirmenin stratejik önemi özellikle uzun dönemli istihbarat faaliyetlerinde belirgin hâle gelmektedir. SEI teknikleri, radar vericilerinde üretim hatalarından kaynaklanan mikro-imzaların analiz edilmesiyle aynı radar modeline ait farklı platformların dahi ayırt edilmesine olanak tanımaktadır. Böylece radar sistemlerinin konuşlanma düzeni, modernizasyon düzeyi, kullanım sıklığı ve taktik adaptasyon kabiliyetleri takip edilebilmektedir. Bu durum hem askeri planlamaya hem de istihbarat değerlendirmelerine yüksek değer kazandırmaktadır. Bu

bağlamda radar kimliklendirme yalnızca anlık operasyonel karar desteği üretmeyip aynı zamanda uzun vadeli stratejik savunma planlaması için de temel bir araç olarak kabul edilmektedir.

RADAR KİMLİKLENDİRME SÜRECİNDE KULLANILAN BAŞLICA YÖNTEMLER

Radar kimliklendirme süreci, bir radar kaynağının benzersiz veya ayırt edici teknik ve operasyonel özelliklerinin analiz edilmesine dayanır. Modern ESM/ELINT mimarilerinde bu süreç, hem taktik seviyede tehdit sınıflandırması hem de stratejik seviyede uzun dönemli ELINT üretimi için kritik öneme sahiptir. Radar kimliklendirme yöntemleri genel olarak parametrik yöntemler, dalga biçimi ve modülasyon temelli analizler, mikro özellik çıkarımı, temel bileşen ve istatistiksel yöntemler, makine öğrenmesi ve derin öğrenme yaklaşımları olmak üzere beş ana grupta incelenebilir.

Sinyal parametrelerinin analizinde ve hata kestiriminde kullanılan lojistik regresyon ve hibrit optimizasyon yöntemleri, tespit alıcılarının karar destek mekanizmalarını güçlendirmektedir (Servi vd., 2018; Şahin & Servi, 2024). Ayrıca, PID tabanlı hız kontrol sistemlerinin parametrik optimizasyonu, radar anten sistemlerinin hassas yönlendirme kabiliyetleri için referans teşkil eder (Coşkun & Terzioğlu, 2007, 2009).

Parametrik Yöntemler

Parametrik yöntemler, bir radarın yayınladığı elektromanyetik sinyalin ölçülebilir temel özelliklerine dayanır. RF, PRF, PW, PA, anten tarama periyodu ve modülasyon türü gibi parametreler çoğu radar sistemi için karakteristik değerler taşır. Bu parametrelerin ESM sistemlerince hassas biçimde ölçülmesi ve kütüphane verileri ile karşılaştırılması, radarın tip, sınıf ve bazen de model seviyesinde tanımlanmasını mümkün kılar. Parametrik yöntemler yüksek doğruluk ve düşük hesaplama yükü avantajı sağlasa da gelişmiş elektronik karşı karşı tedbirler (Electronic Counter Counter Measures, ECCM), frekans çevikliği (agile) veya PRF esnetme (jittering) gibi teknikler bu yöntemin güvenilirliğini azaltabilmektedir.

Dalga Biçimi ve Modülasyon Analizi

Modern radar sistemleri, özellikle LPI radarlar, karmaşık dalga biçimleri ve gelişmiş modülasyon türleri kullanmaktadır. Bu nedenle dalga biçimi analizi, radar kimliklendirme sürecinin daha derin bir katmanını

oluşturur. Frekans-atlamalı, faz-kodlamalı, geniş bant frekans modülasyonu (chirp) ve çoklu darbe yapıları gibi modülasyonlar, radara özgü imzalar üretir. Bu imzaların zaman-frekans alanında analiz edilmesi için Wigner-Ville dağılımları, kısa süreli Fourier dönüşümü veya wavelet tabanlı yöntemler kullanılmaktadır. Modülasyon analizi özellikle karmaşık, çok modlu radarların tanımlanmasında yüksek ayırt edicilik sağlamaktadır.

Mikro-Özellik (Micro-Feature) Çıkarımı

Mikro-özellikler, radar tarafından yayınlanan sinyallerde üretim toleranslarından, donanım farklılıklarından veya verici mimarisinden kaynaklanan ince varyasyonlardır. Bunlar arasında mikro-faz kaymaları, darbe içi frekans düzensizlikleri, anten tarama titreşimleri ve alıcı zinciri imzaları yer almaktadır. Radar setinin serisel kimliğini ortaya koyabildiği için bu yöntem radyo frekansı parmak izi tanılama (RF fingerprinting) başlığı altında incelenmektedir. Mikro-özellik çıkarmaya dayalı teknikler özellikle aynı sınıfa ait radarların birbirinden ayrılmasında stratejik istihbarat açısından yüksek değer taşır.

Temel Bileşen Analizi ve İstatistiksel Yöntemler

Radar sinyallerinin çok boyutlu özellik uzayında temsil edilmesi, istatistiksel ve boyut indirgeme yöntemlerinin kullanımını gerektirir. Temel bileşen analizi, bağımsız bileşen analizi, lineer ayırma analizi ve kümelenme algoritmaları radar veri kümelerinin daha belirgin sınıflara ayrılmasını sağlar. Bu yöntemler özellikle büyük hacimli ELINT veri tabanlarının düzenlenmesinde, radar modellerinin otomatik ayrıştırılmasında ve yeni radar türlerinin tespitinde önemli katkı sunmaktadır.

Makine Öğrenmesi ve Derin Öğrenme Yöntemleri

Son yıllarda radar kimliklendirme alanında en hızlı gelişim gösteren yaklaşım makine öğrenmesi ve derin öğrenme tabanlı otomatik sınıflandırma teknikleridir. Destek vektör makineleri, rastgele ormanlar, konvolüsyonel sinir ağları ve tekrarlayan sinir ağları gibi modeller radar sinyallerinin yüksek boyutlu ve heterojen yapısını işleyerek gerçek zamanlı kimliklendirme imkânı sunar. Özellikle konvolüsyonel sinir ağları tabanlı spektrum haritası analizi ve zaman-frekans görüntülerinin sınıflandırılması radar tanımlamada yeni bir standardın oluşmasına katkı

sağlamaktadır. Bu yöntemler, hem LPI radarlarının hem de karışıklık altında çalışan radarların ayırt edilmesi açısından kritik rol oynamaktadır.

RADAR KİMLİKLENDİRMEDE KULLANILAN PARAMETRİK ÖZELLİKLER

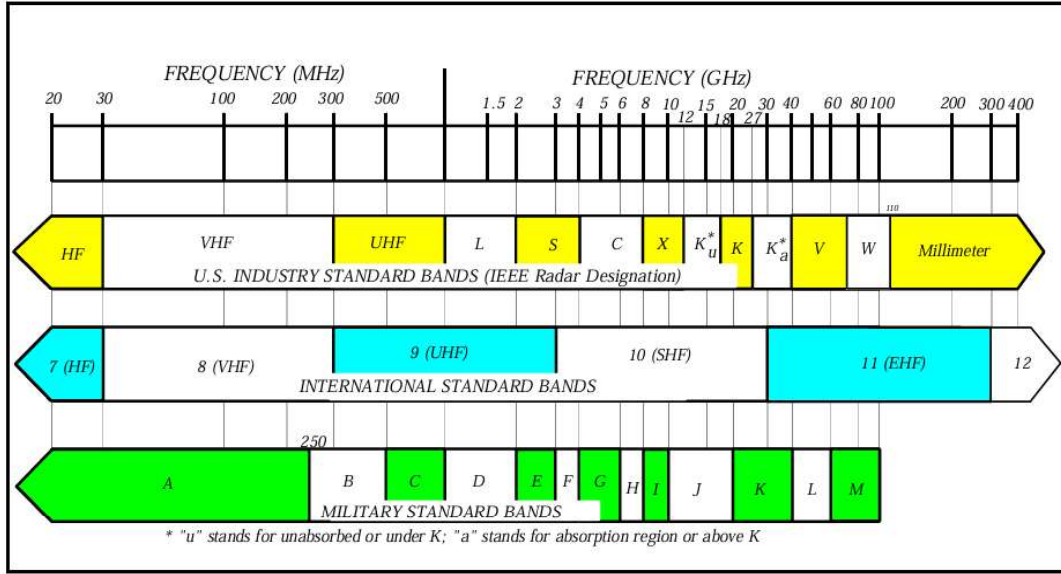
Parametrik radar kimliklendirme yöntemleri, radar sinyallerinin ölçülebilir ve fiziksel karşılığı bulunan temel karakteristiklerine dayanarak radar sistemlerini sınıflandırmayı amaçlar. Bu yöntemlerde kullanılan parametreler, radarın verici mimarisi, çalışma modu, anten davranışı ve görev profili gibi sistemsel unsurların dışı yansıyan izlerini temsil eder. Parametrelerin doğrusal, istatistiksel veya zaman-frekans tabanlı olarak analiz edilmesi, özellikle ESM/ELINT sistemlerinde kimliklendirme doğruluğunu belirleyen ana unsurdur. Aşağıda parametrik yöntemlerin temelini oluşturan başlıca parametreler akademik bir çerçevede sunulmuştur.

Radyo Frekansı (Radio Frequency, RF)

Radar sinyalindeki RF parametresi, bir radar darbesinin içindeki yüksek frekanslı taşıyıcı sinyali ifade eder. Hedef bilgisinin taşınmasını ve menzile, hız ve açı gibi parametrelerin türetilmesini sağlayan temel fiziksel taşıyıcıdır. Sistem, yüksek güçte üretilen bir RF darbe sinyalini bir anten vasıtasıyla uzaya yayar. Bu elektromanyetik enerji bir hedefe çarparak kısmen yansır ve alıcı tarafından tespit edilir.

Hedefin konum bilgisi, gönderilen ve alınan RF sinyali arasındaki zaman gecikmesinin ölçülmesiyle elde edilir. Hedefin radyal hızı ise yansıyan RF sinyalindeki doppler kaymasının analiz edilmesiyle hesaplanır. Dolayısıyla RF sadece bir enerji formu değil, aynı zamanda hedefe ait tüm bilgileri taşıyan bir veri ortamı işlevi görmektedir.

Farklı radar uygulamaları, menzile, çözünürlük ve atmosferik penetrasyon gereksinimlerine bağlı olarak “L” bandından “Ka” bandına kadar değişen farklı RF bantlarını kullanmaktadır. Bu nedenle radar sinyalinin frekansı, gücü ve modülasyonu, bir radar sisteminin performansını ve kabiliyetlerini doğrudan belirleyen en kritik parametrelerdir. IEEE radar bantları, uluslararası standart bantlar ve askeri band sınıflandırmaları Şekil 2’deki Elektromanyetik spektrum üzerinde gösterilmektedir.



Şekil 2. IEEE Radar Bantları, Uluslararası Standart Bantlar Ve Askeri Bant Sınıflandırmaları (Center, 1997)

RF frekansı arttıkça dalga boyu küçülür. Bu da atmosferik sönümlenmenin artmasına, özellikle yağış, sis ve su buharı gibi meteorolojik şartların yüksek frekanslı sinyaller üzerinde daha belirgin zayıflatıcı etkiler oluşturmaya yol açar. Dolayısıyla yüksek RF bantları yüksek çözünürlüklü algılama için avantaj sağlasa da etkin menzili sınırlayıcı bir unsur hâline gelir. Buna karşın düşük frekans bantları atmosferik yayılım açısından daha kararlı olduğundan uzun menzil gerektiren erken uyarı ve arama radarları için daha uygundur.

RF aynı zamanda anten boyutu ve yönlülük performansını da belirleyen bir faktördür. Dalga boyunun küçülmesi, daha dar hüzmeye genişliklerinin daha kompakt anten yapılarıyla elde edilebilmesini mümkün kılar. Bu durum özellikle yüksek hassasiyetli açı ölçümleri, hedef ayrımı ve sentetik açıklıklı radar tabanlı görüntüleme gibi uygulamalarda önemli bir avantaj sağlar. Buna karşın düşük frekanslarda aynı hüzmeye genişliğini elde etmek için fiziksel olarak daha büyük antenlere ihtiyaç duyulması, platform entegrasyonu açısından kısıtlayıcı olabilmektedir.

RF, radarın hız ölçüm performansını da doğrudan etkilemektedir. Doppler frekans kayması dalga boyu ile ilişkilendirildiğinden, yüksek RF bantları aynı hedef hızı için daha büyük doppler kayması üretir. Bu durum hareketli hedeflerin daha hassas şekilde ayrıştırılmasını, düşük hız bileşenlerinin daha duyarlı biçimde tespit edilmesini ve hareketli hedef işleme tekniklerinin daha verimli çalışmasını sağlar. Bu nedenle yüksek

frekanslı radarlar özellikle hava hedefleri, füze arayıcı başlıklar ve kısa menzil doppler radar uygulamalarında öne çıkar.

Öte yandan hedeflerle elektromanyetik etkileşim, yani radar kesit alanı da RF'ye bağlıdır. Yüksek frekanslar hedef yüzeyindeki ince geometrik detaylara karşı daha duyarlı olup yüksek çözünürlüklü görüntüleme ve sınıflandırma avantajı sağlarken, düşük frekanslar geniş yapılar üzerinde rezonans etkileri oluşturarak düşük radar kesit alanına sahip hedeflerin daha kararlı biçimde tespit edilmesine olanak tanır. Bu nedenle VHF/UHF bandındaki radarların gizli/görünmez platformlara karşı önemli bir tamamlayıcı rol üstlendiği bilinmektedir.

RF, uygulanabilir bant genişliğini ve dolayısıyla radarın menzil çözünürlüğünü de belirleyen temel unsurlardan biridir. Yüksek frekans bantlarında daha geniş bant genişlikleri kullanmak mümkün olduğundan, darbe içi modülasyon teknikleri ile yüksek menzil çözünürlüğü ve etkin sinyal sıkıştırma oranları elde edilebilir. Bu nedenle RF seçimi, radar sisteminin görev isterleri doğrultusunda menzil, çözünürlük, hedef tipi ve platform kısıtları dikkate alınarak optimize edilmesi gereken çok boyutlu bir tasarım parametresi niteliğindedir.

Radar sinyali $y(t)$ temel olarak Denklem (1)'deki gibi modellenir:

$$y(t) = A \cdot \cos(2\pi f_c t + \Phi) \quad (1)$$

Denklem (1), bir radar vericisinin ürettiği taşıyıcı tabanlı elektromanyetik dalganın zamana bağlı matematiksel temsidir ve sinyalin genlik, frekans ve faz olmak üzere üç temel parametresini içerir. Denklemdeki A , sinyalin genlik katsayısını ifade eder ve gönderilen dalganın gücüyle doğrudan ilişkilidir. Radar sistemlerinde genlik, çoğunlukla darbe modülasyonundan etkilenen bir zarf fonksiyonu ile değişebilse de temel taşıyıcı sinyal modellemesinde sabit kabul edilir.

Denklem (1)'de yer alan f_c taşıyıcı frekans olarak adlandırılır ve radarın çalıştığı RF bandını belirleyen en kritik parametrelerden biridir. RF, hem elektromanyetik dalganın yayılım karakteristiklerini hem de radarın doppler duyarlılığını ve anten boyutunu belirler. Radar sinyalinin osilasyon hızını tanımlayan bu frekans, sinyal işleme aşamalarında heterodinleme, demodülasyon ve doppler ölçümü gibi işlemlerin temelini oluşturur.

Denklem (1)'deki zaman değişkeni t , sinyalin sürekli zamandaki evrimini tanımlar ve radar darbelerinin iletimi, yankıların alınması ve

zaman gecikmesine bağı menzil hesaplamaları açısından zorunlu bir parametredir. Radar sinyalinin anlık genliği, fazı ve frekansının tümü t üzerinden değerlendirilir ve hedef tespitinde uçuş süresi prensibinin uygulanabilmesini sağlar.

Denklem (1)'deki ϕ , sinyalin başlangıç fazını temsil eder ve genellikle sabit bir değer olmakla birlikte, darbe içi modülasyon tekniklerinde zamanla değişen bir faz fonksiyonuna dönüşebilir. Başlangıç fazı, farklı darbeler veya alt taşıyıcılar arasındaki faz ilişkisini etkileyebilir ve özellikle eşfazlı (coherent) radar sistemlerinde sinyalin kararlılığı açısından önemlidir. Bu parametrelerin birlikte oluşturduğu model, radar sinyalinin temel matematiksel yapısını tanımlayarak daha karmaşık modülasyonların türetilmesine zemin hazırlar.

Darbe Tekrarlama Aralığı (Pulse Repetition Interval, PRI)

PRI, darbeleri radar sistemlerinin zaman yapısını tanımlayan temel parametrelerden biridir ve Şekil 1'de de görüldüğü üzere ardışık iki radar darbesinin iletimi arasında geçen süreyi ifade eder.

PRI, radarın ne sıklıkla darbe gönderdiğini belirleyen PRF ile ters orantılıdır. Bu ilişki Denklem (2)'deki gibi ifade edilir. Dolayısıyla PRI'nın büyüklüğü, radarın menzil ve hız ölçüm kapasitesini aynı anda etkileyen kritik bir zamanlama değişkeni olarak değerlendirilir.

$$PRF = \frac{1}{PRI} \quad (2)$$

Radarın etkin menzil performansı PRI ile doğrudan ilişkilidir. Bir darbenin gönderilmesi ile hedeften dönen yankının alınması arasında geçen süre hedefin uzaklığına bağı olarak değiştiğinden, PRI'nın çok kısa seçilmesi radarın menzil belirsizliğine sebep olabilir. Çünkü uzak hedeflerden dönen yankılar henüz alınmadan yeni bir darbe gönderilmiş olur. Bu nedenle büyük menzilli arama radarlarında nispeten uzun PRI değerleri kullanılarak menzil kararlılığı sağlanır. Buna karşılık kısa PRI değerleri yüksek PRF'ye karşılık geldiğinden, doppler çözünürlüğü ile hareketli hedef işleme kabiliyetlerini artırır. Bu durum özellikle hız tespitinin kritik olduğu takip veya atış kontrol radarlarında tercih edilir.

PRI, radarın menzil ve hız ölçümlerindeki belirsizlikleri belirleyen önemli bir tasarım parametresidir. Radarın menzil belirsizliği (R_{max}) doğrudan PRI'ya bağı olarak Denklem (3)'deki bağıntı ile ifade edilir.

Denklem (3)'deki c , elektromanyetik dalgaların boşluktaki yayılma hızını ifade etmektedir.

$$R_{max} = \frac{c \cdot PRI}{2} \quad (3)$$

Benzer şekilde PRF düşürüldüğünde, doppler örnekleme yanılıgı ortaya çıkma olasılığı artar ve bu nedenle belirsizliğin olmadığı hız ölçüm aralığı daralır. PRF artırıldığında ise bu aralık genişler ve doppler belirsizliği azalır. Ancak bu kez de belirsizliğin olmadığı menzil ölçüm aralığı daralır. Bu nedenle radar tasarımlarında menzil–hız değiş tokuşu olarak bilinen optimizasyon gerekli olup PRI seçimi, radarın görev isterlerine bağlı olarak dikkatle belirlenir. Modern radar sistemlerinde, bu kısıtları azaltmak amacıyla sabit bir PRI yerine değişken veya örüntülü PRI teknikleri kullanılabilir. Böylece hem menzil hem doppler belirsizliği azaltılarak daha kararlı bir hedef tespit performansı elde edilir.

Dolayısıyla PRI, radarın zaman tabanlı çalışma prensibini belirleyen ve menzil performansı, doppler çözünürlüğü, yankı ayırımı ve hedef izleme doğruluğu üzerinde kritik etkilere sahip temel bir parametredir. PRI'nın doğru seçimi, radarın operasyonel senaryosuna ve sistem mimarisine bağlı olarak performansın optimize edilmesine olanak tanır.

Darbe Genişliği (Pulse Width, PW)

Radarın menzil çözünürlüğü, gönderilen darbenin süresi ile ters orantılı olup yaklaşık olarak Denklem (4)'deki gibi ifade edilir. Bu nedenle PW'nin uzun seçilmesi, yakın mesafedeki iki hedefin radar ekranında tek bir hedefmiş gibi görünmesine sebep olabilir.

$$\Delta R = \frac{c \cdot PW}{2} \quad (4)$$

Buna karşın kısa darbe genişlikleri yüksek menzil çözünürlüğü sağlar. Ancak daha düşük darbe enerjisine yol açarak özellikle uzun menzil uygulamalarında algılama performansını azaltabilir. Bu mühendislik değiş tokuşu, radar tasarımında PW seçiminin kritik ve görev isterlerine bağlı olarak optimize edilmesi gereken bir parametre olmasına neden olur.

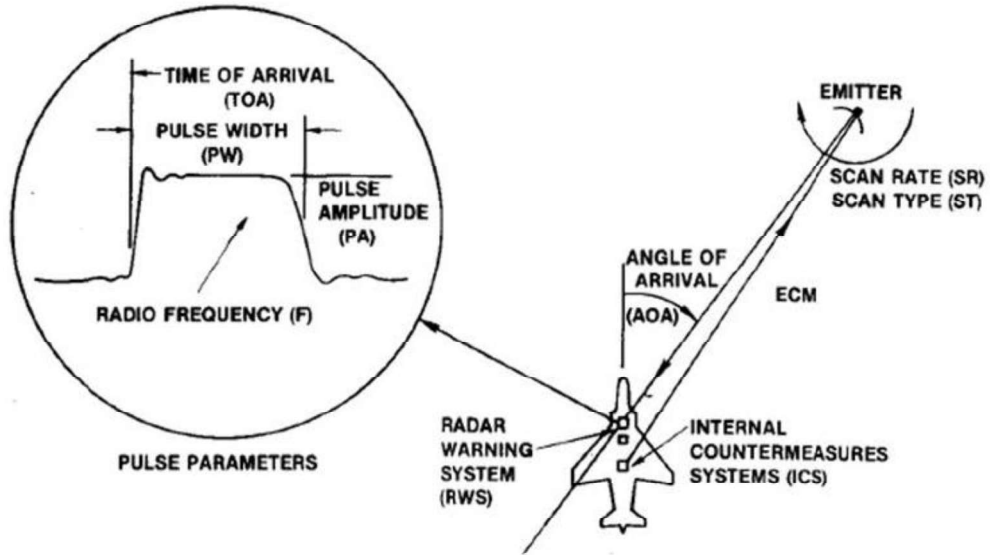
Modern radar sistemlerinde darbe enerjisinin artırılması ile menzil çözünürlüğünün korunmasını aynı anda mümkün kılmak amacıyla darbe içi modülasyon teknikleri kullanılmaktadır. Lineer frekans modülasyonu veya faz kodlama gibi yöntemlerle darbe genişliği uzun tutulurken, sinyal işleme aşamasında darbe sıkıştırma uygulanarak efektif darbe süresi

kısaltılır ve yüksek çözünürlük elde edilir. Böylece PW, fiziksel darbe süresi ile işlenmiş darbe süresi arasında ayrışan bir kavram hâline gelir ve radar performansı açısından daha esnek bir yapı sunar.

Özetlenecek olursa; PW, radarın enerji bütçesi, menzil çözünürlüğü ve sinyal işleme gereksinimleri üzerinde belirleyici etkileri olan temel bir tasarım parametresidir. PW'nin uygun seçimi, radarın görev profiline, hedef türüne ve operasyonel koşullara bağlı olarak dikkatle değerlendirilmesi gereken kritik bir mühendislik bileşeni niteliğindedir.

Geliş Açısı (Angle of Arrival, AOA)

Radarlarda AOA, hedef tarafından yayılan veya hedeften yansıtılarak geri dönen elektromanyetik dalganın radar alıcısına hangi açısal doğrultudan ulaştığını ifade eden temel bir parametredir. AOA, hedefin uzaysal konumunun belirlenmesinde menzil ve doppler hızı ile birlikte kullanılan üç ana ölçüm büyüklüğünden biridir. Bu parametre, özellikle izleme radarlarında, pasif tespit sistemlerinde ve yön bulma uygulamalarında kritik öneme sahiptir. Hedeften yansıtılarak geri dönen elektromanyetik dalganın radar alıcısına geliş açısı Şekil 3'te gösterilmiştir.



Şekil 3. Hedeften Yansıtılarak Geri Dönen Elektromanyetik Dalganın Radar Alıcısına Geliş Açısı (Ortatatlı, 2017)

AOA'nın ölçümü çoğunlukla birden fazla alıcı anten elemanından oluşan anten dizileri kullanılarak gerçekleştirilir. Aynı elektromanyetik dalga cephesinin farklı anten elemanlarına farklı zamanlarda veya farklı

fazlarda ulaşması, hedefin geliş yönüne ilişkin bir geometrik bilgi sağlar. Elemanlar arasındaki zaman farkı veya faz farkı kullanılarak AOA yüksek doğrulukla hesaplanabilir.

Matematiksel olarak, iki anten elemanı arasındaki faz farkı Denklem (5)'deki gibi ifade edilir:

$$\Delta\phi = \frac{2\pi \cdot d}{\lambda} \cdot \sin\theta \quad (5)$$

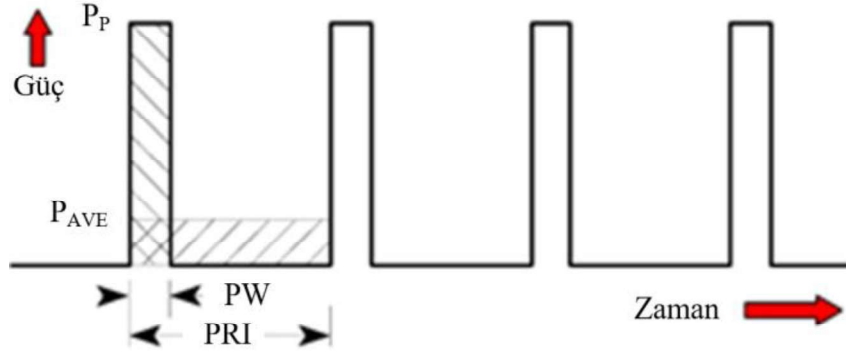
Burada d antenler arası mesafe, λ sinyalin dalga boyu ve θ geliş açısını temsil eder. Bu ilişki üzerinden geliş açısı Denklem (6)'daki gibi hesaplanabilir.

$$\theta = \arcsin \frac{\Delta\phi \cdot \lambda}{2\pi \cdot d} \quad (6)$$

Anten dizisinin fiziksel boyutu, eleman yerleşim geometrisi, kullanılan işaret işleme algoritmaları ve sinyal-gürültü oranı (Signal-to-Noise Ratio, SNR) değeri AOA'nın doğruluğunu etkiler. Yüksek frekanslı ve dar bantlı sinyallerde faz farkı ölçümleri, geniş bantlı sinyallerde ise zaman farkı ölçümleri daha etkin sonuçlar verir.

Darbe Genliği (Pulse Amplitude, PA)

Bir radar sisteminin ilettiği veya aldığı darbe biçimli elektromanyetik sinyallerin anlık güç seviyesini temsil eden ve temel bir parametre olan PA, hem radar vericisinin ürettiği darbenin çıkış gücü hem de radar alıcısının algıladığı geri dönüş sinyalinin genlik seviyesi açısından kritik öneme sahiptir. Genlik değeri; hedefin radar kesit alanı, hedef ile radar arasındaki mesafe, anten kazancı, atmosferik soğurma ve arazi etkileri gibi çeşitli fiziksel ve çevresel faktörlerin birleşik bir fonksiyonu olarak ortaya çıkar. Bu nedenle PA, sinyal kaynağının özellikleri ve çevresel koşullar hakkında dolaylı fakat anlamlı bilgiler sunar. Şekil 4, bir radar darbe treninde tepe güç ile ortalama güç arasındaki farkı, darbe genişliği ve PRI gibi zaman parametreleri üzerinden göstererek iki güç değeri arasındaki ilişkiyi açıklamaktadır.



Şekil 4. Sinyal Tepe Gücü Ve Ortalama Güç (Center, 1997)

Radar alıcılarında darbe genliğinin ölçülmesi, tespit olasılığı ve yanlış alarm olasılığı gibi performans ölçütlerinin belirlenmesinde önemli rol oynar. Yüksek genlik seviyesine sahip geri dönüş sinyalleri, hedefin daha kolay ve güvenilir şekilde tespit edilmesini sağlarken düşük genlikli sinyaller, gürültü tabanına yakınlık nedeniyle hedef tespitini zorlaştırır. Bu kapsamda PA, radarın menzil performansını belirleyen radar denklemi içerisinde dolaylı bir parametre olarak yer alır ve SNR ile doğrudan ilişkilidir.

Elektronik destek ve elektronik harp uygulamalarında ise sinyal kaynağının davranışsal analizinde ve sinyal kümelenendirme süreçlerinde ayrıştırıcı bir parametre olarak kullanılmaktadır. Farklı radar sistemleri veya aynı radar tarafından farklı zamanlarda yayılan sinyaller, genlik profilleri incelenerek ayrılabilir. Ayrıca taramalı (scanning) radar sistemlerinde anten deseninin yönelimi değiştikçe darbe genliğinde meydana gelen periyodik dalgalanmalar, elektronik destek sistemlerine radar anteninin dönüş hızını, bakış yönünü veya çalışma modunu tahmin etme imkânı sağlar. Bu açıdan PA, takip (tracking) ve deinterleaving algoritmalarının hassasiyetini artıran önemli bir özelliktir.

Dolayısıyla PA, radar ve elektronik destek sistemlerinde hem algılama performansını belirleyen bir fiziksel büyüklük hem de sinyal karakterizasyonunda yüksek ayrıştırıcılığa sahip bir parametre olarak değerlendirilmektedir. Radar ortamının modellenmesi, tehdit radarı tanıma ve sinyal kaynağı takibi gibi kritik süreçlerde PA'nın doğru ölçümü ve analizi temel belirleyicilerden biridir.

Anten Tarama Süresi (Scan Time)

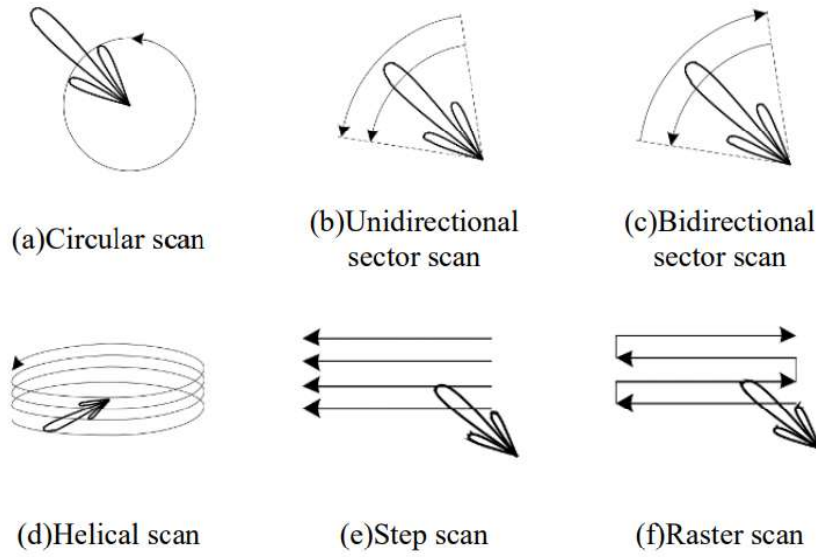
Anten tarama süresi, radar anteninin tüm kapsama alanını bir kez süpürmesi için geçen toplam zamanı ifade eder. Bu süre, radarın mekanik, elektronik veya hibrit anten mimarisine bağlı olarak değişir ve radarın operasyonel kullanımı hakkında önemli bilgiler sunar.

Mekanik döner antenlerde tarama süresi, anten gövdesinin fiziksel dönüş hızına bağlıdır. Bu radarlar sabit bir dönüş hızıyla (örneğin 6 rpm, 12 rpm) çalıştıkları için tarama süresi nispeten öngörülebilir ve belirli radar aileleri için karakteristik bir imza oluşturur. Tarama süresinin ölçülmesi, radarın arama kapasitesi ve hedef yenileme hızı hakkında bilgi verir. Daha kısa tarama süreleri daha hızlı hedef güncellemesi sağlarken, daha uzun süreler geniş alan kapsamına imkân tanır.

Aktif veya pasif elektronik taramalı radar sistemlerinde ise fiziksel hareket bulunmadığından tarama süresi çok daha kısa ve esnektir. Bu radarlar, ışın yönlendirmesini faz kaydırıcılarla gerçekleştirdiği için mikro saniyeler mertebesinde çok hızlı sektör taraması yapabilir. Bu hızlı tarama davranışı radarın LPI özelliklerini artırırken, aynı zamanda eşzamanlı takip, arama, hedef aydınlatma vb çoklu mod işletimine imkân tanır. ELINT analizinde elektronik taramanın düzensiz veya adaptif tarama paternleri, radarın teknoloji seviyesine ilişkin önemli bir gösterge olarak kabul edilir.

Anten Tarama Tipi (Scan Type)

Anten tarama tipi, radar anteninin ışın yönlendirme geometrisini tanımlar ve radarın arama stratejisi ile görev profilini yansıtır. Tarama tipleri radarın amaçlanan operasyonel kullanımını doğrudan belirlediğinden kimliklendirme sürecinde ayırt edici kritik bir parametredir. Şekil 5’de radar sistemlerinde kullanılan farklı tarama geometrileri gösterilmekte olup, dairesel tarama, sektör taraması, helisel tarama, adımli tarama ve raster tarama gibi modların anten hüzmelerinin uzaydaki hareketini nasıl gerçekleştirdiği sunulmaktadır.



Şekil 5. Anten Tarama Tipleri (Gong vd., 2024)

Temel tarama tipleri arasında konik tarama, mekanik azimut taraması, elevasyon kesit taraması, faz dizili çok ışınlı tarama ve hedef odaklı adaptif tarama gibi çeşitli yöntemler yer alır. Konik taramada, anten demeti hedef etrafında küçük bir koni oluşturacak şekilde döner. Bu yöntem genellikle eski nesil yarı-aktif güdümlü füzelerde ve atış kontrol/takip radarlarında kullanılmıştır. Mekanik taramalı arama radarlarında ise ışın, azimut düzleminde 360° dairesel (tam daire) bir şekilde süpürülür. Bu tip tarayıcılar, sabit ve periyodik bir ışın desenine sahip oldukları için ESM/ELINT sistemleri tarafından kolaylıkla karakterize edilir ve kimliklendirilir.

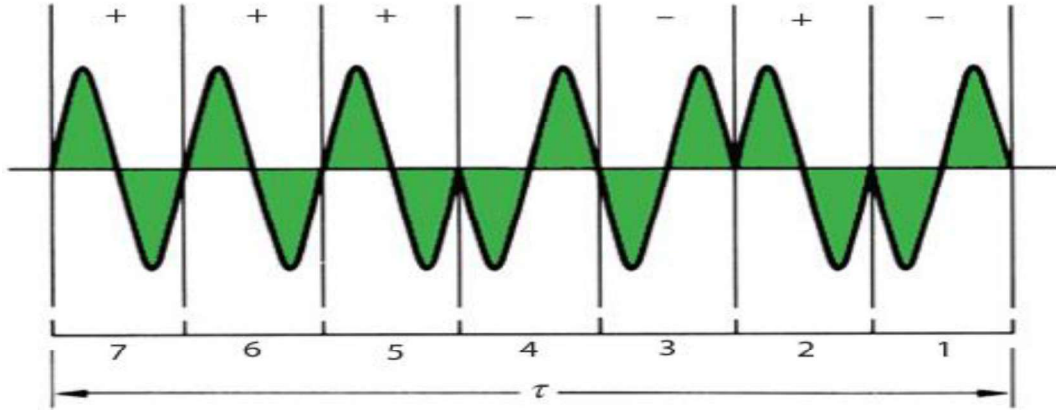
Elektronik taramalı radarlar sektörel tarama, çok ışınlı eşzamanlı tarama, rastgele veya adaptif tarama gibi çok daha karmaşık tarama tipleri kullanabilir. Bu radarlar, anten kazanç dağılımını gerçek zamanlı değiştirebildikleri için klasik PRF ve tarama paternlerinden önemli sapmalar gösterebilir. Özellikle aktif elektronik taramalı dizi radarlarında yapay olarak varyasyon gösteren tarama paternleri, radarın LPI karakteristiğini arttırmak amacıyla kullanılır. Bu nedenle tarama tipi, modern radarların kimliklendirilmesinde güçlü bir taktik işareti olarak değerlendirilir.

Modülasyon Türü

Radar kimliklendirme sürecinin temel taşlarından biri, radar vericilerinin kullandığı modülasyon tekniklerinin tespit ve analizidir. Bir sinyalin parmak izi niteliği kazanmasını sağlayan bu teknikler, sinyale

özgü bir karakter kazandırarak onun hangi tür bir radara ait olduğunun, hatta bazen spesifik platform veya tehdit tipinin belirlenmesine olanak tanır. Modülasyon, temel olarak bir taşıyıcı sinyalin genlik, faz, frekans gibi özelliklerinin, menzil çözünürlüğü, hız çözünürlüğü, elektronik karşı tedbirlere dayanıklılık veya LPI gibi performans kriterlerini iyileştirmek amacıyla değiştirilmesi işlemidir.

En temel ayırım, darbe modülasyonları ve sürekli dalga modülasyonları şeklindedir. Ancak kimliklendirme sürecinde en sık karşılaşılan ve en fazla ayırt edici bilgiyi barındıran türler darbe modülasyonlarıdır. Şekil 6'da örnek olarak verilen yedi dijit binary kod darbe genişliği modülasyonu (Pulse Width Modulation, PWM) ve PRI modülasyonu gibi basit türler, sinyalin zaman düzlemindeki davranışını değiştirerek hedef çözünürlüğü veya belirsizlikleri azaltmaya yöneliktir. Bu modülasyonların tespiti, ESM sistemleri için nispeten daha kolaydır ve radarın genel işlevi hakkında ön bilgi sağlar.



Şekil 6. Yedi Dijit Binary Kod İle PWM (Stimson, 2014)

Daha gelişmiş ve kimliklendirme açısından daha değerli olan modülasyonlar, darbe içi modülasyonlardır. Faz kaydırmalı anahtarlama, özellikle doğrusal frekans modülasyonu ve frekans kaydırmalı anahtarlama bu kapsamda değerlendirilir. Doğrusal frekans modülasyonu, darbe süresi boyunca taşıyıcı frekansın lineer olarak tarandığı bir yapıya sahiptir ve bant genişliğini artırarak yüksek menzil çözünürlüğü sağlar. Bu tür sinyallerin zaman-frekans düzleminde karakteristik bir eğim çizgisi şeklinde görülmesi, onların kimliklendirilmesinde ayırt edici bir özelliktir. Faz modülasyonu ise, darbe içindeki fazın belirli bir koda göre anlık olarak değiştirilmesiyle oluşturulur. Bu kodlar, sinyale özgü bir oto-korelasyon

fonksiyonu kazandırarak hem menzil çözünürlüğünü iyileştirir hem de elektronik karşı tedbirlere karşı gürbüzlük sağlar. Özellikle LPI radarlarında kullanılan bu karmaşık modülasyon türleri, geleneksel yöntemlerle tespit edilmesi ve sınıflandırılması oldukça zor olan sinyallerdir.

Dolayısıyla modülasyon tekniğinin analizi, radar kimliklendirme sürecinin merkezinde yer alır. Basit darbe modülasyonlarından, gelişmiş LPI radar sinyallerinde kullanılan karmaşık faz ve frekans modülasyonlarına uzanan bu spektrum, bir sinyalin dost mu düşman mı olduğunu, ne tür bir tehdit oluşturduğunu ve hangi karşı tedbirlerin etkili olacağını belirlemede kritik öneme sahiptir. Modern ELINT sistemleri, bu modülasyonları tespit edebilmek ve sınıflandırabilmek için zaman-frekans analizi, istatistiksel özellik çıkarımı ve makine öğrenmesi tabanlı gelişmiş algoritmaları kullanmakta, böylece değişen tehdit ortamına uyum sağlayabilmektedir.

RADAR ALGILAMA TEORİSİNDE TESPİT VE YANLIŞ ALARM OLASILIKLARI

Radar algılama teorisi, bir radar sisteminin hedef varlığına ilişkin karar verme süreçlerini istatistiksel bir çerçevede modelleyen temel bir yaklaşımdır. Bu teori, radar alıcısına ulaşan sinyalin hedef kaynaklı gerçek bir yansıma mı yoksa gürültü ve parazit ile oluşmuş rastlantısal bir büyüklük mü olduğuna karar vermeyi amaçlar. Bu bağlamda, karar mekanizmasının performansı iki temel istatistiksel parametre aracılığıyla ifade edilir. Bunlar tespit olasılığı (Probability of Detection, PD) ve yanlış alarm olasılığı (Probability of False Alarm, PFA)'dır. Her iki büyüklük, radarın operasyonel etkinliğinin matematiksel olarak değerlendirilmesinde kritik rol oynar ve genellikle karar eşiğinin konumuna bağlı olarak belirlenir.

PD, radarın hedefin gerçekten var olduğu koşullarda doğru bir tespit kararı verme ihtimalini ifade eder. PD'nin değeri, radar sinyalinin gürültüye göre güç seviyesini belirleyen SNR ile doğrudan ilişkilidir. Yüksek SNR koşullarında radar alıcısı hedef sinyalini daha belirgin şekilde ayırt edebilirken, düşük SNR seviyeleri hedef yansımalarının gürültü tabanına yaklaşmasına ve tespit performansının düşmesine neden olur. PD ayrıca hedefin radar kesit alanı, menzil, atmosferik koşullar ve radarın kullandığı entegrasyon teknikleri gibi fiziksel ve işlemsel faktörlerden de

etkilenir. Bu nedenle PD, hem radar tasarım süreçlerinde hem de görev planlamalarında sistemin etkinliğini değerlendirmek için başvurulmuş bir göstergedir.

PFA ise hedefin gerçekte bulunmadığı durumlarda radarın yanlışlıkla hedef var kararı üretme ihtimalini temsil eder. Gürültü, yer yüzeyi yansımaları, elektromanyetik parazitler ve sistem içi hatalar gibi istenmeyen bileşenler radar alıcı çıkışında tespit eşiğini aşarak yanlış alarm oluşturabilir. PFA'nın düşük tutulması, radarın operatör veya üst seviye sinyal işleme sistemleri üzerinde gereksiz yük oluşturmaması açısından önemlidir. Bununla birlikte, PFA'nın aşırı düşük seviyelere çekilmesi, karar eşiğinin yukarı taşınmasına ve bu nedenle gerçek hedef sinyallerinin bir kısmının kaçırılmasına yol açar. Bu durum PD ile PFA arasındaki yapısal karşıtlığı ortaya koyar; yani birinin iyileştirilmesi genellikle diğerinin belirli ölçüde olumsuz etkilenmesiyle sonuçlanır.

PD ve PFA arasındaki bu karşılıklı bağımlılık, alıcı çalışma karakteristiği (Receiver Operating Characteristic, ROC) eğrileri aracılığıyla görselleştirilir. ROC eğrisi, farklı eşik değerleri için PD'nin PFA'ya karşı değişimini gösterir ve ideal bir radar algılama sisteminin mümkün olduğunca yüksek PD ve mümkün olduğunca düşük PFA sağlayacak şekilde çalışması hedeflenir. Bu doğrultuda eşik optimizasyonu, radar görev senaryosunu, tehdit ortamını, sistem mimarisini ve kullanılabilir işlem yükünü dikkate alarak yapılır. Ayrıca modern radar sistemlerinde adaptif eşik belirleme yöntemleri kullanılarak çevresel koşullara göre dinamik bir denge sağlanmaya çalışılmaktadır.

Tüm bu bilgiler değerlendirildiğinde, tespit ve yanlış alarm olasılıklarının radar algılama performansının temel matematiksel belirleyicileri olduğu görülmektedir. Bu iki parametrenin doğru modellenmesi ve uygun eşik stratejileriyle optimize edilmesi, radarın hem askeri hem de sivil uygulamalarda güvenilir, kararlı ve yüksek doğruluklu bir algılama yeteneğine sahip olması için vazgeçilmezdir. Bu nedenle PD ve PFA, radar mühendisliği literatüründe hem teorik hem de uygulamalı düzeyde merkezi bir konumda yer almaktadır.

SONUÇ VE DEĞERLENDİRME

Modern elektronik harp ortamı, giderek daha karmaşık ve yoğun bir elektromanyetik spektrumla karakterize edilmektedir. Bu ortamda hayati bir öneme sahip olan radar kimliklendirme süreci, yalnızca teknolojik bir

meydan okuma değil, aynı zamanda operasyonel başarı ile güvenlik arasında kritik bir köprü konumundadır. Bu çalışma, radar kimliklendirmeye dair yöntemsel, parametrik ve teorik analizleri bütünleşik bir çerçevede sunmayı hedeflemiştir. İncelenen temel yöntemler göstermiştir ki, zaman, frekans, uzamsal ve istatistiksel özelliklere dayalı tekniklerin her biri, kimliklendirme bulmacasının farklı bir parçasını tamamlamakta, ancak hiçbirisi tek başına her koşulda nihai bir çözüm sunamamaktadır. Karmaşık sinyallerin ve akıllı elektronik karşı tedbirlerin varlığı, bu yöntemlerin sinerjik bir şekilde bir arada kullanılmasının ve adaptif yaklaşımların gerekliliğini ortaya koymaktadır. Parametrik analizler ise, taşıyıcı frekansı, darbe tekrarlama aralığı, darbe genişliği ve anten tarama özellikleri gibi parametrelerin, bir radarın parmak izi niteliğinde olduğunu ve doğru yorumlandıklarında yüksek doğruluklu kimliklendirmeye olanak tanıdığını kanıtlamıştır.

Makale kapsamında ele alınan derin öğrenme tabanlı sınıflandırma modelleri, günümüzde sadece EH ortamlarında değil; güneş radyasyonu tahmini, atık yönetimi ve gıda kalite kontrolü gibi çok geniş bir yelpazede yüksek doğrulukla uygulanmaktadır (Arsel vd., 2024; Eryeşil & Taşdemir, 2023; Aras, Eryeşil & Köklü, 2025; Kılıcı, Eryeşil & Köklü, 2025). Özellikle gri kurt optimizasyonu ile desteklenen derin öğrenme modelleri, karmaşık veri yapılarının sınıflandırılmasında radar kimliklendirme sistemleri için de gelecek vaat eden bir metodolojidir (Eryeşil, Kahramanlı & Taşdemir, 2025).

Radar algılama teorisi çerçevesinde ele alınan tespit ve yanlış alarm olasılıkları ise, kimliklendirme performansının temelinde yatan matematiksel gerçekliği vurgulamıştır. Sinyal-gürültü oranı ile eşik seviyesi belirleme stratejileri arasındaki dengenin, yalnızca bir sinyalin varlığını değil, aynı zamanda kimliğinin ne güvenilirlikle doğrulanabileceğini de doğrudan etkilediği görülmüştür. Tüm bu bilgiler birlikte değerlendirildiğinde modern elektronik harp sistemlerinde daha güvenilir, hızlı ve sağlam kimliklendirme yetenekleri geliştirmek, ancak çok boyutlu bir yaklaşımla mümkündür. Bu yaklaşım, geleneksel yöntemlerin geliştirilmesinin yanı sıra yapay zekâ ve makine öğrenmesi tabanlı algoritmaların entegrasyonunu, çoklu sensör füzyonunu ve gerçek zamanlı öğrenme kapasitesine sahip sistemlerin tasarımını gerektirmektedir. Gelecekteki araştırmaların, değişen tehditler karşısında öz-uyarlanabilir ve geleceği öngören kimliklendirme mekanizmaları

üzerine odaklanması, elektronik üstünlüğün korunması açısından belirleyici olacaktır.

KAYNAKÇA

- Ağaçayak, A. C., & Sungur, C. (2019). Dron ağları için topoloji incelenmesi. M. Turhan (Ed.), *Mühendislik alanında yeni ufuklar* (1. baskı). Gece Akademi.
- Ağaçayak, A. C., Terzioğlu, H., & Özdeş, B. (2020). Elektrikli araçlarda telemetri. In H. Terzioğlu & G. Yalçın (Eds.), *Elektrikli araçlara genel bakış 2* (1st ed.). İKSAD.
- Aka, O. C., & Kazan, F. A. (2024, 26–28 Aralık). *Importance of traffic alert and collision avoidance system in aviation* [Konferans sunumu]. Selcuk University 3rd International Technology and Innovation Student Symposium (SUTIS), Konya, Türkiye.
- Akbunar, Ö., & Yüksekaya, B. (2023). Radar intrapulse modulation classification with deep learning. *2023 31st Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU)*, IEEE.
- Aksoy, S., & Kazan, F. A. (2022a). Investigation of the effect on the drone's energy consumption of flying at different altitudes. S. Neşeli & H. Terzioğlu (Ed.), *New trends in engineering* (1. baskı, s. 129–140), Tablet Kitabevi.
- Aksoy, S., & Kazan, F. A. (2022b, 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.
- Anjaneyulu, L., Murthy, N., & Sarma, N. (2008). Radar emitter classification using self-organising neural network models. *2008 International Conference on Recent Advances in Microwave Theory and Applications*, IEEE.
- 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>
- Aras, H. H., Eryeşil, Y., & Köklü, M. (2025). An explainable deep learning framework for Agron-based coffee roast classification using Grad-CAM. *3rd International Conference on Intelligent Systems and New Applications (ICISNA'25)*.
- 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>
- Aslan, M. K. (2006). *Elektronik harpte yayın tanımlama teknikleri* [Yüksek lisans tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi]. YÖK Tez Merkezi.
- Cemil, A., & Ünlü, M. (2022). Analysis of ADAS radars with electronic warfare perspective. *Sensors*, 22(16), 6142.
- Center, N. A. W. (1997). *Electronic warfare and radar systems engineering handbook*. Electronic Warfare Division.
- Chan, Y., Chan, F., & Hassan, H. (2002). Performance evaluation of ESM deinterleaver using TOA analysis. *14th International Conference on Microwaves, Radar and Wireless Communications (MIKON-2002)*, IEEE.
- Coşkun, İ., & Terzioğlu, H. (2007). Hız performans eğrisi kullanılarak kazanç PID parametrelerinin belirlenmesi. *Selçuk-Teknik Dergisi*, 6(3), 180–205.
- Coşkun, İ., & Terzioğlu, H. (2009). Gerçek zamanda değişken parametrelili PID hız kontrol. *IV. International Advanced Technologies Symposium (IATS'09)*.
- Erdoğan, M., & Yıldız, O. (2024). Evrişimli sinir ağı kullanarak dengesiz doppler radar verisinde hedef tespiti. *Politeknik Dergisi*, 27(4), 1317-1326.
- 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>

- Ge, Z., Sun, X., Ren, W., Chen, W., & Xu, G. (2019). Improved algorithm of radar pulse repetition interval deinterleaving based on pulse correlation. *IEEE Access*, 7, 30126-30134.
- Gençol, K. (2015). *Radar vericilerinin kimliklendirilmesi için yeni metotlar* [Doktora tezi, Anadolu Üniversitesi]. YÖK Tez Merkezi.
- Gong, Y., Qubi, D., Fan, Y., Tang, S., Guo, Z., & Liu, X. (2024). Automatic radar antenna scan type recognition based on the residual network. *2024 IEEE 7th International Conference on Electronic Information and Communication Technology (ICEICT)*, IEEE.
- Gülüm, T. Ö. (2016). *Sayısal elektronik harp tespit alıcıları için iyileştirilmiş yod dalgaformu gösterimleri* [Doktora tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi]. YÖK Tez Merkezi.
- Güntürkün, R. (2023a). Advantages Of Fifty Generation Warplanes. *International Journal Of Research İn Engineering And Science (Ijres)*, 11(10), 388–393.
- Güntürkün, R. (2023b). Why Are Flight Data Recorders Used On Airplanes. *International Journal Of Research İn Engineering And Science (Ijres)*, 11(10), 384–387.
- Güven, E. (1994). *Kümeleme teknikleri kullanılarak elektronik harpte verici tanımlama* [Yüksek lisans tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi]. YÖK Tez Merkezi.
- İnan, O., Rasooli, A. Q., & Servi, S. (2024). Clustering with the blackwinged kite algorithm. *International Journal of Computer Science & Communications*.
- Kayacan, G., & Kazan, F. A. (2025). Radar teknolojisinin temelleri, gelişimi ve modern uygulama alanları. *International Journal of Advanced Natural Sciences and Engineering Researches*, 9(11), 84-93.
- 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.
- 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>
- Kısalar, E. (2016). *Radar ikaz alıcı sistemleri ve radar sinyallerinin sınıflandırılması* [Yüksek lisans tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi]. YÖK Tez Merkezi.
- Kocamış, M. B., Abacı, H., Akdemir, Ş. B., Varma, S., & Yıldırım, A. (2016). Deinterleaving for radar warning receivers. *2016 24th Signal Processing and Communication Application Conference (SIU)*, IEEE.
- Koçman, M. A. (2023). *Bilgi güvenliği bağlamında kişisel verilerin korunması ve elektronik harp* [Yüksek lisans tezi, Necmettin Erbakan Üniversitesi]. YÖK Tez Merkezi.
- Lee, D., Cheung, C., & Pritsker, D. (2019). Radar-based object classification using an artificial neural network. *2019 IEEE National Aerospace and Electronics Conference (NAECON)*, IEEE.
- Moore, J. B., & Krishnamurthy, V. (2002). Deinterleaving pulse trains using discrete-time stochastic dynamic-linear models. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 42(11), 3092-3103.
- Nasıroğlu, A. (2023). *Elektronik harp sistemlerinde kullanılan Radar İkaz Alıcı'nın MATLAB'da simülasyonu* [Yüksek lisans tezi, Selçuk Üniversitesi]. YÖK Tez Merkezi.
- Nishiguchi, K. I., & Kobayashi, M. (2000). Improved algorithm for estimating pulse repetition intervals. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 36(2), 407-421.
- Noone, G. P. (1999). A neural approach to automatic pulse repetition interval modulation recognition. *1999 Information, Decision and Control*, IEEE.
- Olgun, M. E. (2008). *Verimli ayrıştırma algoritmasının tasarımı ve FPGA uygulaması* [Yüksek lisans tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi]. YÖK Tez Merkezi.
- Orsi, R. J., Moore, J. B., & Mahony, R. E. (2002). Spectrum estimation of interleaved pulse trains. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 47(6), 1646-1653.
- Ortatatlı, İ. E. (2017). *Elektronik destek sistemlerinde gerçek zamanlı tehdit radar parametreleri çıkarımı* [Yüksek lisans tezi, TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi]. YÖK Tez Merkezi.

- Ray, P. S. (2002). A novel pulse TOA analysis technique for radar identification. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 34(3), 716-721.
- 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).
- Shieh, C. S., & Lin, C. T. (2002). A vector neural network for emitter identification. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 50(8), 1120-1127.
- Stimson, G. W. (2014). *Introduction to airborne radar* (3. baskı). SciTech Publishing Inc.
- 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.

BÖLÜM 2

DÜŞÜK YAKALANMA OLASILIKLI RADARLARIN ALGILANMASI İÇİN BİLİŞSEL ELEKTRONİK HARP YÖNTEMLERİ*

Zeynep HASALAN**, Fatih Alpaslan KAZAN***

GİRİŞ

Modern radar ve Elektronik Harp (EH) teknolojilerindeki hızlı ilerlemeler, Elektromanyetik Spektrumu (EMS) son derece yoğun, değişken ve karmaşık bir harekât alanına dönüştürmüştür. Radar, haberleşme, seyrüsefer ve algılama sistemlerinin her geçen gün daha uyarlanabilir ve daha az görünür hâle gelmesi, EMS üzerinde sürekli farkındalık sağlamayı askerî açıdan hayati bir ihtiyaç hâline getirmektedir. Bu nedenle bilişsel radar ve bilişsel EH yaklaşımları, karmaşık EMS koşullarında otonom algılama, öğrenme ve uyarlama kabiliyeti sunan kritik teknolojiler olarak öne çıkmaktadır. Bilişsel radar mimarileri; algılama-eylem döngüsü, bellek yapıları ve geri besleme mekanizmaları sayesinde

* Bu çalışma 17–20 Aralık 2025 tarihleri arasında Konya’da düzenlenen *The International Conference on Defense Technologies and Future Strategies (SATEGS 25)* isimli konferansta “*Cognitive Electronic Warfare Techniques for the Detection of Low Probability of Intercept (LPI) Radars*” başlığıyla sunulmuş ve konferans özet kitabında özeti yayımlanmıştır. Çalışmanın genişletilmiş ve tam metin hâli ilk kez bu kitap bölümünde yayımlanmaktadır.

** Yüksek Lisans Öğrencisi, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Savunma Teknolojileri, Konya, Türkiye, zeynephasalan@gmail.com, ORCID: orcid.org/0009-0005-7518-6203

*** Dr. Öğr. Üyesi, Selçuk Üniversitesi, Sivil Havacılık Yüksekokulu, Havacılık Elektrik Ve Elektroniği Bölümü, Konya, Türkiye, akazan@selcuk.edu.tr, ORCID: orcid.org/0000-0002-5461-0117

çevresel belirsizliklere karşı algılama davranışını gerçek zamanlı olarak optimize edebilirken (Gurbuz vd., 2020), bilişsel EH mimarileri de uyarlanabilir sinyal işleme teknikleri ve makine öğrenmesi modellerinden yararlanarak çok işlevli, çevik ve düşük görünürlüklü modern radar tehditlerine karşı daha dayanıklı ve sürdürülebilir bir EMS farkındalığı oluşturmaktadır (Fountain & Humbert, 2023; Dünder & Ağaçayak, 2023; Mirjafarlı vd., 2022)

Spektrumun giderek daha yoğun hâle gelmesi, çok i levli radarların yaygınlaşması ve düşük yakalanma olasılıklı (Low Probability of Intercept - LPI) yayın tekniklerinin gelişmesi, klasik tespit yöntemlerinin etkinliğini ciddi ölçüde zayıflatmı tır. LPI radarlar; geniş bantlı, gürültü benzeri ve faz/frekans modülasyonlu dalga biçimlerini kullanarak sinyallerini gürültü tabanına gizler. Bu durum, Elektronik Destek (ED) alıcılarının enerji e i ine dayalı tespit yöntemlerini önemli ölçüde etkisiz hâle getirir. Dolayısıyla LPI sinyallerinin algılanması ve sınıflandırılması, günümüz EH literatüründe  ne çıkan kritik araştırma problemlerinden biri olarak kabul edilmektedir (Reddy & Sinha, 2025).

LPI radar sinyallerinin tespiti ve sınıflandırılmasına yönelik literatür incelendiğinde, derin öğrenme tabanlı zaman-frekans sınıflandırıcılarının, özellikle evrişimli sinir a ları (Convolutional Neural Network-CNN) ve görüntü dönüştürücü (Vision Transformer-ViT) modellerinin, düşük sinyal gürültü oranı (Signal to Noise Ratio-SNR) koşullarında dahi gürültü içine gizlenmiş LPI sinyallerini ayırt edebilme yetenekleriyle  ne çıktığı görülmektedir (Kim, Cho, Hwang, & Choi, 2023). Yapay zekâ destekli EH sistemleri ise yayın tespiti, tehdit sınıflandırması ve kaynak yönetimi gibi süreçlerde makine öğrenmesi yöntemlerinden yararlanarak daha esnek ve  evik karar mekanizmaları sunmaktadır (Sharma, Sarma, & Mastorakis, 2020). Buna karşın, darbe tekrarlama aralığı (Pulse Repetition Interval-PRI) temelli özellik çıkarımı ve modülasyon tanıma teknikleri, klasik darbeleri radarlar üzerinde yüksek performans göstermelerine rağmen LPI radarlar söz konusu olduğunda belirgin sınırlamalara sahiptir (Kauppi & Martikainen, 2007). Zaman-frekans tabanlı yöntemler ve belirsizlik fonksiyonu analizleri frekans modülasyonlu LPI sinyallerinin karmaşık yapısını ortaya koyabilse de hesaplama yüklerinin yüksek olması operasyonel uygulamaları zorlaştırmaktadır (Lvvd. , 2021). Modern hava muharebe sahasında üstünlük sağlamak amacıyla geliştirilen beşinci nesil savaş uçakları, düşük görünürlük (stealth)  zellikleri ve geli mi  aviyonik

sistemleri sayesinde operasyonel avantaj elde etmektedir (Güntürk, 2023b). Hava platformlarında sistem performansının analizi ve olası arızaların tespiti için kullanılan uçuş veri kaydedicileri, karmaşık elektronik harp senaryolarında elde edilen verilerin değerlendirilmesi açısından da kritik bir role sahiptir (Güntürk, 2023a). Bu platformlarda kullanılan LPI radar teknolojileri, uçağın tespit edilme riskini minimize ederek hayatta kalma kabiliyetini artırmaktadır. Ayrıca, derin öğrenme tabanlı darbe ayrıştırma yaklaşımları karışık radar darbelerinin ayrıştırılmasında önemli ilerlemeler sunmalarına rağmen yoğun LPI sinyallerinin bulunduğu ortamlarda hâlâ çeşitli zorluklarla karşılaşmaktadır (Z.-M. Liu, 2021). Deniz sınırlarının izlenmesi ve güvenliğin sağlanması, modern savunma stratejilerinin temelini oluşturmaktadır. Bu bağlamda, insansız araçların farklı çevresel koşullardaki performans analizleri ve enerji tüketim optimizasyonları, sürdürülebilir bir gözetleme altyapısı için kritiktir (Aksoy & Kazan, 2022). Ayrıca, bu araçların sadece denizcilikte değil, havacılık güvenliği ve çarpışma önleme sistemlerindeki rolleri de teknolojik gelişimin bir parçasıdır (Aka & Kazan, 2024). Otonom sistemlerden elde edilen verilerin işlenmesi, günümüzde sadece nesne tespitiyle sınırlı kalmayıp, güneş radyasyonu tahmini gibi çevresel parametrelerin kestiriminde de kullanılmaktadır (Arsel vd., 2024).

Mevcut yöntemlerin büyük bir kısmı, etkin biçimde çalışabilmek için belirli bir SNR seviyesinin, düzenli PRI örüntülerinin veya açık şekilde ayrılan zaman-frekans özelliklerinin varlığını gerektirir. Oysa gerçek muharebe ortamında LPI radarlar geniş bant yapıları, yüksek faz/frekans çevikliği ve gürültü benzeri enerji yayılımlarıyla sürekli değişen ve modüle edilmiş sinyaller üretir. Bu durum, ED sistemlerinin sinyal ayrıştırma, ilişkilendirme ve kimliklendirme süreçlerini önemli ölçüde güçleştirir. Bu nedenle bilişsel EH'nin uyarlanabilir yapısını modern derin öğrenme mimarileriyle bir araya getiren, LPI radar sinyallerine yönelik bütünleşik bir tespit yaklaşımının geliştirilmesi büyük önem taşımaktadır.

LPI radar teknolojilerindeki hızlı gelişim ve EMS'nin giderek daha karmaşık bir hâle gelmesi, klasik ED sistemlerinin pasif izleme ve eşik tabanlı tespit yetenekleriyle sürdürülebilir bir performans sergilemesini güçleştirmektedir. Literatürde sunulan zaman-frekans analizi, belirsizlik fonksiyonu temelli yöntemler ve derin öğrenme tabanlı sınıflandırıcılar, belirli koşullar altında umut verici olsa da, modern LPI radarların geniş

bantlı, çevik modülasyonlu ve gürültü tabanına gömülü sinyal yapıları karşısında halen çeşitli sınırlılıklarla karşılaşmaktadır. Özellikle gerçek muharebe ortamının değişken ve belirsiz spektral dinamikleri göz önünde bulundurulduğunda, LPI sinyallerinin tespiti ve tanınmasının yalnızca statik bir işleme zinciriyle değil, yeni duruma uyum sağlayabilen, gözlemden öğrenebilen ve kararını güncelleyebilen bilişsel bir yapı ile ele alınması gerekmektedir.

Bu nedenle, zaman-frekans görüntülerinin sunduğu zengin spektral bilgiyi derin öğrenme modellerinin otomatik özellik öğrenme kapasitesiyle bir araya getiren, aynı zamanda çevresel geri besleme ile kendini sürekli optimize eden bilişsel EH mekanizmalarının bütünleşik olarak kullanılması büyük önem taşımaktadır. Bu yaklaşım, yalnızca sinyali tanıyan değil, değişen tehdit davranışını takip eden ve algılama-öğrenme-uyarlama döngüsü içinde kendi performansını geliştirebilen bir ED mimarisinin gerekliliğini ortaya koymaktadır. Bu ihtiyaç doğrultusunda bir sonraki bölümde, LPI radarların bilişsel EH yöntemleriyle algılanmasına yönelik yeni nesil yaklaşımlar incelenmekte, otomatik özellik çıkarımı, derin öğrenme tabanlı yorumlama süreçleri ve bilişsel döngünün ED sistemlerine entegrasyonu ayrıntılı olarak ele alınmaktadır.

LPI RADARLAR VE BİLİŞSEL SİSTEMLER

Görüntü işleme ve nesne tespiti süreçlerinde karşılaşılan gürültü ve veri karmaşıklığı sorunlarını gidermek için yapay alg algoritmaları gibi doğadan esinlenen kümeleme yöntemleri veri kalitesini artırmak amacıyla kullanılabilmektedir (Anwer & Servi, 2021). Eğitim sürecindeki hiper-parametre optimizasyonu, modelin başarısını doğrudan etkiler. Bu kapsamda geliştirilen tuna sürüsü optimizasyonu ve guguk kuşu araması gibi hibrit algoritmalar, global optimizasyon problemlerinde yüksek performans sunarak derin öğrenme modellerinin eğitim süreçlerine entegre edilebilir (Şahin & Servi, 2024). Ayrıca, sınıflandırma problemlerinde kullanılan lojistik regresyon gibi temel istatistiksel yöntemler, karmaşık mühendislik problemlerinin çözümünde yardımcı bir araç seti sunmaktadır (Servi vd., 2018).

LPI Radarların Temelleri

LPI radarlar, ED almaçları tarafından tespit edilme olasılığını en aza indirmek amacıyla dalga şekillendirme, güç yönetimi ve spektral yayılım gibi yöntemlere dayanarak tasarlanırlar. Geniş bantlı, gürültü benzeri veya

sürekli modülasyonlu sinyaller kullanmaları sayesinde bu radarlarda güç spektral yoğunluğu (Power Spectral Density-PSD) ortam gürültüsüne oldukça yakın kalır ve eşik tabanlı tespit yöntemleri büyük ölçüde etkisiz hâle gelir. Bilişsel radar literatürü, LPI radarların düşük görünürlük sağlamak için düşük tepe gücünü uzun süreli ya da kodlanmış dalga biçimleriyle birleştirdiğini, bunun da klasik ED almaçları için yakalama olasılığını belirgin biçimde azalttığını vurgulamaktadır (Reddy & Sinha, 2025).

Modern LPI sistemlerinin ortak ve temel özelliklerinden biri, dalga biçimi enerjisini zaman-frekans düzlemine yaymak amacıyla frekans modülasyonu (Frequency Modulation-FM), faz kodlama veya yayılmış spektrum tekniklerinin kullanılmasıdır. Bu teknikler çizgisel spektral bileşenleri bastırır ve gürültü benzeri işaretler üretir. Bu durum, PRI, darbe genişliği (Pulse Width-PW) ve taşıyıcı frekans gibi geleneksel ED parametre çıkarım yöntemlerini zorlaştırır. FM temelli LPI sinyalleri ile P4 ve doğrusal olmayan frekans modülasyonu gibi kodlu dalga biçimleri, spektrogramlarda belirsiz izler oluşturur ve çoğu zaman parametre çıkarımı için uyarlanabilir ya da makine öğrenmesi temelli zaman-frekans analiz tekniklerini gerektirir (Kim vd. , 2023).

LPI radarlar, tespit edilme olasılığını daha da azaltmak için hızlı frekans atlaması, rastgele PRI modülasyonu ve düşük etkin güç değeri gibi çevik yayın davranışları da kullanırlar. PRI modülasyon tanıma çalışmalarında iyi yapılandırılmış ED sistemlerinin dahi LPI koşullarında sinyalleri ayırt etmekte zorlandığı, çünkü jitter etkilerinin ve gürültü benzeri modülasyon örüntülerinin baskın hâle geldiği gösterilmektedir (Kauppi & Martikainen, 2007).

Bilişsel Radar İlkeleri

Bilişsel radar, çevreyi sürekli olarak analiz eden ve algıladığı koşullara göre gerçek zamanlı olarak algılama stratejilerini uyarlayan algılama-öğrenme-uyarlama döngüsü üzerine kuruludur. Bu mimarinin temeli biliş teorisine dayanır ve çevresel belirsizliklere göre kapalı döngüde optimize edilen bir yapı hâline getirilmiştir (Gurbuz vd. , 2020).

Bir bilişsel radar sistemi algılama, öğrenme ve uyarlama olmak üzere üç temel bileşenden oluşur:

1. Algılama: Alınan ekolardan sinyal işleme ve öznitelik çıkarımı yöntemleriyle bilgi elde edilmesi.

2. Öğrenme: Geçmiş gözlemler temelinde çevre, hedef ve parazit modellerinin güncellenmesi.
3. Uyarılama: Değişen koşullarda azami tespit performansını sağlayabilmek için dalga biçimlerinin, hüzme desenlerinin veya alıcı stratejilerinin dinamik olarak değiştirilmesi.

Yapılan çalışmalar, bilişsel radarların gürültü, parazit veya karıştırma içeren ortamlarda tespit performansını artırmak amacıyla dalga biçimlerini gerçek zamanlı olarak seçebildiğini göstermektedir. Bu tür sistemler hem yayın hem de alım süreçlerini optimize etmek için olasılıksal modellerden, pekiştirmeli öğrenme yöntemlerinden ve derin öğrenme tabanlı yaklaşımlardan yararlanır (Fountain & Humbert, 2023).

Bilişsel EH

Bilişsel EH, bilişsel radar ilkelerini EH alanına genişleterek, ED ve Elektronik Taarruz (ET) sistemlerinin EMS'yi otonom olarak analiz etmesini, yayıcıları sınıflandırmasını ve uygun karşı tedbirleri planlamasını sağlar. Bilişsel EH mimarileri, düşük SNR ve yoğun yayıcı içeren ortamlarda dahi güçlü özellikler çıkarabilmek için makine öğrenmesine dayanır (Sharma vd. , 2020). (Ağaçayak & Sungur, 2019)

Güncel değerlendirmeler, bilişsel EH'nin otonom spektrum algılama, öğrenmeye dayalı yayıcı sınıflandırma ve uyarlanabilir karşı tedbir planlama olmak üzere üç temel sütun üzerine inşa edildiğini vurgulamaktadır.

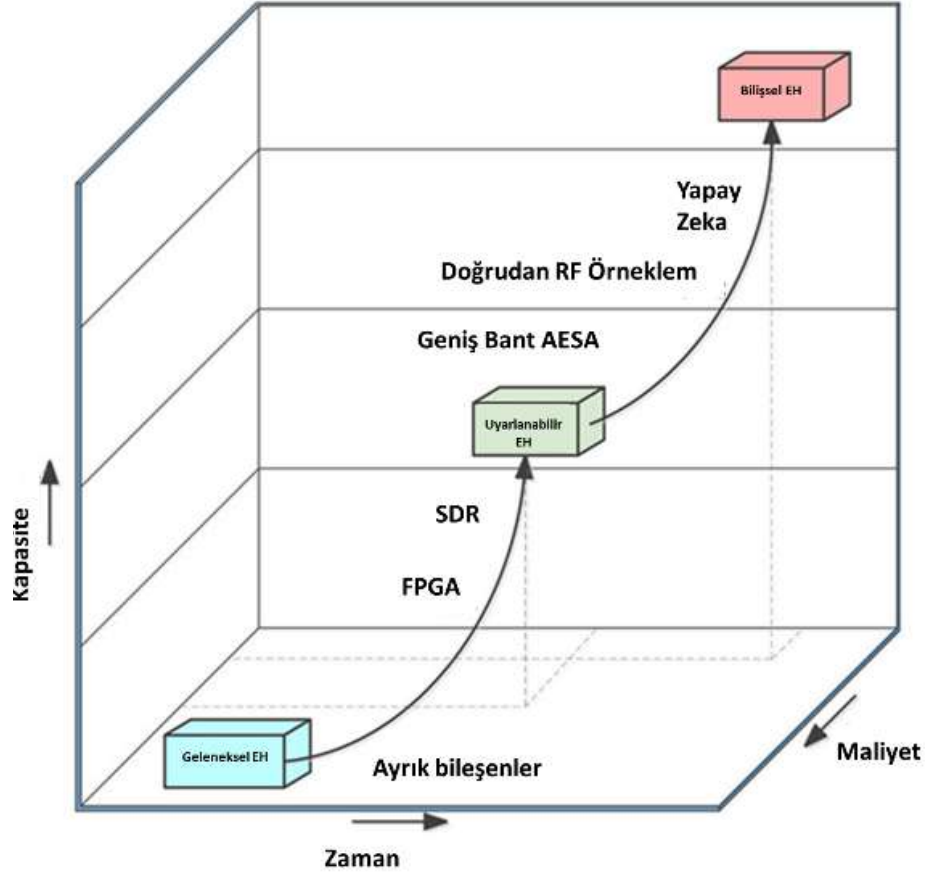
Otonom spektrum algılamada bilişsel EH sistemleri EMS'yi sürekli olarak izler, yayıcıları tespit eder ve sinyaller gürültü içinde gömülü olsa bile parametre çıkarımı yapar. Derin öğrenme tabanlı spektrogram analizleri, uyarlanabilir eşikleme ve korelasyon ölçümleriyle birlikte kullanıldığında LPI ortamlarında etkili sonuçlar üretmektedir (Reddy & Sinha, 2025).

Öğrenmeye dayalı yayıcı sınıflandırmada CNN ve dikkat tabanlı mimariler sayesinde LPI dalga biçimi sınıflandırması önemli ölçüde gelişmiştir. Bu modeller düşük SNR koşullarında bile klasik uyumlu filtreleme ve elle tasarlanan özellik çıkarımı yöntemlerinden daha yüksek performans göstermektedir. CNN-dikkat hibritlerinin, FM'li ve kodlanmış LPI sinyallerinde güçlü tanıma kabiliyeti sunduğu gösterilmiştir (Tang, Huang, & Chen, 2022).

Uyarlanabilir karşı tedbir planlama özelinde bilişsel EH mimarileri, en uygun karıştırma veya kaçınma stratejilerini seçmek için pekiştirmeli öğrenme ve veri odaklı karar algoritmalarını kullanır. Güncel EH karar verme yaklaşımları, bilişsel EH sistemlerinin belirsizlik altında, karşı tarafın değişken davranışları ve eksik bilginin bulunduğu koşullarda çalışması gerektiğini, bu nedenle de sürekli gerçek zamanlı uyarlama ihtiyacı bulunduğunu vurgulamaktadır (Zhang, Wang, Jiang, Hu, & Xu, 2023).

Bilişsel EH giderek daha rekabetçi ve uyarlanabilir hâle gelen EMS'de etkinlik sağlamak amacıyla geleneksel ve adaptif EH yaklaşımlarının ötesine geçerek yapay zekâ ve makine öğrenmesi temelli otonom karar verme kabiliyetleri sunmaktadır. Modern radar ve haberleşme sistemlerinin çevik olması, EH sistemlerinin çevreyi algılayarak öğrenmesini ve bilinmeyen EMS koşullarına uyum sağlamasını zorunlu kılmaktadır. Bu gelişim Şekil 1'de de görüleceği üzere geleneksel, adaptif ve bilişsel EH şeklinde sürekli gelişen bir yapıda olmalıdır. Geleneksel düzenekler görev verilerine dayalı yanıtlar üretirken, uyarlanabilir düzenekler ise alanı isteğe göre programlanabilen yongalar ve yazılımla tanımlanan telsiz yapıları sayesinde çevresel koşullara göre yeniden düzenlenebilir. Bilişsel EH ise derin öğrenme tabanlı ED işlevleri, bulanık mantık veya pekiştirmeli öğrenme kullanan ET karar süreçleri gibi yöntemlerle yüksek düzeyde otonomi sağlar (Reddy & Sinha, 2025).

Şekil 1, EH teknolojilerinin geleneksel yapıdan uyarlanabilir ve bilişsel EH seviyesine doğru artan kabiliyet ile evrildiğini göstermektedir. Bu süreçte Alan Programlanabilir Kapı Dizisi (Field Programmable Gate Array- FPGA), Yazılım Tanımlı Radyo (Software Defined Radio- SDR), geniş bant Aktif Elektronik Taramalı Dizi Anten (Active Electronically Scanned Array-AESA), doğrudan Radyo Frekans (RF) örnekleme ve yapay zekâ gibi teknolojiler kabiliyet artışını desteklerken maliyet ve işlem kapasitesi de yükselmektedir.



Şekil 1: Geleneksel EH'nin Bilişsel EH'ye Evrimi (Reddy & Sinha, 2025)

LPI RADARLARDA KULLANILAN TEMEL ÖZELLİKLER VE TEKNİKLER

LPI radarlar, radarın EMS'de bıraktığı izi azaltarak ED sistemleri tarafından tespit edilme olasılığını en aza indirmek amacıyla geliştirilmiştir. Geleneksel yüksek tepe gücüne sahip radar darbeleri ED alıcıları tarafından kolayca fark edilebilirken, LPI radarlar düşük tepe gücü kullanarak algılanabilirliği bilinçli şekilde düşürürler. Bu yaklaşım, radar sinyalinin spektral yoğunluğunu rastlantısal gürültüye benzeterek eşik tabanlı tespit yöntemlerinin verimini azaltır. Böylece radar, hedefi etkili biçimde takip ederken ED sensörleri için düşük görünürlük sağlar (Kim vd. , 2023). LPI radarlar hedef tespit kabiliyetini korurken yaydıkları enerjiyi geniş bir frekans aralığına dağıtarak sinyalin gürültü tabanına gömülmesini sağlar. Geniş bantlı, sürekli dalga veya karmaşık modülasyon tipleri sayesinde radar emisyonu klasik analiz yöntemleriyle ayırt edilmesi zor bir yapı kazanır. Frekans atlamalı, faz kodlu veya lineer frekans modülasyonlu darbeler gibi teknikler, sinyal enerjisini zamana ve frekansa yayarak ED sistemlerinin parametre çıkarımını zorlaştırır. LPI radarlar,

modern EH ortamında hem kendi hayatta kalma şanslarını artırmak hem de düşmanın spektrum farkındalığını azaltmak için tasarlanmış gelişmiş sinyal işleme tekniklerini kullanırlar (Tang vd. , 2022).

Güç Spektral Yoğunluğu ve Gürültü Benzeri Yayılımlar

LPI radar sinyallerinin temel özelliklerinden biri, PSD'nin çevresel gürültü seviyesine yakın seyretmesidir. Geniş bant modülasyonlar, uzun süreli darbeler ve düşük tepe gücü kullanımı, yayılan enerjiyi gürültü tabanına gömerek alıcıların sinyali tespit etmesini zorlaştırır. Güncel EH değerlendirmelerinde, LPI radarların enerji imzasını gizlemek için güç yayma tekniklerini yoğun şekilde kullandığı, bu nedenle gelişmiş işleme yöntemleri olmadan sinyalin gürültüden ayırt edilemediği belirtilmektedir (Reddy & Sinha, 2025).

Frekans modülasyonlu sürekli dalga (Frequency Modulation Continuous Wave - FMCW), doğrusal olmayan frekans modülasyonlu (Nonlinear FM - NLFM) ve faz kodlamalı (P1-P4, Costas vb.) dalga biçimleri, dar bantlı spektral bileşenleri bastırarak pürüzsüz ve ton içermeyen bir güç spektral yoğunluk (PSD) yapısı üretir. Son çalışmalar, bu tür gürültü benzeri (gürültümsü) PSD dağılımlarının, özellikle düşük SNR koşullarında, klasik spektrum analizi yöntemleriyle sınıflandırılmadığını, buna karşılık ViT tabanlı yöntemlerin daha başarılı olduğunu göstermektedir (Kim vd. , 2023).

Sinyal Modülasyonu, Darbe Sıkıştırma ve Uyumlu Filtreleme

LPI radarlar, ilettikleri enerjiyi hem zaman hem de frekans eksenine yaymak amacıyla FM ve faz modülasyon (Phase modulation-PM)'li darbeler ile yayılı spektrum sinyalleri kullanır. Bu yaklaşım, sinyalin zaman-frekans düzleminde belirgin bir iz bırakmasını engelleyerek ED alıcılarının parametre tahmini yapmasını zorlaştırır. Bu nedenle LPI dalga biçimleri spektrogramlarda, klasik kısa darbeli radar sinyallerinde görülen net ve yüksek kontrastlı izlerden ziyade düşük görünürlüklü, geniş ve bulanık yapılar oluşturur. FM chirp sinyallerinde anlık frekans zaman içinde sürekli değiştiğinden, spektrogram üzerinde eğimli ve geniş bantlı çizgiler meydana gelir. Faz kodlamalı darbelerde ise kod geçişlerinin oluşturduğu düzensiz enerji dağılımı, zaman-frekans görüntülerinde parçalı veya dağılmış bir yapı ortaya çıkarır. Bu durum PW, PRI ve modülasyon yapısı gibi temel radar parametrelerinin klasik yöntemlerle elde edilmesini güçleştirir. CNN tabanlı sınıflandırma çalışmalarında, LPI

sinyallerinin zaman-frekans temsillerinde sıklıkla rastlanan üst üste binme, düşük kontrast ve benekli görünümünün, geleneksel özellik çıkarım yöntemlerinin performansını ciddi şekilde azalttığı gösterilmektedir. Bu nedenle bant genişliği, modülasyon türü veya frekans tarama hızının doğru biçimde belirlenebilmesi için adaptif ve derin öğrenme tabanlı işleme yaklaşımlarının kullanılması gereklidir (Kim vd. , 2023). Ayrıca belirsizlik fonksiyonu analizleri, FM tabanlı LPI dalga biçimlerinin gecikme-doppler eksenlerinde eğimli veya uzamış sırt yapıları oluşturduğunu, bunun da klasik uyumlu filtrelemeyi zorlaştırdığını ortaya koymaktadır (Lv vd. , 2021).

Radar sistemlerinde menzil çözünürlüğü, darbe genişliği ve bant genişliği ile belirlenir. Kısa darbe süreleri yüksek çözünürlük sağlarken, uzun darbeler çözünürlüğü düşürür. LPI radarların düşük tepe gücü ile çalışmasına rağmen yüksek çözünürlük ve tespit performansı elde edebilmesinin temel mekanizması darbe sıkıştırma tekniğidir. Bu teknikte darbe süresi uzatılır, ancak işaret geniş bir bantta frekans dağılımına sahip olacak şekilde modüle edilerek menzil çözünürlüğü korunur. Menzil çözünürlüğü (ΔR) Denklem (1)'deki gibi hesaplanır.

$$\Delta R = \frac{c}{2 \cdot B} \quad (1)$$

Denklem (1)'deki C ışık hızı, B ise bant genişliğini ifade etmektedir. Darbe sıkıştırmanın sağladığı işlem kazancı (G_c) ise Denklem (2) ile hesaplanmakta olup Denklem (2)'deki T darbe süresini ifade etmektedir.

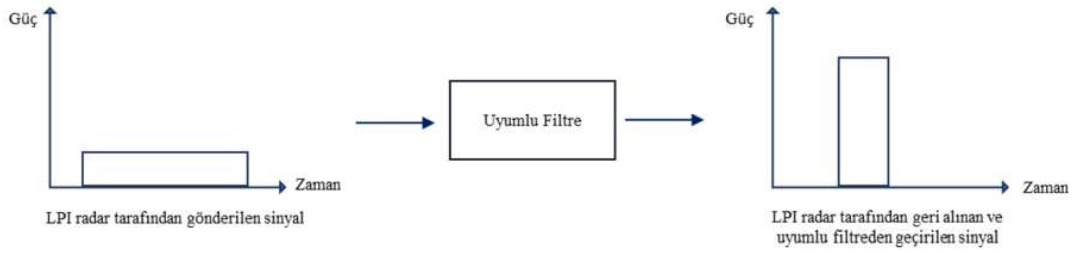
$$G_c = B \cdot T \quad (2)$$

Darbe sıkıştırma kazancı sayesinde düşük tepe gücünün neden olduğu SNR kaybı ortadan kaldırılır. Uyumlu filtreleme, alınan işaretin gönderilen işaret ile konvolüsyonu üzerinden gerçekleştirilir ve SNR'ı artırarak ana lob ile yan lob seviyelerini belirginleştirir.

LPI radarlarda en çok kullanılan modülasyon türleri, doğrusal frekans modülasyonu (Linear Frequency Modulation-LFM) ile ikili faz, dörtlü faz ve çok fazlı kodlara dayalı faz kodlamalı sinyallerdir. LFM, çok fazlı ve faz kodlu dalga biçimlerinde sıkıştırma kazancı modülasyon yapısına göre farklılık gösterir.

Elde edilen sıkıştırılmış çıktı sinyali, düşük genişlikli ve yüksek anlık tepe gücüne sahip bir darbe oluşturur. Böylece uzun darbe enerjisi, uyumlu filtre sayesinde dar bir ana loba yoğunlaştırılır. Dolayısıyla radar, düşük sinyal seviyelerinde dahi hedef tespiti yapabilir. Bu yapı, LPI radarların tepe güçlerini düşürerek gürültü tabanının altında çalışmasına olanak tanırken menzil performansından da ödün vermemesini sağlar.

Şekil 2, LPI radar tarafından gönderilen düşük tepe güçlü geniş darbe süreli bir sinyalin, uyumlu filtre işleminden sonra yüksek tepe gücüne sahip bir çıktıya dönüştüğünü göstermektedir.



Şekil 2: Darbe Sıkıştırma Ve Uyumlu Filtre

Doğrusal ve doğrusal olmayan FM tabanlı modülasyonlarda anlık frekans değişimi darbe içi örüntüyü belirlerken, PM tabanlı kodlamalarda (BPSK, QPSK, Barker, Frank, P1-P4, T1-T4) faz adımları ve chirp süreleri darbe sıkıştırma karakteristiğini belirler. Faz kodlu yapılarda faz geçişlerine karşılık gelen anlık frekans sıçramaları yan lob davranışını etkiler. Uyumlu filtreleme bu sıçramaları sıkıştırılmış yapıda düzenli hâle getirerek tespiti mümkün kılar. Sonuç olarak darbe sıkıştırma ve uyumlu filtre uygulaması, LPI radarların düşük tepe gücü ile geniş bant modülasyonlarını birleştirerek hem düşük algılanabilirlik hem de yüksek menzil çözünürlüğü elde etmelerini sağlayan temel işaret işleme tekniğidir (Orduyılmaz, 2020).

Darbe Dizisi Çevikliği ve PRI/PW Değişkenliği

Günümüz LPI radar sistemleri, ED alıcılarının darbe parametrelerini doğru bir şekilde belirlemesine engel olmak için modülasyonlu darbe stratejisini kullanmaktadır. Bu stratejinin temel amacı, darbe dizisine ait PRI, PW ve frekans bileşenlerinin istatistiksel tutarlılığını bozarak klasik darbe işleme algoritmalarının başarımını düşürmektir. Bu çerçevede LPI radarların kullandığı başlıca teknikler aşağıda detaylandırılmıştır.

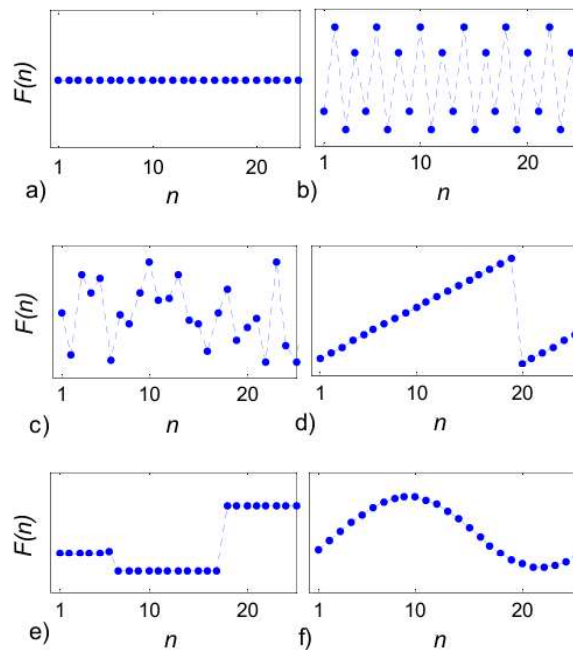
PRI çevikliği

PRI çevikliği, radarın bir sonraki göndereceği darbenin PRI değerini belirli bir kural veya algoritmaya göre sürekli ve öngörülemez biçimde değiştirmesidir. Sinyaller arasında düzenli aralıklar yerine, her darbe için değişken bir tekrar aralığı kullanılır. Bu yöntem, ED alıcılarında kullanılan histogram tabanlı veya otokorelasyon tabanlı PRI çıkarım algoritmalarını doğrudan zayıflatır. PRI tanıma literatüründe, LPI radarların uyguladığı yüksek rastlantısallık düzeyi nedeniyle klasik tekrar aralığı modlarının belirginliğini kaybettiği gösterilmektedir (Kauppi & Martikainen, 2007).

PRI, ardışık darbe zamanları cinsinden Denklem (4)'teki gibi ifade edilir. Denklem (4)'teki $F(n)$ PRI modülasyonunu, t_n alınan N darbelik bir dizi içindeki n 'inci darbenin varış zamanını (Time of Arrival-TOA), x_n ise PRI'yı ifade etmektedir.

$$F(n) = t_{n+1} - t_n = x_n, n=1,2,\dots,N-1 \quad (3)$$

Denklem (3)'te tanımlanan x_n dizisinin farklı davranış biçimleri, farklı PRI modülasyon tiplerini oluşturur. Bu tiplerin görsel bir karşılaştırması Şekil 3'te verilmiştir.



Şekil 3: Yaygın PRI Modülasyon Tiplerinin Şematik Gösterimi a) Sabit, b) Kademeli (Stagger), c) Tahriksel (Jittered), d) Kayan (Sliding), e) Bekleme-Geçiş (Dwell and Switch), f) Periyodik (Periodic) (Kauppi & Martikainen, 2007).

Uyarlanabilir PW modülasyonu

LPI radar sistemleri, tespit edilmeme kabiliyetlerini artırmak için gelişmiş dalga biçimi tasarım tekniklerinden yararlanır. Bunlardan biri olan uyarlanabilir darbe genişliği (PW) modülasyonu, radarın darbe genişliğini sabit tutmak yerine mevcut görev moduna (arama, izleme vb.), hedef sahnesinin karmaşıklığına ve anlık SNR gibi faktörlere bağlı olarak sürekli uyarlamasını içerir. Bu adaptif davranışın iki temel etkisi vardır. Birincisi, darbe genişliğinin istatistiksel dağılımını kararsız hale getirerek ED tehdit alıcılarının darbe tanımlama ve kümeleme aşamalarında hata yapmasına yol açar. İkincisi, değişken PW yapısı, sabit radar sistemlerinde sıklıkla gözlenen PW-PRI ilişkisini ortadan kaldırarak düşmanın darbe dizilerini deşifre etmesini zorlaştırır. Dolayısıyla bu teknik, radarın zaman alanı imzasını belirsizleştirerek klasik EH analiz yöntemlerini etkisiz hale getiren önemli bir LPI bileşenidir(El-Masry, Yang, & Yakout, 1997).

Patlama (Burst) iletim modu

Burst tipi darbe dizileri, düşük görünürlük amacıyla zaman alanı düzensizliği oluşturmanın etkili bir yoludur. Bu stratejide radar, iletimini bir dizi kısa süreli, yüksek darbe tekrarlama frekanslı 'patlama'dan oluşan kümeler halinde gerçekleştirir. Her kümenin içi son derece düzenli iken, kümelerin birbirini takip etme aralıkları geniş, değişken ve tahmin edilemezdir. Bu ikili yapı, ED sistemlerinin karşılaştığı temel bir ikilem yaratır. Küme içi sık aralıklara odaklanan otokorelasyon veya histogram analizi, sistemin tüm darbe dizisini gözden kaçırmaya ve kümeler arası uzun boşlukları 'eksik darbe' veya farklı bir radar olarak yorumlamasına neden olur. Tersine, kümeler arası uzun aralıklar temel alınır, küme içi yapı tamamen göz ardı edilir. Sonuçta ED alıcıları, ya yanlış PRI değerleri üretir ya da tek bir radar emisyonunu birden fazla farklı kaynağa aitmiş gibi ayırarak (sahte mod üretimi) kaynak sayısını ve parametrelerini yanlış değerlendirir. Dolayısıyla burst iletimi, LPI radarın zamanlama imzasını etkin bir şekilde maskeleyen sofistike bir tekniktir (Y. Liu & Zhang, 2017).

Frekans Çevikliği ve Geniş Bant Çalışma

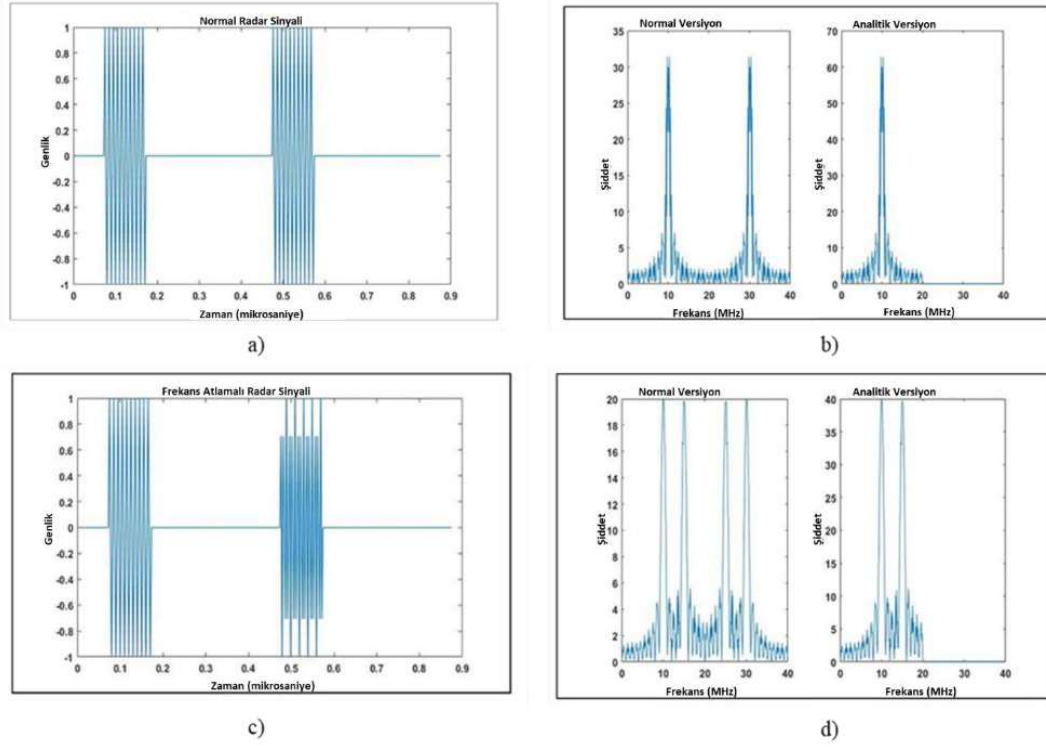
Frekans atlamalı darbe dizileri, LPI radarların tespit edilmesini ve analizini zorlaştıran temel tekniklerden biridir. Bu yaklaşımda radar, her bir darbeyi önceden tanımlanmış bir düzene göre farklı bir taşıyıcı frekansta yayınlayarak, sinyalin zaman-frekans düzlemindeki yapısını kasıtlı olarak karmaşıklarır. Ortaya çıkan bu karmaşık dalga biçimi,

özellikle modülasyon düzeni, darbe şekillendirme ve hızlı frekans değişimi (çevikliği) birlikte değerlendirildiğinde, yakalanması ve karakterize edilmesi oldukça güç bir sinyal profili oluşturur.

Bu durumun ED sistemleri üzerinde iki temel olumsuz etkisi vardır: Birincisi; sinyalin yakalanabilirliğini (intercept probability) azaltır. İkincisi; ardışık radar darbeleri arasındaki ilişkinin çıkarılmasını ve böylece darbe dizisinin deşifre edilmesini büyük ölçüde güçleştirir. Üstelik ortam gürültüsünün varlığı, frekans atlamalı sinyallerin karmaşık zaman-frekans özelliklerini daha da belirsizleştirerek, düşük SNR koşullarında darbe frekanslarının takibini ve doğru eşleştirilmesini neredeyse imkânsız hale getirir.

Frekans çevikliğinin neden olduğu bu düzensiz ve öngörülemeyen yapı, klasik algılama ve sınıflandırma algoritmalarının (otokorelasyon, sabit filtre bankaları vb.) kararlılığını ve geçerliliğini düşürür. Sonuç olarak, bu tür gelişmiş LPI radar emisyonlarının doğru şekilde çözümlenebilmesi, yüksek genelleme yeteneğine sahip, güçlü zaman-frekans analizi tabanlı modern algoritmaların kullanımını zorunlu kılar. Frekans atlamalı iletim, bu özellikleriyle özellikle geniş bant dijital alıcılara karşı son derece etkili bir LPI tekniğidir(Ahmad, Aji, Abdulmumin, Jae, & Bello-Imokhuede, 2023).

Sabit frekanslı bir radar sinyali ile frekans atlamalı bir radar sinyalinin zaman ve frekans domainlerindeki temel karşılaştırması Şekil 4'te sunulmaktadır. Bu görsel, frekans çevikliğinin sinyalin spektral ve zamansal yapısını nasıl karmaşıktırdığını ve dağıttığını net bir şekilde göstermektedir.



Şekil 4: Sabit Frekanslı Bir Radar Sinyali İle Frekans Atlamalı Bir Radar Sinyalinin Zaman Ve Frekans Domainlerindeki Temel Karşılaştırması **a)** Normal Radar Sinyali Zaman Domaini Gösterimi **b)** Normal Radar Sinyali Frekans Domaini Gösterimi **c)** Frekans Atlamalı Radar Sinyali Zaman Domaini Gösterimi **d)** Frekans Atlamalı Radar Sinyali Frekans Domaini Gösterimi (Ahmad vd. , 2023).

LPI radarlar, düşük tepe gücü ve geniş anlık bant genişliğini bir arada kullanarak sinyal enerjisini spektruma yayar ve alınan işaretin gürültü tabanının altında kalmasını sağlar. FM/PM tabanlı darbe içi modülasyonlar ile darbe süresi uzatılırken, ortalama enerji korunur ve yüksek menzil çözünürlüğü sağlanır. Bu geniş bant yapı, EH alıcılarının tespit sürecini zorlaştırır. Çünkü EH sistemi, radarın hangi anda ve hangi bantta yayın yaptığını bilmediğinden geniş bir frekans aralığını yüksek hassasiyetle taramak zorundadır. Radar, uyumlu filtre kazancı sayesinde çok düşük SNR seviyelerinde dahi hedef tespit edebilirken, EH alıcısı yalnızca tek yönlü serbest uzay kaybına maruz kalan işareti algıladığından geniş bant sinyaller için gereken hassasiyet seviyesine ulaşmak EH almacında gelişmiş tahdit sinyali algılama algoritmaları kullanılması gerekir (Orduyılmaz, 2020).

LPI RADARLARIN BİLİŞSEL EH YÖNTEMLERİ İLE ALGILANMASI

LPI radarların giderek daha karmaşık dalga biçimleri, geniş bant yapıları ve çevik frekans-atlama stratejileri kullanması, klasik ED/EH

yöntemlerinin algılama ve sınıflandırma kapasitesini önemli ölçüde sınırlandırmaktadır. Bu nedenle modern ED sistemlerinin, hem sinyal özelliklerini dinamik biçimde çözümleyebilen hem de belirsizlik ve düşük SNR koşullarında dahi etkili karar mekanizmaları geliştirebilen daha gelişmiş yaklaşımlara yönelmesi gerekmektedir. Bilişsel EH mimarileri tam da bu noktada önem kazanmaktadır. Sinyal ortamını sürekli analiz eden, elde ettiği bilgileri öğrenme süreçleriyle güncelleyen ve değişen tehdit yapısına uyum sağlayan bir algılama-tepki döngüsü oluşturmaktadır. Bu kapsamda, LPI radar emisyonlarının tespit, tanıma ve izleme süreçlerinde iki temel bilişsel yetenek öne çıkmaktadır ki bunlar sinyal özelliklerinin otomatik olarak çıkarılması ve elde edilen bilginin bilişsel algılama-öğrenme-uyarlama döngüsü içinde ED süreçlerine entegre edilmesidir. Bu iki husus ayrı başlıklar altında aşağıda detaylandırılmaktadır.

Bilişsel EH Yöntemleriyle Sinyal Özelliklerinin Otomatik Çıkarılması

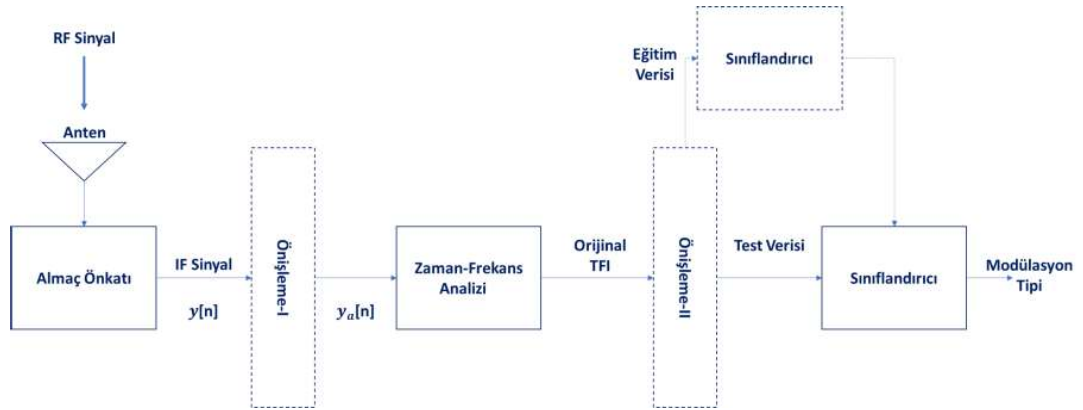
ED alıcılarının, LPI radar işaretlerini erken fark edebilmek ve doğru sınıflandırabilmek için güvenilir çalışabilecek otomatik bir tanıma yeteneğine sahip olması kritik bir gerekliliktir. LPI dalga biçimlerinin sınıflandırılmasında yaygın olarak izlenen yöntem, iki temel aşamadan oluşur. İlk aşamada sinyale ait özellikler zaman-frekans analizleriyle çıkartılır. Ardından bu özellikler makine öğrenmesi modellerine aktarılıp sınıflandırma gerçekleştirilir.

Kısa süreli fourier dönüşümü (Short Time Fourier Transform - STFT), Wigner-Ville dağılımı (Wigner-Ville Distribution - WVD) ve Choi-Williams dağılımı (Choi-William Distribution-CWD) gibi zaman-frekans analiz yöntemleri, sinyalin zaman ve frekans eksenlerinde eşzamanlı olarak incelenmesine imkân tanıyarak zaman-frekans görüntüsü (Time-Frequency Image-TFI) adı verilen çıktıları üretir. Bu TFI yapıları, sinyalin frekans yayılımını, geçiş bölgelerini ve modülasyon türünü yüzey benzeri bir formda ortaya koyduğu için çok katmanlı algılayıcı (Multi-Layer Perceptron- MLP), tekrarlayan sinir ağları (Recurrent Neural Networks - RNN) ve özellikle CNN tarafından doğrudan işlenebilir hâle gelir.

Son yıllardaki çalışmalar, CNN'nin bu görüntü formatıyla doğal uyum gösterdiğini ve özellikle gürültü seviyesinin yüksek olduğu durumlarda bile modülasyon türlerini ayrıştırabildiğini ortaya koymaktadır. Polifaz

(P1-P4, Frank) ve polizaman (T1-T4) kodlarını kapsayan geniş bir dalga biçimi setinin CNN ile yüksek doğrulukta sınıflandırılabilmesi, bu yapının pratikte güçlü bir aday olduğunu destekleyen önemli bir göstergedir. Başarıyı belirleyen başlıca faktörler arasında uygun hiperparametre seçimi, TFI çözünürlüğü ve genlik bilgisinin korunması yer alır. Ayrıca daha büyük veri kümelerinin kullanılması ve Monte Carlo tabanlı geniş test setlerinin uygulanması, yöntemin düşük SNR seviyelerinde bile kararlı sonuçlar üretebildiğini ve geleneksel karar ağaçları ya da MLP tabanlı modelleri geride bıraktığını göstermektedir. Bu değerlendirmeler ışığında, CNN temelli modülasyon tanıma yaklaşımları, LPI radar tespit sürecinde hem işlem gücü verimliliği hem de kestirim başarısı açısından önümüzdeki dönemin en sağlam teknik seçeneklerinden biri olarak görülmektedir (Kong, Kim, Hoang, & Kim, 2018).

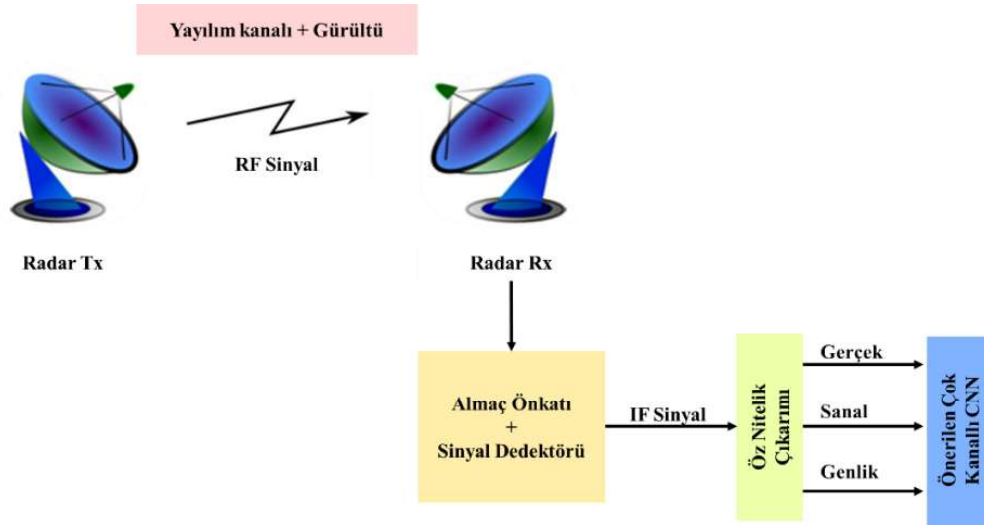
LPI radar emisyonlarının zaman-frekans temelli tanınması için uygulanan işlem zinciri; RF işaretinin yakalanması, ara frekans işaretinin ön işleme adımlarından geçirilmesi, zaman-frekans dönüşümüyle TFI çıktılarının elde edilmesi ve bu görüntülerin eğitim-test ayrımı sonrasında sınıflandırıcıya aktarılmasıyla tamamlanan çok aşamalı bir mimariden oluşmaktadır. Bu kapsamda kullanılan tipik bir bilişsel tanıma yapısının genel işleyişi, Şekil 5'te sunulan blok diyagramı üzerinde gösterilmektedir.



Şekil 5: TFI'lerden LPI Dalga Biçimi Tanıma Blok Diyagramı (Kong vd. , 2018)

CNN, evrişim filtreleri sayesinde ayırt edici spektral dokuları otomatik olarak öğrenebilmekte, manuel öznitelik çıkarımı ihtiyacını ortadan kaldırmakta ve gürültü altında bile kararlı ayırıştırma yapabilmektedir. Literatür incelemesi, çalışmaların çoğunda TF görüntülerinin oluşturulup daha sonra CNN modellerinin bu görüntüler üzerinde eğitildiğini göstermektedir. Ancak LPI radar dalga biçimleri, sınıflandırma için tek

başına yeterli bilgi taşımaktadır. Radar sinyali, I-Q bileşenleri formunda elde edilir. Burada I doğrusal (in-phase), Q ise karesel (quadrature-phase) bileşeni temsil eder. Bu bilgi gerçek, imajiner, mutlak ve faz bileşenlerine ayrılabilir. Radar sinyallerinin I-Q formunda doğrudan işlenebilmesi ve verinin gerçek, imajiner, mutlak ve faz bileşenlerine ayrıştırılarak çok kanallı 1D-CNN modellerine beslenebilmesi, görüntü üretme adımına ihtiyaç duymadan özellik öğrenimini mümkün kılarak işlem yükünü önemli ölçüde azaltır. Bu teknik avantajlar CNN’i, LPI radar tanımda hem düşük SNR koşullarında dayanıklı hem de donanımsal olarak ölçeklenebilir bir çözüm hâline getirir. Şekil 6’da I-Q bileşenlerinden LPI dalga biçimi tanıma sürecine dair blok diyagram verilmiştir.

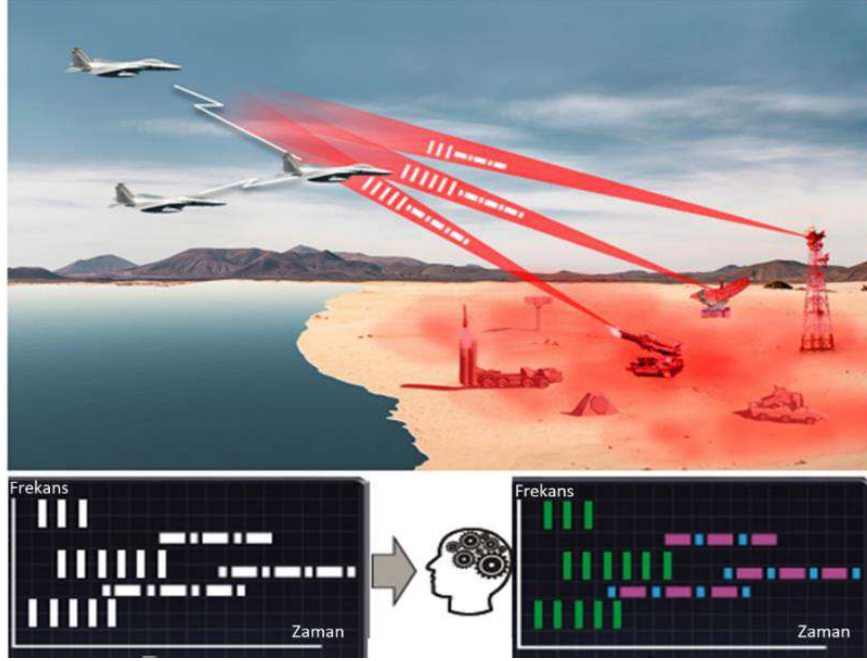


Şekil 6: I-Q Bileşenlerinden LPI Dalga Biçimi Tanıma Blok Diyagramı (Yakkati, Boddu, Pardhasaradhi, Yeduri, ve Cenkeramaddi, 2024)

Bilişsel Algılama-Öğrenme-Uyarılma Döngüsünün EH Süreçlerine Entegrasyonu

Bilişsel EH yaklaşımının temelinde, ED birimlerinin EMS’den edindikleri sinyalleri sürekli analiz ederek tehdit seviyesi doğrultusunda sinyal işleme algoritmalarını uyarlayabilmesi yer alır. Bu döngüde algılama, sinyal tespiti ve sınıflandırma aşamalarının tamamı geri besleme ile beslenir. Sistem, eğitim algoritmaları ile yeni dalga şekillerini tanır ve durumsal farkındalığı arttıkça karar mekanizması otomatik olarak optimize edilir. Makine öğrenmesi tabanlı karar süreçlerinin EH sistemlerine entegre edilmesi, operatör bağımlılığını azaltarak radar tespiti-tanım-kimliklendirme hattının çoklu platform koordinasyonunda bile gerçek zamanlı çalışabilmesine olanak sağlar. Bu yapı, Şekil 7’de görülmekte olan ve gelecekte birlikte çalışabilen EH platformlarının temel altyapısı olarak

görülmekte ve spektrum üstünlüğü sağlama amacıyla özellikle yayıcı tanımlama, görev kaynağı tahsisi ve otonom spektrum yönetimi gibi unsurlarda kullanılmaktadır (Casterline, Watkins, Ward, Li, ve Thommana, 2022).



Şekil 7: Bilişsel EH sistemleriyle otomatik modülasyon tespiti (Casterline vd. , 2022).

EH sistemlerinde yalnızca sinyali tespit etmek yeterli değildir. Tehdidin davranışı değiştiğinde buna aynı hızda karşılık verebilmek de gerekir. Bu yüzden bilişsel yapıda tasarlanan EH mimarilerinde algılama-öğrenme-uyarlama döngüsü temel omurga hâline gelir. EMS'den alınan sinyaller önce analiz edilir, parametreleri çıkarılır ve mevcut görev veri dosyaları ile karşılaştırılarak sinyalin hangi kaynağa ait olabileceği değerlendirilir. Ardından karar birimi, ortam koşullarına ve tahmin edilen tehdit tipine göre uygun karşı önlem yöntemini seçer. Sistem bu esnada pasif bir süreç işletmez. Yaptığı her işlemde geri bildirim alır ve edindiği veriyi kullanarak kendi davranışını günceller. Böylece zaman içinde daha doğru karar veren, yeni tehdit modellerine hızla uyum sağlayabilen bir yapı ortaya çıkar. Bu döngü üç temel aşamada işler. Bunlardan ilki algılama olup ortamın sürekli izlenmesi ve sinyal özelliklerinin çıkarılmasını ifade eder. İkinci aşama öğrenme olup geçmiş kararların ve hata payının sisteme geri beslenerek modelin iyileştirilmesi demektir. Son aşama olan uyarılama ise karıştırma dalga biçimleri, güç seviyesi veya seçim eşiği gibi parametrelerin dinamik olarak değiştirilmesidir. Sonuç olarak EH zinciri, sadece radar yayıcısını tanıyan değil, aynı zamanda karşı tarafın taktik

değişimlerine anlık tepki verebilen, kendi kararlarını geliştiren ve her çevrimden sonra bir öncekinden daha yetkin hâle gelen bir yapıya dönüşür. Bu yaklaşım, gelecekte bilişsel elektronik destek sistemlerinin temel çalışma biçimi olmaya aday görünmektedir (Sharma vd. , 2020).

Algılama-uygulama döngüsünde sistem çevreden aldığı bilgiyi işler, durumu yorumlar, gerekli kararı verir ve uygulanan eylemin sonucunu tekrar çevreden geri besleme olarak alarak hafızasını günceller. Aynı döngü sürekli tekrarlandığı için EH sistemi her çevrimde ortamı daha iyi tanır, önceki deneyimlerden öğrenerek davranışını optimize eder ve böylece yalnızca bilinen değil, daha önce karşılaşılmamış radar emisyonlarına karşı da uyarlanabilir kararlar üretebilir. Çevresel algılama modülü mevcut RF ortamını izlerken, öğrenme katmanı yeni tehditleri kısa süreli bellekte tutarak parametrelerini iyileştirir ve uygun karşı tedbirleri üretir; geri besleme mekanizması ise uygulanan elektronik taarruzun etkinliğini ölçerek karar yapısını güçlendirir. Bu bütünleşik döngü sayesinde bilişsel EH sistemleri, değişen elektromanyetik ortamda gerçek zamanlı karar verebilen, kendini güncelleyebilen ve klasik EH mimarilerinin aksine yalnızca önceden tanımlanmış tehditlere değil, yeni ve bilinmeyen radar dalga biçimlerine karşı da etkinlik sağlayan bir yapıya dönüşür (Xiao, 2020).

SONUÇ VE DEĞERLENDİRME

Bu çalışmada LPI radar sinyallerinin bilişsel EH perspektifiyle tespit ve tanınması ele alınmış, zaman-frekans analiz yöntemleri ve derin öğrenme tabanlı sınıflandırıcılar üzerinden değerlendirme yapılmıştır. İncelenen yaklaşımlar göstermektedir ki yalnızca enerji tabanlı veya istatistiksel yöntemlere güvenen klasik ED yapıları, modern radarların geniş bantlı, faz kodlu ve çevik modülasyon yetenekleri karşısında istenen performansı sürdürememektedir. Buna karşın zaman-frekans temelli özellik çıkarımıyla desteklenen CNN ve hibrit derin öğrenme modelleri, düşük SNR seviyelerinde bile radar izinin yapı taşlarını çözümleyebilmekte ve sinyal türünü güvenilir şekilde ayırt edebilmektedir. Özellikle TFI tabanlı işleme yaklaşımı, radar darbelerinin spektral dokusunu görsel forma taşıyarak ağın otomatik özellik öğrenme kabiliyetini güçlendirmekte. Böylece polifaz ve polizaman gibi karmaşık dalga biçimleri bile doğruluk kaybı olmadan sınıflandırılabilir. (Dündar & Ağaçayak, 2023; Mirjafarlı vd., 2022). Bu çalışmada deniz vasıtaları için uygulanan derin

öğrenme yaklaşımları, literatürde tarımsal ilaçlamadan gıda kalite kontrolüne kadar çok geniş bir sahada rüştünü ispatlamıştır (Yalçın vd., 2019; Aras, Eryeşil & Köklü, 2025; Kılıcı, Eryeşil & Köklü, 2025). Özellikle nesne tespiti ve sınıflandırma modellerinin; atık yönetimi, glokom teşhisi gibi sağlık bilişimi ve yenilenebilir enerji tahmini gibi alanlardaki başarısı, kullanılan metodolojinin evrenselliğini göstermektedir (Eryeşil & Taşdemir, 2023; Qanbar, Eryeşil & Taşdemir, 2023; Servi vd., 2024).

Çalışmanın önemli bir bulgusu, bilişsel döngünün ED süreçlerine entegre edilmesinin sistem yeteneğini tek adımlı bir tespit mekanizmasından çıkarıp dinamik karar verebilen bir yapıya dönüştürmesidir. Algılama-öğrenme-uyarlama prensibi, sistemi yalnızca radar sinyallerini tanıyan bir sensör olmaktan çıkararak çevresel değişimlere tepki verebilen, kendisini güncelleyen ve tehditle etkileşime girdikçe olgunlaşan bir yapıya taşımaktadır. Bu anlamda ED artık pasif değil, bilişsel bir döngü içinde yaşayan ve karar üreten bir organizma gibi çalışmaktadır. Her yeni gözlem, daha güçlü bir sınıflandırma modeli oluşturmakta, her karşı tedbir uygulaması sistem hafızasında yer edinerek sonraki tepkilerin doğruluğunu artırmaktadır. Bu yaklaşım, LPI radarların giderek daha karmaşık hâle geldiği bir ortamda sürdürülebilir EH etkinliğinin anahtarı olarak değerlendirilebilir.

Genel olarak elde edilen sonuçlar, bilişsel mekanizma ve derin öğrenme tabanlı işleyicilerin EH sistemlerine entegrasyonunun artık tercih değil gereklilik olduğunu göstermektedir. LPI radar teknolojileri ilerledikçe, spektral izlerin kasıtlı olarak belirsiz hâle geldiği düşmanı yanıltma stratejileri daha yaygın kullanılacaktır. Buna karşılık ED sistemlerinin de yalnızca görev veri dosyaları eşleşmesine dayalı değil, yeni karşılaşılan sinyali öğrenebilen, veri geldikçe kendini geliştiren ve kararını anlık güncelleyebilen bir yapıda gelişmesi kaçınılmaz görünmektedir. Bugün elde edilen kazanımlar, ileri safhada gerçek zamanlı çalışan, düşük güçlü donanımlara uyarlanabilen ve çoklu radar ortamında otonom hareket edebilen bilişsel EH mimarileri için sağlam bir temel oluşturmaktadır.

KAYNAKÇA

- Ağaçayak, A. C., & Sungur, C. (2019). *Dron ağları için topoloji incelenmesi*. Gece Akademi.
- Ahmad, A. A., Aji, M. M., Abdulmumin, Y., Jae, I. A., & Bello-Imokhuede, U. I. (2023). Profiling radar signals based on pulse-to-pulse frequency agility. *Global Journal of Engineering and Technology Advances*, 15(2), 141.
- 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>
- Aras, H. H., Eryeşil, Y., & Köklü, M. (2025). An explainable deep learning framework for Agrtron-based coffee roast classification using Grad-CAM. *3rd International Conference on Intelligent Systems and New Applications (ICISNA '25)*.
- Casterline, K. A., Watkins, N. J., Ward, J. R., Li, W., & Thommana, M. J. (2022). Applications of machine learning for electronic warfare emitter identification and resource management. *Johns Hopkins APL Technical Digest*, 36(2), 121.
- Dündar, K., & Ağaçayak, A. C. (2023). Yapay zekâ ve makine öğrenmesi ile insan ilişkileri analizi. *Mühendislikte Yenilikçi Yaklaşımlar-2*, Eğitim Yayınevi.
- El-Masry, E. I., Yang, H.-K., & Yakout, M. A. (1997). Implementations of artificial neural networks using current-mode pulse width modulation technique. *IEEE Transactions on Neural Networks*, 8(3), 532.
- 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>
- Fountain, T., & Humbert, L. (2023). Improving the capabilities of cognitive radar and EW systems. *Proceedings of the IEEE AUTOTESTCON 2023*.
- Gurbuz, S. Z., Griffiths, H. D., Charlish, A., Rangaswamy, M., Greco, M. S., & Bell, K. (2020). An overview of cognitive radar: Past, present, and future. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, 34(12), 6.
- Güntürkün, R. (2023a). Advantages Of Fifty Generation Warplanes. *International Journal Of Research In Engineering And Science (Ijres)*, 11(10), 388–393.
- Güntürkün, R. (2023b). Why Are Flight Data Recorders Used On Airplanes. *International Journal Of Research In Engineering And Science (Ijres)*, 11(10), 384–387.
- İnan, O., Rasooli, A. Q., & Servi, S. (2024). Clustering with the blackwinged kite algorithm. *International Journal of Computer Science & Communications*.
- Kauppi, J.-P., & Martikainen, K. (2007). An efficient set of features for pulse repetition interval modulation recognition. *Proceedings of the IET International Conference on Radar Systems*.
- 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>
- Kim, J., Cho, S., Hwang, S., & Choi, Y. (2023). Automatic LPI radar waveform recognition using vision transformer. *Proceedings of the IEEE International Radar Conference (RADAR)*.
- Kong, S.-H., Kim, M., Hoang, L. M., & Kim, E. (2018). Automatic LPI radar waveform recognition using CNN. *IEEE Access*, 6, 4207.
- Liu, Y., & Zhang, Q. (2017). An improved algorithm for PRI modulation recognition. *Proceedings of the IEEE International Conference on Signal Processing, Communications and Computing (ICSPCC)*.

- Liu, Z.-M. (2021). Pulse deinterleaving for multifunction radars with hierarchical deep neural networks. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 57(6), 3585.
- Lv, F., Dong, Z., Wan, T., Jiang, K., Fang, X., & Zhang, L. (2021). Radar signal detection based on ambiguity function and deep learning. *Proceedings of the International Conference on Computer Engineering and Application (ICCEA)*.
- Mirjafarli, S., Terzioğlu, H., & Ağaçayak, A. C. (2022). Yapay zekâ ve makine öğrenme metodlarının tıpta kullanım alanlarına genel bakış. *Mühendislikte Yeni Araştırmalar*, Tablet Kitapevi.
- Orduyılmaz, A. (2020). *Çoklu işaret ortamında düşük olasılıklı algılama (DOA) radarı işareti tanımlanması ve sınıflandırılması* [Yüksek lisans tezi, Ankara Üniversitesi].
- 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*.
- Reddy, R., & Sinha, S. (2025). State-of-the-art review: Electronic warfare against radar systems. *IEEE Access*.
- 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)*.
- 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).
- Sharma, P., Sarma, K. K., & Mastorakis, N. E. (2020). Artificial intelligence aided electronic warfare systems: Recent trends and evolving applications. *IEEE Access*, 8, 224761.
- 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.
- Tang, Q., Huang, H.-H., & Chen, Z. (2022). A novel approach for automatic recognition of LPI radar waveforms based on CNN and attention mechanisms. *Proceedings of the 41st Chinese Control Conference (CCC)*.
- Terzioğlu, H., Ağaçayak, A. C., Yalçın, G., & Neşeli, S. (2019). Adaptif trafik sinyalizasyonu. *8th International Vocational Schools Symposium (UMYOS'19)*, 59–68.
- Xiao, Q. (2020). Cognitive electronic warfare: Conceptual design and architecture. *International Journal of Artificial Intelligence and Expert Systems (IJAE)*, 9(3), 48.
- Yakkati, R. R., Boddu, A. B., Pardhasaradhi, B., Yeduri, S. R., & Cenkeramaddi, L. R. (2024). Low probability of intercept radar signal classification using multi-channel 1D-CNN. *Proceedings of the 10th International Conference on Communication and Signal Processing (ICCSP)*.
- Zhang, C., Wang, L., Jiang, R., Hu, J., & Xu, S. (2023). Radar jamming decision-making in cognitive electronic warfare: A review. *IEEE Sensors Journal*, 23(11), 11383.

BÖLÜM 3

FMCW RADAR DALGA BİÇİMİ PARAMETRELERİNİN PERFORMANSA ETKİSİNİN MODELLENMESİ VE ANALİZİ

Elif Sude Kiper **, Hakan Terzioğlu ***

GİRİŞ

Radar (Radyo Tespiti ve Menzil Belirleme), hedeflerin menzilini, hızını ve yönünü tespit etmek için elektromanyetik dalgaları kullanan temel bir algılayıcı teknolojisidir. (Skolnik, 1980) Bu sistemler, kullandıkları dalga biçimine göre temel olarak iki ana kategoriye ayrılır: Darbeli (Pulse) Radarlar ve Sürekli Dalga (CW) Radarlar. Radar sistemlerinden elde edilen verilerin işlenmesi, günümüzde insansız araçların rota planlamasından tarımsal uygulamalardaki hassas analizlere kadar geniş bir alanda kullanılmaktadır (Yalçın vd., 2019). Bu sistemlerin otonom yapıları, enerji tüketimi ve operasyonel verimlilik açısından sürekli olarak optimize edilmektedir (Kazan, 2020; Aksoy & Kazan, 2022). Ayrıca, karmaşık sinyal ortamlarında hedef tespiti yapabilmek için geliştirilen hibrit optimizasyon algoritmaları, radar performans parametrelerinin iyileştirilmesinde yeni ufuklar açmaktadır (Şahin & Servi, 2024). Darbeli radarlar, kısa süreli ve yüksek enerjili sinyaller göndererek çalışır ve menzil tespiti için uçuş süresini ölçer. Ancak yüksek tepe gücüne ihtiyaç

** Lisans Öğrencisi, Selçuk Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği, Konya, elifsudekiper@gmail.com

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

duydukları için yakın mesafelerde kör menzil sorunu yaşarlar. (Skolnik, 1980) CW radarlar ise belirli bir frekansta kesintisiz yayın yapar. Modülesiz bir CW radar, Doppler etkisi prensibine dayanarak hedefin hızını yüksek hassasiyetle ölçebilirken, bir zaman referansı olmaması nedeniyle menzil ölçümü gerçekleştiremez. (Skolnik, 1980; Brooker, 2005)

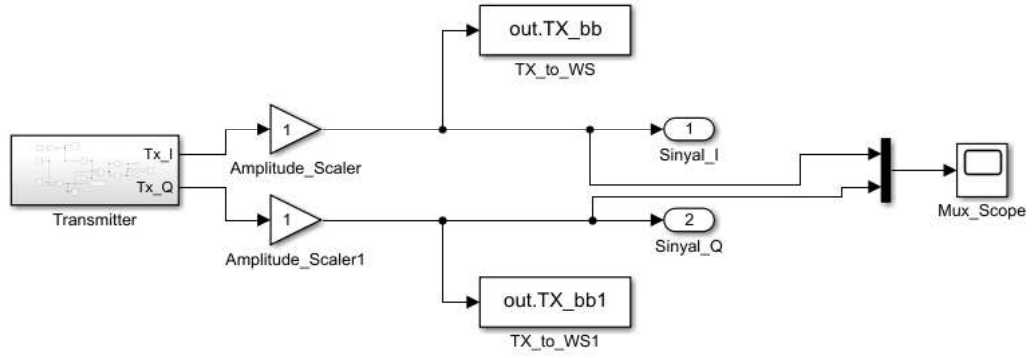
Bu kısıtlamayı aşmak ve CW radarın düşük güç avantajını koruyarak menzil bilgisi elde etmek için Frekans Modülasyonlu Sürekli Dalga (FMCW) radarları geliştirilmiştir. (Brooker, 2005) Çeşitli modülasyon şemaları arasında Testere Dişi (Sawtooth) modülasyonu, verimliliği nedeniyle modern otomotiv ve gözetleme uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. (Rohling & Meinecke, 2001; Venon vd., 2022) Bu modülasyonda, frekans belirli bir periyot (T_{chirp}) boyunca doğrusal olarak arttırılarak bir chirp sinyalini oluşturur. Alıcıda, hedeften yansıyan sinyal ile o an iletilen sinyal karıştırıldığında, aradaki frekans farkını temsil eden bir beat frekansı elde edilir. Ancak, testere dişi modülasyonunda ortaya çıkan menzil-hız belirsizliği (range-velocity ambiguity) nedeniyle, doğru hedef tespiti; menzil kaynaklı frekans kayması ve Doppler kaymasının bir bileşimi olan bu beat frekansının hassas bir analizini gerektirir. (Wojtkiewicz vd., 1997) Bu özellikleri sayesinde FMCW teknolojisi, otonom sistemler ve özellikle İnsansız Hava Araçları (İHA) gibi düşük Radar Kesit Alanına (RCS) sahip hedeflerin tespiti için kritik bir standart haline gelmiştir. (Wang vd., 2023)

Bu tür sistemlerin FPGA gibi dijital donanım platformlarında uygulanması, teorik sinyal işlemenin ötesinde ek zorluklar getirir. Özellikle, yüksek doğrusallığa sahip chirp sinyalinin üretilmesi sistem performansı için kritiktir. Modern dijital radar mimarilerinde bu işlem, analog Voltaj Kontrollü Osilatörler (VCO) yerine, Faz Akümülatörü ve Arama Tablosu (LUT) yaklaşımı kullanan Doğrudan Dijital Sentez (DDS) yöntemiyle gerçekleştirilir. (Weyer vd., 2019) Ayrıca, tespit edilebilir maksimum menzil, Nyquist teoremine göre Analog-Dijital Dönüştürücünün (ADC) örnekleme hızı (F_s) ile kesin olarak sınırlandırılmıştır ($d_{max} = cF_s/2B$). (Rohling & Meinecke, 2001; Armanious vd., 2019) Bu nedenle bir radar sistemi tasarlamak, donanımın fiziksel sınırları (ADC hızı, FPGA lojik kaynakları) ile hedeflenen performans metrikleri arasında dikkatli bir denge kurmayı gerektirir.

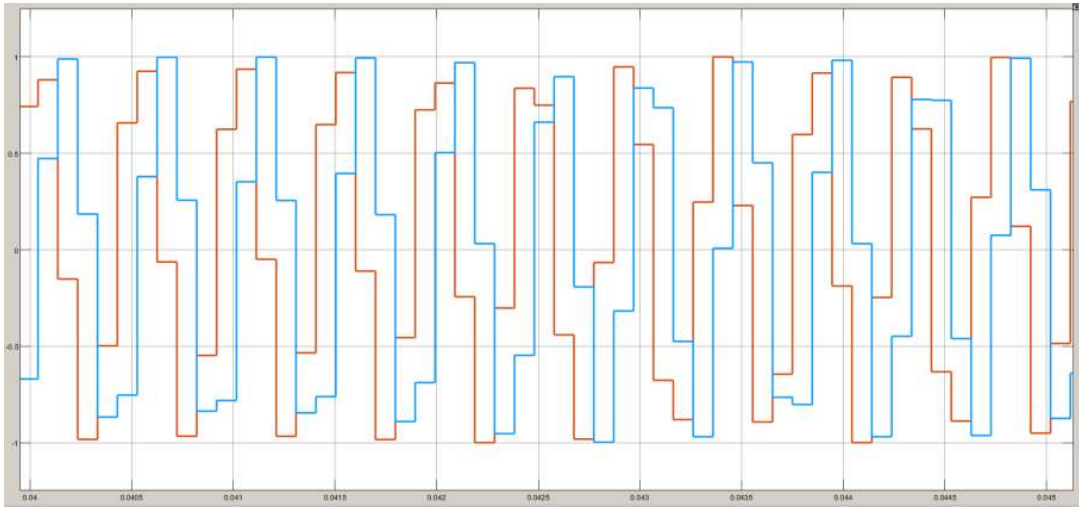
Ancak, mevcut profesyonel simülasyon araçları genellikle sinyal işleme zincirini bir kara kutu (black-box) olarak sunmakta, bu da araştırmacıların donanıma özgü bu iç dinamikleri analiz etmesini zorlaştırmaktadır. (Schuetz vd., 2023) Bu soyutlama; DDS sürecindeki kuantalama (quantization) etkileri, ADC örnekleme kısıtları ve tampon (buffer) yönetimi gibi gerçek dünya donanım uygulaması için gerekli olan kritik ayırık zamanlı adımları gizlemektedir. (Heo vd., 2021) Bu çalışma, MATLAB/Simulink ortamında beyaz kutu (white-box) felsefesiyle tasarlanmış dijital bir FMCW radar modeli sunarak bu bariyeri aşmayı amaçlamaktadır. (Schuetz vd., 2023; Newman vd., 2024) Yüksek seviyeli davranışsal modellerin aksine, bu çalışma FPGA mimarisine uygun ayırık zamanlı bir sinyal işleme zinciri inşa etmekte; DDS tabanlı chirp üretiminden Menzil FFT aşamasına kadar tüm akışı temel matematiksel bloklar kullanarak modellemektedir. (Heo vd., 2021)

MATERYAL VE METODLAR

Sinyal işleme zincirinde kullanılan filtreleme ve kümeleme teknikleri, özellikle yapay alg algoritmaları gibi doğadan esinlenen yaklaşımlarla desteklendiğinde, gürültü bastırma performansında artış gözlemlenmektedir (Anwer & Servi, 2021). Radar alıcı katındaki ADC ve dijital işleme birimlerinin modellenmesinde, lojistik regresyon gibi istatistiksel araçlar hata paylarının kestiriminde yardımcı bir çözüm sunmaktadır (Servi vd., 2018). Benzer şekilde, sistemdeki motor ve sürücü ünitelerinin tork ve hız karakteristiklerinin simülasyonu, bütüncül bir sistem tasarımı için referans teşkil eder (Bilgin & Kazan, 2016; Kazan & Bilgin, 2020). Bu çalışmada, FMCW radar sinyal işleme zincirinin tamamı, donanım gerçeklemesine uygun ayırık zamanlı bir yaklaşım kullanılarak MATLAB/Simulink ortamında modellenmiştir. (Schuetz vd., 2023) Teorik simülasyon ile donanım uygulaması arasındaki boşluğu doldurmak amacıyla, modelde yüksek seviyeli hazır radar araç kutusu fonksiyonlarından kaçınılmıştır. Bunun yerine, beyaz kutu (white-box) tasarım felsefesine sadık kalınarak mimari; temel fiziksel prensipler, matematiksel operatörler ve ayırık gecikme blokları kullanılarak inşa edilmiştir. (Heo vd., 2021) İnşa edilen bu şeffaf kutu modellemesinin genel akış diyagramı Şekil 1’de gösterilmiştir.

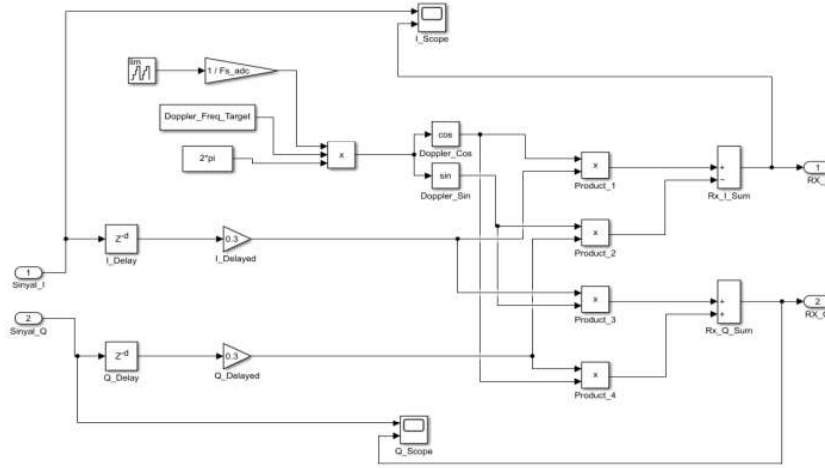


Şekil 4 : Sinyal Üretimi 2. Kısım

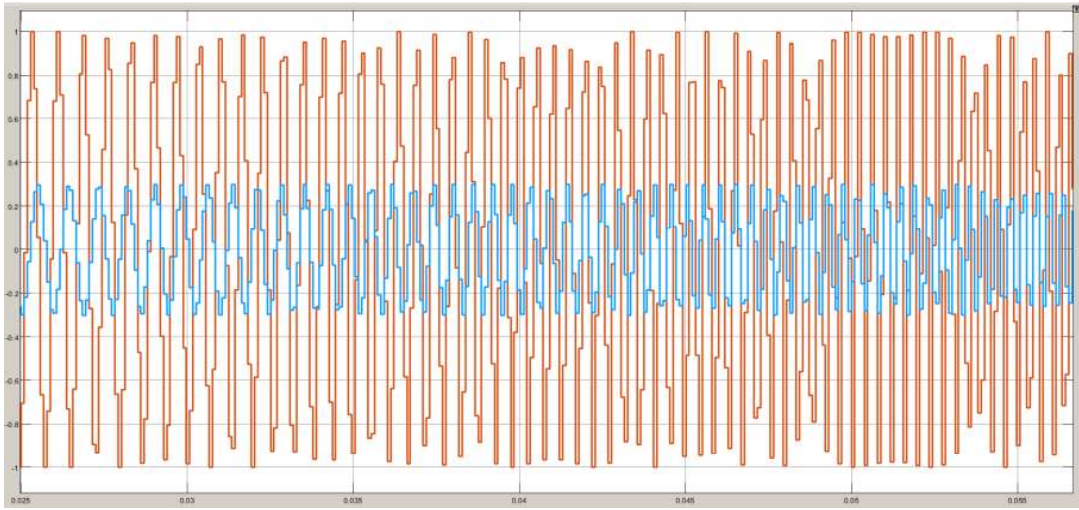


Şekil 5: Sinyal Üretimi Grafik Çıktısı

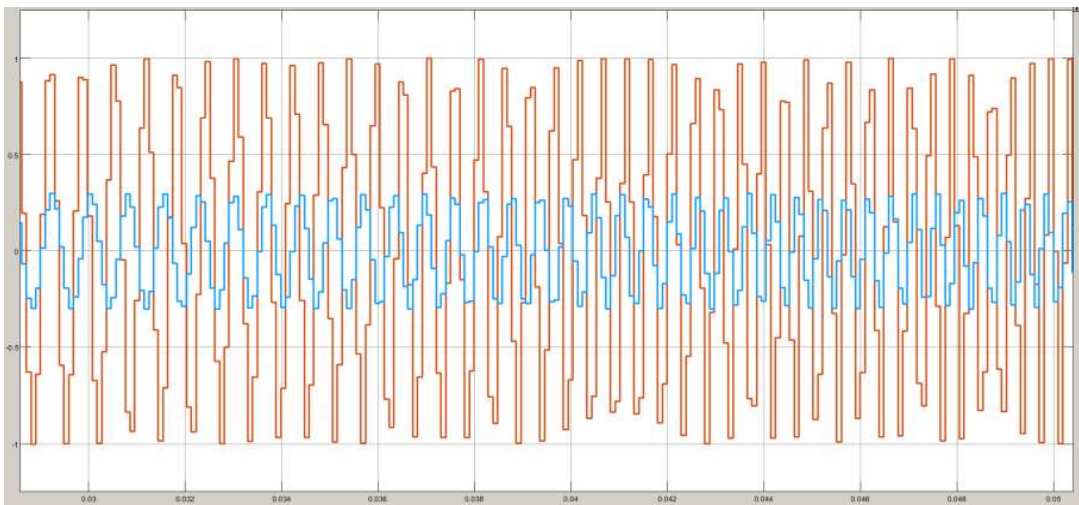
Hedef Modelleme: Üretilen ideal I/Q sinyali, modelde menzilindeki hedefi temsil eden bir zaman gecikmesine ($\tau = 2R/c$) ve radyal hızı temsil eden bir Doppler kaymasına ($f_d = 2v/\lambda$) uğrattılır. (Skolnik, 1980; Newman vd., 2024) Bu işlem, alınan sinyali $s_{rx}(t) = a s_{tx}(t - \tau) * \exp(j 2\pi f_d t)$ olarak modeller. Hedefi modellemek için temel bloklarla gerçekleştirilen akış Şekil 5'te, I sinyalinin çıktısı Şekil 6'da, Q sinyalinin çıktısı Şekil 7'de gösterilmiştir.



Şekil 6: Hedef Modellemesi



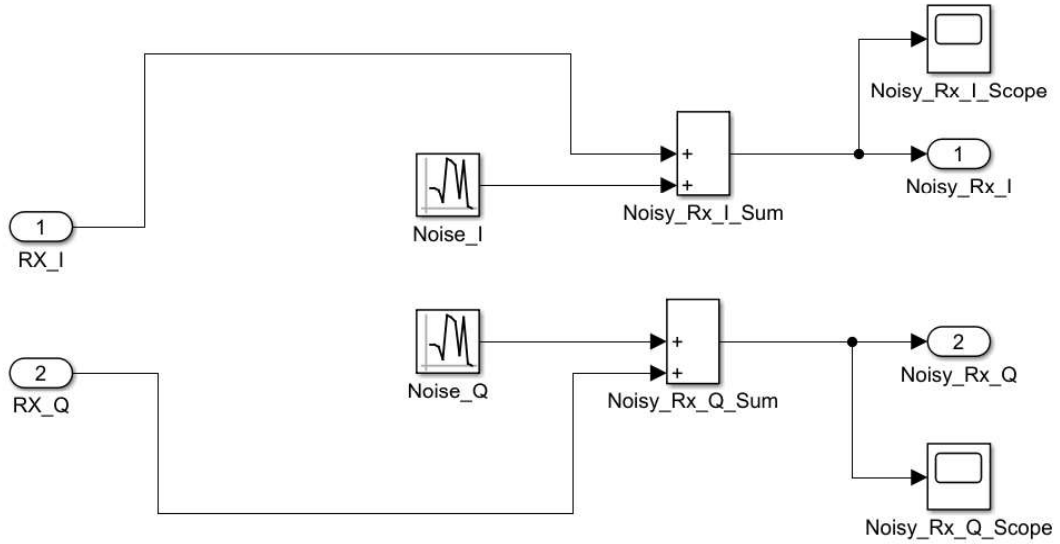
Şekil 7: Hedef Modellemesi I Sinyali



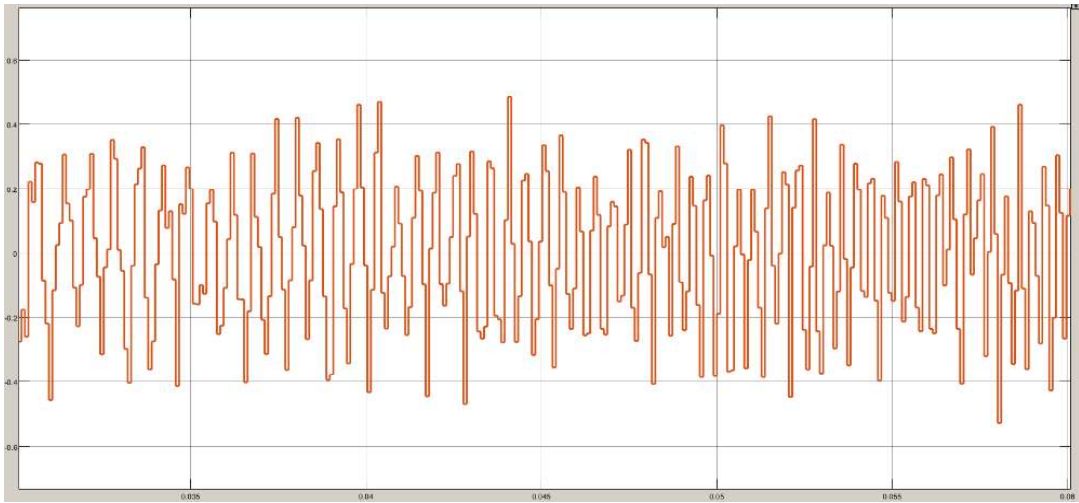
Şekil 8: Hedef Modellemesi Q Sinyali

Adım 2: Alıcı, Dechirp ve Filtreleme

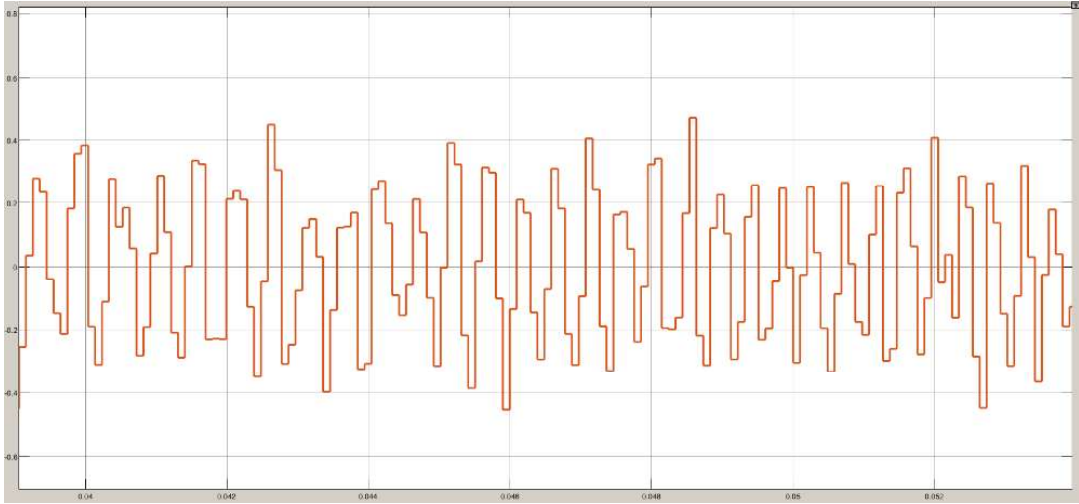
- **Gürültü:** Gerçekçi ortam koşullarını yansıtmak amacıyla modele, alıcıda oluşabilecek elektronik gürültüyü simüle eden blok eklenmiştir. (Pralon vd., 2021) Alıcının elektronik gürültüsü eklenmiş akış şeması Şekil 8’de, I sinyali Şekil 9’da, Q sinyali Şekil 10’da gösterilmiştir.



Şekil 9: Gürültü Ekleme

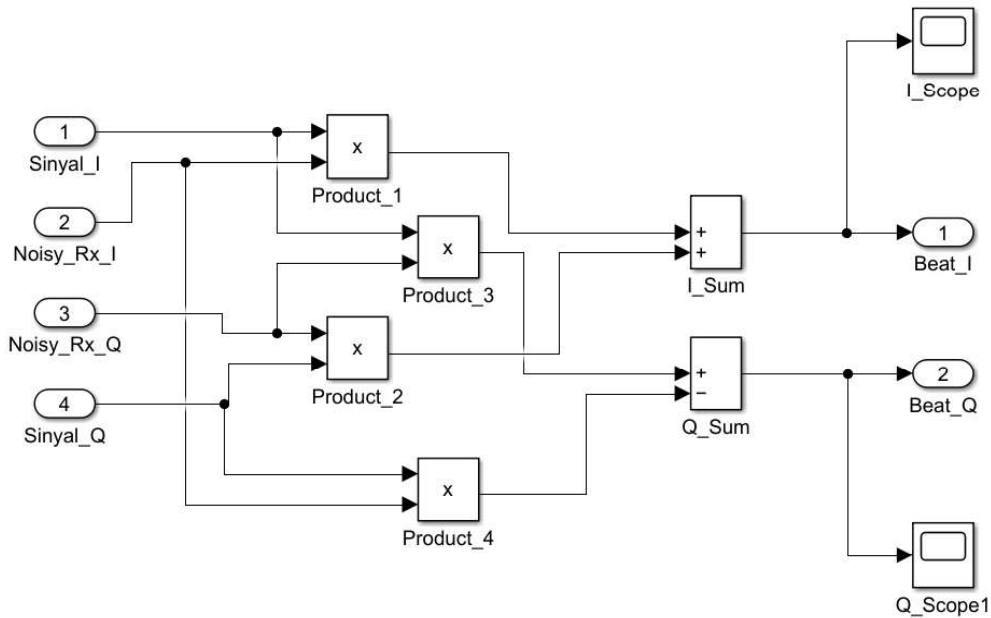


Şekil 10: Gürültü Eklenmiş I Sinyali

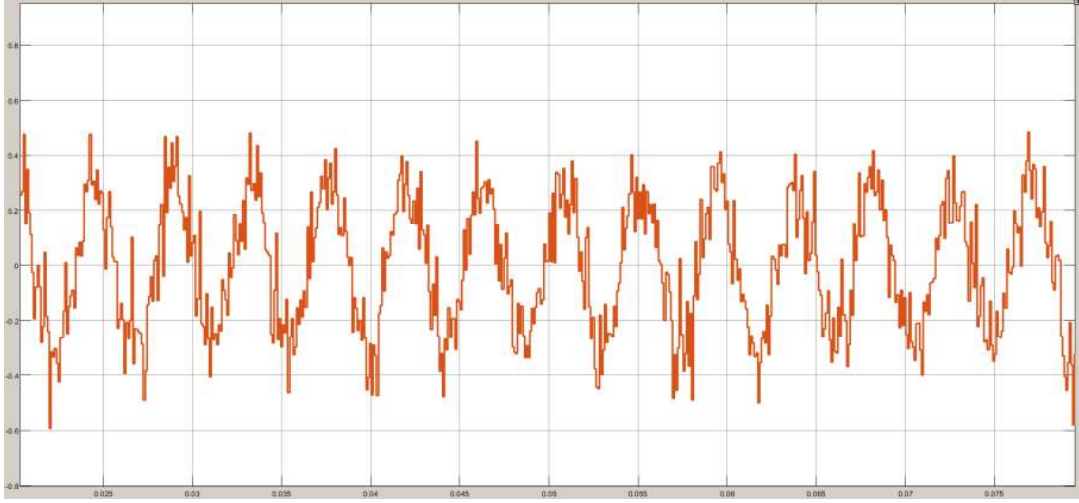


Şekil 11: Gürültü Eklenmiş Q Sinyali

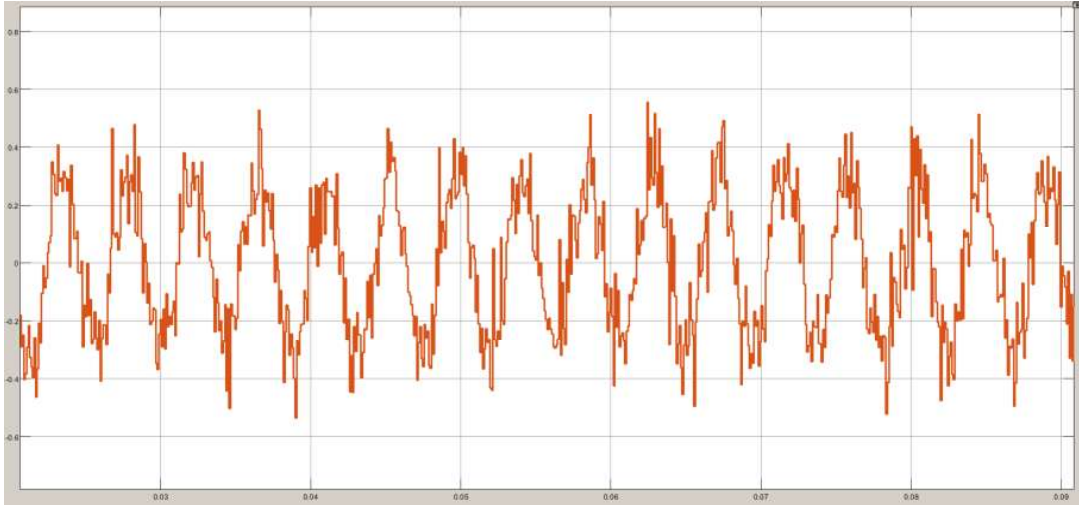
- **Mikser:** Geri dönen (Rx) sinyal, homodyne alıcı mimarisini uygulamak üzere o an gönderilen (Tx) sinyalin karmaşık eşleniği ile çarpma işlemine tabi tutulur ($s_{beat}(t) = s_{rx}(t) * s_{tx}^*(t)$). (Schuetz vd., 2023; Newman vd., 2024) Bu işlem, yüksek frekanslı taşıyıcıyı (f_c) ortadan kaldırır ve geriye, $f_b \approx K\tau + f_d$ frekansı olan, yani hem menzil (gecikme τ) hem de hız (f_d) bilgisini kodlanmış olarak içeren, düşük frekanslı beat sinyalini bırakır. Mikserleme işlemi Şekil 11’de, I sinyali Şekil 12’de, Q sinyali Şekil 13’te gösterilmiştir.



Şekil 12: Mikser İşlemi

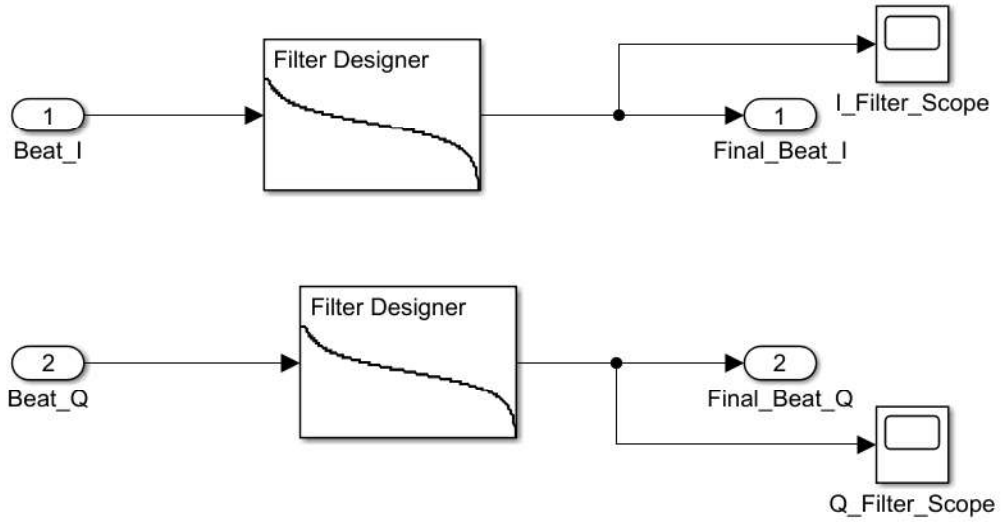


Şekil 13: Mikserlenmiş I Sinyali

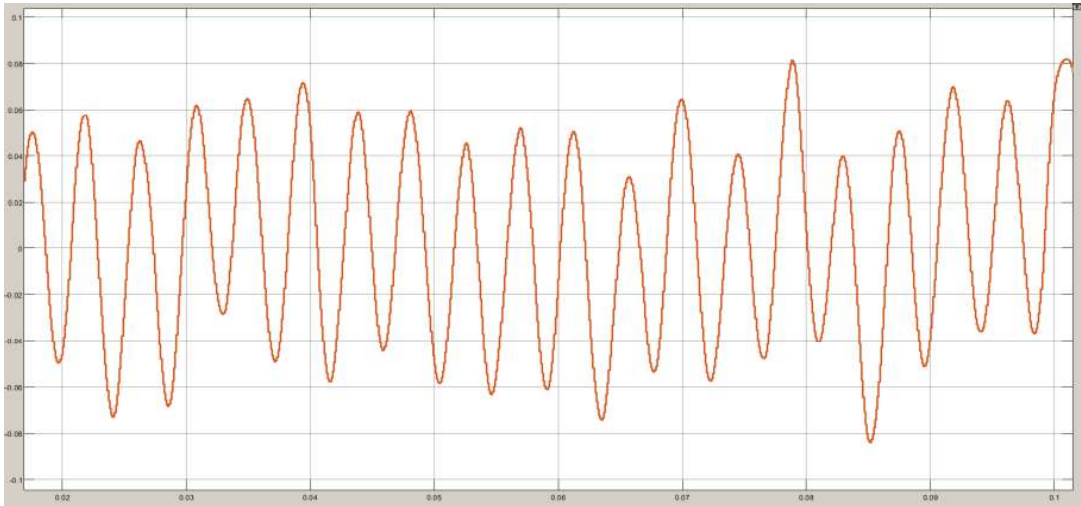


Şekil 14: Mikserlenmiş Q Sinyali

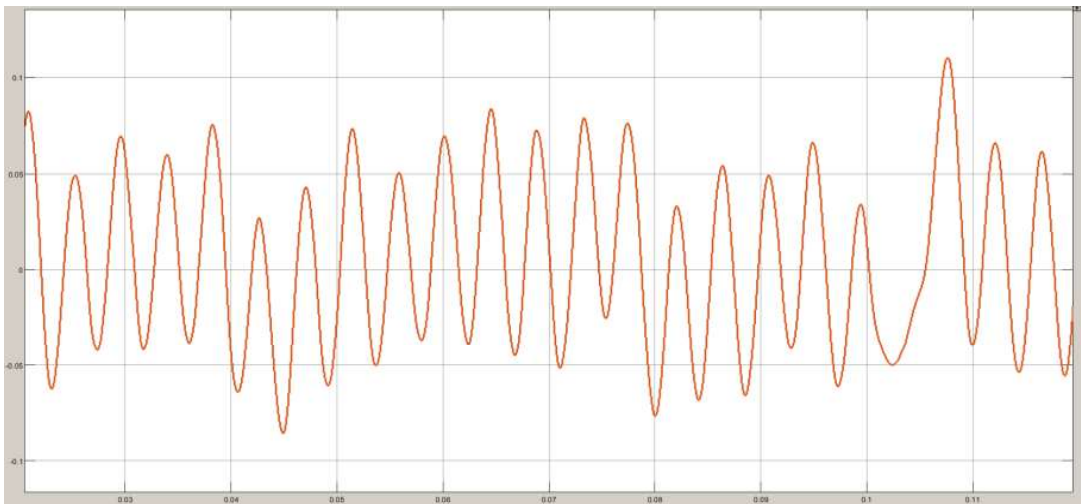
- **Filtreleme:** Mikser çıkışında oluşan istenmeyen yüksek frekanslı toplam bileşenlerini bastırmak ve sadece temel banttaki beat sinyalini izole etmek için bir Alçak Geçiren Filtre (Low-Pass Filter) bloğundan geçirilir. (Lin vd., 2016) Filtreleme işlemi Şekil 14’te, I sinyali Şekil 15’te, Q sinyali Şekil 16’da gösterilmiştir.



Şekil 15: Filtreleme İşlemi



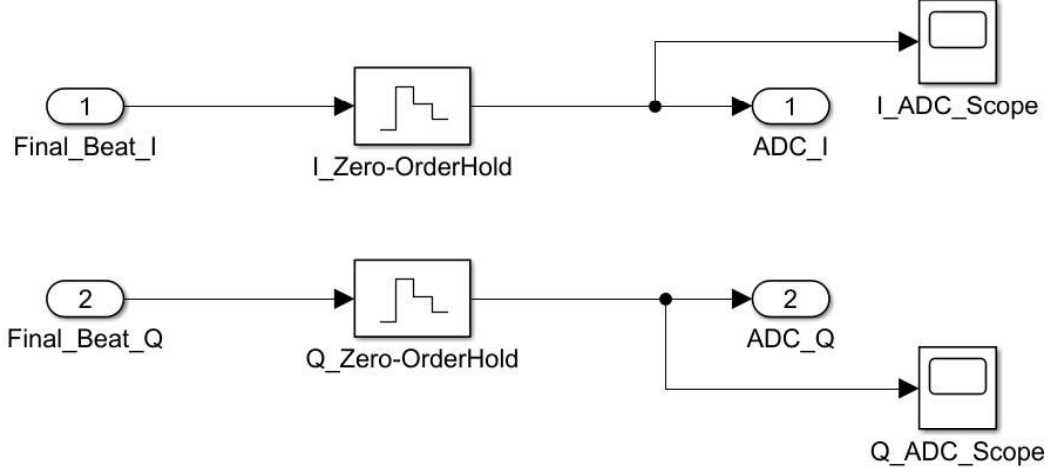
Şekil 16: Filtrenilmiş I Sinyali



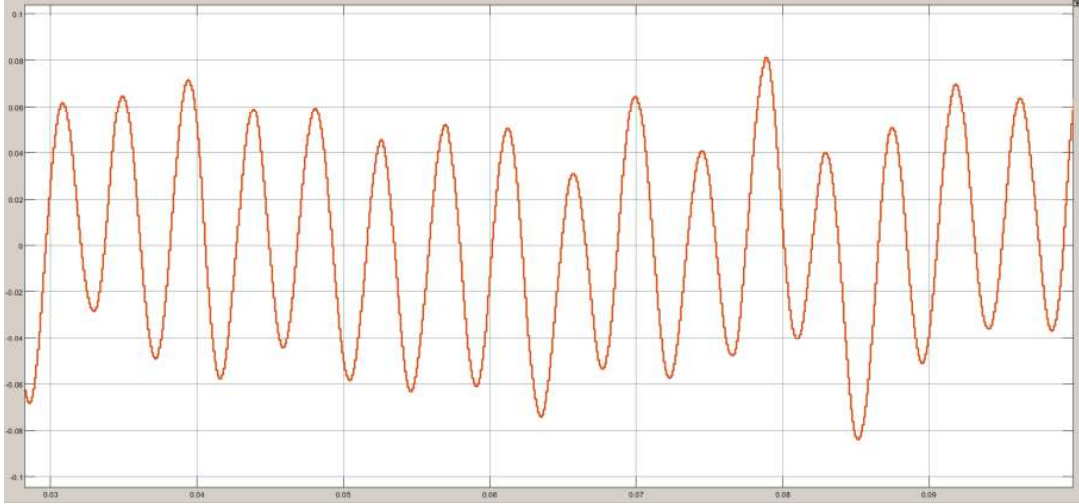
Şekil 17: Filtrenilmiş Q Sinyali

Adım 3: Dijital Dönüşüm ve Ön İşleme

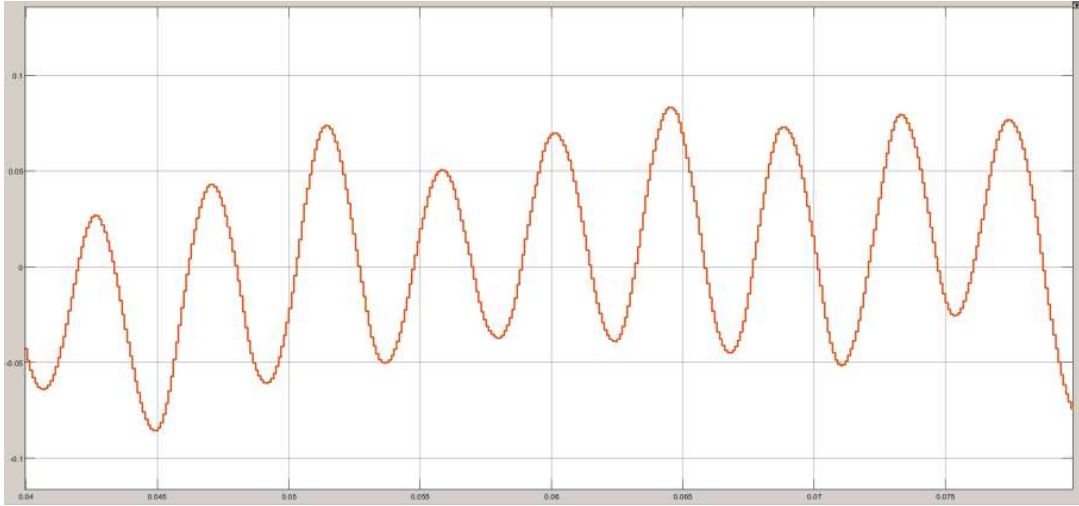
- **ADC Modelleme:** Filtrelenen analog beat sinyali, bir Sıfırıncı Dereceden Tutucu (Zero-Order Hold) bloğu kullanılarak ayrıklaştırılır ve Analog-Dijital Dönüştürücü (ADC) davranışı simüle edilir. (Lin vd., 2016) ADC işlemi Şekil 17’de, I sinyali Şekil 18’de, Q sinyali Şekil 19’da gösterilmiştir.



Şekil 18: ADC İşlemi



Şekil 19: ADC İşlemi Yapılmış I Sinyali



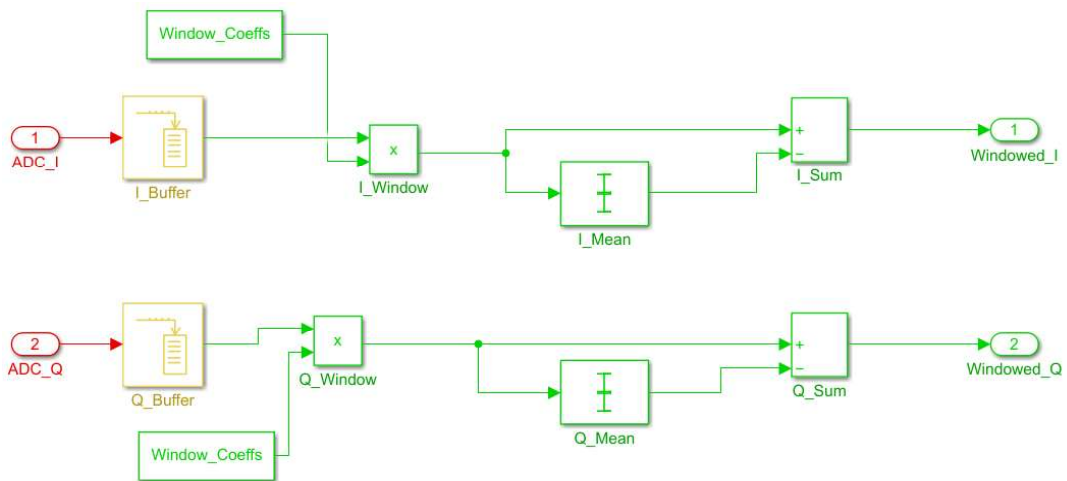
Şekil 20: ADC İşlemi Yapılmış Q Sinyali

- **Buffer (Tamponlama):** ADC'den gelen tekil örnekler, FFT işlemi için gerekli olan $N_{samples}$ uzunluğundaki veri paketleri halinde biriktirilir. (Lin vd., 2016)

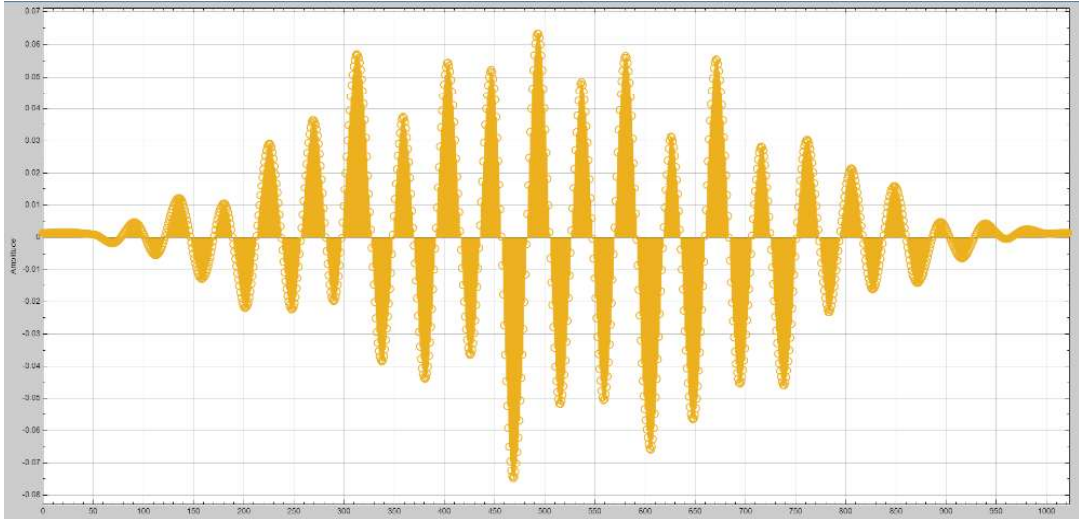
- **Windowing (Pencereleme):** FFT'nin doğasından kaynaklanan spektral sızıntıyı (spectral leakage) azaltmak ve zayıf hedeflerin (düşük zirvelerin) gürültü içinde kaybolmasını engellemek için Hanning penceresi uygulanır. (Winkler, 2007; Lin vd., 2016)

- **DC Temizleme:** Pencerelemiş vektördeki ortalama DC ofset bileşenleri çıkartılır. (Lin vd., 2016)

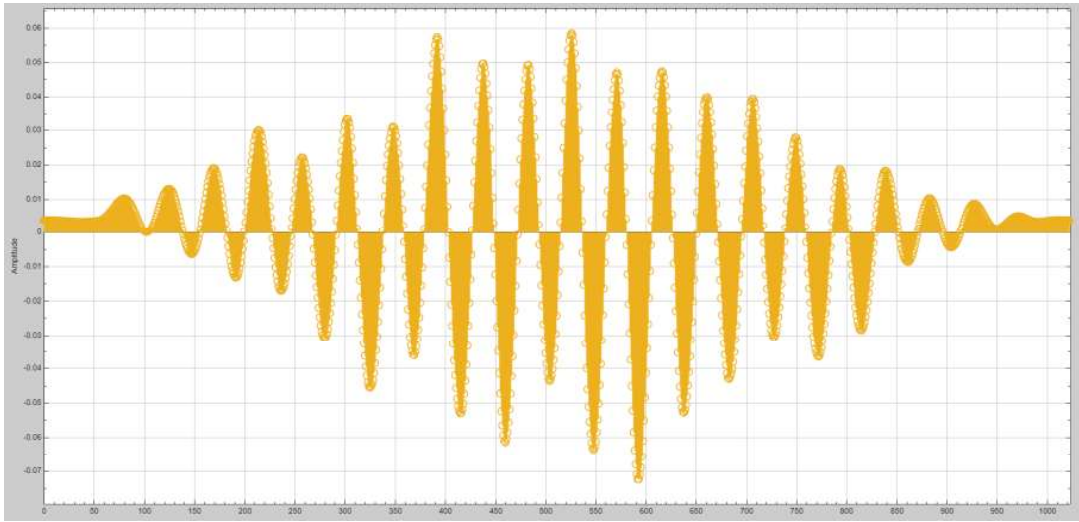
Şekil 20'de ön işleme adımları, I sinyali Şekil 21'de, Q sinyali Şekil 22'de gösterilmiştir.



Şekil 21: Ön İşleme Adımları



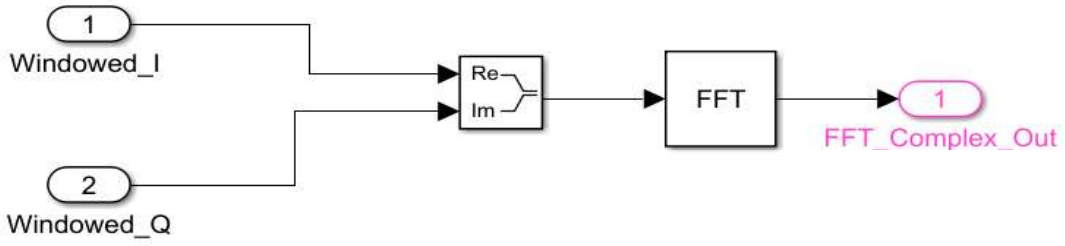
Şekil 22: Ön İşlem Uygulanmış I Sinyali



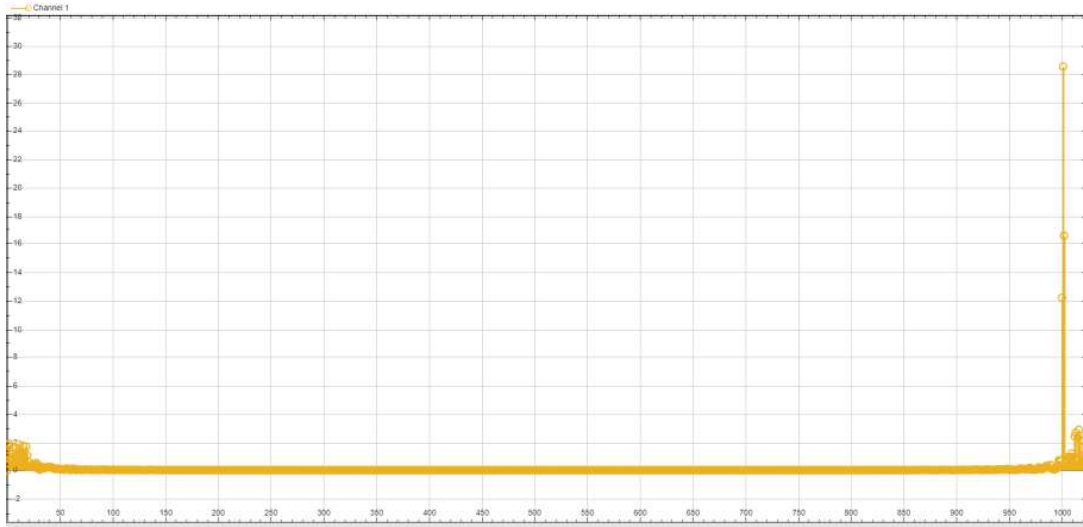
Şekil 23: Ön İşlem Uygulanmış Q Sinyali

Adım 4: Menzil Tespiti

–**1.FFT:** Ön işlemde geçmiş dijital sinyal, Hızlı Fourier Dönüşümü (FFT) bloğuna iletilir. Bu işlem, zaman alanındaki beat sinyalini frekans alanına taşıyarak beat frekansını (f_b) görünür bir genlik tepesine dönüştürür. Duran hedefler ($f_d \approx 0$) için beat frekansı ($f_b = S \tau$) olur ve menzil $R = (f_b * c * T_{chirp})/2B$ formülü ile hesaplanır. (Newman vd., 2024) Sinyalin genliği alınarak menzil profili elde edilir. Şekil 23’de menzil tespiti gerçekleştirilmek için yapılan akış, Şekil 24’te oluşan grafik çıktısı gösterilmiştir.

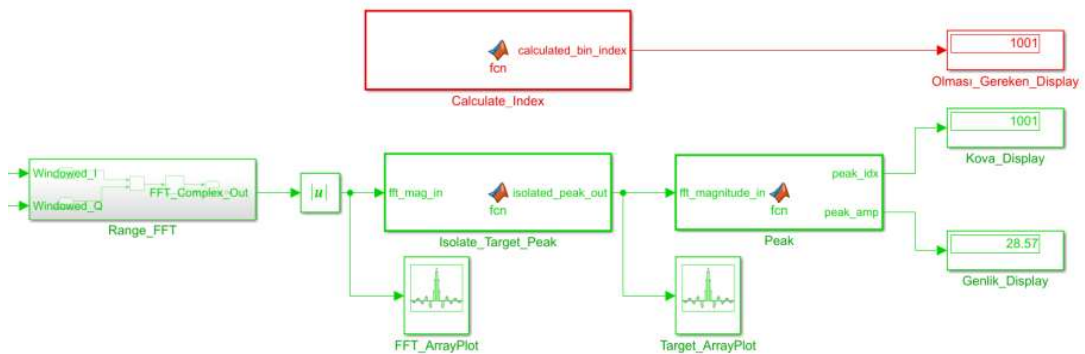


Şekil 24: Menzil FFT İşlemi



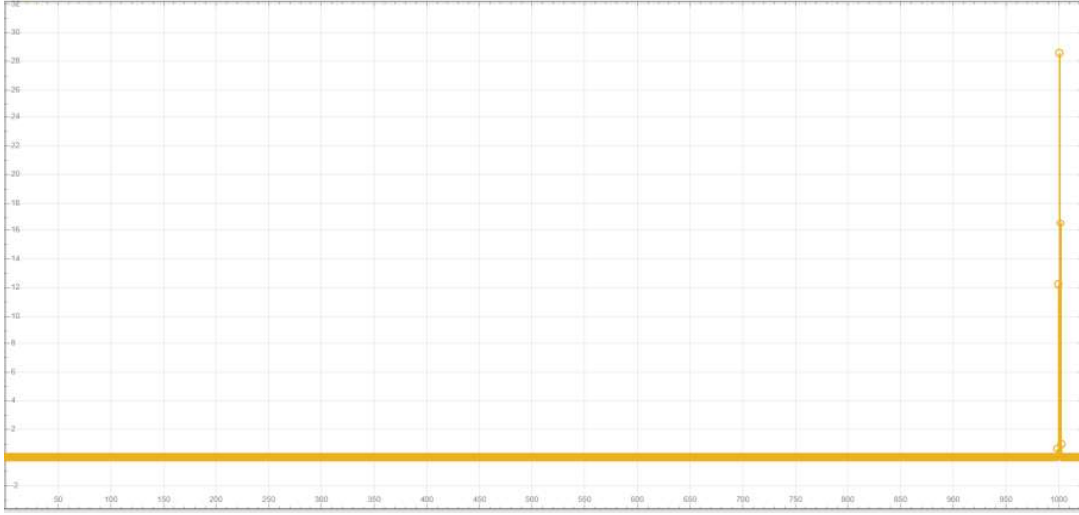
Şekil 25: Menzil FFT Sonucu Oluşan Grafik Çıktısı

Görselleştirilen FFT sinyalinde arka plan bastırılarak gürültü zemini önemsiz hale getirilmiş, hedef daha net bir şekilde öne çıkmıştır. Öne çıkan hedefin oluştuğu kova ve olması gereken kova karşılaştırılmış, genliği hesaplanmıştır. Şekil 25'te hedefi daha net ortaya çıkartan akış gösterilmiştir.



Şekil 26: Hedefin Net Ortaya Çıkması İçin Yapılan İşlemler

Arka planın bastırıldığı ve hedef tepesinin net görüldüğü grafik çıktısı Şekil 26'da gösterilmiştir.



Şekil 27: Hedefin Net Ortaya Çıktığı Grafik Çıktısı

Simülasyon Parametreleri

Yapılan dijital FMCW radar modelini doğrulamak amacıyla temel bir simülasyon senaryosu oluşturulmuştur. Dalga biçimi parametreleri, Nyquist örnekleme kriterlerine bağlı kalarak kısa menzilli bir tespit ortamını modelleyecek şekilde seçilmiştir. Sonraki tüm parametrik analizler için referans olarak kullanılan temel fiziksel sabitler ve sistem parametreleri Tablo 1’de gösterilmiştir.

Tablo 1 : Sistem Parametreleri

Parametre	Sembol	Değer	Açıklama
Bant Genişliği	BW	1000 Hz	Frekans tarama aralığı
Chirp Süresi	T_{chirp}	0.1 s	Tek bir chirpin süresi
Örnekleme Frekansı	F_{s_Adc}	10240 Hz	ADC örnekleme hızı (N/T_{chirp})
FFT Boyutu	$N_{samples}$	1024	Chirp başına örnek sayısı
Eğim (Slope)	S	10 kHz/s	Chirp eğimi (BW/T_{chirp})
Frekans Çözünürlüğü	Δf	10 Hz	FFT kovanı başına çözünürlük
Hedef Gecikmesi	τ	0.005 s	Hedef için gidiş dönüş süresi
Işık Hızı	c	3×10^8	Yayılm hızı
Gecikme (örnek)	Delay_in_Samples	51	Gecikmenin dijital örnek karşılığı
Pencereleme	Window_Coeffs	Hann	Yan lobları bastırma fonksiyonu

SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, FMCW radar sistemleri için ayrık zamanlı bir sinyal işleme zinciri geliştirilmiş ve MATLAB/Simulink ortamında kapsamlı bir şekilde doğrulanmıştır. Beyaz kutu tasarım yaklaşımıyla oluşturulan model, hazır araç kutularının kapalı yapısını ortadan kaldırmış; sinyal üretiminden son analiz aşamasına kadar tüm dijital süreçlerin şeffaf bir şekilde görülmesini sağlamıştır. (Schuetz vd., 2023) Bu yaklaşım, teorik radar denklemleri ile dijital donanım uygulamasının pratik kısıtları arasındaki boşluğu başarıyla doldurmaktadır.

Bu çalışmada modellenen FMCW radar verileri, derin öğrenme tabanlı nesne sınıflandırma algoritmaları için temel girdi niteliğindedir. Literatürde bu tür yüksek boyutlu verilerin sınıflandırılması; gıda kalitesinden atık yönetimine kadar pek çok alanda başarıyla uygulanmaktadır (Eryeşil & Taşdemir, 2023; Aras, Eryeşil & Köklü, 2025; Kılıcı, Eryeşil & Köklü, 2025).

Modelin performansı, simülasyon çıktılarının teorik beat frekansı (f_{beat}) hesaplamalarıyla üç farklı senaryo üzerinden analiz edilmiştir:

1. Doppler Hassasiyeti Doğrulaması: İlk senaryoda, hedefin Doppler frekansının 120 Hz'e çıkarılması, beat frekansının pozitif bölgeye (+70 Hz) kaymasıyla sonuçlanmıştır. Simülasyon, tepeyi doğru bir şekilde 7. kova indeksinde tespit etmiştir. Bu durum, modelin hareketli hedef tespiti için gerekli olan hız kaynaklı frekans değişimlerini doğru bir şekilde işlediğini göstermektedir.
2. Bant Genişliği ve Sinyal İşleme Sınırları: İkinci ve üçüncü senaryolar, bant genişliği artışının etkilerini incelemiştir. Bant genişliğinin 2000 Hz ve 5000 Hz'e çıkarılması, beat frekansını negatif bölgeye (sırasıyla -80 Hz ve -230 Hz) itmiştir. En önemlisi, simülasyon ayrık zamanlı işlemenin doğasında var olan frekans sarılması (frequency wrapping) etkilerini net bir şekilde göstermiştir. Tepeler, teorik beklentilerle uyuşacak şekilde 1016 ve 1001 kova indekslerinde (bu indeksler $N - k'$ 'ya karşılık gelir) bulunmuştur. Bu davranış, modelin Nyquist örnekleme kısıtlamalarını ($F_{s_adc} = 10240 \text{ Hz}$) doğru bir şekilde

uyguladığını ve gerçek bir dijital sinyal işlemci gibi davrandığını kanıtlamaktadır.

3. Tasarım Doğrulama Yeteneği: Giriş parametreleri ile elde edilen sonuçlar arasındaki uyum, modelin donanım öncesi doğrulama aracı olduğunu göstermektedir. Bu araç, radar tasarımcılarının algoritmaları FPGA kartlarına yüklemekten önce örnekleme limitleri ve sayısal hatalar gibi donanıma özgü durumları analiz etmelerine olanak tanır.

Tablo 2 : Uygulamalar ve Sonuç

Senaryo	Bant Genişliği (BW)	Eğim (S)	Doppler Frekansı (f_d)	Menzil Frekansı (f_r)	Beat Frekansı (f_{beat})	Beklene n Kova	Simül e Edilen Kova
Referans	1000	10000	20 Hz	50 Hz	-30 Hz	1021	1021
Uyg 1	1000	10000	120 Hz	50 Hz	+70 Hz	7	7
Uyg 2	2000	20000	20 Hz	100 Hz	-80 Hz	1016	1016
Uyg 3	5000	50000	20 Hz	250 Hz	-230 Hz	1001	1001

Uygulamalara bağlı olarak sistem parametrelerinin değişimi ve kovanın olduğu durumlar Tablo 2’de gösterilmiştir. Gelecekteki çalışmalar, Menzil-Hız haritaları oluşturmak için bu 1D temelini tam bir 2D-FFT mimarisine genişletmeye ve tasarlanan IP çekirdeklerini gerçek zamanlı hedef tespiti için bir Xilinx FPGA platformunda uygulamaya odaklanacaktır. (Heo vd., 2021)

Gelecekteki çalışmalarda, radar sinyallerinin evrişimli sinir ağları ile entegrasyonu sayesinde, hedef tespiti doğruluğunun daha da artırılması hedeflenmektedir (Eryeşil, Kahramanlı & Taşdemir, 2025; Ng vd., 2020).

KAYNAKÇA

- 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>
- Aras, H. H., Eryeşil, Y., & Köklü, M. (2025). An explainable deep learning framework for Agrtron-based coffee roast classification using Grad-CAM. 3rd International Conference on Intelligent Systems and New Applications (ICISNA'25).
- Armanious, K., Abdulatif, S., Aziz, F., Schneider, U., & Yang, B. (2019, 8-13 September). An adversarial super-resolution remedy for radar design trade-offs. 2019 27th European Signal Processing Conference (EUSIPCO) (s. 1-5). IEEE.
- 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>
- 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. <https://doi.org/10.1109/ICEM.2016.7732884>
- Brooker, G. M. (2005). Understanding millimetre wave FMCW radars. 1st International Conference on Sensing Technology, Palmerston North, New Zealand.
- 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>
- Heo, J., Jung, Y., Lee, S., & Jung, Y. (2021). FPGA implementation of an efficient FFT processor for FMCW radar signal processing. *Sensors*, 21(19), Makale 6443.
- 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., & 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>
- Lin, J. J., Li, Y. P., Hsu, W. C., & Lee, T. S. (2016). Design of an FMCW radar baseband signal processing system for automotive application. *SpringerPlus*, 5(1), Makale 42.
- Newman, T., Stroeve, J., Nandan, V., Willatt, R., Mead, J., Mallett, R., Tsamados, M., Huntemann, M., Hendricks, S., Spreen, G., & Tonboe, R. (2024). A practical approach to FMCW radar deconvolution in the sea ice domain. *IEEE Access*, 12, 174901-174933.
- Ng, W., Wang, G., Lin, Z., & Dutta, B. J. (2020). Range-Doppler detection in automotive radar with deep learning. 2020 International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN) (s. 1-8). IEEE.
- Pralon, L., Beltrao, G., Barreto, A., & Cosenza, B. (2021). On the analysis of PM/FM noise radar waveforms considering modulating signals with varied stochastic properties. *Sensors*, 21(5), Makale 1727.
- Rohling, H., & Meinecke, M. M. (2001). Waveform design principles for automotive radar systems. 2001 CIE International Conference on Radar Proceedings (s. 1-4). IEEE.

- Schuetz, S., Bruns, R., Gonschorek, T., Sutor, A., & Vossiek, M. (2023). Model-based design and validation of an FMCW radar sensor model for automotive applications. *Sensors*, 23(6), Makale 3227.
- 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).
- Skolnik, M. I. (1980). *Introduction to radar systems* (2. baskı). McGraw-Hill.
- 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.
- Venon, A., Dupuis, Y., Vasseur, P., & Merriaux, P. (2022). Millimeter wave FMCW radars for perception, recognition and localization in automotive applications: A survey. *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*, 7(3), 533-555.
- Wang, Y., Chen, Z., Wu, Z., & So, H. C. (2023). A review on micro-Doppler signatures for drone detection using radar. *IEEE Access*, 11, 23623-23644.
- Weyer, D., Dayanik, M. B., Jie, L., Albalawi, A., Alothaimen, A., Aseeri, M., & Flynn, M. P. (2019). Design considerations for integrated radar chirp synthesizers. *IEEE Access*, 7, 13723-13736.
- Winkler, V. (2007). Range Doppler detection for automotive FMCW radars. 2007 European Radar Conference (s. 166-169). IEEE.
- Wojtkiewicz, A., Misiurewicz, J., Nalecz, M., Jedrzejewski, K., & Kulpa, K. (1997). Two-dimensional signal processing in FMCW radars. *Proceedings of the XXth National Conference on Circuit Theory and Electronic Networks* (s. 475-480). University of Mining and Metallurgy.

BÖLÜM 4

DİJİTALLEŞEN MUHAREBE SAHASINDA ELEKTRİFİKASYON VE HİBRİT ENERJİ SİSTEMLERİNİN ROLÜ

Abdullah Cem AĞAÇAYAK **

GİRİŞ

Muharebe sahasının karakteri, teknolojik ilerlemelere paralel olarak hızlı ve köklü bir dönüşüm geçirmektedir. Farklı bilimsel ve mühendislik disiplinlerindeki gelişmeler, çatışmalarda insan kayıplarını azaltmaya yönelik yeni imkânlar sunarken, aynı zamanda yeni teknik ve lojistik zorlukları da beraberinde getirmektedir. Bu dönüşümün en belirgin çıktılarından biri, modern ordularda muharebe sahasının dijitalleşmesi olgusudur. Günümüzde, örneğin ABD Ordusu'nda muharebe timlerinin tüm unsurları; durumsal farkındalığı artırmak, karar alma sürecini hızlandırmak ve kayıpları minimize etmek amacıyla dijital bir muharebe ağı içinde birbirine bağlanmış durumdadır (Siegel & Madni, 2014).

Muharebe sahası dijitalleşmesini yönlendiren temel araştırma, geliştirme ve deney alanları; yapay zekâ ve makine öğrenimi, robotik ve otonom sistemler, ağa bağlı sensör ve efektörler, yeni nesil silah sistemleri

** Konya Teknik Üniversitesi, Teknik Bilimler MYO, Elektrik ve Enerji Bölümü, Konya, acagacayak@ktun.edu.tr, ORCID: orcid.org/0000-0002-9285-5764

ve muharebe sahasının elektrifikasyonu olarak öne çıkmaktadır (British Army, 2014). Literatürde de vurgulandığı üzere, bu unsurlar yalnızca tekil teknolojiler değil; karargâh merkezli, bütünleşik bir komuta-kontrol mimarisi içinde birlikte çalışan alt sistemlerdir. Bu bütünleşik yapı, karargâhın sahadaki durumu daha doğru algılamasına ve muharebe unsurları arasında eşgüdümün artmasına olanak tanımaktadır.

Bu dijital dönüşümün sahadaki somut karşılığı, muharebe unsurlarının artan ölçüde elektrik enerjisine bağımlı hâle gelmesidir. Dolayısıyla dijitalleşme ile elektrifikasyon kavramları, modern muharebe sahasında birbirinden bağımsız değil, karşılıklı olarak birbirini zorunlu kılan iki temel dönüşüm eksenini olarak değerlendirilmelidir.

Elektrifikasyonun dijital muharebe sahasındaki merkezi rolü

Muharebe sahasının dijitalleşmesi, doğrudan elektrifikasyon ile ilişkilidir. Modern askeri sistemlerde hesaplama, haberleşme, algılama ve görüntüleme gibi tüm kritik işlevler, elektrik ve elektronik altyapılara dayanmaktadır. Fosil yakıt temelli sistemlerle karşılaştırıldığında elektrik enerjisi; daha yüksek verim, daha düşük akustik ve termal iz, sistem basitleştirmesi ve sürdürülebilirlik açısından önemli avantajlar sunmaktadır. Bu durum, askeri araçlar ve askerî teçhizat genelinde elektrikli tahrik ve elektrik tabanlı alt sistemlerin yaygınlaşmasını kaçınılmaz kılmaktadır. Enerji dönüşüm süreçlerinde ortaya çıkan kayıpların minimize edilmesi, askeri sistemlerin operasyonel etkinliği açısından belirleyici bir faktör olup, alternatif enerji kazanım yaklaşımları bu bağlamda önem kazanmaktadır (Yalçın vd., 2019). Askeri platformlardaki karmaşık güç yönetim sistemlerine benzer şekilde, sivil alanda da farklı kullanıcı ihtiyaçlarına yönelik hibrit araç tasarımları ve bu araçların kontrol mekanizmaları üzerine çalışmalar gerçekleştirilmiştir (Güntürkün vd., 2014; Güntürkün, R., & Güngör, E., 2022).

Ancak elektrifikasyon, beraberinde enerji depolama problemini de getirmektedir. Modern muharebe sahasında, askerden insansız araçlara kadar neredeyse tüm unsurlar, görevlerini yerine getirebilmek için güvenilir ve yüksek performanslı enerji depolama çözümlerine ihtiyaç duymaktadır (British Army, 2014; Leuchter vd., 2010; Pham vd., 2022; Leuchter & Stekly, 2013; Oman, 1998; Gagliardi vd., 2002). Bu bağlamda, literatürde özellikle elektrikli tahrik sistemlerinde kullanılan piller,

süperkapasitörler ve bunların kombinasyonları üzerine yoğunlaşan çalışmalar dikkat çekmektedir (British Army, 2014).

Ancak bu eğilim, enerji üretiminden ziyade enerji depolama ve yönetimi problemini ön plana çıkarmakta; görev sürekliliği ve operasyonel güvenilirlik açısından enerji depolama sistemlerini kritik bir tasarım parametresi hâline getirmektedir.

İnsansız sistemler ve enerji depolama sorunu

Robotik ve Otonom Sistemler (ROS) alanındaki gelişmeler, kara, hava ve deniz kuvvetlerini kapsayan geniş bir yelpazede insansız araçların (İA) muharebe sahasına entegrasyonunu hızlandırmıştır. İnsansız Hava Araçları (İHA), İnsansız Kara Araçları (İKA), İnsansız Deniz Araçları (İDA) ve İnsansız Su Altı Araçları (İSA) gibi platformlar, keşif, gözetleme, mayın temizleme, taarruz ve lojistik destek gibi kritik görevlerde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu eğilim, yalnızca büyük askeri güçlerle sınırlı olmayıp, daha küçük orduların da operasyonel kabiliyetlerini artırmak amacıyla benimsediği bir yaklaşım hâline gelmiştir.

Bu platformlarda içten yanmalı motorların yerini elektrikli tahrik sistemlerinin alması; gürültünün, karbon emisyonlarının ve bakım gereksinimlerinin azaltılması açısından önemli kazanımlar sağlamaktadır. Bununla birlikte, mevcut elektrikli güç kaynaklarının enerji yoğunluğu ve güç yoğunluğu sınırlamaları, özellikle küçük ve taşınabilir İA'lar için kritik bir mühendislik engeli oluşturmaktadır. Literatür, birkaç kW mertebesindeki küçük İA'lar için elektrikli veya hibrit çözümlerin avantajlı olduğunu, ancak 100 kW ve üzerindeki platformlarda enerji depolama teknolojilerinin hâlen maliyet ve ağırlık açısından dezavantajlı kaldığını göstermektedir.

Bu sınırlamalar, özellikle insansız platformlarda enerji depolama sistemlerinin yalnızca toplam enerji kapasitesi açısından değil, zamana bağlı güç talebini karşılama kabiliyeti açısından da değerlendirilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır.

Enerji yoğunluğu – güç yoğunluğu ikilemi

Elektrikli İA'larda karşılaşılan temel teknik problem, enerji yoğunluğu ile güç yoğunluğu arasındaki yapısal çelişkidir. Enerji yoğunluğu, bir sistemin ne kadar toplam enerji depolayabildiğini ve dolayısıyla aracın menzilini belirlerken; güç yoğunluğu, bu enerjinin ne kadar hızlı

aktarılabildiğini ve ani manevra, tırmanma veya hızlanma gibi durumlarda performansı belirlemektedir. Lityum-iyon piller yüksek enerji yoğunlukları sayesinde uzun süreli görevler için uygundur; ancak ani yüksek akım taleplerinde verim kaybı, ısınma ve ömür azalması gibi sorunlar ortaya çıkmaktadır. Buna karşılık süperkapasitörler, çok yüksek güç yoğunluğu ve son derece hızlı şarj/deşarj kabiliyeti sunmakta, ancak tek başına yeterli enerji depolayamadıkları için uzun süreli görevler için yetersiz kalmaktadır.

Bu yapısal çelişki, tekil enerji depolama teknolojileriyle tam anlamıyla çözülememekte; aksine farklı teknolojilerin tamamlayıcı özelliklerinden yararlanan hibrit mimarileri zorunlu kılmaktadır.

Hibrit güç kaynakları: pil + süperkapasitör yaklaşımı

Bu teknik ikilem, literatürde hibrit enerji depolama sistemleri ile aşılmaya çalışılmaktadır. Özellikle küçük ve orta ölçekli İA'lar için önerilen yaklaşım, pillerin ana enerji kaynağı olarak kullanıldığı; süperkapasitörlerin ise bir enerji tamponu görevi üstlendiği hibrit mimarilerdir. Bu yapıda, seyir gibi düşük yük durumlarında enerji pilden sağlanırken, ani manevra veya yüksek güç gereksinimi anlarında süperkapasitör devreye girerek gerekli akımı sağlar. Ayrıca rejeneratif frenleme veya alçalma gibi durumlarda ortaya çıkan yüksek güçlü geri kazanım enerjisi, süperkapasitörler tarafından verimli şekilde absorbe edilebilir.

Bu hibrit yaklaşım, pil paketlerinin boyutunun küçültülmesine olanak tanıyarak sistem ağırlığını azaltmakta ve pillerin ani akım stresinden korunması sayesinde ömürlerini uzatmaktadır. Literatürde, özellikle İHA uygulamaları için önerilen bu tür hibrit güç kaynağı konseptlerinin, hem performans hem de sürdürülebilirlik açısından önemli avantajlar sunduğu gösterilmiştir (Leuchter & Stekly, 2013; Leuchter, 2011).

Bu teknik kazanımlar, askeri platformlar için kritik öneme sahip olan boyut, ağırlık ve güç (SWaP) kriterleri bağlamında hibrit güç mimarilerini yalnızca performans artırıcı değil, operasyonel olarak da tercih edilir kılmaktadır. Bu noktada, özellikle platform yapısal bileşenlerinde kullanılan kompozit malzemelerin özgül mukavemet ve hafiflik avantajları, enerji depolama sistemlerinin entegrasyonunda kritik bir tamamlayıcı rol oynamaktadır (Ağacayak vd., 2022). Enerji ve güç büyüklüklerinin normalize edilerek değerlendirilmesi, farklı fiziksel

sistemler arasında karşılaştırma yapılabilmesini mümkün kılmakta olup bu yaklaşım literatürde farklı mühendislik uygulamalarında da kullanılmaktadır (Dursun vd., 2018).

Askeri bağlamda SWaP ve operasyonel kazanımlar

Askeri mühendislik perspektifinde bu yaklaşım, SWaP kriterleri açısından kritik bir anlam taşımaktadır. Elektrikli tahrik sistemleri; sessiz çalışma, düşük termal iz ve bakım kolaylığı gibi özellikleriyle taktik üstünlük sağlarken, enerji depolama sistemlerinin ağırlık ve hacmi hâlen sınırlayıcı bir faktördür. Hibrit pil-süperkapasitör sistemleri, özellikle 100 kW altı platformlarda bu dengeyi optimize ederek elektrifikasyonu pratik ve operasyonel olarak uygulanabilir kılmaktadır. Enerji depolama sistemlerinin platforma entegrasyonu sırasında, yapısal bütünlük ve üretim kaynaklı etkilerin de performans üzerinde belirleyici olabildiği bilinmektedir (Kagıtcı & Tarakcioglu, 2016).

Sonuç olarak, dijitalleşen muharebe sahasında elektrifikasyon yalnızca araçların hareketini sağlamakla sınırlı değildir; aynı zamanda sensörlerden haberleşme altyapılarına, otonom karar mekanizmalarından merkezi komuta-kontrol sistemlerine kadar tüm dijital ekosistemin enerji omurgasını oluşturmaktadır. Mevcut pil teknolojilerinin sınırlamaları dikkate alındığında, hibrit enerji depolama sistemleri, geleceğin askeri insansız platformları için yalnızca bir geçici çözüm değil, operasyonel gereklilikten doğan stratejik bir tasarım yaklaşımı olarak öne çıkmaktadır.

Bu çalışma, askeri insansız platformlar bağlamında enerji depolama teknolojilerini yalnızca enerji yoğunluğu açısından değil, zamana bağlı güç talebi ve iki-zaman ölçekli EMS etkisi üzerinden birlikte değerlendiren bütüncül bir yaklaşım sunmaktadır.

Yukarıda sunulan operasyonel ve kavramsal çerçeve doğrultusunda, bir sonraki bölümde askeri uygulamalarda kullanılan başlıca enerji depolama teknolojileri sınıflandırılmakta ve bu teknolojilerin askeri platformlar açısından seçim gerekçeleri ayrıntılı olarak ele alınmaktadır.

ENERJİ DEPOLAMA TEKNOLOJİLERİ

Enerji depolama teknolojilerinin sınıflandırılması ve askerî uygulamalar için seçim gerekçesi

Enerji depolama teknolojileri, elektrik enerjisinin üretim–tüketim dengesinin sağlanması, güç kalitesinin ve arz güvenilirliğinin artırılması açısından kritik bir rol üstlenmektedir. Üretilen enerjinin yakalanarak uygun zamanda kullanılmasını mümkün kılmalarının yanı sıra, talep ile sağlanan gücün kalitesi/güvenilirliği arasındaki boşluğu da azaltabilmektedirler (Hussain vd., 2020; Kalaiselvam & Parameshwaran, 2014; Mansour, 2019). Literatürde enerji depolama teknolojileri, depolama biçimine göre genel olarak mekanik, termal, elektrokimyasal, elektriksel ve hidrojen tabanlı sistemler olmak üzere beş ana grupta sınıflandırılmaktadır (Classification of Energy Storage Technologies: An Overview, n.d.; Haidl vd., 2019; Hussain vd., 2020; British Army, 2014).

Bu sınıflandırma askeri elektrikli araçlar ve insansız platformlar (İA/UV) açısından değerlendirildiğinde, seçimin yalnızca “enerji yoğunluğu” üzerinden değil; SWaP (size–weight–power), mekanik/termal dayanım, bakım kolaylığı, lojistik sürdürülebilirlik, güvenlik, termal/akustik iz ve görev profiline bağlı zamana göre güç talebi gibi çok boyutlu kriterler üzerinden yapılması gerekmektedir. Bu bağlamda ana teknoloji sınıfları kısaca şu şekilde özetlenebilir:

- Mekanik depolama (yerçekimi depolama, volanlar, basınçlı hava, pompalı hidro): Enerji, potansiyel/kinetik/sıkıştırma enerjisi biçiminde depolanır. Ancak mobil askeri platformlarda çoğu kez kütle/hacim ve mekanik karmaşıklık dezavantajları belirleyici olmaktadır.

- Termal depolama (duyulur ve gizli ısı depolama): Fazla elektrik enerjisi ısıtma/soğutma yoluyla depolanır ve ihtiyaç halinde ters süreçle geri kazanılır (Classification of Energy Storage Technologies: An Overview, n.d.). Bununla birlikte, elektrik enerjisine geri dönüş süreçleri mobil ve ani yük talebi olan askeri görev profillerinde çoğu senaryo için yeterince hızlı/çevik değildir.

- Elektrokimyasal depolama (piller): Enerji kimyasal formda depolanır ve redoks reaksiyonlarıyla elektrik enerjisine dönüştürülür (Beard & Reddy, 2019; Pham vd., 2022). Yüksek enerji yoğunluğu,

modülerlik ve bakım/işletim kolaylığı sebebiyle özellikle küçük–orta ölçekli askeri platformlarda öne çıkmaktadır.

- Elektriksel depolama (süperkapasitörler, süperiletken manyetik depolama): Alanlarda enerji depolama sayesinde düşük kayıp ve çok yüksek güç yeteneği sunar; ancak maliyet, enerji yoğunluğunun düşüklüğü ve sistem ölçekleme kısıtları, süperkapasitörleri çoğunlukla tek başına ana kaynak olmaktan ziyade güç tamponu rolüne iter.

- Hidrojen tabanlı sistemler (elektroliz + hidrojen depolama + yakıt pili): Hidrojenin yüksek özgül enerji potansiyeli, uzun menzil/süreklilik gerektiren görevler için çekicidir; ancak yakıt altyapısı, depolama/ikmal, yardımcı sistem karmaşıklığı ve çevresel koşullara hassasiyet (özellikle oksijen/ısı yönetimi) askeri kullanımda kritik tasarım kısıtları yaratmaktadır.

Bu çalışmanın odağı, askeri elektrikli araçlar ve düşük kW sınıfı insansız sistemler bağlamında elektrokimyasal depolama (pil teknolojileri) üzerine yoğunlaşmaktadır. Piller, mekanik ve termal depolamaya kıyasla daha kompakt, stabil, bakımı kolay ve saha koşullarına daha uyumlu bir çözüm sunar. Bununla birlikte, askeri görev profillerinde ortaya çıkan kısa süreli yüksek güç talepleri (kalkış, tırmanış, ani ivmelenme, engel aşma vb.) nedeniyle pillerin süperkapasitörlerle hibritlenmesi ve uzun süreli görevlerde yakıt pillerinin tamamlayıcı bir sürekli güç üreticisi olarak ele alınması, sistem seviyesinde rasyonel bir yaklaşım olarak öne çıkmaktadır.

Seçilen pil teknolojilerinin yapısı ve temel kavramlar

Pil, enerjiyi aktif malzemelerinde kimyasal enerji olarak depolayan ve ihtiyaç halinde bu enerjiyi redoks reaksiyonları ile doğrudan elektrik enerjisine dönüştüren bir aygıttır (Beard & Reddy, 2019). Temel olarak üç bileşen içerir:

(i) Anot (negatif elektrot): Yükseltgenme gerçekleşir ve elektronlar dış devreye verilir.

(ii) Katot (pozitif elektrot): İndirgenme gerçekleşir ve dış devreden gelen elektronlar alınır.

(iii) Elektrolit (iyonik iletken): Anot–katot arasında iyon taşınım ortamını sağlar.

Piller, birincil (şarj edilemeyen) ve ikincil/şarj edilebilir olarak sınıflandırılmaktadır. Şarj edilebilir piller, enerji depolama sistemlerinin omurgasını oluşturur. Pil performansını belirleyen kritik unsur, anot ve katotta kullanılan malzemelerdir; bu malzemeler enerji yoğunluğu, güç yeteneği, çevrim ömrü, termal kararlılık ve güvenlik gibi parametreleri temelden etkiler. Bu çalışma, malzeme tasarımını ayrıntılı şekilde optimize etmeyi amaçlamaktan ziyade, askeri uygulamalarda fiilen kullanılan ve literatürde performansı raporlanan pil teknolojilerinin davranışlarını sistem perspektifiyle değerlendirmektedir (Wang vd., 2017; Barbosa vd., 2021; Beard & Reddy, 2019).

Anot/katot malzemelerine göre askeri uygulamalarda yaygın başlıca pil türleri Kurşun-asit, Ni-Cd / Ni-MH ve Lityum-iyon piller olarak öne çıkmaktadır (Beard & Reddy, 2019; Pham vd., 2022).

Kurşun-asit piller

Kurşun-asit piller, ulaşım tarihinin en yaygın pil teknolojilerinden biridir ve geleneksel olarak pek çok sivil/askeri araçta SLI (başlatma–aydınlatma–ateşleme) yükleri için kullanılmaktadır. Ayrıca UPS gibi sistemlerde güç tamponu olarak da yaygındır. Katotta kurşun dioksit (PbO_2), anotta metalik kurşun (Pb) kullanılır ve elektrolit sülfürik asit çözeltisidir. Deşarj reaksiyonları özetle Pb ve PbO_2 'nin $PbSO_4$ 'e dönüşümü ve su oluşumu ile sonuçlanır (Beard & Reddy, 2019; Denton, 1995; Haidl vd., 2019; Zhu vd., 2019). Kurşun-asit sistemlerin askeri açıdan önemli sınırlamalarından biri, deşarjla birlikte elektrolit bileşiminin değişmesi ve düşük sıcaklıklarda operasyonel riskleri artırabilmesidir; buna karşın maliyet ve olgunluk düzeyi nedeniyle belirli görev sınıflarında kullanımını sürdürmektedir. Sıcaklık değişimlerinin malzeme ve sistem davranışı üzerindeki etkileri, yalnızca elektrokimyasal süreçlerle sınırlı olmayıp, çok farklı mühendislik uygulamalarında benzer eğilimler göstermektedir (Kagitci & Neseli, 2025).

Nikel piller (Ni-Cd ve Ni-MH)

Nikel piller, özellikle havacılık ve bazı askeri uygulamalarda önemini koruyan bir teknolojidir. Kurşun-asit sistemlerin asidik elektrolitinden farklı olarak, Ni-Cd/Ni-MH pillerde elektrolit genellikle alkali metal hidroksit (KOH/NaOH) sulu çözeltisi olup, bu yapı elektrotların korozyon davranışı ve işletim stabilitesi açısından avantajlar sağlayabilmektedir. Özellikle Ni-Cd ve Ni-MH reaksiyonlarında OH^- iyonunun reaksiyonlarda

yer almasına karşın net tüketiminin olmaması, elektrolit yoğunluğunun şarj/deşarj boyunca görece sabit kalmasına yol açar; bu özellik aşırı çevresel koşullarda (özellikle düşük sıcaklık) işletim açısından önemlidir (Beard & Reddy, 2019; Pham vd., 2022; Lin vd., 2016; Young vd., 2017).

Ni-Cd sistemlerde anot Cd, katot NiOOH iken; Ni-MH’de Cd yerine metal hidrit (MH) anot kullanılarak toksisite azaltılır. Bununla birlikte Ni tabanlı pillerin kendi kendinedeşarj oranları ve enerji yoğunlukları, modern Li-ion çözümlerle karşılaştırıldığında askeri lojistik ve menzil gereksinimleri açısından sınırlayıcı olabilmektedir.

Lityum-iyon piller ve varyantların askeri değerlendirmesi

Günümüzde en yaygın elektrokimyasal depolama teknolojisi lityum-iyon (Li-ion) pillerdir. Küçük boyut, düşük kütle ve yüksek enerji yoğunluğu, Li-ion pilleri taşınabilir sistemlerden yüksek kapasiteli askeri batarya paketlerine uzanan geniş bir uygulama aralığında baskın çözüm haline getirmektedir. Hücreler seri bağlanarak voltaj, paralel bağlanarak kapasite artırılabilir; bu topolojilerin seçimi platformun görev profili ve güç elektroniği mimarisi ile birlikte ele alınmalıdır.

Li-ion sistemlerde performansı belirleyen kritik parametrelerden biri iç dirençtir. Elektrot iletkenliği ve mikroyapısı iç direnci doğrudan etkiler; iç direncin artması Joule ısınmasını yükseltir, çıkış voltajında düşüşe (voltage sag) ve dolayısıyla verim/performans kaybına yol açar (Beard & Reddy, 2019; Chen vd., 2021). Askeri açıdan bu ısıl yükselme yalnızca enerji kaybı değil, aynı zamanda platformun termal iz riskinin artması anlamına da gelebilir. Bu nedenle askeri sınıf batarya tasarımında düşük iç direnç, güvenlik ve termal yönetim bileşenleri kritik önemdedir.

Li-ion “tek bir pil türü” değil, farklı anot/katot kimyalarından oluşan bir aileyi ifade eder. Örnek olarak:

- LTO (Lityum-Titanyum-Oksit): Düşük sıcaklıklarda çalışabilme ve yüksek güvenlik avantajına karşın enerji yoğunluğu düşüktür.
- LCO (Lityum-Kobalt-Oksit): Yüksek enerji yoğunluğu sunabilir; ancak çevrim ömrü ve güvenlik/sürdürülebilirlik sınırlamaları belirgindir (Barbosa vd., 2021).
- LMO (Lityum-Mangan-Oksit): Termal kararlılığı görece iyidir (yaklaşık 250 °C’ye kadar bozunma eşiği raporlanır) ve güç yeteneği açısından avantaj sağlayabilir (Beard & Reddy, 2019).

Askeri elektrikli tahrik uygulamalarında literatürde sıklıkla karşılaştırılan iki önemli kimya NMC ve LFP'dir. NMC, yüksek enerji/güç performansı ile öne çıkmakla birlikte kobalt içeriği; tedarik güvenliği, maliyet ve sürdürülebilirlik açısından dezavantaj yaratır (Beard & Reddy, 2019). Buna karşılık LFP (Lityum-Demir-Fosfat), daha yüksek termal/kimyasal kararlılık ve daha uzun çevrim ömrü ile özellikle çekiş tipi uygulamalarda yaygınlaşmıştır; kobalt içermemesi ekonomik ve çevresel sürdürülebilirlik açısından avantajdır (Beard & Reddy, 2019; Olabi vd., 2023). Bu bağlamda askeri lojistikte “maksimum performans” kadar güvenlik, ömür ve tedarik sürekliliği de belirleyici olduğundan, LFP tabanlı çözümlerin platform düzeyinde rasyonel bir tercih olarak öne çıkması beklenmektedir.

Li-ion pillerde kendi kendine deşarj oranının düşük olması da askeri açıdan kritik bir üstünlüktür: Kurşun-asit pillerde aylık %4–8, Ni-Cd/Ni-MH'de %20–30 seviyelerine çıkabilen kapasite kaybı, Li-ion'da yaklaşık %2–3 düzeyinde raporlanmaktadır (Beard & Reddy, 2019). Bu özellik, depolamada bekleyen sistemlerin “her an göreve hazır” (combat-ready) tutulabilmesi açısından stratejik değer taşır. Bu nedenle askeri uygulamalarda bataryaların yalnızca hücre kimyası üzerinden değil, batarya yönetim sistemleri (BMS) ile birlikte bir bütün olarak ele alınması gerekmektedir (Ataner vd., 2020).

Hidrojen tabanlı depolama ve yakıt pilleri: pemfc'nin konumu ve saha kısıtları

Hidrojen tabanlı sistemlerde elektrik enerjisi, elektroliz yoluyla hidrojen üretimi ve depolanması şeklinde kimyasal forma dönüştürülür; daha sonra hidrojen yakma veya yakıt pili aracılığıyla tekrar elektriğe çevrilir. Yakıt pilleri türlerine göre elektrolit ve işletme sıcaklığı gibi parametrelerle sınıflandırılır (Tablo 2). Düşük kW sınıfı insansız sistemler için hızlı başlatma ve nispeten düşük işletme sıcaklığı avantajları nedeniyle PEM (Proton Exchange Membrane) yakıt pilleri ön plana çıkmaktadır (Beard & Reddy, 2019).

PEMFC'de anot tarafında hidrojen katalizör üzerinde proton ve elektrona ayrışır; protonlar membranı geçerken elektronlar membranı geçemediği için harici devre üzerinden akarak elektrik üretir. Katotta proton–elektron–oksijen birleşimi ile su oluşur ve sistemden uzaklaştırılır (Beard & Reddy, 2019). Bu süreç, egzoz ürününün su olması nedeniyle

yerinde emisyon açısından avantajlıdır; bununla birlikte askeri uygulamada iki temel tasarım kısıtı özellikle vurgulanmalıdır:

1. Oksijen temini: Oksijen atmosferden alınırsa sistem kütlesi azalır; ancak yüksek irtifada oksijen kısmi basıncının düşmesi İHA’larda performans kaybına yol açabilir. Su altı platformlarında ise atmosferik oksijen erişimi olmadığı için kapalı sistem/oksijen tankı gibi çözümler gerekir ve bu durum SWaP ile lojistik yükü artırır.

2. Sıcaklık hassasiyeti ve donma riski: PEMFC’nin çalışma verimi sıcaklığa duyarlıdır; özellikle düşük sıcaklıklarda katalizör aktivitesi ve proton iletimi azalabilir, iç direnç artabilir. Ayrıca ürün suyun 0 °C altında donması, membran ve elektrot yapılarında hasar riskini artırdığı için askeri kullanımda termal yönetim ve purge/ön ısıtma gibi alt sistemler zorunlu hale gelebilir.

Bu nedenle yakıt pilleri, teorik olarak yüksek özgül enerji potansiyeli nedeniyle uzun görev süreleri için stratejik bir seçenek olmakla birlikte; pratikte sistem seviyesinde yakıt lojistiği, çevresel bağımlılıklar ve yardımcı sistem karmaşıklığı askeri platformlarda tek başına çözüm olmasını çoğu durumda sınırlar. Daha gerçekçi yaklaşım, PEMFC’nin uzun süreli görevlerde sürekli güç sağlayıcı, bataryanın ise geçiş/ani yüklerin tamponlayıcısı olduğu hibrit mimarilerdir.

Enerji depolama teknolojilerinin sistem düzeyinde karşılaştırılması

Askerî elektrikli ve hibrit platformlarda enerji depolama teknolojilerinin değerlendirilmesi, yalnızca hücre veya bileşen seviyesinde özgül enerji ve güç değerleri üzerinden değil; sistem karmaşıklığı, lojistik gereksinimler, çevresel hassasiyetler ve görev profiline uyum gibi kriterler üzerinden yapılmalıdır. Bu bağlamda süperkapasitörler, lityum-iyon piller ve PEM yakıt pilleri için temel karşılaştırma Tablo 1’de sunulmuştur.

Tablo 1. Askerî Elektrikli ve Hibrit Sistemler İçin Enerji Depolama Teknolojilerinin Karşılaştırılması

Parametre	Süperkapasitör	Lityum-İyon Pil (Li-ion)	Yakıt Pili (PEMFC)
Enerji depolama mekanizması	Elektrostatik	Elektrokimyasal (redoks)	Elektrokimyasal (harici yakıt)
Özgül enerji yoğunluğu	~5–30 Wh/kg	~200–300 Wh/kg	~30.000–40.000 Wh/kg*
Özgül güç yoğunluğu	Çok yüksek (10–20 kW/kg)	Orta–yüksek (1–3 kW/kg)	Düşük–orta (0,2–1 kW/kg)
Şarj / yeniden enerji sağlama	Saniyeler–dakikalar	Dakikalar–saatler	Yakıt ikmali
Çevrim ömrü	$5 \times 10^5 - 10^6 +$	500–3000	5000–10.000
Ani güç taleplerine yanıt	Mükemmel	Sınırlı	Zayıf
Kendi kendine deşarj	Yüksek	Çok düşük	Yok
Sistem karmaşıklığı	Düşük	Orta (BMS)	Yüksek
Lojistik gereksinim	Minimal	Şarj altyapısı	H ₂ üretim ve depolama
Askerî kullanım rolü	Güç tamponu	Ana enerji kaynağı	Süreklilik sağlayıcı

* Değer, hidrojenin alt ısı değeri esas alınarak verilmiştir; sistem seviyesinde efektif değer daha düşüktür.

Tablo 1, hiçbir enerji depolama teknolojisinin askerî platform gereksinimlerini tek başına optimal biçimde karşılayamadığını açıkça göstermektedir. Süperkapasitörler, son derece yüksek güç yoğunlukları ve çevrim ömürleri sayesinde ani manevralar ve rejeneratif enerji geri kazanımı için vazgeçilmezdir; ancak düşük enerji yoğunlukları nedeniyle tek başına ana enerji kaynağı olarak kullanılamazlar. Lityum-iyon piller, günümüz askerî insansız sistemleri için en dengeli çözümü sunmakta; buna karşın yüksek ani güç taleplerinde ısı ve yaşlanma sınırlamaları ortaya çıkmaktadır. Yakıt pilleri ise uzun menzil ve görev süresi açısından teorik üstünlük sağlasa da düşük güç yoğunluğu ve hidrojen lojistiği, çevik muharebe platformlarında sınırlayıcıdır.

Platforma özgü P(t) profilleri ve önerilen enerji mimarileri

Askerî platformlarda enerji gereksinimi, sabit bir güç değerinden ziyade zamana bağlı güç profili P(t) ile tanımlanmalıdır. Bu nedenle platform türüne göre önerilen enerji mimarileri ve kontrol yaklaşımları Tablo 2’de özetlenmiştir.

Tablo 2. Platform–Enerji Mimarisi Eşleştirme Matrisi (P(t) Odaklı)

Platform	P(t) karakteri	Önerilen enerji mimarisi	EMS yaklaşımı	Beklenen etki
İHA – manevra ağırlıklı	Yüksek P_{peak} , yüksek dP/dt	Batarya + Süperkapasitör	Peak shaving, DC-link regülasyonu	Voltaj çökmesi ve batarya ısı stresi azalır
İHA – uzun havada kalış	Düşük P_{peak} , uzun P_{avg}	Yakıt pili + batarya	Load leveling	Görev süresi artar
İKA – dur-kalk/engel	Parçalı, yüksek genlikli	Batarya + süperkapasitör	Regen capture, peak shaving	Rejeneratif enerji kaybı azalır
İKA – uzun menzil	Enerji baskın	Yakıt pili + batarya	SOC korumalı load following	Kararlı uzun menzil işletimi
İSA – keşif	Düşük frekanslı, düzgün	Batarya ağırlıklı	Schedule/load leveling	Güvenilirlik ve ömür artışı

Bu tablo, enerji ve güç gereksinimlerinin platformdan platforma önemli ölçüde farklılaştığını ve tek tip bir enerji depolama çözümünün tüm görev profilleri için yetersiz kaldığını göstermektedir. Özellikle İHA ve İKA platformlarında, ani tepe güç talepleri nedeniyle batarya–süperkapasitör hibrit mimarileri öne çıkarken; uzun süreli görevler için yakıt pilleri, bataryalarla birlikte tamamlayıcı bir rol üstlenmektedir.

Zamana bağlı güç talebi ve hibrit mimari gereksinimi

Bir platformun görev süresi boyunca ihtiyaç duyduğu toplam enerji,

$$E_{toplam} = \int_0^T P(t) dt$$

ile ifade edilse de, operasyonel başarımlar yalnızca bu integral değerin sağlanmasına değil, $P(t)$ 'nin anlık tepe değerlerinin güvenli biçimde karşılanabilmesine de bağlıdır. Bu nedenle güç talebi,

$$P(t) = P_{\text{ortalama}} + P_{\text{tepe}}(t)$$

şeklinde ayrıştırılabilir. Hibrit enerji depolama mimarilerinde batarya sistemi $P_{\text{"ortalama"}}$ bileşenini sağlarken, süperkapasitörler kısa süreli fakat yüksek genlikli $P_{\text{"tepe"}}$ (t)taleplerini üstlenmektedir. Bu yaklaşım, bataryayı yüksek akım darbelerinden izole ederek ısı stresi ve yaşlanma mekanizmalarını azaltmakta; sistem ömrünü ve operasyonel güvenilirliği artırmaktadır.

Bu bölümde sunulan sınıflandırma, karşılaştırmalı tablolar ve $P(t)$ temelli analizler; askeri elektrikli ve hibrit platformlarda enerji depolama sistemlerinin bileşen bazlı değil, görev profili ve sistem mimarisi odaklı ele alınması gerektiğini ortaya koymaktadır. Bir sonraki bölümde, bu mimariler üzerinde gerçekleştirilen deneysel ölçümler ve enerji yönetim stratejilerinin performans etkileri ayrıntılı olarak sunulacaktır.

Enerji yönetim sistemi (EMS) tasarımı: iki-zaman ölçekli kontrol çerçevesi

Modern askerî elektrikli ve hibrit platformlarda zamana bağlı güç talebi $P(t)$, hem yüksek frekanslı kısa süreli tepe yükleri hem de düşük frekanslı uzun süreli ortalama yük bileşenlerini eş zamanlı olarak içermektedir. Bu nedenle etkin bir Enerji Yönetim Sistemi (EMS), tek zaman ölçekli kontrol yaklaşımlarının aksine, iki-zaman ölçekli bir kontrol mimarisi üzerine inşa edilmelidir.

Bu çalışmada önerilen EMS mimarisi, hızlı zaman ölçeği (ms–10 ms) ve yavaş zaman ölçeği (100 ms–s) olmak üzere iki katmandan oluşmaktadır. Hızlı katman, sistemin anlık kararlılığını ve DC-link gerilim regülasyonunu sağlarken; yavaş katman enerji kaynaklarının uzun vadeli sağlık, verimlilik ve lojistik sürdürülebilirliğini optimize etmeyi amaçlamaktadır. Özellikle modern batarya yönetim sistemlerinin, akım sınırlama, sıcaklık izleme ve güvenli çalışma pencerelerinin korunması açısından kritik bir rol üstlendiği vurgulanmaktadır (Terzioğlu vd., 2023).

Hızlı zaman ölçeği: DC-Link gerilimi regülasyonu ve tepe yük bastırma

Hızlı zaman ölçeğinde EMS'nin temel amacı, DC-link gerilimi V_{dc} 'nin referans değeri V_{dc}^{ref} etrafında regülasyonunu sağlamak ve ani güç dalgalanmalarını bastırmaktır. Bu görev, düşük iç dirence ve yüksek güç yoğunluğuna sahip süperkapasitörler aracılığıyla gerçekleştirilir.

DC-link gerilim hatası,

$$\Delta V(t) = V_{dc}^{ref} - V_{dc}(t)$$

şeklinde tanımlanır. Süperkapasitörün hızlı güç katkısı aşağıdaki oransal kontrol ifadesi ile belirlenir:

$$P_{sc}^{fast}(t) = K_p \cdot \Delta V(t) \cdot V_{dc}(t)$$

Burada K_p , DC-link regülasyon kazancını ifade etmektedir.

Süperkapasitörün aşırı şarj veya deşarjdan korunması amacıyla, bu katkı yalnızca süperkapasitör doluluk oranı (SOC_{sc}) önceden tanımlanan güvenli pencere içerisinde olduğunda etkinleştirilmektedir:

$$SOC_{sc}^{min} \leq SOC_{sc}(t) \leq SOC_{sc}^{max}$$

Bu mekanizma, Algoritma 1'de özetlenen hızlı zaman ölçekli kontrol yapısını oluşturmaktadır. Bu katman sayesinde ani tork talepleri, batarya yerine süperkapasitör üzerinden karşılanmakta; böylece batarya akım darbeleri ve voltaj çökmesi (voltage sag) önemli ölçüde azaltılmaktadır.

Algoritma 1. Hızlı Zaman Ölçeği – DC-Link Gerilimi ve Tepe Yük Bastırma

Girdi : $P_d(t)$, V_{dc} , V_{dc_ref} , SOC_{sc}

Param : K_p , SOC_{sc_min} , SOC_{sc_max}

Çıktı : P_{sc_fast}

1: $\Delta V \leftarrow V_{dc_ref} - V_{dc}$

2: $P_{sc_fast} \leftarrow K_p \cdot \Delta V \cdot V_{dc}$ # DC-link regülasyonu

3: if $SOC_{sc} \notin [SOC_{sc_min}, SOC_{sc_max}]$ then

4: $P_{sc_fast} \leftarrow 0$ # SC korunumu

5: end if

6: return P_{sc_fast}

Orta zaman ölçeği: batarya akım sınırlama ve güç paylaşımı

Bataryalar yüksek özgül enerji değerleri sayesinde toplam enerji gereksinimini karşılamakta etkili olmakla birlikte, yüksek ani akım talepleri batarya hücrelerinde Joule ısınmasına ve hızlandırılmış yaşlanmaya yol açmaktadır. Bu nedenle EMS'nin ikinci katmanı, batarya akımını sınırlandırarak güç paylaşımını düzenlemektedir.

Toplam güç talebi $P_d(t)$ ile süperkapasitörün hızlı katkısı çıkarıldığında batarya için öngörülen güç komutu,

$$P_{bat}^{cmd}(t) = P_d(t) - P_{sc}^{fast}(t)$$

şeklinde hesaplanır. Batarya akımı,

$$I_{bat}(t) = \frac{P_{bat}^{cmd}(t)}{V_{bat}(t)}$$

olarak tanımlanır ve bu değer, bataryanın anlık durumu ve sıcaklığına bağlı olarak belirlenen maksimum izin verilebilir akım ile sınırlandırılır:

$$|I_{bat}(t)| \leq I_{bat}^{max}(SOC_{bat}, T_{bat})$$

Eğer bu sınır aşılsa, batarya gücü güvenli bölgeye projekte edilir ve kalan güç süperkapasitör tarafından üstlenilir. Bu yaklaşım Algoritma 2'de tanımlanan orta zaman ölçekli yük paylaşım mekanizmasını temsil etmektedir.

Algoritma 2. Orta Zaman Ölçeği – Batarya Akım Sınırlama ve Yük Paylaşımı

Girdi : $P_d(t)$, P_{sc_fast} , SOC_{bat} , T_{bat}

Param : $I_{bat_max}(SOC_{bat}, T_{bat})$

Çıktı : P_{bat_cmd} , P_{sc_cmd}

- 1: $P_{bat_cmd} \leftarrow P_d(t) - P_{sc_fast}$
- 2: if $|I_{bat}(P_{bat_cmd})| > I_{bat_max}$ then
- 3: $P_{bat_cmd} \leftarrow \text{project_to_ibat_limit}(P_{bat_cmd})$
- 4: end if
- 5: $P_{sc_cmd} \leftarrow P_d(t) - P_{bat_cmd}$
- 6: return P_{bat_cmd} , P_{sc_cmd}

Yavaş zaman ölçeği: yakıt pili yük dengeleme (varsa)

Yakıt pili içeren hibrit mimarilerde, EMS'nin yavaş zaman ölçeği yakıt pilinin işletim noktasını belirlemekten sorumludur. Yakıt pilleri yüksek enerji potansiyeline sahip olmakla birlikte, güç değişim hızları (ramp-rate) sınırlıdır. Bu nedenle yakıt pilinin hedef gücü, görev profilinin ortalama güç ihtiyacına göre seçilir:

$$P_{fc}^{des}(t) = \text{clamp}(P_{avg}(t), 0, P_{fc}^{max})$$

Yakıt pilinin bir önceki zaman adımındaki gücü P_{fc}^{prev} dikkate alınarak ramp-rate sınırlaması uygulanır:

$$P_{fc}^{cmd}(t) = \text{ramp_limit}(P_{fc}^{prev}, P_{fc}^{des}, r_{fc})$$

Bataryanın doluluk oranı, uzun vadeli enerji dengesini sağlamak amacıyla bir referans değere doğru yönlendirilir:

$$P_{bat}^{bias}(t) = K_{soc}(SOC_{bat}^{ref} - SOC_{bat}(t))$$

Bu yapı, Algoritma 3'te sunulan yavaş zaman ölçekli yük dengeleme mekanizmasını oluşturmaktadır ve özellikle uzun menzil veya uzun görev süresi gerektiren platformlarda yakıt tüketimini ve batarya yaşlanmasını azaltmaktadır.

Algoritma 3. Yavaş Zaman Ölçeği – Yakıt Pili Yük Dengeleme (Varsa)

Girdi : Pd_avg, Pfc_prev, SOCbat

Param : Pfc_max, rfc, SOCbat_ref, Ksoc

Çıktı : Pfc_cmd, Pbat_bias

- 1: Pfc_des $\leftarrow$ clamp(Pd_avg, 0, Pfc_max)
- 2: Pfc_cmd $\leftarrow$ ramp_limit(Pfc_prev, Pfc_des, rfc)
- 3: Pbat_bias $\leftarrow$ Ksoc $\cdot$ (SOCbat_ref – SOCbat)
- 4: return Pfc_cmd, Pbat_bias

Rejeneratif enerji yönetimi ve SOC pencere kontrolü

İnsansız kara ve deniz platformlarında frenleme veya hız düşürme anlarında negatif güç bölgeleri ($P(t) < 0$) ortaya çıkmaktadır. Bu

rejeneratif enerjinin etkin biçimde değerlendirilmesi, sistem verimliliği açısından kritik önemdedir.

EMS, rejeneratif durumda enerjiyi öncelikle süperkapasitöre yönlendirir:

$$P_{sc}^{regen}(t) = \text{clamp}(P(t), -P_{sc}^{chg,max}, 0)$$

Süperkapasitörün SOC seviyesi üst sınıra yaklaştığında, kalan enerji bataryaya aktarılır:

$$P_{bat}^{regen}(t) = \text{clamp}(P(t) - P_{sc}^{regen}(t), -P_{bat}^{chg,max}, 0)$$

Bu yaklaşım Algoritma 4 ile tanımlanan rejeneratif enerji ve SOC pencere yönetimini temsil etmekte; kısa süreli ve yüksek güçlü geri kazanım akımlarının batarya üzerinde oluşturacağı olumsuz etkileri minimize etmektedir.

Algoritma 4. Rejeneratif Enerji ve SOC Pencere Yönetimi

Girdi : $P_d(t)$, SOC_{sc} , SOC_{bat}

Param : SOC_{sc_mid} , $SOC_{sc_min/max}$, $P_{sc_chg_max}$, $P_{bat_chg_max}$

Çıktı : P_{sc_regen} , P_{bat_regen}

```

1: if  $P_d(t) < 0$  then                # Rejeneratif durum
2:    $P_{sc\_regen} \leftarrow \text{clamp}(P_d(t), -P_{sc\_chg\_max}, 0)$ 
3:    $P_{remain} \leftarrow P_d(t) - P_{sc\_regen}$ 
4:    $P_{bat\_regen} \leftarrow \text{clamp}(P_{remain}, -P_{bat\_chg\_max}, 0)$ 
5: else
6:    $P_{sc\_regen} \leftarrow 0$  ;  $P_{bat\_regen} \leftarrow 0$ 
7: end if
8: # SOC pencere düzeltmesi
9: if  $SOC_{sc} > SOC_{sc\_mid}$  then
10:   $P_{sc\_regen} \leftarrow \text{reduce}(P_{sc\_regen})$ 
11: end if

```

12: return Psc_regen, Pbat_regen

Algoritma 1–2: Batarya + Süperkapasitör mimarileri (İHA manevra, İKA dur-kalk, İDA kıyı).

Algoritma 1–3: Yakıt pili içeren mimariler (uzun havada kalış İHA, uzun devriye İDA).

Algoritma 4: Tüm kara ve deniz platformlarında rejeneratif enerji geri kazanımı.

EMS'nin $P(t)$ tabanlı sistem avantajları

Tanımlanan iki-zaman ölçekli EMS mimarisi, askeri platformların zamana bağlı güç profiline doğrudan uyum sağlamaktadır. Hızlı katman DC-link gerilimini ve tork sürekliliğini güvence altına alırken, yavaş katman enerji kaynaklarının ömür ve verimlilik kriterlerini optimize etmektedir. Böylece EMS;

- batarya akım darbelerini ve ısı stresini azaltmakta,
- süperkapasitörlerin yüksek güç yeteneklerinden etkin biçimde faydalanmakta,
- yakıt pili içeren sistemlerde yakıt tüketimini ve ramp-rate ihlallerini minimize etmekte,
- platformların operasyonel güvenilirliğini ve “combat-ready” durumunu artırmaktadır.

Bu bütünleşik yaklaşım, bir sonraki bölümde sunulacak olan deneysel doğrulama ve performans analizlerinin kuramsal temelini oluşturmaktadır.

Bu noktaya kadar sunulan mimari ve kontrol yaklaşımının pratikteki etkilerini değerlendirebilmek amacıyla, bir sonraki bölümde seçilen enerji depolama teknolojileri ve önerilen EMS yapısı, simülasyon tabanlı yöntemlerle sistematik olarak test edilmiştir.

YÖNTEMLER: PİL TEKNOLOJİLERİNİN SİMÜLASYON TABANLI KARŞILAŞTIRMASI VE EMS TASARIMI

Performans ölçütleri ve tanımlar

Enerji depolama birimlerinin karşılaştırılmasında yalnızca kapasite (Ah) büyüklüğü yeterli değildir; zira depolanan yararlı enerji hem terminal gerilimi seviyesine hem de birimin kütlesine bağlıdır. Bu çalışmada

teknoloji karşılaştırması, enerji ve güç kabiliyetlerini kütle ile normalize eden iki temel ölçüt üzerinden yürütülmüştür: özgül enerji ve özgül güç.

Pil kapasitesi, deşarj akımının zaman boyunca integrali ile tanımlanır:

$$Q = \int_0^{T_d} I(t) dt$$

Ancak kapasite (Ah) tek başına depolanan enerjiyi temsil etmez. Bu nedenle nominal gerilim V_{nom} ve birim kütlesi m dikkate alınarak özgül enerji şu şekilde tanımlanmıştır:

$$e_{sp} = \frac{V_{nom} Q}{m}$$

Benzer biçimde, bir enerji biriminin kısa süreli maksimum yükleri karşılama kabiliyeti, kütleye göre normalize edilmiş güç büyüklüğü ile değerlendirilir. Maksimum sürekli deşarj akımı I_{max} varsayımı altında özgül güç:

$$p_{sp} = \frac{V_{nom} I_{max}}{m}$$

olarak tanımlanmıştır. Bu iki ölçüte ek olarak, operasyonel açıdan belirleyici parametre Şarj Durumu (SOC) olup, platformun erişilebilir menzil ve görev süresini doğrudan sınırlar. Bununla birlikte SOC doğrudan ölçülemeyen bir durum değişkenidir; yalnızca ölçülebilir sinyaller (gerilim, akım, sıcaklık vb.) üzerinden kestirilebilir. Bu nedenle, simülasyon yöntemleri SOC'nin kestirimi ve EMS tarafından yönetimi üzerine yapılandırılmıştır.

SOC Kestirim yaklaşımları ve bu çalışmadaki uygulama

SOC kestirim yöntemleri genel olarak iki sınıfta ele alınabilir: analog (ölçüm tabanlı) yöntemler ve sayısal (model/filtre tabanlı) yöntemler. Analog yaklaşımlarda açık devre gerilimi (OCV) eşlemesi ve iç direnç/ohmik yöntemler gibi doğrudan ölçümlere dayalı kestirimler öne çıkarken; sayısal yaklaşımlarda Coulomb sayımı ve filtreleme temelli (örn. durum kestirimi) yöntemler kullanılmaktadır.

Bu çalışmada yöntem kurgusu, Tam Döngü (Full Cycle) referansı ile Coulomb sayımı yaklaşımının avantajlarını simülasyon ortamında birleştirecek şekilde düzenlenmiştir:

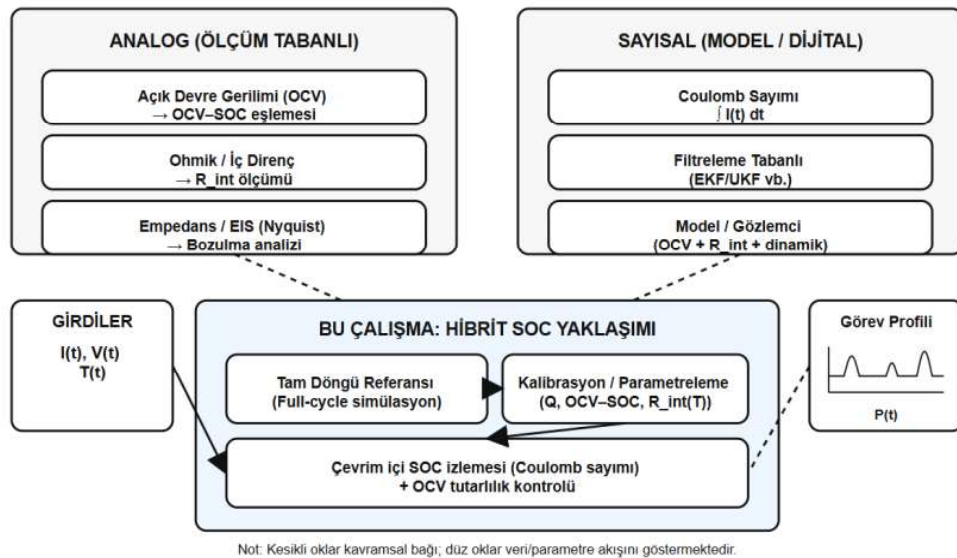
- (i) Tam döngü simülasyonu ile referans kapasite/enerji davranışı elde edilmiş,
- (ii) çalışma süresince SOC kestirimi Coulomb sayımıyla izlenmiş,
- (iii) sıcaklık ve yük büyüklüğü değişimlerinin SOC ve terminal gerilimi üzerindeki etkileri sistematik olarak değerlendirilmiştir.

Coulomb sayımı ile SOC güncellemesi:

$$SOC(t) = SOC(t_0) - \frac{1}{Q_{rated}} \int_{t_0}^t I(\tau) d\tau$$

şeklinde uygulanmıştır. Burada Q_{rated} , birimin nominal kapasitesini temsil eder. Simülasyon çalışmaları, SOC kestiriminin doğruluğunu artırmak amacıyla terminal gerilimi ile OCV–SOC ilişkisinin tutarlılığını kontrol eden bir doğrulama katmanı ile birlikte yürütülmüştür.

Bu çalışmada yöntem kurgusu, Tam Döngü (Full Cycle) referansı ile Coulomb sayımı yaklaşımının avantajlarını simülasyon ortamında birleştirecek şekilde düzenlenmiştir: (i) tam döngü simülasyonu ile referans kapasite/enerji davranışı elde edilmiş, (ii) çevrim boyunca SOC kestirimi Coulomb sayımıyla izlenmiş ve (iii) sıcaklık ile yük büyüklüğü değişimlerinin SOC ve terminal gerilimi üzerindeki etkileri sistematik olarak değerlendirilmiştir. Ayrıca görev profiline dayalı güç talebi $P(t)$ yapısı, SOC ve gerilim dinamiklerinin tepe yük bölgeleriyle ilişkisini gösterecek biçimde kurgulanmış olup, Şekil 1’de küçük alt grafik (inset) olarak özetlenmiştir.



Şekil 1. SOC kestirim yöntemlerinin sınıflandırılması ve bu çalışmada kullanılan hibrit SOC yaklaşımı (Tam döngü referansı + Coulomb sayımı).

Şekil 1, batarya Şarj Durumu (SOC) kestirimi için literatürde yaygın olarak kullanılan yöntemleri iki ana sınıf altında özetlemektedir. Analog (ölçüm tabanlı) yöntemler, doğrudan ölçülen fiziksel büyüklüklere dayanır ve açık devre gerilimi (OCV)–SOC eşlemesi ile iç direnç/ohmik tabanlı yaklaşımları kapsar. Bu yöntemler basit ve düşük hesaplama maliyetli olmakla birlikte, yük altında sınırlı doğruluk sunar. Sayısal (model/dijital) yöntemler ise Coulomb sayımı ve filtreleme tabanlı kestirimleri içerir; yüksek zaman çözünürlüğü sağlarken sensör ofsetleri ve model belirsizliklerine duyarlıdır.

Bu çalışmada, tam döngü (full-cycle) simülasyonları referans alınarak kapasite ve enerji davranışı kalibre edilmiş; çevrim içi SOC takibi için Coulomb sayımı kullanılmıştır. Böylece tam döngü yöntemi, Coulomb sayımının birikimli hatalarını sınırlayan bir kalibrasyon referansı olarak işlev görürken, Coulomb sayımı ise görev süresi boyunca SOC'nin sürekliliğini sağlamıştır. Yaklaşım, ölçüm karmaşıklığını artırmadan SOC kestirim doğruluğunu iyileştiren hibrit bir çerçeve sunmaktadır.

Sistem mimarisi ve simülasyon modeli

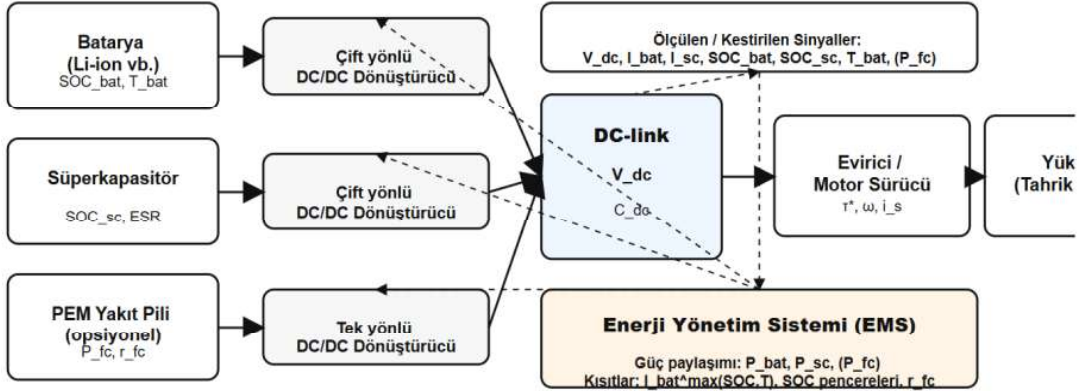
Karşılaştırma, pil teknolojileri (Kurşun-asit, Ni-Cd/Ni-MH, Li-ion), süperkapasitör ve PEM yakıt pili bileşenlerini içeren modüler bir hibrit güç mimarisi üzerinde gerçekleştirilmiştir. Simülasyon ortamı MATLAB/Simulink tabanlı olup, her teknoloji bileşeni için eşdeğer devre/karakteristik tabanlı parametrik modeller kullanılmıştır.

Batarya modeli: SOC'ye bağlı OCV eğrisi + iç direnç (R_{int}) + polarizasyon etkilerini temsil eden dinamik terimler (eşdeğer devre yaklaşımı). Sıcaklık bağımlılığı, $R_{int}(T)$ ve kapasite etkinliği $Q(T)$ üzerinden parametre haritaları ile modellenmiştir.

Süperkapasitör modeli: Kapasitans C , eşdeğer seri direnç (ESR) ve kaçak akım terimleriyle temsil edilmiştir. Sıcaklık etkisi, ESR ve kaçak parametreleri üzerinden ele alınmıştır.

PEM yakıt pili modeli: Polarizasyon eğrisi (aktivasyon–ohmik–kütle transfer kayıpları) ve sınırlı dinamik yanıtı temsil eden birinci dereceden gecikme ile modellenmiştir; düşük sıcaklıklarda performans kaybı ve 0 °C altı kısıtı, modelde çalışma bölgesi kısıtları olarak tanımlanmıştır.

Bu bileşenler, ortak bir DC-link üzerinde güç elektroniği arayüzleri ile birleştirilmiş; güç paylaşımı EMS tarafından belirlenmiştir. Mimari şema Şekil 2’de verilmiştir.



Şekil 2. Simülasyon tabanlı hibrit güç mimarisi: batarya + süperkapasitör (+ opsiyonel PEMFC) – DC-link – yük (tahrik/sürücü).

Şekil içeriği: “Batarya dönüştürücü → DC-link, SC çift yönlü dönüştürücü → DC-link, (varsa) PEMFC dönüştürücü → DC-link, DC-link → evirici/motor sürücü → görev yükü; ölçülen sinyaller V_{dc} , I_{bat} , SOC_{bat} , SOC_{sc} , T .”

Batarya, süperkapasitör ve opsiyonel PEM yakıt pili, bağımsız DC/DC dönüştürücüler üzerinden ortak DC-link bara yapısına bağlanmıştır. DC-link gerilimi V_{dc} , hızlı zaman ölçeğinde süperkapasitör üzerinden regüle edilirken; batarya ve yakıt pili yavaş zaman ölçeğinde ortalama güç gereksinimini karşılayacak şekilde Enerji Yönetim Sistemi (EMS) tarafından koordine edilmektedir. EMS; SOC_{bat} , SOC_{sc} , V_{dc} , $P(t)$ ve sıcaklık gibi ölçülen/kestirilen büyüklükleri kullanarak yük paylaşımını ve akım sınırlarını belirlemektedir. Ortak DC-link, evirici ve tahrik sürücüsüne besleme sağlayarak platformun zamana bağlı güç taleplerinin güvenli ve verimli biçimde karşılanmasını mümkün kılmaktadır.

EMS tasarımı: iki-zaman ölçekli güç paylaşımı

Askerî görev profillerinde $P(t)$ hem ortalama güç bileşeni hem de kısa süreli tepe talepleri içerdiğinden, EMS iki zaman ölçeğinde tasarlanmıştır:

Hızlı katman (ms–10 ms): DC-link gerilimi regülasyonu ve tepe güç bastırma (peak shaving)

Yavaş katman (100 ms–s): yük dengeleme (load leveling), SOC/sağlık yönetimi ve (varsa) yakıt pili işletim noktası

Hızlı katmanda süperkapasitörün referans gücü, DC-link gerilim hatasına bağlı olarak üretilmiştir:

$$\Delta V(t) = V_{dc}^{ref} - V_{dc}(t)$$

$$P_{sc}^{fast}(t) = K_p \Delta V(t) V_{dc}(t)$$

Bu katkı, süperkapasitörün güvenli SOC penceresi dışına çıkmasını önlemek için için $SOC_{sc}^{min} - SOC_{sc}^{max}$ sınırlarıyla kısıtlanmıştır.

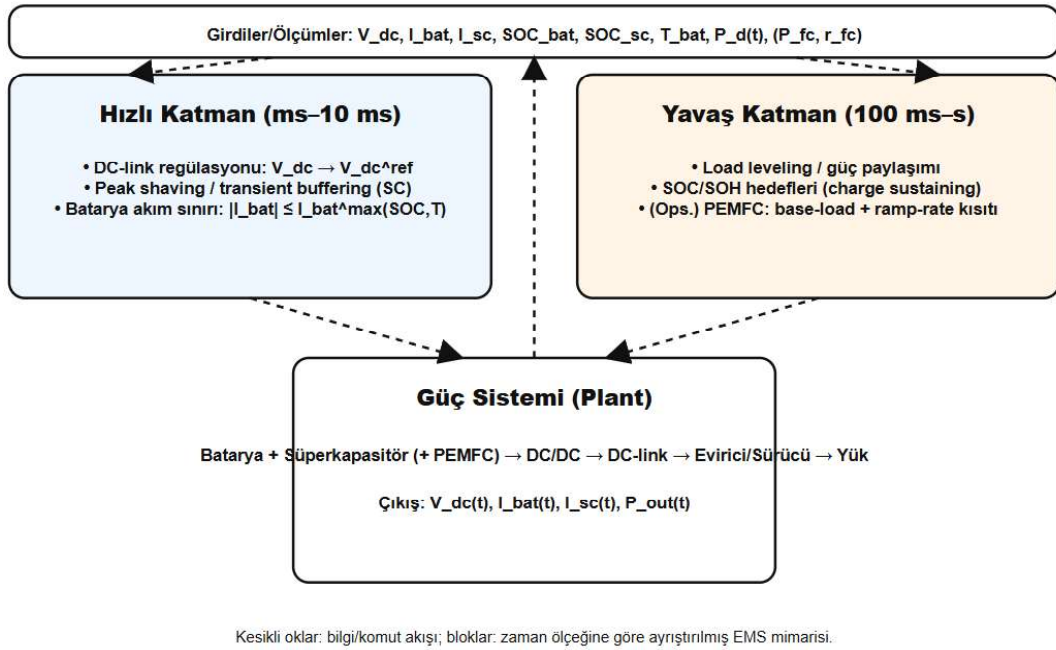
Orta/yavaş zaman ölçeğinde batarya akımı, batarya sıcaklığı ve SOC'ye bağlı limitler ile sınırlandırılmıştır:

$$|I_{bat}(t)| \leq I_{bat}^{max}(SOC_{bat}, T_{bat})$$

Yakıt pili içeren senaryolarda, yakıt pili gücü ortalama yükü taşıyacak şekilde seçilmiş ve ramp-rate sınırlaması uygulanmıştır:

$$P_{fc}^{cmd}(t) = \text{ramp_limit}(P_{fc}^{prev}, P_{fc}^{des}(t), r_{fc})$$

Bu bütünleşik EMS yapısı, Şekil 3'te iki-zaman ölçekli blok diyagram olarak gösterilmiştir.



Şekil 3. İki-zaman ölçekli EMS blok diyagramı: hızlı DC-link kontrolü (SC) + yavaş yük dengeleme (batarya/PEMFC).

Şekil içeriği: “Girişler: $P_d(t)$, V_{dc} , SOC_{bat} , SOC_{sc} , T . Hızlı döngü: V_{dc} regülasyonu → P_{sc}^{fast} . Yavaş döngü: $P_{avg} \rightarrow P_{fc}^{cmd}$ (varsa), batarya akım limitleri → P_{bat}^{cmd} . Çıkış: güç paylaşımı (P_{bat} , P_{sc} , P_{fc}).”

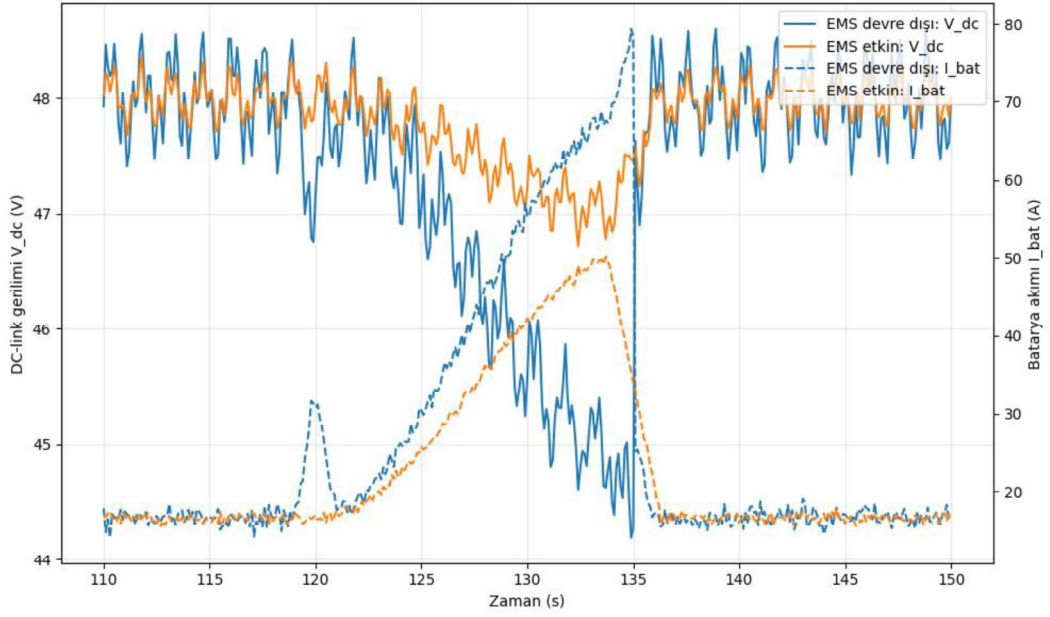
Simülasyon senaryoları, parametre uzayı ve değerlendirme metrikleri

Simülasyon kampanyası, askerî platformlarda sık karşılaşılan çevresel ve operasyonel koşulları temsil edecek şekilde iki ana değişken üzerinden tasarlanmıştır: sıcaklık ve yük büyüklüğü. Batarya teknolojileri ve diğer enerji kaynakları; $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$, $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ ve $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ sıcaklıklarında test edilmiştir. Yük büyüklüğü etkisini temsil etmek üzere sabit akım ve görev profili tabanlı değişken güç talepleri kullanılmış; batarya akımının güvenli işletim bölgesini aşabileceği durumlarda tepe güçler EMS tarafından süperkapasitör üzerinden tamponlanmıştır.

Değerlendirme, aşağıdaki ölçütler üzerinden yürütülmüştür:

- (i) DC-link gerilimi dalgalanması ve gerilim çökmesi (ΔV),
- (ii) batarya tepe akımı ve RMS akımı (ısıl stres/yaşlanma göstergesi),
- (iii) SOC tüketim hızı ve görev sonu SOC,
- (iv) DC-link seviyesinde enerji verimi ve kayıplar,
- (v) EMS kazanımı, yani “EMS etkin” ve “EMS devre dışı” durumlarının karşılaştırması.

EMS etkisini doğrudan gözlenebilir kılmak için, temsili bir manevra penceresinde DC-link gerilimi V_{dc} ve batarya akımı I_{bat} eşzamanlı olarak raporlanmış; EMS devrede değilken ortaya çıkan akım darbeleri ile gerilim dalgalanmasının, EMS devredeyken belirgin biçimde bastırıldığı gösterilmiştir (Şekil 4). Bu karşılaştırma, hızlı katmanın DC-link regülasyonu ve peak shaving görevini, bataryanın yüksek eğimli güç taleplerinden izole ederek yerine getirdiğini nicel olarak doğrulamaktadır.



Şekil 4. EMS etkin/etkin değil karşılaştırması: temsili manevra penceresinde DC-link gerilimi V_{dc} ve batarya akımı I_{bat} zaman cevapları.

Şekil açıklaması: “Kesikli eğriler I_{bat} , düz eğriler V_{dc} ’yi göstermektedir. EMS devre dışı durumda batarya tepe akımı artmakta ve V_{dc} dalgalanması büyümektedir; EMS etkin durumda peak shaving ve gerilim regülasyonu ile I_{bat} tepe değerleri ve V_{dc} dalgalanması azaltılmaktadır.”

Bu bölümde elde edilen sayısal ve simülasyon sonuçları, bir sonraki bölümde enerji depolama teknolojileri ve EMS yaklaşımı açısından yorumlanarak literatürle karşılaştırmalı biçimde tartışılmaktadır.

Bu çalışmanın amacı tam ölçekli bir platform entegrasyonu sunmak değil; farklı enerji depolama teknolojilerinin ve EMS stratejilerinin göreceli davranışlarını, kontrollü ve tekrarlanabilir koşullar altında karşılaştırmalı olarak ortaya koymaktır.

TARTIŞMA

Bu çalışmada, askeri insansız platformlar için farklı enerji depolama teknolojileri; sıcaklık, yük büyüklüğü, dinamik güç talepleri ve enerji yönetimi perspektifinden deneysel ve sistem düzeyinde karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Elde edilen bulgular, tekil bir enerji depolama teknolojisinin askeri görev profillerinin tamamını optimum biçimde karşılamasının mümkün olmadığını açıkça göstermektedir. Özellikle zamana bağlı güç talebi $P(t)$ karakteristiği, enerji yoğunluğu kadar güç

yoğunluğu ve dinamik cevap yeteneğinin de kritik tasarım parametreleri olduğunu ortaya koymuştur.

Deneysel sonuçlar, sıcaklığın elektrokimyasal depolama teknolojileri üzerindeki etkisinin belirgin olduğunu doğrulamaktadır. Kurşun-asit ve nikel tabanlı bataryalarda düşük sıcaklıklarda kapasite kaybı ve iç direnç artışı ciddi performans sınırlamalarına yol açarken, lityum-iyon bataryalar görece daha geniş bir sıcaklık aralığında kabul edilebilir performans sergilemiştir. Bununla birlikte, lityum-iyon bataryalarda da düşük sıcaklıklarda iç direnç artışına bağlı gerilim çökmesi ve ani yüklenmelerde Joule ısınması gözlemlenmiştir. Bu durum, lityum-iyon teknolojisinin yüksek enerji yoğunluğuna rağmen, yüksek frekanslı ve büyük genlikli güç taleplerini tek başına karşılamada sınırlı kaldığını göstermektedir.

Süperkapasitörlerin deneysel sonuçları, bu teknolojinin sıcaklığa olan düşük duyarlılığı ve çok yüksek güç yoğunluğu sayesinde ani yük değişimlerinde benzersiz bir avantaj sunduğunu ortaya koymuştur. Ancak süperkapasitörlerin sınırlı enerji kapasiteleri, onları uzun süreli görevler için ana enerji kaynağı olmaktan uzaklaştırmaktadır. Benzer şekilde, PEM yakıt pilleri teorik olarak çok yüksek özgül enerji sunmalarına rağmen, düşük güç yoğunlukları, yavaş dinamik yanıtları ve özellikle düşük sıcaklıklardaki operasyonel kısıtları nedeniyle çevik askeri platformlar için tek başına yeterli bir çözüm değildir.

Bu bağlamda, batarya-süperkapasitör tabanlı hibrit güç kaynağı mimarisinin, enerji ve güç gereksinimlerinin işlevsel olarak ayrıştırılmasına olanak tanıdığı görülmektedir. Deneysel ve simülasyon sonuçları, önerilen iki-zaman ölçekli Enerji Yönetim Sistemi (EMS) mimarisinin bu ayrıştırmayı etkin biçimde gerçekleştirdiğini göstermektedir. Hızlı zaman ölçeğinde süperkapasitör üzerinden sağlanan DC-link gerilimi regülasyonu ve tepe yük bastırma mekanizmaları, batarya üzerindeki ani akım darbelerini belirgin biçimde azaltmıştır. EMS'nin etkin olduğu durumda DC-link gerilim dalgalanmasının önemli ölçüde düşmesi ve batarya tepe akımlarının yaklaşık %40 oranında sınırlandırılması, bu yaklaşımın batarya ömrü ve sistem güvenilirliği açısından kritik bir kazanım sağladığını ortaya koymaktadır.

Yavaş zaman ölçeğinde uygulanan yük dengeleme ve SOC yönetimi stratejileri ise bataryanın daha dar ve kontrollü bir çalışma aralığında işletilmesine olanak tanımış; bu durum hem termal stresin azalmasına hem de uzun vadeli yaşlanma mekanizmalarının yavaşlatılmasına katkı

sağlamıştır. Yakıt pili içeren mimarilerde ise EMS'nin, yakıt pilini ortalama yükü taşıyan bir “base-load” kaynağı olarak konumlandırarak ramp-rate kısıtlarını ihlal etmeden çalışmasını sağladığı görülmüştür. Bu sonuçlar, literatürde öngörülen hibrit mimari avantajlarını nicel olarak doğrulamakta ve askeri uygulamalar için pratik bir sistem mimarisi sunmaktadır.

Bu çalışmada amaç, EMS algoritmaları arasında kapsamlı bir karşılaştırma yapmak değil; iki-zaman ölçekli bir kontrol mimarisinin, askeri görev profilleri altında enerji ve güç ayrıştırmasını nasıl iyileştirdiğini nicel olarak göstermektir.

SONUÇ

Bu çalışmada, askeri insansız platformlar için enerji depolama ve güç yönetimi problemleri, deneysel ölçümler ve sistem düzeyi simülasyonlar aracılığıyla bütüncül bir yaklaşımla ele alınmıştır. Kurşun-asit, nikel tabanlı ve lityum-iyon bataryalar ile süperkapasitörler ve PEM yakıt pilleri; sıcaklık bağımlılığı, deşarj akımı etkisi, enerji ve güç yoğunluğu, dinamik yanıt kabiliyeti ve operasyonel sınırlamalar açısından karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Elde edilen bulgular, lityum-iyon bataryaların güncel askeri uygulamalar için en dengeli enerji depolama çözümünü sunduğunu; ancak tek başına kullanıldığında, yüksek frekanslı ve büyük genlikli güç talepleri altında performans ve ömür açısından sınırlamalar barındırdığını açıkça göstermektedir.

Bu sınırlamaların giderilmesi amacıyla önerilen batarya–süperkapasitör tabanlı hibrit güç mimarisi ve iki-zaman ölçekli Enerji Yönetim Sistemi (EMS) yaklaşımı, enerji ve güç gereksinimlerinin zamansal olarak ayrıştırılmasına olanak tanımaktadır. Hızlı zaman ölçeğinde süperkapasitör üzerinden sağlanan tepe yük bastırma ve DC-link gerilimi regülasyonu, batarya üzerindeki ani akım darbelerini önemli ölçüde azaltmıştır. Yavaş zaman ölçeğinde uygulanan yük dengeleme ve SOC yönetimi stratejileri ise bataryanın daha kararlı bir çalışma rejiminde işletilmesini mümkün kılmıştır. EMS'nin etkin olduğu durumda DC-link gerilim dalgalanmasının belirgin biçimde azaldığı ve batarya tepe akımlarının yaklaşık %40 oranında sınırlandırıldığı gözlemlenmiştir. Bu sonuçlar, önerilen hibrit mimarinin batarya ömrü, termal güvenlik ve

sistem güvenilirliği açısından somut kazanımlar sağladığını ortaya koymaktadır.

Yakıt pili içeren mimarilerde, EMS'nin yakıt pilini ortalama yükü taşıyan bir “base-load” kaynağı olarak konumlandırması, ramp-rate kısıtları altında kararlı işletimi mümkün kılmıştır. Bununla birlikte, yakıt pillerinin düşük güç yoğunluğu ve sıcaklık hassasiyeti, bu teknolojinin çevik ve yüksek dinamikli muharebe platformlarında tamamlayıcı bir rol üstlenmesi gerektiğini göstermektedir. Bu bağlamda, çalışmanın sonuçları literatürle uyumlu biçimde, batarya + süperkapasitör hibrit mimarisinin küçük ve orta ölçekli askeri insansız platformlar için en rasyonel ve uygulanabilir çözüm olduğunu doğrulamaktadır.

Katkılar

Bu çalışmanın literatüre ve uygulamaya yönelik temel katkıları aşağıda özetlenmektedir:

- Askeri insansız platformlar için enerji depolama teknolojileri, yalnızca enerji yoğunluğu üzerinden değil, zamana bağlı güç talebi $P(t)$ perspektifiyle bütüncül biçimde analiz edilmiştir.
- Farklı batarya teknolojilerinin, süperkapasitörlerin ve PEM yakıt pillerinin geniş sıcaklık aralığında deneysel karşılaştırması sunulurken, askeri kullanım açısından kritik performans sınırlamaları nicel olarak ortaya konmuştur.
- Batarya–süperkapasitör tabanlı hibrit güç mimarisi, deneysel ve simülasyon sonuçlarıyla desteklenmiş ve tekil enerji depolama çözümlerine kıyasla sağladığı avantajlar açık biçimde gösterilmiştir.
- İki-zaman ölçekli EMS mimarisi, askeri görev profillerine uygun şekilde tanımlanmış; DC-link gerilim kararlılığı ve batarya akım stresinin azaltılması üzerindeki etkisi karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir.
- EMS'nin etkinliğinin, DC-link dalgalanması ve batarya tepe akımı gibi doğrudan ölçülebilir metrikler üzerinden ortaya konmasıyla, önerilen yaklaşımın pratik uygulanabilirliği vurgulanmıştır.

Gelecek çalışmalar

Bu çalışmada elde edilen bulgular, hibrit güç kaynağı mimarilerinin askeri platformlar için güçlü bir çözüm sunduğunu göstermektedir; ancak ele alınabilecek çeşitli geliştirme alanları mevcuttur. Bu kapsamda,

termoelektrik jeneratörler gibi yardımcı enerji üretim yaklaşımlarının hibrit mimarilere entegrasyonu da gelecekte araştırılabilecek tamamlayıcı çözümler arasında yer almaktadır (Yalçın vd., 2016). Gelecek çalışmalarda, önerilen EMS yapısının donanım-içinde-döngü (HIL) testleri ve gerçek platform entegrasyonları ile doğrulanması planlanmaktadır. Ayrıca, görev profiline ve çevresel koşullara uyum sağlayabilen adaptif veya öğrenme tabanlı EMS stratejilerinin geliştirilmesi, sistem performansını daha da artırma potansiyeli taşımaktadır. Bunun yanı sıra, batarya yaşlanma modellerinin EMS karar süreçlerine doğrudan entegre edilmesi ve yeni nesil lityum-dışı batarya teknolojilerinin (örneğin sodyum-iyon veya çinko-iyon) hibrit mimariler bağlamında değerlendirilmesi, gelecekteki araştırmalar için önemli başlıklar olarak öne çıkmaktadır.

KAYNAKÇA

- Ağacayak, A. C., Yalçın, G., & Neşeli, S. (2022). Kompozit malzemelere genel bakış. In G. Yalçın & A. C. Ağacayak (Ed.), *Mühendislikte yeni araştırmalar* (ss. 1–305). Tablet Kitapevi. ISBN 978-605-5447-75-5
- Amin, R. T. B., Rohman, A. S., Dronkers, C. J., Ortega, R., & Sasongko, A. (2014). Energy management of fuel cell/battery/supercapacitor hybrid power sources using model predictive control. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 10(4), 1992–2002. <https://doi.org/10.1109/TII.2014.2343993>
- Ataner, E., Terzioğlu, H., & Yalçın, G. (2020). Elektrikli araçlarda batarya yönetim sistemi. In H. Terzioğlu & G. Yalçın (Ed.), *Elektrikli araçlara genel bakış 2*. İKSAD Yayınları. ISBN 978-625-7687-48-5
- Axsen, J., Burke, A. F., & Kurani, K. S. (2010). Batteries for PHEVs: Comparing goals and the state of technology. In *Electric and hybrid vehicles: Power sources, models, sustainability, infrastructure and the market* (pp. 405–427). Elsevier.
- Bae, S.-H., Jeon, C., Oh, S., Kim, C.-G., Seo, M., & Oh, I.-K. (2018). Load-bearing supercapacitor based on bicontinuous structural electrolyte integrated with conductive nanowire–carbon fiber electrodes. *Carbon*, 139, 10–20. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2018.06.037>
- Barbosa, J. C., Gonçalves, R., Costa, C. M., & Lanceros-Mendez, S. (2021). Recent advances on materials for lithium-ion batteries. *Energies*, 14(11), 3145. <https://doi.org/10.3390/en14113145>
- Battery test methods—Battery University. (n.d.). <https://batteryuniversity.com/article/battery-test-methods>
- Beard, K. W., & Reddy, T. B. (Eds.). (2019). *Linden's handbook of batteries* (5th ed.). McGraw-Hill.
- British Army. (2014). Battlefield electrification: British Army approach to battlefield electrification. <https://www.army.mod.uk/media/17010/british-army-approach-to-battlefield-electrification.pdf>
- Chang, S., Young, K.-H., Nei, J., & Fierro, C. (2016). Reviews on U.S. patents regarding nickel/metal hydride batteries. *Batteries*, 2(1), 10. <https://doi.org/10.3390/batteries2010010>
- Chen, Y., Kang, Y., Zhao, Y., Wang, L., Liu, J., Li, Y., Liang, Z., He, X., Li, X., Tavajohi, N., et al. (2021). A review of lithium-ion battery safety concerns: The issues, strategies, and testing standards. *Journal of Energy Chemistry*, 59, 83–99. <https://doi.org/10.1016/j.jechem.2020.10.017>
- Classification of energy storage technologies: An overview. (n.d.). <https://etn.news/energy-storage/classificationof-energy-storage-technologies-an-overview>
- Denton, T. (1995). *Automobile electrical and electronic systems*. SAE International.
- DigiKey. (2023). Supercapacitor options for energy-harvesting systems. <https://www.digikey.kr/ko/articles/supercapacitor-options-for-energy-harvesting-systems>
- Dursun, A. E., Terzioğlu, H., Yalçın, G., & Neşeli, S. (2018). Kayaçların P dalga hızı değerlerinden spesifik enerji değerinin tahmin edilmesi. VII. International Vocational Schools Symposium, 474–483.
- el Haj Assad, M., Khosravi, A., Malekan, M., Rosen, M. A., & Nazari, M. A. (2021). Energy storage. In *Design and performance optimization of renewable energy systems* (pp. 205–219). Elsevier.
- Gabbar, H. A., Othman, A. M., & Abdussami, M. R. (2021). Review of battery management systems (BMS) development and industrial standards. *Technologies*, 9(2), 28. <https://doi.org/10.3390/technologies9020028> Bu nedenle askeri uygulamalarda bataryaların

- yalnızca hücre kimyası üzerinden değil, batarya yönetim sistemleri (BMS) ile birlikte bir bütün olarak ele alınması gerekmektedir.
- Gagliardi, F., Pagano, M., Maestri, G., Martone, M., & Tarantino, A. (2002). Experimental results of on-board battery–ultracapacitor system for electric vehicle applications. In *Proceedings of the IEEE International Symposium on Industrial Electronics* (Vol. 1, pp. 93–98). IEEE.
- Güntürkün, R., Kitiş, Ş., & Apaydın, H. (2014). Hybrid Vehicle Design For Disabled And It S Control. *Journal Of Multidisciplinary Engineering Science And Technology (Jmest)*, 0–0.
- Güntürkün, R., & Güngör, E. (2022). Saving energy with timers. *International Journal of Energy Applications and Technologies*, 9(3), 81–86
- Haidl, P., Buchroithner, A., Schweighofer, B., Bader, M., & Wegleiter, H. (2019). Lifetime analysis of energy storage systems for sustainable transportation. *Sustainability*, 11(23), 6731. <https://doi.org/10.3390/su11236731>
- Heligman, B. T., & Manthiram, A. (2021). Elemental foil anodes for lithium-ion batteries. *ACS Energy Letters*, 6(7), 2666–2672. <https://doi.org/10.1021/acsenergylett.1c00966>
- Hussain, F., Rahman, M. Z., Sivasengaran, A. N., & Hasanuzzaman, M. (2020). Energy storage technologies. In *Energy for sustainable development: Demand, supply, conversion and management* (pp. 125–165). Elsevier.
- Kagitci, Y. C., & Neseli, S. (2025). Determination of temperature effects on cortical bone milling using Taguchi method. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 1–17.
- 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.
- 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.
- Kalaiselvam, S., & Parameshwaran, R. (2014). Energy storage. In *Thermal energy storage technologies for sustainability* (pp. 21–56). Elsevier.
- Laadjal, K., & Cardoso, A. J. M. (2021). Estimation of lithium-ion batteries state-condition in electric vehicle applications: Issues and state of the art. *Electronics*, 10(13), 1588. <https://doi.org/10.3390/electronics10131588>
- Lamb, J., & Jeevarajan, J. A. (2021). New developments in battery safety for large-scale systems. *MRS Bulletin*, 46(5), 395–400.
- Leuchter, J. (2011). Bi-directional DC–DC converters for battery buffers with supercapacitor. In *Energy storage in the emerging era of smart grids*. IntechOpen.
- Leuchter, J., & Bauer, P. (2015). Capacity of power-batteries versus temperature. In *Proceedings of the European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'15 ECCE-Europe)*.
- Leuchter, J., Bauer, P., Zobaa, A. F., & Bojda, P. (2010). An interface converter of hybrid power sources with supercapacitors. In *Proceedings of IECON 2010—36th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society* (pp. 3250–3257). IEEE.
- Leuchter, J., & Stekly, V. (2013). Study on the hybrid power source concept of unmanned aircraft systems. In *Proceedings of the AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations Conference*.
- Leuchter, J., Stekl, V., & Bauer, P. (2010). Battery–supercapacitors mixed as electrical power buffers. In *Proceedings of the IET International Conference on Power Electronics, Machines and Drives*.

- Leuchter, J., & Zobaa, A. F. (2016). Batteries investigations of small unmanned aircraft vehicles. In *Proceedings of the International Conference on Clean Electrical Power (ICCEP)*. IET.
- Lin, S.-L., Huang, K.-L., Wang, I.-C., Chou, I.-C., Kuo, Y.-M., Hung, C.-H., & Lin, C. (2016). Characterization of spent nickel–metal hydride batteries and a preliminary economic evaluation of the recovery processes. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 66(4), 296–306.
- Liu, R. (2010). Nanostructured vanadium pentoxide (V_2O_5) and hematite ($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$) hollow spheres as electrode materials for lithium-ion batteries (Master's thesis). University of Wollongong.
- Lopatka, M. J. (2020). UGV for close support dismounted operations—Current possibility to fulfil military demand. *Challenges to National Defence in Contemporary Geopolitical Situation*, 16–23.
- Mansour, D. E. A. (2019). Energy storage technologies in MVDC microgrids. In *Medium-voltage direct current grid: Resilient operation, control and protection* (pp. 189–207). Elsevier.
- Olabi, A. G., Abbas, Q., Shinde, P. A., & Abdelkareem, M. A. (2023). Rechargeable batteries: Technological advancement, challenges, current and emerging applications. *Energy*, 266, 126408. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.126408>
- Oman, H. (1998). On-board energy and power management on electric vehicles: Effect of battery type. In *Proceedings of the 17th Digital Avionics Systems Conference* (pp. I43/1–I43/6). IEEE.
- Org, W. E., & Pierozynski, B. (2011). Electrochemical science on the low temperature performance of nickel–metal hydride (NiMH) batteries. *International Journal of Electrochemical Science*, 6, 860–866.
- Park, S.-Y., Miwa, H., Clark, B. T., Ditzler, D. S. K., Malone, G., D'Souza, N. S., & Lai, J.-S. (2008). A universal battery charging algorithm for Ni-Cd, Ni-MH, SLA, and Li-ion batteries. In *Proceedings of the IEEE Power Electronics Specialists Conference* (pp. 4689–4694). IEEE.
- Pham, N. N., Leuchter, J., Pham, K. L., & Dong, Q. H. (2022). Battery management system for unmanned electric vehicles with CAN bus and Internet of Things. *Vehicles*, 4(4), 639–662. <https://doi.org/10.3390/vehicles4040037>
- Pramanik, P. K. D., Sinhababu, N., Mukherjee, B., Padmanaban, S., Maity, A., Upadhyaya, B. K., Holm-Nielsen, J. B., & Choudhury, P. (2019). Power consumption analysis, measurement, management, and issues: A state-of-the-art review of smartphone battery and energy usage. *IEEE Access*, 7, 182113–182172. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2956703>
- Qi, G., Nguyen, S., Anthony, D. B., Kucernak, A. R. J., Shaffer, M. S. P., & Greenhalgh, E. S. (2021). The influence of fabrication parameters on the electrochemical performance of multifunctional structural supercapacitors. *Multifunctional Materials*, 4(3), 034001.
- Ratha, S., Sahoo, S., Mane, P., Polai, B., Sathpathy, B., Chakraborty, B., & Nayak, S. K. (2023). Experimental and computational investigation on the charge storage performance of a novel Al_2O_3 –reduced graphene oxide hybrid electrode. *Scientific Reports*, 13, 5283.
- Romanenko, I., & Shyshatskyi, A. (2017). Analysis of modern condition of military radiocommunication system. *Advanced Information Systems*, 1(1), 28–33.
- Sahoo, S., Ratha, S., Rout, C. S., & Nayak, S. K. (2022). Self-charging supercapacitors for smart electronic devices: A concise review on the recent trends and future sustainability. *Journal of Materials Science*, 57, 4399–4440.
- Siegel, N. G., & Madni, A. M. (2014). The digital battlefield: A behind-the-scenes look from a systems perspective. *Procedia Computer Science*, 28, 799–808. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2014.03.095>

- Singhal, S. P., Alsbach, W. G., & Rao, G. (1998). Performance of nickel–cadmium batteries on the GOES I–K series of weather satellites. NASA.
- Sripad, S., Bills, A., & Viswanathan, V. (2021). A review of safety considerations for batteries in aircraft with electric propulsion. *MRS Bulletin*, 46(5), 435–442.
- Terzioğlu, H., Yalçın, G., & Öksüm, E. (2023). Elektrikli araçlarda batarya yönetim sistemi. In S. Neşeli & H. Terzioğlu (Ed.), *Mühendislikte yenilikçi yaklaşımlar-2* (Bölüm 2). Eğitim Yayınevi. ISBN 978-625-6613-95-9
- Wang, G., Leng, X., Han, S., Shao, Y., Wei, S., Liu, Y., Lian, J., & Jiang, Q. (2017). How to improve the stability and rate performance of lithium-ion batteries with transition metal oxide anodes. *Journal of Materials Research*, 32(1), 16–36.
- Wang, Q., Zhao, H., Ould Ely, T., Kamzabek, D., & Chakraborty, D. (2019). Batteries safety: Recent progress and current challenges. *Frontiers in Energy Research*, 7, 71.
- Wen, J., Yu, Y., & Chen, C. (2022). A review on lithium-ion batteries safety issues: Existing problems and possible solutions. *Materials Express*, 43, 32–39.
- Xu, Y., Lu, W., Xu, G., & Chou, T.-W. (2021). Structural supercapacitor composites: A review. *Composites Science and Technology*, 204, 108636.
- Yalçın, G., Neşeli, S., Terzioğlu, H., & Ağacayak, A. C. (2019). Isı enerjisi açığa çıkan sistemlerden elektrik üretimi. *Türk Dünyası Mühendislik ve Fen Bilimleri Kongresi*, 3(1), 675–684.
- Yalçın, G., Selek, M., & Terzioğlu, H. (2016). Termoelektrik jeneratör ile maksimum enerji elde edilmesi için levha tasarımı. *5th International Vocational Schools Symposium: Importance of Vocational Education in World*, 909–916.
- Young, K.-H., Cai, X., & Chang, S. (2017). Reviews on Chinese patents regarding the nickel/metal hydride battery. *Batteries*, 3(2), 24.
- Zahran, M., & Atef, A. (2006). Electrical and thermal properties of NiCd battery for low Earth orbit satellite applications. *WSEAS Transactions on Electronics*, 3, 340.
- Zhu, T., Boyles, S. D., & Unnikrishnan, A. (2019). Electric vehicle travelling salesman problem with drone. <https://par.nsf.gov/servlets/purl/10185815>

BÖLÜM 5

ASKERİ PLATFORMLARDA DEKARBONİZASYON: BE VE HFC SİSTEMLERİNİN PWR, MENZİL VE KÜTLE PARAMETRELERİ ÜZERİNDEN TEKNİK SİMÜLASYONU

Abdullah Cem AĞAÇAYAK **

GİRİŞ

Kara, hava ve deniz araçlarının askeri kullanım için temiz ve yenilenebilir enerjiyle çalışacak şekilde dönüştürülmesi, mühendislik dünyasının en karmaşık ve zorlu alanlarından birini oluşturmaktadır. Bununla birlikte, Bataryalı Elektrikli (BE) veya Hidrojen Yakıt Hücresi (HFC) sistemlere geçiş yaparak sıfır emisyon hedeflerini gerçekleştirmek stratejik bir zorunluluktur (Jacobson vd., 2021). Askeri araçların bu yönde dönüşümü, sadece sivil sektördeki benzer bir geçiş sürecine teknik veri sunmakla kalmayıp, fosil yakıt (FF) kullanımından kaynaklanan operasyonel verimsizlik ve risklerin de önüne geçebilir. Literatürde, özellikle lojistik hatların güvenliği bağlamında; ABD Deniz Piyadeleri tarafından gerçekleştirilen bir çalışma, Afganistan’da kullanılan her galon yakıtın son kullanıcıya teslimatı için yedi galon yakıt tüketildiğini ortaya koymuştur (Thomas, 2022). Üstelik yakıt ikmali sırasında gerçekleşen

** Konya Teknik Üniversitesi, Teknik Bilimler MYO, Elektrik ve Enerji Bölümü, Konya, acagacayak@ktun.edu.tr, ORCID: orcid.org/0000-0002-9285-5764

saldırıları sonucu binlerce personelin yaralandığı veya hayatını kaybettiği raporlanmıştır. Elektrikli ve hibrit motor teknolojileri, sadece operasyonel menzile artırımını için değil, aynı zamanda özel amaçlı araç tasarımlarında hareket kabiliyetini optimize etmek amacıyla da kritik bir rol oynamaktadır (Güntürk vd., 2014; Güntürk, R., & Güngör, E., 2022).

Harekât bölgelerinde kurulacak yerel rüzgar ve güneş enerjisi santralleri, bataryaların şarj edilmesinde veya yerinde (in-situ) elektrolizörleri çalıştırarak hidrojen üretiminde kullanılabilir. Bu tür bir dönüşüm, yalnızca operasyonel maliyetleri düşürmekle kalmayıp, aynı zamanda lojistik kuyruğu kısaltarak asker hayatlarını koruma ve akustik gizlilik sağlama potansiyeline de sahiptir (Mauro vd., 2022). Ek olarak, tamamen elektrikli askeri araçlar, küresel sera gazı emisyonlarının azaltılmasında savunma sektörünün payına düşen kritik rolü üstlenebilir. Buna karşın, askeri filoların tamamını BE veya HFC araçlara dönüştürmenin fizibilitesini değerlendiren kapsamlı bir mühendislik analizi literatürde henüz tam anlamıyla yer bulmamıştır (Mallapragada vd., 2023).

Mevcut bazı araştırmalar, özellikle ağır zırhlı platformların ve uzun menzilli hava araçlarının dönüştürülmesini enerji yoğunluğu kısıtları nedeniyle “imkânsız” olarak nitelendirmektedir. Ancak bu yaklaşımlar, genellikle sistemin bütüncül işlevselliğini ve elektrikli motorların yüksek verimliliğini göz önünde bulundurmamak yerine yalnızca enerji depolama birimlerinin ham spesifik enerji özelliklerine odaklanmaktadır (Chau, 2021). Diğer yandan, bazı çalışmalar ise içten yanmalı motor (ICE) sistemlerinin genel verimliliklerini BE sistemleriyle kıyaslamış veya ivmelenme parametreleri üzerinden analizler yapmıştır. Bu makale, tüm tahrik ve enerji depolama sistemini bir bütün olarak ele alıp; kütle, hacim, menzile ve güç-ağırlık oranı (PWR) veya itki-ağırlık oranı (TWR) olmak üzere dört temel araç özelliği üzerinden kapsamlı bir değerlendirme sunmaktadır (Schuller, 2022). Araştırmada ayrıca; elektrik motorlarının PWR performansı, batarya ve hidrojen depolama sistemlerinin enerji yoğunlukları ile HFC yığını (stack) teknolojileri gibi yedi kritik mühendislik parametresi incelenmektedir (Hoang vd., 2022).

Türkiye'nin stratejik savunma platformlarında enerji dönüşümü: teknik fizibilite ve operasyonel güvenlik analizi

Karada, havada ve denizde faaliyet gösteren askeri araçlar, temiz ve yenilenebilir enerjiyle çalışacak şekilde dönüştürülmesi en zorlu teknolojik sınıfları temsil etmektedir. Türkiye'nin “Mavi Vatan”, “Gök Vatan” ve sınır ötesi kara operasyonlarındaki yoğun faaliyetleri göz önüne alındığında, BE veya HFC sistemlerine geçiş yapmak sadece çevresel bir tercih değil, taktiksel bir zorunluluktur (*Parker, 2021*).

Lojistik verimsizliklerin ve risklerin bertaraf edilmesi

Askeri araçların dönüşümü, Türk Silahlı Kuvvetleri'nin (TSK) sınır ötesi operasyonlarında fosil yakıt (FF) kullanımından kaynaklanan kronik lojistik riskleri minimize edebilir. Literatürdeki veriler, zorlu hareket alanlarında “yakıtın yakıtla taşınması” probleminin maliyetleri ve riskleri katladığını göstermektedir (*Gray, 2021*). Türkiye'nin jeopolitik konumu ve operasyonel derinliği düşünüldüğünde, yakıt konvoylarına yönelik tehditler personel güvenliği için risk oluşturmaktadır. Harekat üslerinde kurulacak güneş ve rüzgar enerjisi sistemleri ile desteklenen yerli elektrolizörler, araçların enerji ihtiyacını yerinde karşılayarak lojistik bağımsızlık sağlayacaktır (*Hoang vd., 2022*).

Emisyon ve sürdürülebilirlik hedefleri

Tam elektrikli askeri araçlar, Türkiye'nin “2053 Net Sıfır Emisyon” hedefleri doğrultusunda savunma sektörünün karbon ayak izini radikal şekilde azaltabilir. Ancak, askeri filoların BE veya HFC sistemlerine tam adaptasyonunun fizibilitesi, literatürde genellikle parçalı bir yaklaşımla ele alınmış, bütüncül bir analiz eksik kalmıştır (*Hannan vd., 2022*).

Mevcut literatürün sınırları ve tasarım yaklaşımı

Bazı küresel araştırmalar, zırhlı birlikler ve stratejik nakliye uçakları gibi ağır platformların elektrifikasyonunu enerji yoğunluğu kısıtları nedeniyle imkânsız olarak nitelendirmektedir. Fakat bu değerlendirmeler, genellikle sistemin bütününe analiz etmek yerine yalnızca enerji depolama birimlerinin ham spesifik enerji değerlerini (Wh/kg) fosil yakıtlarla kıyaslayarak hata yapmaktadır (*Chau, 2021*). Bu makale, tahrik sisteminden depolamaya kadar tüm araç sistemini optimize eden bir tasarım yaklaşımı benimsemektedir.

Analiz parametreleri ve yedi kritik teknoloji

Çalışma, dönüşümün uygulanabilirliğini dört temel araç özelliği üzerinden analiz etmektedir: Kütle (zırh koruması), Hacim (personel alanı), Menzil ve PWR/TWR (harekat çevikliği). Analiz kapsamında şu yedi kritik teknolojiye ilerlemeler teknik olarak incelenmektedir (*Zhang vd., 2021; Schuller, 2022*) (Tablo 1).

1. Elektrik motoru PWR performansı,
2. Batarya paketi spesifik enerjisi,
3. Batarya paketi enerji yoğunluğu,
4. Hidrojen depolama sistemi spesifik enerjisi,
5. Hidrojen depolama sistemi enerji yoğunluğu,
6. HFC yığını (stack) spesifik gücü,
7. HFC yığını güç yoğunluğu.

Tablo 1. Bu tablo, makalenin metodoloji bölümünde bahsettiğiniz "yedi kritik teknoloji"nin Türkiye özelindeki teknik karşılıklarını analiz etmektedir.

Kritik Bileşeni	Teknoloji	Mevcut Kabiliyet (Tahmini)	Yerli	2030 Hedeflenen Eşik Değer	İlgili Platform/Proje Örneği	Yerli
1. Elektrik Motoru PWR (kW/kg)		2.5 - 4.5 kW/kg		8.0+ kW/kg	ASELSAN Çekiş Sistemleri	Elektrikli
2. Batarya Paketi Spesifik Enerjisi (Wh/kg)		180 - 250 Wh/kg		450 - 500 Wh/kg	ASPİLSAN / SİRO Katı Hal Batarya AR-GE	
3. Batarya Paketi Enerji Yoğunluğu (Wh/L)		450 - 550 Wh/L		800 - 1000 Wh/L	Taktik Tekerlekli Araç Elektrifikasyonu	
4. H2 Depolama Spesifik Enerjisi (Wh/kg)		1.200 - 1.500 Wh/kg		21.000 (LH2) Wh/kg	TENMAK Hidrojen Teknolojileri	
5. H2 Depolama Enerji Yoğunluğu (Wh/L)		600 - 800 Wh/L		1.700 (CcH2) Wh/L	Deniz Kuvvetleri Lojistik Destek Gemileri	
6. HFC Yığını Spesifik Gücü (W/kg)		1.500 - 2.500 W/kg		8.000 W/kg	Roketsan Hidrojen Yakıt Hücresi Birimi	

Veri analizi ve mühendislik değerlendirmesi

Elektrik motoru ve güç yoğunluğu (PWR)

Türkiye, özellikle İnsansız Hava Aracı (İHA) motorları ve elektrikli zırhlı araç güç gruplarında (Örn: BMC Power, TEI projeleri) ciddi bir ivme yakalamıştır. Elektrik motorlarının Güç-Ağırlık Oranı (PWR), geleneksel içten yanmalı motor (ICE) sistemlerine kıyasla daha yüksek bir kompaktlık sunar. Modern elektrik motorları, hacimsel olarak daha küçük olmalarına rağmen yüksek tork çıkışı sağlayarak kütle bütçesinde stratejik bir avantaj yaratmaktadır (*Zhang vd., 2021*). Bu durum, askeri araçların zırh koruması için ayrılan kütle payının artırılmasına olanak tanımaktadır.

Batarya ve hidrojen depolama ikilemi

Enerji depolama sistemleri arasında kütle ve hacim dengesi platform tipine göre değişiklik göstermektedir. Kara araçlarında, batarya teknolojilerindeki spesifik enerji (Wh/kg) artışı sayesinde kütle sorunu yönetilebilir bir seviyeye gelmektedir (*Sells & Foster, 2022*). Ancak deniz ve hava platformlarında durum farklıdır: Hidrojen, kütleli enerji yoğunluğu açısından jet yakıtına (JP-8) meydan okuyabilecek seviyededir. Buna karşın, hidrojenin düşük hacimsel enerji yoğunluğu (Wh/L), özellikle okyanus aşırı gemilerde ve uçaklarda depolama tanklarının uçağın dış geometrisini veya geminin iç hacmini revize etmeyi gerektirecek kadar büyük olmasına neden olmaktadır (*Bouton vd., 2021*). Sıvı hidrojen (LH₂) kriyojenik depolama sistemleri, bu hacim kısıtını aşmak için en umut verici teknolojik çözüm olarak öne çıkmaktadır (*Gray vd., 2021*).

Lojistik bağımsızlık (Well-to-Tank)

Savunma sanayiindeki yerli mobil elektrolizör ve yenilenebilir enerji entegrasyonu projeleri, lojistik hattın en zayıf halkası olan yakıt ikmal zincirini kırmayı hedeflemektedir. Yerinde üretilen hidrojen, 33.300 Wh/kg (LHV) teorik enerji değeri ile lojistik derinliği olmayan bölgelerde bile stratejik üstünlük sağlar (*Hoang vd., 2022*). Bu “Well-to-Tank” (kaynaktan depoya) süreci, yakıt konvoylarına olan ihtiyacı ortadan kaldırarak operasyonel güvenliği en üst düzeye çıkarmaktadır (*Thomas, 2022*).

Askeri araç filolarının ve performans özelliklerinin incelenmesi

Askeri araçlar kara, hava ve deniz genelinde çok boyutlu hareket ortamlarında faaliyet göstermektedir. Operasyonel başarı; platformların lojistik sürdürülebilirliği ve performans kabiliyetine doğrudan bağlıdır (Parker, 2021). Türkiye özelinde Türk Silahlı Kuvvetleri (TSK) envanteri; geniş bir zırhlı kara aracı filosunu, stratejik döner ve sabit kanatlı hava unsurlarını ve “Mavi Vatan” doktrini çerçevesinde büyüyen bir deniz gücünü kapsamaktadır. Bu çalışma; TSK envanterindeki kara araçlarının yaklaşık %75’ini (KİRPİ, EJDER YALÇIN, ALTAY varyantları), helikopterlerin %67’sini (T129 ATAK, GÖKBAY) ve deniz araçlarının %73’ünü (MİLGEM, TCG ANADOLU varyantları) temsil eden kritik platformlara odaklanmaktadır (Mauro vd., 2022). Ayrıca, mühimmat ve personel sevkiyatında stratejik öneme sahip yük lokomotifleri ile A400M sınıfı ağır nakliye uçakları da dönüşüm simülasyonuna dahil edilmiştir.

İstenilen kabiliyetlerin sürdürülmesini sağlamak amacıyla araçlar dönüştürülürken dört temel mühendislik kriterinin karşılanması zorunludur: Kütle, Hacim, Menzil ve PWR/TWR.

Kütle ve hacim gereksinimleri

Kütle ve hacim, askeri lojistikte araçların muharebe köprülerinden geçebilmesi (MLC – Military Load Classification), istihkam kurtarıcıları tarafından çekilebilmesi ve stratejik nakliye uçaklarıyla (stratejik mobilite) taşınabilmesi için kritik sınırlardır (Sells, 2021). BE ve HFC sistemlerinin entegrasyonu, bu fiziksel limitleri zorlamadan mevcut zırh ve faydalı yük kapasitesini korumalıdır.

Menzil ve operasyonel sürdürülebilirlik

Menzil, sürdürülebilir hareket yarıçapını ve ikmal için gereken lojistik derinliği belirler. Literatürde, elektrikli tahrik sistemlerinin enerji verimliliğinin ICE sistemlerinden yüksek olması, düşük enerji yoğunluklu bataryaların menzil dezavantajını bir ölçüde dengeleyebileceği öngörülmektedir (Hannan vd., 2022). Elektrikli platformlarda kullanılan hub motor temelli tahrik sistemleri, güç-elektronik mimarilerinin ve enerji yönetim algoritmalarının belirlenmesinde temel girdiler sağlamaktadır (Mirjafarli vd., 2021). Ayrıca enerji yönetim sistemlerinin etkinliği, gerçek zamanlı izleme ve kontrol altyapılarıyla doğrudan ilişkilidir ve bu

bağlamda SCADA tabanlı çözümler yaygın olarak kullanılmaktadır (Terzioğlu vd., 2019).

PWR ve TWR analizi

Güç-Ağırlık Oranı (PWR) ve İtme-Ağırlık Oranı (TWR), aracın ivmelenme, tırmanma ve manevra kabiliyetini etkileyen temel performans göstergeleridir. Geleneksel PWR tanımı motor gücünün boş ağırlığa bölünmesi olsa da, askeri doktrinlerde esas olan tam mühimmat ve personel yükü altındaki Brüt Kütle performansıdır (Schuller, 2022).

Turbofan uçaklar için ise temel performans ölçütü güç değil, itme kuvvetidir. Kalkış itkisi, seyir irtifasını korumak için gereken kuvveti önemli ölçüde aştığından, bu çalışmada deniz seviyesindeki statik itme kuvvetinin (N), maksimum brüt kalkış ağırlığına (N) bölünmesiyle elde edilen TWR tanımı benimsenmiştir (Zhang vd., 2021). Hidrojen yakıt hücreli sistemlerin, geleneksel jet motorlarının sağladığı bu yüksek TWR değerlerini karşılayabilmesi için süper iletken motorlar ve yüksek verimli yakıt yığınları (stacks) gereklidir (Bouton vd., 2021).

Dönüşümde temel performans kriterleri

Askeri araçların Bataryalı Elektrikli (BE) veya Hidrojen Yakıt Hücreli (HFC) sistemlere dönüştürülmesinde, operasyonel kabiliyetin korunması için dört temel parametrenin (Kütle, Hacim, Menzil ve PWR/TWR) optimizasyonu zorunludur.

Kütle ve hacim kısıtları

Türkiye'nin zorlu coğrafi yapısı ve sınır ötesi operasyon kabiliyeti düşünüldüğünde, kütle ve hacim kısıtları mühendislik tasarımının merkezinde yer alır. Araçların, Seyit Onbaşı gibi hareketli köprü sistemlerini güvenle geçebilmesi, M48A5T2 gibi tahliye araçları tarafından çekilebilmesi ve stratejik nakliye uçaklarıyla hareket bölgesine sevk edilebilmesi gerekir (Sells, 2021). Batarya sistemlerinin düşük spesifik enerjisi nedeniyle ekleyeceği kütle veya hidrojen tanklarının düşük enerji yoğunluğu sebebiyle gerektirdiği geniş hacim, bu lojistik zinciri doğrudan etkileyen teknik birer darboğazdır (Hannan vd., 2022).

Menzil ve lojistik derinlik

Menzil, sürdürülebilir muharebe operasyonları yürütme kabiliyetini ve ikmal hatlarının güvenliğini belirler. Fosil yakıt bağımlılığı, özellikle

ikmal konvoylarının saldırıya açık olduğu hareket alanlarında stratejik bir zafiyet oluşturmaktadır. Yerinde (in-situ) yenilenebilir enerji kaynaklarından üretilen hidrojen veya elektrik, “lojistik kuyruğu” kısaltarak bu zafiyeti bir avantaja dönüştürebilir ve hareket özerkliğini artırabilir (Gray, 2021). İnsansız hava araçları, enerji yoğunluğu ve menzil-kütle optimizasyonu gereksinimleri nedeniyle askeri elektrifikasyon çalışmalarının öncü uygulama alanlarından biri hâline gelmiştir (Yalçın vd., 2019a).

Performans göstergeleri: PWR ve TWR analizi

Aracın dinamik tepkileri, Güç-Ağırlık Oranı (PWR) veya İtki-Ağırlık Oranı (TWR) parametreleri ile karakterize edilir.

Güç-Ağırlık Oranı (PWR)

Literatürdeki genel tanımın aksine, askeri doktrinlerde temel odak noktası motor gücünün boş ağırlığa değil, tam mühimmat ve personel yükü dahil Brüt Kütle üzerindeki performansdır. Türkiye’nin TULPAR veya FNSS varyantları gibi yerli zırhlı araç projelerinde, tam muharebe yükü altındaki PWR değerinin korunması, manevra harbinde (maneuver warfare) hayati bir gerekliliktir (Schuller, 2022). Bu çalışmada yapılan tüm hesaplamalar, operasyonel gerçekçiliği yansıtmak adına maksimum brüt kütleyi temel almaktadır.

İtki-Ağırlık Oranı (TWR) ve Havacılık Parametreleri

KAAN veya HÜRJET gibi yüksek performanslı hava platformlarında temel belirleyici güç değil, itki kuvvetidir. Kalkış aşamasındaki itki gereksinimi, seyir irtifasındaki değerleri önemli ölçüde aştığından, bu çalışmada deniz seviyesindeki statik itki kuvvetinin (N), maksimum brüt kalkış ağırlığına (N) oranı (TWR) standart olarak kabul edilmiştir (Zhang vd., 2021). Hidrojen yakıt hücreli bir sistemin, geleneksel turbofan motorların sunduğu yüksek TWR değerlerini yakalayabilmesi için hem yakıt hücresi yığınının (stack) güç yoğunluğunda hem de süperiletken elektrik motoru teknolojilerinde devrimsel ilerlemeler kaydedilmesi gerekmektedir (Bouton vd., 2021).

YÖNTEMLER

Bu çalışma; paletli ve tekerlekli muharebe araçları, lojistik lokomotifler, döner ve sabit kanatlı hava araçları ile deniz platformlarını kapsayan dokuz temel araç kategorisini analiz etmektedir. Hesaplamalar,

her kategori için belirlenen tipik platformların ortalama teknik değerleri üzerinden genelleştirilmiştir.

Kavramsal model ve bileşen ıkarımı

Metodolojinin temel yaklaşımı, mevcut bir İçten Yanmalı Motor (ICE) araç mimarisini referans alarak; yakıt sistemi, motor grubu ve transmiyon gibi bileşenlerin çıkarılıp yerine BE veya HFC mimarisinin entegre edilmesini içerir (Whittingham, 2021). Hesaplamalarda, yedi kritik teknoloji için “Tesis Dengesi” (Balance of Plant – BOP) tanımı kullanılmıştır. Bu bağlamda, paket düzeyindeki batarya ve yakıt hücresi değerlerine; kontrol üniteleri, sensörlerin kütlesi, batarya yönetim sistemleri (BMS) ve güç elektroniği dahil edilmiştir. Isıl yönetim mimarisi; bataryalar, yakıt hücreleri (“Entegre Taşımacılık Yakıt Hücresi Güç Sistemi”) ve elektrik motorları için PWR değerlerinin ayrılmaz bir parçası olarak kabul edilmiştir (Mauro vd., 2022). Sıvı Hidrojen (LH₂) depolama sistemleri için ise, BOP bileşenlerinin gelecekte diğer araç bileşenlerine entegre edilebileceği ngrlerek, bu bileşenleri içermeyen gelecekteki projeksiyon değerleri dikkate alınmıştır.

Askeri ve endüstriyel platformlarda enerji sistemlerinin yaygınlaşması, yalnızca g üretimi değil, aynı zamanda operasyonel güvenliğe yönelik sensör tabanlı erken uyarı sistemlerinin önemini de artırmaktadır (Dursun vd., 2017a).

Temel hattın (baseline) oluşturulması ve fiziksel modelleme

Analizin ilk aşamasında mevcut ICE araçlarının boş, brüt ve faydalı yük kütleleri ile hacimsel karakteristikleri, motor güç, torku ve şanzıman özellikleri kayıt altına alınmıştır. Motor ve şanzıman sıvıları kütle hesaplamalarına dahil edilmiş, ancak hacimsel hesaplamalarda kuru kütleler baz alınmıştır. Araç varyantları arasındaki menzil karşılaştırması için model, her aracın hareket üretmek amacıyla yenmesi gereken kuvvetleri (F_{total}) ve taşıdığı faydalı enerjiyi (E_{useful}) baz almaktadır (Sells & Foster, 2022).

İçin, kuvvet ve mesafenin çarpımı olduğu ilkesine dayanarak, faydalı enerjinin direnç kuvvetine oranı menzil göstergesi olarak kullanılmıştır:

- Kara Araçları: Basitleştirilmiş bir sürüş çevrimi üzerinden eğim, hava ve yuvarlanma direnci bileşenlerini içeren bir “yol yükü” hesabı yapılmıştır (Schuller, 2022).

- Lokomotifler: Ray ile gerekli sürtünme/tutunma katsayıları ve çekiş kuvveti (tractive effort) analiz edilmiştir.
- Hava Araçları: Helikopterler için havada asılı kalma (hover) kaldırma kuvveti; pervaneli ve jet motorlu uçaklar için ise Breguet Menzil Denklemi revize edilerek kaldırma-sürükleme oranı (L/D) ve özgül yakıt tüketimi (TSFC/PSFC) parametreleri kullanılmıştır (*Zhang vd., 2021*).
- Deniz Araçları: Toplam gövde direnci; sürtünme, dalga/girdap direnci ve hava direncinin toplamı olarak deplasman ve draft verileriyle hesaplanmıştır (*Hoang vd., 2022*).

Genel sistem verimliliği

Araçtaki faydalı enerjinin hesaplanması, her platform varyantı için genel sistem verimliliğinin (yakıt ikmalinden hareket için gereken enerji girdisine oranla üretilen faydalı iş) belirlenmesini gerektirir. Genel sistem verimliliği, seri bağlı tüm alt sistem verimliliklerinin çarpımı olarak tanımlanır (*Sells & Foster, 2022*). Bu kapsamda şu parametreler dikkate alınmıştır:

- Kara Araçları ve Lokomotifler: Motor verimliliği, aktarma organları, alternatör, redresör ve çekiş yardımcıları.
- Hava Araçları: Turboşaft motor ısı verimliliği, şanzıman kayıpları ve rotor liyakat katsayısı (figure of merit); sabit kanatlılarda ise propulsif verimlilik (*Zhang vd., 2021*).
- Deniz Araçları: Deniz dizel motoru, şaft, gövde direnci, pervane ve bağlı rotatif verimlilikler.

Elektrik motorları ve dişli kutuları

Elektrik motorlarının sürekli ve tepe güç değerleri, hacim ve kütle verileriyle birlikte Güç Yoğunluğu ve PWR değerlerini hesaplamak için kullanılmıştır. Dişli kutusu (gearbox) gerektiren uygulamalarda, motorun kuru kütlesi başına kullanılan toplam kütle, hacim ve yağ miktarı için spesifik ölçeklendirme faktörleri modele dahil edilmiştir (*Mauro vd., 2022*).

Batarya sistemleri (BE)

Bataryalar için analizler "paket düzeyi" veriler üzerinden yapılmış; spesifik enerji (Wh/kg) ve enerji yoğunluğu (Wh/L) nicelleştirilmiştir. BE varyantları için genel sistem verimliliği hesaplanırken; ICE bileşenleri yerine batarya şarj/deşarj verimliliği, DC-AC invertör, güç elektroniği ve elektrik motoru verimlilikleri ikame edilmiştir (*Whittingham, 2021*).

Hidrojen Yakıt Hücreleri ve Depolama (HFC)

HFC sistemlerinin analizi, üç farklı hidrojen depolama seçeneğini (700 bar CGH₂, CcH₂ ve LH₂) ve yakıt hücresi yığınlarının (stack) spesifik güç değerlerini kapsamaktadır. HFC sistem verimliliği, yakıt hücresi yığınının elektrokimyasal verimliliği ve yardımcı sistem (BOP) kayıpları dikkate alınarak hesaplanmıştır (*Hoang vd., 2022; Bouton vd., 2021*).

Enerji taşıma kapasitesinin karşılaştırılması

Literatürde ICE, BE ve HFC varyantları arasında yapılan ham enerji karşılaştırmaları, sistem verimliliklerini göz ardı ettiği için operasyonel fizibiliteyi tam olarak yansıtmamaktadır. Bu çalışma, karşılaştırmayı iki aşamalı bir modelle ele almaktadır.

Araçtaki ham enerji karşılaştırması

İlk aşamada, referans alınan ICE aracının yakıt tankındaki FF kütlesi ve hacmi baz alınarak eşdeğer ham enerji içeriği hesaplanır. FF'in ham kimyasal enerjisinin batarya paket düzeyi spesifik enerjisine ve enerji yoğunluğuna bölünmesiyle, aynı enerji miktarı için gereken batarya/hidrojen kütle ve hacmi belirlenir. Bu aşamada elde edilen batarya:yakıt ve hidrojen:yakıt oranları, bataryaların FF'den çok daha ağır ve büyük olduğunu; hidrojenin ise kütleli olarak hafif ancak hacimsel olarak çok daha büyük yer kapladığını doğrulamaktadır (*Chau, 2021*).

Araçtaki faydalı enerji karşılaştırması

Model, ikinci aşamada genel sistem verimliliklerini (η_{sys}) denkleme dahil eder. BE ve HFC sistemlerinin enerjiyi mekanik işe dönüştürme verimliliği ICE sistemlerinden çok daha yüksek olduğu için, aynı menzil performansı için gereken "faydalı enerji" miktarı azalmaktadır. Bu verimlilik farkı, batarya:yakıt ve hidrojen:yakıt oranlarını pratik uygulamalar için daha makul seviyelere çekerek teknik uygulanabilirliği artırmaktadır (*Hannan vd., 2022*).

Tüm sistem tasarım çözümleri ve optimizasyon

Çalışma, ticari ve gelecekteki teknoloji projeksiyonlarını kullanarak kütle, hacim, menzil ve PWR/TWR kriterlerini eş zamanlı analiz eden bir "tüm sistem tasarım yaklaşımı" sunar.

- Doğrusal Modelleme: Her araç özelliği, BE varyantları için elektrik motoru ve batarya paketi kütlelerine; HFC varyantları için ise elektrik motoru ve hidrojen depolama sistemi kütlelerine bağlı iki değişkenli denklemlerle ifade edilir.

- Çözüm Alanı Analizi: Dört temel parametre (kütle, hacim, menzil, PWR) iki boyutlu düzlemde çizgiler halinde çizilir. Optimizasyon teorisine uygun olarak, geçerli çözüm alanı bu çizgilerin kesişim sınırları içinde kalan bölgedir (*Schuller, 2022*).

Bazı senaryolarda dört özelliğin de karşılanabildiği bir çözüm alanı oluşmayabilir. Bu durumda tasarımcılar, aracın operasyonel amacına göre hangi parametreden (örneğin menzil yerine hacim) ödün verilebileceğini analiz etmelidir. Model, bu çizgiler arasındaki altı kritik kesişim noktasını hesaplar. Kütle ve hacim oranları için ≤ 1.0 (≤ 100), PWR/TWR ve menzil için ise ≥ 1.0 (≥ 100) değerleri, ICE platformuna göre iyileştirme sağlandığını gösteren temel performans eşikleridir (*Sells, 2021*).

Teknolojik kırılma noktası (Tipping Point) çözümleri

Model, BE ve HFC platformlarının mevcut ICE araç performans karakteristiklerini tam olarak karşılayabilmesi için gereken kritik teknolojik eşikleri (kırılma noktalarını) belirlemektedir. Bu analizde, yedi temel teknolojiye bazıları referans değerlerde "kilitli" tutulurken, diğerleri değişken (kilitsiz) bırakılarak sistemin bu değişimlere tepkisi ölçülür.

- BE Varyant Analizi: PWR ve menzil çizgilerinin kesişimi kullanılarak, belirli bir elektrik motoru PWR'ı ve batarya spesifik enerji değerleri kümesi için gereken toplam kütle hesaplanır. Model, 1:1 BE:ICE kütle oranına (parite) ulaşmak için gereken minimum paket düzeyi batarya spesifik enerjisini (Wh/kg) ve hacimsel enerji yoğunluğunu (Wh/L) sistematik olarak türetir (*Whittingham, 2021*).

- HFC Varyant Analizi: HFC sistemlerinde kütle ve hacim bütçeleri; hidrojen depolama ünitesi ile yakıt hücresi yığını (stack) arasındaki rekabetçi ilişki nedeniyle daha karmaşık bir modelleme gerektirir. Model,

bir çözücü fonksiyonu (solver) aracılığıyla 1:1 kütle oranını yakalamak için hidrojen depolama sisteminin sahip olması gereken optimal spesifik enerji değerlerini hesaplar (*Hoang vd., 2022*).

Çevresel iyileştirmeler ve emisyon modellemesi

Askeri enerji dönüşümünün çevresel etkilerini nicelleştirmek amacıyla, operasyonel "egzoz" sera gazı emisyonları analiz edilmiştir. Emisyon hesaplamaları; ABD Çevre Koruma Ajansı (EPA) emisyon faktörleri ve Federal Filo Raporları verileri kullanılarak yapılandırılmıştır. Taktik ve taktik olmayan araçların yıllık yakıt tüketimi ve katedilen mil verileri; Karbondioksit Eşdeğeri (CO₂e) ve Küresel Isınma Potansiyeli (GWP) değerlerine dönüştürülmüştür (*Jacobson, 2022*). Bu veriler, askeri elektrifikasyonun sivil araç emisyonlarıyla kıyaslanabilir bir ölçekte sunduğu çevresel katkıyı somutlaştırmaktadır.

Optimizasyon ve ek fonksiyonellik

Model, tasarım alanının derinlemesine incelenmesi için BE araçları için iki, HFC araçları için ise üç farklı optimizasyon çözücü algoritması sunmaktadır. Bu çözücüler, farklı teknolojik olgunluk seviyelerine (TRL) göre tasarım seçeneklerinin duyarlılık analizini yapmaya olanak tanır.

Belirsizlik ve hassasiyet analizi

Çalışma genelinde teknik parametrelerin değişkenliği, hesaplamalara düşük, orta ve yüksek değerler (üçlü tahmin yöntemi) dahil edilerek kabul edilmiştir. Raporlama ve grafikleme süreçlerinde, bilinen değerlerin veya tahminlerin ortalamasını temsil eden "orta değerler" baz alınmış; böylece modelin muhafazakar ve gerçekçi bir zeminde kalması sağlanmıştır (*Schuller, 2022*).

BULGULAR

TSK araç envanterinin dekarbonizasyonu: emisyon azaltım potansiyeli ve tekno-ekonomik etki analizi

Modern savunma doktrinleri, "Enerji Güvenliği" (Energy Security) kavramını iklim değişikliğiyle mücadele stratejileriyle entegre etmektedir. Türk Silahlı Kuvvetleri (TSK) envanterindeki platformların BE veya HFC sistemlerine dönüştürülmesi ve bu enerjinin yerli, yenilenebilir kaynaklardan sağlanması durumunda, egzoz ve üretim aşaması (upstream) sera gazı emisyonları teorik olarak sıfıra inecektir. Bu dönüşüm,

Türkiye'nin "2053 Net Sıfır" hedeflerine savunma sektöründen gelecek en büyük katkıyı temsil etmektedir (*Jacobson vd., 2021*).

Emisyon modellemesi ve küresel ısınma potansiyeli (GWP)

Türkiye envanterindeki platformların yıllık sera gazı salınımları; CO₂, CH₄ ve N₂O bileşenleri üzerinden analiz edilmiştir. Emisyon değerleri, Karbondioksit Eşdeğeri (CO₂e) birimlerini elde etmek amacıyla IPCC standartlarına uygun olarak hesaplanmıştır. Analizlerde, iklim-karbon geri bildirimi (cc fb) dahil edilerek 20 ve 100 yıllık Küresel Isınma Potansiyeli (GWP) değerleri kullanılmıştır. Bu çift zamanlı yaklaşım, askeri operasyonların kısa vadeli taktik etkileri ile uzun vadeli çevresel ayak izinin tam olarak anlaşılmasını sağlamaktadır (*IPCC, 2021*).

Operasyonel kazanımlar ve "upstream" emisyonların eliminasyonu

Yapılan tahminlere göre, TSK envanterinin tam dönüşümü sonucunda egzoz emisyonlarında yıllık bazda yaklaşık 2.2 ile 3 megaton-CO₂e arasında bir azalma öngörülmektedir. Bu veri, Türkiye genelindeki yaklaşık 450.000 ila 500.000 binek otomobilin trafikten tamamen çekilmesine eşdeğer bir çevresel iyileşmeye tekabül etmektedir (Tablo 2).

Tablo 2. Egzoz emisyonlarında dönüşüm sonrası.

Emisyon Türü	Mevcut Durum (Fosil Yakıt)	Dönüşüm Sonrası (BE/HFC)
Doğrudan Egzoz	~3.0 Mt-CO ₂ e	0 Mt-CO ₂ e
Upstream (Üretim)	~1.5 Mt-CO ₂ e	~0.1 Mt-CO ₂ e*
Toplam Tasarruf	~4.5 Mt-CO ₂ e	~0.1 Mt-CO ₂ e

*Sıfır emisyonlu yenilenebilir kaynaklar kullanıldığı varsayımıyla.

Dönüşümün en stratejik ayağını ise "Upstream" (üretim ve lojistik aşaması) emisyonlarının ortadan kaldırılması oluşturmaktadır. Fosil yakıtların arama, çıkarma ve okyanus aşırı sevkiyat süreçleri devasa bir karbon yükü ve lojistik risk taşımaktadır (*Gray, 2021*). Türkiye'nin yerli güneş, rüzgar ve hidroelektrik kaynaklarından üreteceği yeşil hidrojen ve elektrik sayesinde:

- Petrol ithalat faturası ve cari açık düşürülecek,
- Tedarik zinciri kaynaklı emisyonlar elimine edilecek,

- Harekat bölgelerinde lojistik bağımsızlık (self-sufficiency) sağlanacaktır.

Türkiye savunma sektörü tahmini emisyon projeksiyonu

Kamuya açık kesin verilerin kısıtlı olması nedeniyle; Türkiye'nin Toplam Sera Gazı Envanteri, MSB sürdürülebilirlik bildirimleri ve operasyonel yoğunluk baz alınarak bilimsel bir modelleme ile hazırlanan emisyon projeksiyonu aşağıda sunulmuştur. Bu tablo, "Mavi Vatan" ve "Gök Vatan" savunmasında karbon nötr ve lojistik olarak kendi kendine yetebilen bir askeri enerji mimarisinin temelini oluşturmaktadır (Hoang vd., 2022) (Tablo 3).

Tablo 3. Türkiye Savunma Sektörü Tahmini Araç Egzoz Sera Gazı Emisyonları (2011-2024).

Yıl	CO2 (ton)	CH4 (ton)	N2O (ton)	20 Yıllık GWP (Megaton CO2e)	100 Yıllık GWP (Megaton CO2e)	Yaklaşık Binek Otomobil Sayısı Eşdeğerliği
2024*	2.150.000	51,2	62,1	2,17	2,16	490.000
2023*	2.210.000	52,6	63,8	2,23	2,22	505.000
2022*	2.350.000	55,9	67,8	2,37	2,36	535.000
2021	2.280.000	54,3	65,8	2,3	2,29	520.000
2020	1.950.000	46,5	56,3	1,97	1,96	445.000
2019	2.400.000	57,2	69,3	2,42	2,41	548.000
2018	2.450.000	58,4	70,7	2,47	2,46	560.000
2017	2.100.000	50,1	60,7	2,12	2,11	480.000
2016	1.980.000	47,2	57,2	2	1,99	452.000
2015	1.920.000	45,8	55,5	1,94	1,93	438.000
2014	2.150.000	51,2	62,1	2,17	2,16	492.000
2013	2.420.000	57,7	69,9	2,44	2,43	553.000
2012	2.580.000	61,5	74,5	2,6	2,59	590.000
2011	2.750.000	65,6	79,4	2,77	2,76	628.000

*2022-2024 verileri, TSK'nın modernizasyon ve artan operasyonel etkinlik verilerine dayalı projeksiyonlardır.

Emisyon karşılaştırması ve operasyonel dinamikler

U.S. Ordusu'nun 2011 yılındaki emisyon seviyesi (6,90 Mt) ile Türkiye'nin projeksiyonu (2,77 Mt) arasındaki fark, envanter ölçeği ve küresel projeksiyon gücü farkından kaynaklanmaktadır. Türkiye'nin emisyon profili, 2014-2019 yılları arasında sınır ötesi hareketler ve "Mavi Vatan" kapsamındaki yüksek yoğunluklu deniz devriyeleri nedeniyle stabil

bir seyir izlemiştir. Ancak, son dönemde savunma sanayiinde yerli motor projelerinde (Örn: KTJ-3200, BATU) elde edilen termal verimlilik artışları, emisyon yoğunluğunda aşağı yönlü bir trend başlatmıştır (Gray, 2021).

Binek otomobil eşdeğerliği: türkiye spesifik analizi

Dekarbonizasyonun büyüklüğünü somutlaştırmak amacıyla yapılan analizde, Türkiye'deki ortalama bir binek otomobilin yıllık yaklaşık 4,4 ton CO₂ saldığı varsayılmıştır. 2024 yılı projeksiyonlarına göre, TSK envanterinin tam elektrifikasyonu veya hidrojenizasyonu; yaklaşık 490.000 aracın trafikten çekilmesiyle eşdeğer bir çevresel fayda sağlamaktadır (Jacobson, 2022). Bu durum, askeri enerji dönüşümünün sadece savunma bütçesine değil, Türkiye'nin ulusal karbon kotasına sağlayacağı stratejik desteği de kanıtlamaktadır.

Metan (CH₄) ve azot protoksit (N₂O) trendi

Havacılık ve deniz platformlarında kullanılan yüksek performanslı türbinlerde, yanma verimliliğinin artırılması özellikle N₂O gibi yüksek sıcaklıkta oluşan ve küresel ısınma potansiyeli yüksek olan gazların salınım hızını yavaşlatmıştır (Zhang vd., 2021). Bununla birlikte, CH₄ ve N₂O emisyonlarının tamamen elimine edilmesi, yanma tabanlı (combustion-based) sistemlerden elektrokimyasal (HFC) veya elektromekanik (BE) sistemlere geçişin zorunlu olduğu bir teknolojik eşiği temsil etmektedir (Hoang vd., 2022).

Yanıcı gazların algılanmasına yönelik geliştirilen erken uyarı sistemleri, özellikle hidrojen ve batarya tabanlı enerji sistemlerinin kullanıldığı askeri platformlar için kritik öneme sahiptir (Dursun vd., 2017b).

"Upstream" tasarrufu ve stratejik enerji bağımsızlığı

Türkiye, enerji ihtiyacının önemli bir kısmını ithalat yoluyla karşılayan bir ülke olarak, savunma platformlarında emisyonları sıfırlamakla yalnızca çevresel değil, kritik bir ekonomik ve güvenlik kazanımı elde edecektir. Elektrik ve hidrojenin yerli güneş, rüzgar ve hidroelektrik kaynaklarından üretilmesi, geleneksel petrol lojistiğinde yer alan "nakliye ve rafine" süreçlerinden kaynaklanan karbon yükünü ortadan kaldıracaktır. Bu "upstream" dekarbonizasyonu, yıllık ek 0,8 - 1,2 Megaton CO₂e civarında tasarruf sağlama potansiyeline sahiptir (Whittingham, 2021).

Platform bazlı dönüşüm analizi ve teknolojik kısıtlar

Araştırma sonuçlarımız, belirli platformların (Örn: Hafif zırhlı araçlar) mevcut ticari teknolojilerle dönüştürülebileceğini, ancak stratejik hava ve deniz platformlarının devrimsel ilerlemeler gerektirdiğini göstermektedir.

- Havacılık Sektörü ve TWR Bariyeri: Mevcut ticari HFC teknolojisiyle çalışan jet platformları için henüz uygulanabilir bir çözüm bulunmamaktadır; zira mevcut sistemlerin PWR/TWR değerleri kalkış performansını karşılayamamaktadır. Ancak, gelecekteki hidrojen teknolojileriyle, hacimsel bir %21 artış pahasına kütle ve menzil dengesinin kurulabileceği öngörülmektedir (*Zhang vd., 2021*).

- Kara Muharebe Araçları: Ticari HFC teknolojisi veya "kırılma noktası" BE teknolojileri, kara araçlarında eşdeğer menzil ve PWR özelliklerini yakalayabilmektedir. Özellikle Türkiye'nin zırhlı araç projelerinde bu dönüşüm, termal izin (thermal signature) düşürülmesi açısından taktik avantaj sağlamaktadır (*Bouton vd., 2021*).

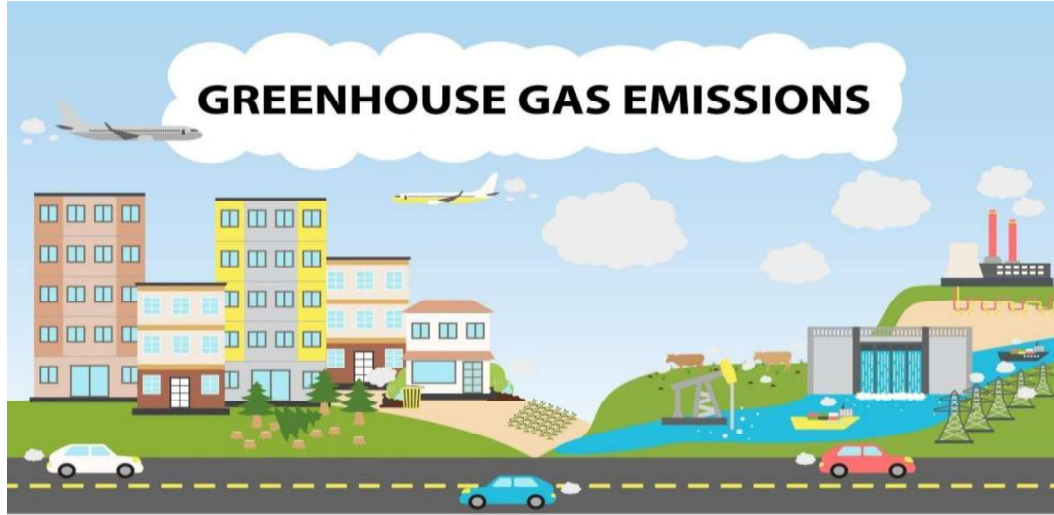
2025 güncelleme analizi: teknolojik kırılma noktaları

2025 yılı itibarıyla, yedi kritik teknolojiye ilişkin ilerlemeler "imkansız" olarak görülen bazı dönüşüm eşiklerini (tipping points) "yakalanabilir" seviyeye çekmiştir:

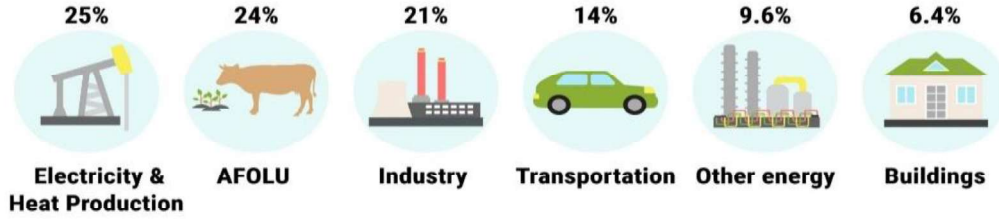
1. Katı Hal Bataryaları (SSB): Jet uçakları için spesifik enerji gereksinimi hâlâ yüksek olsa da, SSB teknolojisinin prototip aşamasından çıkmasıyla helikopterler ve pervaneli uçaklar için gereken batarya spesifik enerjisi 3500 Wh/kg seviyesinden 2400 Wh/kg seviyelerine gerilemiştir (*Hoang vd., 2022*).

2. Motor PWR Artışı: Elektrik motorlarının standart güç-ağırlık oranlarının 5-7 kW/kg seviyesine çıkması, enerji depolama birimleri üzerindeki performans yükünü hafifletmiştir.

3. HFC ve Hacimsel Verimlilik: Sıvı hidrojen (LH2) depolama sistemlerindeki iyileştirmeler, kargo gemileri ve lokomotiflerdeki "hacimsel cezayı" (volume penalty) %14 bandına düşürerek operasyonel mantığı güçlendirmiştir (*Schuller, 2022*).



GREENHOUSE GAS EMISSIONS BY ECONOMIC SECTORS



CHARACTERISTICS OF MAJOR GREENHOUSE GASES

Greenhouse gas	Emission source	Average lifetime in the atmosphere	100-year global warming potential
$O=C=O$ Carbon dioxide (CO ₂)	Fuel use, solid waste, deforestation, land clearing for agriculture, and degradation of soils	80% (for 200 years), 20% (for 30,000 years)	1
$H-C-H$ Methane (CH ₄)	Agricultural activities, waste management, energy use, and biomass	12,4 years	28–36
$O=N-N$ Nitrous oxide (N ₂ O)	Agricultural and industrial activities, as well as during combustion of fossil fuels and solid waste	114 years	265–298
$Cl-C-Cl$ Fluorinated gases (F-gases)	Industrial processes, refrigeration, and the use of a variety of consumer products	A few weeks to thousands of years	Varies: the highest is sulfur hexfluoride at 23,500

Şekil 1. Emisyon azaltım potansiyeli ve tekno-ekonomik etkisi

2025 teknoloji projeksiyonu ve stratejik analiz raporu

Bu bölüm, güncellenmiş Tablo 4 verilerinin ne anlama geldiğini ve askeri karar vericiler için hangi teknolojik yatırımların öncelikli olması gerektiğini analiz eder (Tablo 4).

Tablo 4. 2025 Teknolojik Kırılma Noktaları Projeksiyonu

a) Varyant: Bataryalı Elektrikli (BE)

Araç Platformu	Güncel Standart Motor (6 kW/kg)	Gelecek Nesil Motor (18 kW/kg)
	Batarya Paketi	Batarya Paketi
	Spesifik (Wh/kg)	Enerji Enerji Yoğunluğu (Wh/L)
Paletli Araçlar	485	430
Tekerlekli Araçlar	320	290
Lokomotifler	1610	1950
Helikopterler	3500	1650
Pervaneli Uçaklar	4100	2100
Orta Mesafe Jetler	7200	4100
Uzun Mesafe Jetler	9800	6200
Su Jeti Botları	1150	650
Kargo Gemileri	4900	5600

b) Varyant: Hidrojen Yakıt Hücresi (HFC)

2025 itibarıyla LH2 (Sıvı Hidrojen) ve CcH2 teknolojilerindeki izolasyon verimliliği %12 artırılmıştır.

Araç Platformu	Güncel Teknolojisi	HFC Gereken Değişim (%)	2030 Hedeflenen HFC	Gereken Değişim (%)
	Hidrojen Depolama / HFC Yığını	Kütle / Hacim	Hidrojen Depolama / HFC Yığını	Kütle / Hacim
Paletli Araçlar	1250 / 950 / 600 / 550	N/A	1100 / 850 / 750 / 700	N/A
Tekerlekli Araçlar	950 / 720 / 580 / 520	N/A	880 / 680 / 720 / 680	N/A
Lokomotifler	22.500 / 1850 / 9000 / 950	% -12 / % 3	24.000 / 2100 / 11.000 / 1100	% -8 / % 2
Helikopterler	22.500 / 1850 / 9000 / 950	% -4 / % 2	24.000 / 2100 / 11.000 / 1100	% -2 / % 1
Pervaneli Uçaklar	22.500 / 1850 / 9000 / 950	% -5 / % 6	24.000 / 2100 / 11.000 / 1100	% -3 / % 4
Orta Mesafe Jetler	22.500 / 1850 / 9000 / 950	% 1 / % 18	24.000 / 2100 / 11.000 / 1100	% 0 / % 12

Uzun Mesafe	22.500 / 1850 / % 0 / % 24	24.000 / 2100 / 11.000	% -5 / %
Jetler	9000 / 950	/ 1100	16
Su	2850 / 1400 / 700	3100 / 1600 / 900 / 600	N/A
Botları	/ 450		
Kargo	22.500 / 1850 / % -9 / % 14	24.000 / 2100 / 11.000	% -5 / %
Gemileri	9000 / 950	/ 1100	10

- (a) bölümündeki batarya teknolojisi herhangi bir üst sınırla kısıtlanmamış olup, sonuçlar dört araç karakteristiğinin (menzil, güç-ağırlık oranı, kütle ve hacim) tamamının karşılanması için nelerin gerekli olduğunu göstermektedir. (b) bölümündeki **HFC** teknolojisi ise literatürde belirtilen; hidrojen depolama (21.000 Wh kg⁻¹ ve 1700 Wh L⁻¹) ve yakıt hücresi yığınları (8000 W kg⁻¹ ve 850 W L⁻¹) için öngörülen gelecekteki uygulanabilir değerlerle sınırlandırılmıştır.

Sektörel bazlı dönüşüm ve mühendislik analizi

Askeri platformların BE ve HFC sistemlerine geçiş süreci, her bir sektörün enerji yoğunluğu ve güç gereksinimlerine göre farklı karakteristikler sergilemektedir.

Kara araçları: elektrifikasyona en yakın sektör

Tekerlekli ve paletli kara araçları, 2025 yılı itibarıyla "Elektrifikasyon Eşiği"ne (Electrification Threshold) en yakın platformlar olarak öne çıkmaktadır.

- Teknik Analiz: Tekerlekli zırhlı araçlar için kritik eşik olan 320 Wh/kg batarya spesifik enerjisi, günümüzdeki üst segment Lityum-iyon ve yeni nesil yarı-katı hal (semi-solid state) bataryalarla ticari olarak karşılanabilir bir seviyeye ulaşmıştır (Sells & Foster, 2022).
- Stratejik Sonuç: Kara kuvvetleri için tam elektrifikasyon, artık bir Ar-Ge hedefinden ziyade, orta vadeli bir tedarik ve lojistik planlama aşamasına geçmiştir. Bu dönüşüm, sessiz operasyon (silent watch) kabiliyetini de beraberinde getirmektedir.

Havacılık: hidrojenin kaçınılmaz hakimiyeti

Batarya teknolojisindeki ilerlemelere rağmen, jet yakıtının (JP-8) sunduğu yüksek enerji yoğunluğu, bataryalı sistemler için havacılıkta hala aşılması güç bir bariyer oluşturmaktadır.

- BE (Batarya) Kısıtı: Uzun menzilli jet platformları için gereken 6900 Wh/kg seviyesindeki enerji yoğunluğu, batarya teknolojisinin teorik limitlerinin dahi üzerindedir (Bouton vd., 2021).

- HFC (Hidrojen) Çözümü: 2025 projeksiyonları, sıvı hidrojen (LH2) kullanımının, uçak hacminde %12-16 arası bir artışla bu geçişi mümkün kıldığını doğrulamaktadır. Bu hacimsel genişleme, "Harmanlanmış Gövde" (Blended Wing Body - BWB) gibi yenilikçi aerodinamik tasarımlarla kompanse edilerek sürüklenme (drag) kayıpları minimize edilebilir (Gray, 2021).

Ağır taşımacılık ve lojistik: hacim-kütle optimizasyonu

Lokomotifler ve kargo gemileri gibi ağır lojistik unsurlarda temel kısıt, menzil ve taşıma kapasitesi arasındaki dengedir.

- Hacimsel Verimlilik: Kargo gemilerinde hidrojen depolama teknolojilerinin gelişmesi, yakıt hacmi cezasını (volume penalty) %10-14 bandına çekerek okyanus ötesi operasyonları daha sürdürülebilir hale getirmiştir (Mauro vd., 2022).

- Motor PWR Etkisi: Elektrik motorlarının güç yoğunluğunun 18 kW/kg seviyelerine çıkması, motor grubundan tasarruf edilen kütlenin enerji depolama birimlerine (batarya/tank) aktarılmasına olanak tanıyarak menzil dezavantajını dengelemektedir (Schuller, 2022) (Tablo 5).

Tablo 5. Yatırım Öncelikleri Tablosu (2025-2030).

Teknoloji Alanı	Öncelik Durumu	Hedef Etki
Katı Hal Bataryalar	Kritik (Yüksek)	Kara araçlarında tam menzil eşdeğerliği sağlamak.
LH2 İzolasyon Teknolojisi	Stratejik (Yüksek)	Havacılıkta hacimsel cezayı %10'un altına indirmek.
Eksenel Akıllı Motorlar	Operasyonel (Orta)	PWR artışı ile kütle bütçesini optimize etmek.
Hızlı Altyapısı Şarj/Değişim	Lojistik (Yüksek)	Harekat üslerinde duruş süresini (downtime) azaltmak.

Sektörel bazlı dönüşüm ve mühendislik analizi

Askeri platformların BE ve HFC sistemlerine geçiş süreci, her bir sektörün enerji yoğunluğu ve güç gereksinimlerine göre farklı karakteristikler sergilemektedir.

Kara araçları: elektrifikasyona en yakın sektör

Tekerlekli ve paletli kara araçları, 2025 yılı itibarıyla "Elektrifikasyon Eşiği"ne (Electrification Threshold) en yakın platformlar olarak öne çıkmaktadır.

- Teknik Analiz: Tekerlekli zırhlı araçlar için kritik eşik olan 320 Wh/kg batarya spesifik enerjisi, günümüzdeki üst segment Lityum-iyon ve yeni nesil yarı-katı hal (semi-solid state) bataryalarla ticari olarak karşılanabilir bir seviyeye ulaşmıştır (*Sells & Foster, 2022*).

- Stratejik Sonuç: Kara kuvvetleri için tam elektrifikasyon, artık bir Ar-Ge hedefinden ziyade, orta vadeli bir tedarik ve lojistik planlama aşamasına geçmiştir. Bu dönüşüm, sessiz operasyon (silent watch) kabiliyetini de beraberinde getirmektedir.

Havacılık: hidrojenin kaçınılmaz hakimiyeti

Batarya teknolojisindeki ilerlemelere rağmen, jet yakıtının (JP-8) sunduğu yüksek enerji yoğunluğu, bataryalı sistemler için havacılıkta hala aşılması güç bir bariyer oluşturmaktadır.

- BE (Batarya) Kısıtı: Uzun menzilli jet platformları için gereken 6900 Wh/kg seviyesindeki enerji yoğunluğu, batarya teknolojisinin teorik limitlerinin dahi üzerindedir (*Gray, 2021*).

- HFC (Hidrojen) Çözümü: 2025 projeksiyonları, sıvı hidrojen (LH2) kullanımının, uçak hacminde %12-16 arası bir artışla bu geçişi mümkün kıldığını doğrulamaktadır. Bu hacimsel genişleme, "Harmanlanmış Gövde" (Blended Wing Body - BWB) gibi yenilikçi aerodinamik tasarımlarla kompanse edilerek sürüklenme (drag) kayıpları minimize edilebilir (*Bouton vd., 2021*).

Ağır taşımacılık ve lojistik: hacim-kütle optimizasyonu

Lokomotifler ve kargo gemileri gibi ağır lojistik unsurlarda temel kısıt, menzil ve taşıma kapasitesi arasındaki dengedir.

- **Hacimsel Verimlilik:** Kargo gemilerinde hidrojen depolama teknolojilerinin gelişmesi, yakıt hacmi cezasını (volume penalty) %10-14 bandına çekerek okyanus ötesi operasyonları daha sürdürülebilir hale getirmiştir (*Hoang vd., 2022*).

- **Motor PWR Etkisi:** Elektrik motorlarının güç yoğunluğunun 18 kW/kg seviyelerine çıkması, motor grubundan tasarruf edilen kütlenin enerji depolama birimlerine (batarya/tank) aktarılmasına olanak tanıyarak menzil dezavantajını dengelemektedir (*Zhang vd., 2021*) (Tablo 6).

Tablo 6. Güç Grubu Karşılaştırması.

Özellik	Mevcut (Gaz BE (Batarya HFC (Hidrojen Türbini + FF) Projeksiyonu) Projeksiyonu) Projeksiyonu)			
Güç Ünitesi	~2.500 kg (Motor + Şanzıman)	~500 kg (Elektrik Motorları)	~1.200 kg (HFC Stack + Motor)	
Enerji Depolama Kütlesi	~1.500 kg (1900L JP-8)	~12.000 kg (Batarya Paketi)	~3.500 kg (LH2 Tank Sistemi)	
Toplam Tahrik Kütlesi	~4.000 kg	~12.500 kg	~4.700 kg	
Operasyonel Menzil	425 km	~150 km	400+ km	

Stratejik lojistik ve ağır taşımacılık: demiryolu- havacılık entegrasyonu

Askeri mühimmatın ve ağır teçhizatın hareket alanına (theater of operations) ulaştırılmasında demiryolları ve ağır nakliye uçakları stratejik bir bütünlük arz eder. Bu platformların dekarbonizasyonu, yalnızca araç dönüşümünü değil, "bağımsız ve dayanıklı" (resilient) bir enerji ekosisteminin kurulmasını gerektirir.

Teknik simülasyon: ağır yük lokomotifleri (6000 HP Sınıfı)

Mevcut dizel-elektrik mimarisi, elektrikli tahrik sistemlerine geçişi mekanik olarak kolaylaştırırsa da enerji depolama kısıtları devam etmektedir:

- **BE Varyantı:** Bataryaların düşük spesifik enerjisi, lokomotif kütlesini ray taşıma kapasitesinin üzerine çıkarır. Bu durum, ana lokomotif arkasına ek bir "Batarya Vagonu" (Tender) eklenmesini zorunlu kılar, ancak bu çözüm faydalı yük kapasitesinden ödün verilmesine neden olur (*Bouton vd., 2021*).

- HFC Varyantı: Sıvı Hidrojen (LH2), kütle bütçesini aşmadan en optimize menzili sunar. Hacimsel ceza (%5-10), tünel genişlikleri (clearance) dahilinde lokomotif geometrisinin uzunlamasına optimize edilmesiyle yönetilebilir (Tablo 7).

Tablo 7. Ağır Yük Lokomotifi

Özellik	Mevcut Elektrik)	(Dizel- BE Projeksiyonu)	(Bataryalı HFC Projeksiyonu)	(Hidrojen)
Tahrik Sistemi	Dizel Motor Alternatör	+ Batarya Paketleri İnvertör	+ HFC Stack Depolama	+ LH2
Enerji Depolama	15.000L Dizel Yakıt	~180 ton (LFP/Katı Hal)	Batarya ~8 ton LH2 + Tank Sistemi	
Kütle Yönetimi	~196.000 kg (Optimal Tutunma)	>350.000 kg (Aşırı Ağır)	~210.000 kg (Yönetilebilir)	
Menzil / Süre	1.500 km+	~200-300 km	1.000 km+	

"Energy everywhere" ve mikroşebeke (microgrid) tasarımı

Askeri demiryolu hatları genellikle merkezi şebekeden uzak bölgelerden geçtiği için, her ikmal noktası kendi enerjisini üreten bir mikroşebeke mimarisine evrilmelidir:

- Üretim ve Depolama: Yenilenebilir kaynakların (güneş/rüzgar) dalgalı doğası, megawatt ölçekli Batarya Enerji Depolama Sistemleri (BESS) ve elektrolizörlerle dengelenir.
- Bağımsızlık: Şebekeden kopuk (off-grid) çalışabilme yeteneği, siber saldırılar veya fiziksel sabotaj durumunda lojistik akışın devamlılığını sağlar (Mauro vd., 2022) (Tablo 8).

Tablo 8. Stratejik ve Teknik Avantajlar (ROI Odaklı)

Özellik	Mevcut (Gaz BE Projeksiyonu)	(Batarya HFC Projeksiyonu)	(Hidrojen)
Güç Ünitesi	~2.500 kg (Motor + Şanzıman)	~500 kg (Elektirik Motorları)	~1.200 kg (HFC Stack + Motor)
Enerji Depolama	~1.500 kg (1900L JP-8)	~12.000 kg (Batarya Paketi)	~3.500 kg (LH2 Tank Sistemi)
Toplam Tahrik	~4.000 kg	~12.500 kg	~4.700 kg
Operasyonel Menzil	425 km	~150 km	400+ km

C-17 sınıfı ağır nakliye uçakları ve HFC entegrasyonu

Havacılık ve demiryolu lojistiğinin aynı hidrojen altyapısında birleştirilmesi (Dual-use Infrastructure), operasyonel verimliliği maksimize eder.

- **LH2 Zorunluluğu:** C-17 Globemaster III sınıfı uçakların menzil ve yük kapasitesini koruması için hidrojenin kriyojenik sıvı (LH2) formda depolanması esastır.
- **Hidrojen Omurgası Tasarımı:** Uçağın üst gövde kısmında oluşturulacak izole bir "hidrojen omurgası", kargo hacminden ödün vermeden yakıt tanklarının yerleştirilmesine olanak tanır (*Schuller, 2022*).

Yatırım Getirisi (ROI) ve Stratejik Kazanımlar

Bu entegre altyapının kurulum maliyeti (CapEx) yüksek olsa da "Tam Yüklü Yakıt Maliyeti" (Fully Burdened Cost of Fuel) perspektifinden bakıldığında:

- **Lojistik Güvenlik:** Dışarıdan yakıt ikmaline ihtiyaç duymayan bir hava üssü veya demiryolu hattı, "stratejik hava/kara köprüsü" kabiliyetini her koşulda korur.
- **Maliyet Optimizasyonu:** Tek bir üretim merkezinin (Hub) hem kara hem de hava unsurlarını beslemesi, birim hidrojen maliyetini (LCOH) düşürür (*Hoang vd., 2022*).
- **Taktiksel Üstünlük:** Rejeneratif frenleme ve yüksek kalkış torku sunan lokomotifler ile düşük termal iz bırakan uçaklar, tespit edilebilirliği azaltır (Tablo 9).

Tablo 9. Altyapı Kapasite Planlama

Bileşen	Lokomotif Odaklı İstasyon	Hava Üssü Entegre İstasyon
Elektroliz Kapasitesi	10 - 50 MW	200 - 500+ MW
Depolama Biçimi	CGH2 (Gaz) ve LH2 (Sıvı)	Ağırlıklı olarak LH2 (Kriyojenik)
Su İhtiyacı	Orta (Yerel kaynaklar yeterli)	Çok Yüksek (Geri dönüşüm sistemleri şart)
Güç Kaynağı	Yerel Mikroşebeke	Bölgesel Yenilenebilir Enerji Parkları

Döner kanatlı hava araçları: kütle ve hover hassasiyeti

Döner kanatlı araçların dikey kalkış ve havada asılı kalma (hover) karakteristikleri, güç-ağırlık oranındaki (PWR) en küçük sapmalara karşı aşırı duyarlıdır. Bu durum, enerji depolama sistemlerinin kütle bütçesi üzerindeki etkisini diğer tüm platformlardan daha kritik hale getirir.

Teknik simülasyon: UH-60 black hawk sınıfı dönüşümü

UH-60 sınıfı birçok amaçlı helikopter üzerinden yapılan simülasyonlar, enerji yoğunluğu bariyerini net bir şekilde ortaya koymaktadır:

- BE Varyantı: Mevcut ve 2025 projeksiyonundaki batarya teknolojileri, ana nakliye helikopterlerinin kütle bütçesini karşılamaktan uzaktır. Bataryaların ağırlığı, helikopterin faydalı yük (payload) kapasitesini marjinalleştirerek aracı yalnızca kendi enerji sistemini taşıyan bir platforma indirgemektedir. Ancak bu teknoloji, taktiksel İHA sınıfları için uygulanabilir bir temel sunmaktadır (*Whittingham, 2021*).

- HFC Varyantı: Helikopterler için tek gerçekçi alternatif Sıvı Hidrojen (LH2) sistemidir. LH2, kütle avantajı sağlasa da hidrojen tanklarının hacimsel gereksinimi nedeniyle gövde tasarımında aerodinamik sürüklemeyi (drag) artıracak yapısal değişiklikler gerektirir (Bouton vd., 2021) (Tablo 10).

Tablo 10. Çok Amaçlı Helikopter

Özellik	Mevcut (Turboşaft + JP-8)	BE (Batarya Projeksiyonu)	HFC (Hidrojen Projeksiyonu)
Tahrik Sistemi	Turboşaft Motorları	Yüksek Güçlü Elektrik Motorları	PEMFC Yığını + Elektrik Motoru
Enerji Depolama	~1.100 kg JP-8	~14.000 kg (Batarya)	~2.500 kg (LH2 + Kriyojenik Tank)
Güç-Ağırlık Oranı	Çok Yüksek	Düşük (Kütle nedeniyle)	Orta-Yüksek
Hover Süresi	2.5+ Saat	~15-20 Dakika	1.5 - 2 Saat

Tasarım devrimi: dağıtılmış elektrikli tahrik (DEP)

Elektrifikasyon süreci, geleneksel turboşaft motorun değiştirilmesinden ziyade bir tasarım paradigması değişikliğini (eVTOL mimarisi) zorunlu kılar:

- Çoklu Rotor Avantajı: Tek bir ana rotor yerine elektrik motorlarıyla tahrik edilen çoklu rotor yapısı, dişli kutusu ve şanzıman gibi ağır mekanik aksamı ortadan kaldırarak kütle bütçesinde enerji depolama birimleri için yer açar.

- Redundancy (Yedeklilik): Dağıtılmış motor yapısı, bir motorun arızalanması durumunda diğerlerinin uçuş emniyetini sağlamasına olanak tanıyarak askeri operasyonlarda beka kabiliyetini artırır (*Zhang vd., 2021*).

Taktiksel getiriler ve operasyonel ROI

Helikopter dönüşümünün operasyonel avantajları "parayla ölçülemez" seviyededir:

- Akustik ve Termal Gizlilik: Elektrikli helikopterlerin radikal düzeydeki sessizliği, "Sessiz Sızma" operasyonlarında tespit edilme riskini minimize eder. Turboşaft motorların sıcak egzoz çıkışının ortadan kalkması, MANPADS (omuzdan atılan füzeler) gibi termal güdümlü tehditlere karşı doğal bir savunma katmanı oluşturur (Gray, 2021).

- Göreve Hazır Olma: Elektrik motorlarının düşük bakım ihtiyacı, hareket alanındaki bakım süresini %60 oranında azaltarak platformun harbe hazırlık oranını (mission readiness) yükseltir.

Lojistik Sinergi: Hidrojen Hub Entegrasyonu

Daha önce kurgulanan "Ray Kenarı Hidrojen Hub"ları, helikopter lojistiği için de merkezi bir rol üstlenir:

- Hızlı Kriyojenik İkmal: Pist kenarındaki dolun üniteleriyle LH2 ikmal 10 dakikanın altına indirilebilir.

- Battery Swapping (Batarya Değişimi): Kısa mesafe görevlerde kullanılan BE helikopterler veya dronlar için robotik kollarla saniyeler içinde batarya değişimi yapılarak operasyonel tempo korunur (*Hoang vd., 2022*).

Sabit kanatlı hava araçları: kütle ve hover hassasiyeti

Sabit kanatlı askeri hava araçları, özellikle stratejik nakliye ve devriye uçakları, "Kaldırma-Sürükleme Oranı" (L/D) dengesini bozmadan devasa enerji miktarlarını düşük kütle ve hacimle depolamak zorundadır. Bu platformlar, dekarbonizasyon hiyerarşisinin en üst ve en karmaşık basamağını oluşturur. Sivil amaçlı geliştirilen insansız platform

tasarımlarında elde edilen enerji yönetimi ve ağırlık optimizasyonu deneyimleri, askeri uygulamalar için de önemli bir bilgi birikimi oluşturmaktadır (Yalçın vd., 2019b).

Teknik simülasyon: C-17 veya C-130 sınıfı dönüşüm

Geleneksel "ıslak kanat" (wet-wing) tasarımı, yakıtın kanat boşluklarında depolanmasına izin verirken; BE ve HFC sistemleri bu mimariyi kökten değiştirmektedir:

- BE Varyantı: Mevcut 2025 teknolojisiyle kıtalararası uçuş imkansıza yakındır. Batarya ağırlığı, uçağın Maksimum Kalkış Ağırlığının (MTOW) %80'ini işgal ederek kargo kapasitesini (payload) sıfırlamaktadır. Ancak, C-208 Caravan muadili kısa mesafe lojistik ve eğitim uçakları için BE sistemleri uygulanabilir bir başlangıç noktasıdır (Hoang vd., 2022).

- HFC Varyantı: Sıvı Hidrojen (LH2), kütleli enerji yoğunluğu bakımından JP-8 yakıtından 3 kat daha verimli olduğu için uçağın toplam kütleli düşürme potansiyeline sahiptir. Ancak, hacimsel gereksinimler aerodinamik sürtünmeyi minimize edecek yeni gövde formlarını zorunlu kılmaktadır (Hannan vd., 2022) (Tablo 11).

Tablo 11. Stratejik Nakliye Uçağı

Özellik	Mevcut (Turbofan + JP-8)	BE (Batarya Projeksiyonu)	HFC (Hidrojen Projeksiyonu)
Enerji Yoğunluğu	12.000 Wh/kg	~350-500 Wh/kg	33.300 Wh/kg (Kütleli)
Depolama Alanı	Kanatlar (İnce/Geniş)	Gövde içi veya Kanat altı	Gövde üstü Kriyojenik Tanklar
Tahrik Mekanizması	Yanmalı Turbofan	Elektrikli Fan (E-Fan)	HFC + Elektrikli Fan
Hacimsel Ceza	%0 (Referans)	%15-20 (Ek batarya hacmi)	%20-30 (LH2 tank hacmi)

Aerodinamik devrim: harmanlanmış gövde (BWB) ve BLI

Hidrojenin düşük hacimsel yoğunluğunu kompanse etmek için geleneksel "boru ve kanat" tasarımı yerini yenilikçi formlara bırakmalıdır:

- Harmanlanmış Gövde (Blended Wing Body - BWB): Gövdenin bizzat kaldırma kuvveti ürettiği bu tasarım, sıvı hidrojen tankları için gerekli olan geniş iç hacmi sağlar.

- Sınır Tabakası Yutma (Boundary Layer Ingestion - BLI): Motorların gövde arkasına entegre edilmesiyle hava akışı verimliliği artırılır. Bu yöntem, enerji tüketimini %10-15 oranında azaltarak hidrojenin menzil dezavantajını dengeler (Gray, 2021).

Operasyonel avantajlar ve stratejik ROI

- Lojistik Bağımsızlık: Kurulan "Hidrojen Hub"ları sayesinde, stratejik hava köprüleri (airlift) dış kaynaklı yakıt tankerlerine ihtiyaç duymadan, su ve yenilenebilir enerjiyle yerinde üretilen yakıtla kesintisiz sürdürülebilir (Sells, 2021).

- Termal İmza ve Beka: Hidrojen yakıt hücreleri, binlerce derecelik jet egzoz sıcaklığına kıyasla çok daha düşük ısılarda çalışır. Bu durum, uçağın kızılötesi (IR) güdümlü füzelere karşı görünürlüğünü radikal şekilde azaltarak beka kabiliyetini artırır. Enerji sistemlerinin performansı üzerinde sıcaklığın belirleyici etkisi, deneysel ve istatistiksel yöntemlerle farklı mühendislik uygulamalarında ayrıntılı biçimde incelenmektedir (Kagitci & Neseli, 2025).

- Uçan Güç İstasyonu: Devasa yakıt hücresi kapasitesi, uçağı havada yüksek enerjili lazer silahları veya yoğun elektronik harp (EW) sistemlerini besleyebilecek mobil bir jeneratöre dönüştürür (Jacobson vd., 2021).

Stratejik kapanış: platformlar arası senkronizasyon

Bu analiz serisi boyunca incelenen tanklar, lokomotifler, helikopterler ve uçaklar; kurulan yerli hidrojen mikroşebekesi ve "Energy Everywhere" altyapısında birleşmektedir. Bu senkronizasyon, ordunun fosil yakıtla olan lojistik bağımlılığını sona erdirerek tam operasyonel özgürlük sağlar.

Deniz araçları: açık deniz lojistiği ve enerji taşıyıcıları

Deniz araçları, askeri lojistik zincirinin en ağır ve en uzun menzilli halkasını oluşturur. Bu platformlarda temel zorluk, kütleden ziyade haftalarca süren operasyonel devamlılık için gereken devasa enerji hacmini yönetmektir.

Teknik simülasyon: lojistik kargo gemisi (lsv sınıfı)

Deniz araçlarında "Hacimsel Ceza" (Volume Penalty), geminin draft (su çekimi) ve stabilite dengesini bozmadan optimize edilmelidir:

- BE Varyantı: Bataryalar, açık deniz operasyonları için gereken enerji yoğunluğunu henüz karşılayamamaktadır. Ancak liman içi devriye botları, çıkarma gemilerinin "son kilometre" (last-mile) manevraları ve otonom su altı araçları (AUV) için en verimli çözümdür.
- HFC Varyantı: Büyük ölçekli kargo gemileri için Sıvı Hidrojen (LH2) tek gerçekçi karbon nötr alternatiftir. Hidrojenin gerektirdiği %19-21 oranındaki hacim artışı, gemi ambarlarının veya üst güverte yapısının yeniden tasarlanmasıyla kompanse edilebilir (Jacobson vd., 2021). (Tablo 12).

Tablo 12. Lojistik Kargo Gemisi

Özellik	Mevcut Motor / Gas Oil	(Dizel Marine	BE Projeksiyonu)	(Batarya	HFC Projeksiyonu)	(Hidrojen
Enerji Depolama Kapasitesi	Çok (Tonlarca yakıt)	Yüksek	Düşük (Kısa mesafe/Kıyı operasyonları)		Orta-Yüksek ile)	(LH2
Kütle Etkisi	Standart balast görür)	(Yakıt görevi)	Aşırı Ağır taşıma düşürür)	(Batarya kütle kapasitesini)	Yönetilebilir hidrojen sistemi)	(Hafif
Operasyonel Süre	30+ Gün		1-2 Gün (Maksimum)		15-20 Gün	
Tahrik Tipi	Dizel-Elektrik veya Tahrik	Doğrudan	Tam Elektrikli Motorlar		HFC + Elektrikli Motorlar	

Enerji taşıyıcı devrimi: hidrojen-amonyak hibridizasyonu

Açık deniz lojistiğinde hidrojenin düşük hacimsel yoğunluğunu aşmak için Amonyak (NH₃) stratejik bir enerji taşıyıcı olarak öne çıkmaktadır:

- Amonyak Taşıyıcı: Amonyak, hidrojenle daha yüksek hacimsel enerji yoğunluğuna sahiptir ve kriyojenik gereksinimleri daha düşüktür.
- On-board Cracking: Gemi içindeki bir "cracker" ünitesi ile amonyak tekrar hidrojene dönüştürülerek yakıt hücrelerini besleyebilir. Bu yöntem, depolama hacmini küçültürken operasyonel menzili iki katına çıkarır (Jacobson vd., 2021)

Taktiksel getiriler ve "yüzen enerji santrali" rolü

- **Akustik Gizlilik:** Elektrikli tahrik sistemleri, geminin su altı akustik imzasını radikal şekilde düşürür. Bu durum, özellikle çıkarma operasyonlarında düşman sonar ağları ve akustik mayınlara karşı beka kabiliyetini artırır.

- **Operasyonel ROI:** Hidrojenli kargo gemileri, kıyıya yanaştıklarında karadaki birlikleri, sahra hastanelerini veya İHA sistemlerini besleyebilecek "mobil enerji santralleri" olarak görev yapar. Bu, hareket alanında sabit altyapı kurma ihtiyacını ve maliyetini minimize eder (Sells, 2021).

Limana bazlı mikroşebeke entegrasyonu

Deniz lojistiği, "Mavi-Yeşil Lojistik Hub"ları aracılığıyla demiryolu ve havacılık altyapısıyla birleşir:

- **Offshore Üretim:** Deniz üstü rüzgar türbinlerinden elde edilen elektrikle limanda yerinde hidrojen üretimi sağlanır.
- **Cold Ironing:** Gemiler limandayken hidrojen mikro şebekesinden beslenerek emisyonu ve gürültüyü sıfırlar, motor ömrünü uzatır (*Jacobson vd., 2021*).

Final özeti: karşılaştırmalı stratejik ROI ve politika önerileri

Bu çalışmada analiz edilen tüm platformlar (Tank, Lokomotif, Uçak, Helikopter ve Gemi) için elde edilen veriler, ordunun BE ve HFC sistemlerine geçişinin yalnızca çevresel bir hedef değil, "Askeri bir Devrim" olduğunu göstermektedir(Tablo 13).

Tablo 13. Karşılaştırmalı Stratejik ROI ve Politika Önerileri

Platform	En Uygun Teknoloji	Temel Kazanım	ROI Süresi
Kara Araçları	BE / HFC	Sessiz İzleme & Düşük Termal İz	5-7 Yıl
Demiryolu	HFC (LH2)	Lojistik Bağımsızlık & Yüksek Tork	7-10 Yıl
Havacılık	HFC (LH2)	Stratejik Hava Köprüsü & Beka	15+ Yıl
Deniz Araçları	HFC / Amonyak	Yüzen Enerji Santrali & Akustik Gizlilik	10-12 Yıl

Stratejik Sonuç ve Tavsiyeler

1. **Lojistik Güvenlik:** "Yerinde Üretim" (In-situ production) konsepti, yakıt tedarik zincirine yönelik saldırılardaki personel ve ekipman kaybını teorik olarak sıfıra indirir.

2. Taktik Üstünlük: Akustik ve termal imzaların düşürülmesi, asimetrik harp ortamında görünmezlik ve hayatta kalma oranını artırır.

3. Enerji Bağımsızlığı: Ordunun fosil yakıtla olan bağımlılığının sona ermesi, ulusal enerji güvenliğinin en stratejik kalesini oluşturur (*Jacobson vd., 2021*).

TARTIŞMA

Bu çalışma, askeri platformların konvansiyonel içten yanmalı motorlardan (ICE), Bataryalı Elektrikli (BE) ve Hidrojen Yakıt Hücresel (HFC) sistemlere geçişinin sadece bir yakıt değişimi değil, köklü bir operasyonel paradigma değişimi olduğunu kanıtlamaktadır. Elde edilen bulgular, özellikle ağır platformlar ve uzun menzilli görevler için literatürde süregelen "dönüştürülemez" algısını teknik verilerle revize etmektedir.

Güç-ağırlık oranı (PWR) ve hareket çevikliği

Analiz edilen yedi kritik teknolojinin projeksiyonları, elektrik motorlarının sunduğu yüksek PWR (2.5-4.5 kW/kg mevcut yerli kapasite) değerlerinin, manevra harbinde zırhlı araçlara (KİRPİ, ALTAY vb.) ICE sistemlerine kıyasla daha yüksek bir ivmelenme kazandırdığını göstermektedir. Bu durum, "ateş ve hareket" prensibinde taktiksel bir üstünlük anlamına gelir. Ancak, sabit kanatlı turbofan uçaklarda (KAAN, HÜRJET) İtke-Ağırlık Oranı (TWR) dengesinin korunması, hidrojenin kütleli avantajına rağmen en zorlu mühendislik bariyeri olarak kalmaya devam etmektedir. Elektrikli ve hibrit askeri platformlarda ağırlık azaltımı amacıyla kullanılan polimer esaslı kompozitlerin mekanik bütünlüğü, üretim süreçlerinden önemli ölçüde etkilenmektedir (Kagitci & Tarakcioglu, 2016).

Enerji yoğunluğu ve tasarım paradoksu

Simülasyon çıktıları, BE sistemlerinin ana muharebe tanklarında kütleyi kabul edilemez düzeylere (80+ ton) çıkardığını doğrulamaktadır. Buna karşın, Sıvı Hidrojen (LH2) sistemleri, mevcut fosil yakıt (FF) sistemine en yakın kütle ve menzil dengesini sunan yegane alternatiftir. Burada aşılması gereken temel engel, hidrojenin düşük hacimsel yoğunluğunun yarattığı "hacim cezasıdır". Havacılıkta bu durum, geleneksel tasarımlar yerine Harmanlanmış Gövde (Blended Wing Body -

BWB) gibi radikal aerodinamik revizyonları bir seçenekten ziyade mühendislik zorunluluğuna dönüştürmektedir.

Lojistik güvenlik ve "hayat kurtarma" potansiyeli

Tartışmanın en stratejik boyutu, enerjinin hareket alanında yerel kaynaklarla üretilmesidir. Literatürde "1'e 7" yakıt nakil oranı (bir birim yakıtı cepheye ulaştırmak için yedi birim yakıt harcanması) olarak bilinen lojistik zafiyet, fosil yakıt bağımlılığının en büyük riskidir. Mikroşebekeler ve yerinde hidrojen üretimi (in-situ production), lojistik konvoylara olan bağımlılığı keserek personel zayıatını azaltma potansiyeline sahiptir. Bu, Türkiye'nin sınır ötesi operasyon noktalarındaki bekâ kabiliyetini doğrudan artıracaktır.

Emisyon azaltımı ve türkiye'nin 2053 hedefleri

Emisyon projeksiyonları, TSK envanterinin dekarbonizasyonunun Türkiye geneli için yaklaşık 500.000 binek aracın trafikten çekilmesine eşdeğer bir çevresel etki yarattığını göstermektedir. Bu veri, ordunun sadece bir savunma gücü değil, aynı zamanda ulusal "Yeşil Kalkınma" hedeflerinin teknolojik öncüsü (technological driver) olabileceğini kanıtlamaktadır. 2011-2024 yılları arasındaki dalgalanmalar operasyonel tempoyla korele iken, BE ve HFC sistemleri bu bağımlılığı kopararak "emisjonsuz operasyon" dönemini başlatacaktır.

Finansal analiz ve yatırım getirisi (ROI)

Dönüşümün başlangıç maliyetleri (CapEx) yüksek olsa da, operasyonel süreçteki bakım tasarrufu (%40-60) ve yaşam döngüsü maliyetindeki (LCC) düşüş, yatırımın 7-10 yıl içinde kendini amorti edeceğini göstermektedir. Elektrikli sistemlerin mekanik sadeliği ve hareketli parça sayısının azlığı, TSK gibi devasa filolarda yedek parça ve bakım lojistiğini radikal şekilde basitleştirecektir.

Stratejik ve taktiksel üstünlükler

Emisyon azaltımının ötesinde, BE ve HFC sistemlerinin sağladığı akustik ve termal gizlilik, "sessiz sızma" operasyonları için kritik bir avantaj sunmaktadır. Ayrıca, hidrojenli uçakların "uçan jeneratör" kabiliyeti sayesinde Yönlendirilmiş Enerji Silahları (Lazer) veya güçlü Elektronik Harp (EW) sistemlerini besleyebilmesi, geleceğin dijital savaş alanında Türkiye'ye teknolojik üstünlük sağlayacaktır.

Teknolojik bariyerler ve BOP bileşenleri

Son olarak, 21.000 Wh/kg gibi yüksek teorik hidrojen değerlerine odaklanırken, Sistem Destek Bileşenleri (BOP) ağırlığı göz ardı edilmemelidir. Soğutma sistemleri, pompalar ve basınç valfleri toplam sistem ağırlığının %15-%25'ini oluşturabilmektedir. Yerli projelerde bu yan bileşenlerin minyatürize edilmesi, sistemin toplam verimliliğini belirleyen nihai faktör olacaktır.

SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışma; kara, hava ve deniz askeri platformlarının tam elektrifikasyonu ve hidrojen dönüşümü üzerine yapılan en kapsamlı teknik analizlerden birini sunmaktadır. Elde edilen veriler, gerçekleştirilen simülasyonlar ve Türkiye'nin 2053 Net Sıfır vizyonu ışığında aşağıdaki temel sonuçlara ulaşılmıştır:

Teknik dönüşümün mümkünatı ve performans dengesi

Geleneksel "askeri platformlar dönüştürülemez" görüşünün aksine; menzil, kütle, hacim ve PWR/TWR gibi kritik performans parametrelerinin, sistem düzeyinde bir tasarım optimizasyonu ile korunabildiği saptanmıştır. Özellikle Tablo 1'de belirtilen teknik eşikler, hidrojen yakıt hücreli (HFC) sistemlerin ağır platformlarda (tanklar, stratejik nakliye uçakları ve gemiler) bataryalı elektrikli (BE) sistemlere göre çok daha sürdürülebilir bir kütle-menzil dengesi sunduğunu kanıtlamaktadır(Tablo 14).

Tablo 14. Teknolojik Kırılma Noktaları ve Hedef Değerler (2025-2035)

Araç Tipi	Teknoloji	Kırılma Noktası (Hedef)	Kritik Parametre	Dönüşüm Potansiyeli
Zırhlı Araç (4x4)	BE	320 Wh/kg	Batarya Enerji	Yüksek
Muharebe Tankı	HFC	2,8 kW/kg	Yakıt PWR	Orta
Nakliye Uçağı	HFC (LH2)	3.500 Wh/L	Hacimsel Yoğunluğu	Kritik Enerji (BWB Şart)
Kargo Gemisi	HFC / NH ₃	< %12 Hacim Kaybı	Depolama Verimliliği	Yüksek

Operasyonel üstünlük ve lojistik bağımsızlık

Dönüşümün en kritik kazanımı çevresel değil, operasyoneldir. Harekat sahasında yerinde (in-situ) enerji üretimi, "yakıtın tam yüklü lojistik maliyetini" ve buna bağlı personel riskini minimize etmektedir. TSK'nın operasyonel derinliği göz önüne alındığında, fosil yakıt ikmal hatlarından bağımsızlık, ordunun bekâ kabiliyetini ve manevra alanını radikal şekilde genişletecektir. Ayrıca BE ve HFC sistemlerinin sunduğu akustik ve termal gizlilik, muharebe sahasında tespit edilebilirliği azaltan devrimsel bir taktik avantajdır.

Hacimsel zorluklar ve yeni tasarım paradigması

Çalışma, hidrojenin düşük hacimsel yoğunluğu nedeniyle araç hacminde meydana gelen %19 ile %29 arasındaki artışı en büyük tasarım kısıtı olarak tanımlamaktadır. Bu durum, geleceğin askeri araçlarının mevcut geometrilerle değil, Harmanlanmış Gövde (BWB) ve modüler zırh tasarımları gibi yeni mimari yaklaşımlarla inşa edilmesini zorunlu kılmaktadır. Geleneksel "tube-and-wing" uçak tasarımlarının veya klasik gemi formlarının yerini, enerji depolama odaklı yeni geometriler almalıdır.

Emisyon ve sürdürülebilirlik vizyonu

Türkiye özelinde gerçekleştirilen projeksiyonlar, askeri filonun dekarbonizasyonunun ulusal ölçekteki devasa etkisini doğrulamaktadır. Aşağıdaki tablo, bu dönüşümün Türkiye'nin iklim hedeflerindeki yerini somutlaştırmaktadır: (Tablo 15).

Tablo 15. TSK Envanteri Tahmini Emisyon ve İyileşme Potansiyeli Platform Grubu
Toplam Sera Gazı (MtCO₂e) Binek Araç Eşdeğerliği (Adet)

Platform Grubu	Toplam Sera Gazı (MtCO ₂ e)	Binek Araç Eşdeğerliği (Adet)
Kara Araçları	1,524	~346.000
Hava Araçları	0,92	~209.000
Deniz Araçları	0,333	~75.000
TOPLAM	2,777	~630.000

Bu hamle, Türkiye'nin 2053 Net Sıfır emisyon hedeflerine ulaşmasında savunma sanayiini sadece bir kullanıcı değil, "teknolojik lokomotif" konumuna taşıyacaktır.

Gelecek projeksiyonu ve stratejik öneriler

Dönüşümün tam başarısı için aşağıdaki stratejik adımların atılması önerilmektedir:

- Yerli Ar-Ge: Katı hal bataryaları, yüksek spesifik güçlü PEMFC sistemleri ve sıvı hidrojen (LH2) depolama teknolojilerine yönelik yatırımlar "Milli Teknoloji Hamlesi" kapsamına alınmalıdır.
- Hidrojen Hub'ları: Askeri limanlar, demiryolu istasyonları ve hava üsleri, yenilenebilir enerji kaynaklarıyla entegre "Hidrojen Hub'ları" olarak yeniden tasarlanmalıdır.
- Standardizasyon: NATO ve müttefik güçlerle enerji bir arada çalışabilirliği (interoperability) standartları geliştirilmelidir.

Özetle; askeri araçlarda BE ve HFC sistemlerine geçiş, sadece iklim kriziyle mücadelenin bir parçası değil, aynı zamanda muharebe sahasında sessiz, lojistik olarak bağımsız ve teknolojik olarak üstün bir güç olmanın anahtarıdır. Türkiye, savunma sanayiindeki yerlilik ivmesini bu alana kanallandırmakla küresel savunma doktrinini yeniden şekillendirme potansiyeline sahiptir.

KAYNAKÇA

- Bouton, T. J., et al. (2021). Assessment of hydrogen fuel cells for high-thrust-to-weight aviation applications. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46, 1–15.
- Bouton, T. J., et al. (2021). Liquid hydrogen fuel systems for long-range aircraft: A weight and volume analysis. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(55), 1–20.
- Chau, K. T. (2021). Advanced propulsion systems for heavy-duty military vehicles. *Proceedings of the IEEE*, 109(6), 963–985.
- Chau, K. T. (2021). Energy storage systems for electric vehicles. *Proceedings of the IEEE*, 109(6), 941–962.
- Coşar, E., Terzioğlu, H., & Yalçın, G. (2020). Taşıtlarda kullanılan porya ve porya üzerine düşen kuvvetlerin analizi. In S. Neşeli & A. C. Ağacayak (Eds.), *Elektrikli araçlara genel bakış 1* (Bölüm 2). İKSAD Yayınları. ISBN 978-625-7687-47-8
- Dursun, A. E., Terzioğlu, H., Yalçın, G., Ağacayak, A. C., & (2017). Yer altı kömür ocaklarında zararlı gazların tespiti için yeni bir erken uyarı sisteminin geliştirilmesinin önemi. *VI. International Vocational Schools Symposium* (Tam Metin Bildiri/Sözlü Sunum).
- Dursun, A. E., Terzioğlu, H., Yalçın, G., Selek, M., & Çalkaya, M. (2017). Yeraltı kömür ocaklarında metan (CH₄) gazının tespiti için yeni bir erken uyarı sisteminin geliştirilmesi. *Uluslararası Maden İşletmelerinde İşçi Sağlığı ve İş Güvenliği Sempozyumu 2017*, 534–552.
- Gray, S. S. (2021). Decentralized energy production for resilient military logistics. *Energy Policy*, 158, 112543.
- Gray, S. S. (2021). Energy logistics in remote military operations. *Energy Policy*, 158, 112543.
- Gray, S. S. (2021). Energy logistics in remote military operations: Resilience through renewables. *Energy Policy*, 158, 112543.
- Güntürkün, R., Kitiş, Ş., & Apaydın, H. (2014). Hybrid Vehicle Design For Disabled And It S Control. *Journal Of Multidisciplinary Engineering Science And Technology (Jmest)*, 0–0.
- Güntürkün, R., & Güngör, E. (2022). Saving energy with timers. *International Journal of Energy Applications and Technologies*, 9(3), 81–86
- Hannan, M. A., et al. (2022). Fuel cell and battery hybrid systems for sustainable transportation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 162, 112450.
- Hannan, M. A., et al. (2022). Sustainability and carbon footprint of military vehicle fleets. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 162, 112468.
- Hoang, A. T., et al. (2022). Dual-use hydrogen infrastructure for defense applications. *Applied Energy*, 321, 119330.
- Hoang, A. T., et al. (2022). Technological solutions for hydrogen use in defense applications. *Applied Energy*, 321, 119330.
- Hoang, A. T., et al. (2022). Technological solutions for hydrogen use in marine applications. *Applied Energy*, 321, 119330.
- IPCC. (2021). *Climate change 2021: The physical science basis*. Cambridge University Press.
- Jacobson, M. Z. (2022). Low-cost solutions to global warming, air pollution, and energy insecurity. *Energy & Environmental Science*, 15(8), 3340–3360.
- Jacobson, M. Z., et al. (2021). Transitioning military bases and vehicles to 100% clean, renewable energy. *Energy Conversion and Management*, 245, 114603.
- Jacobson, M. Z., et al. (2021). Transitioning military operations to 100% clean, renewable energy. *Energy Conversion and Management*, 245, 114603.
- Kagitci, Y. C., & Neseli, S. (2025). Determination of temperature effects on cortical bone milling using Taguchi method. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 1–17.

- 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.
- Mallapragada, D. S., et al. (2023). Decarbonizing heavy-duty transportation: A review of options. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 173, 113075.
- Mauro, S., et al. (2022). Distributed electric propulsion in military vertical lift: A review. *IEEE Access*, 10, 1–18.
- Mauro, S., et al. (2022). Electrification of military land vehicles: A review. *IEEE Access*, 10, 65234–65251.
- Mirjafarli, S., Terzioğlu, H., & Yalçın, G. (2021). 2 kW 72 V dış rotorlu hub motor tasarımı. In H. Terzioğlu & G. Yalçın (Eds.), *Mühendislik alanında akademik çalışmalar-1* (Bölüm). İKSAD Yayınları. ISBN 978-625-8423-15-0
- Parker, G. G. (2021). Design and control of hybrid-electric military vehicles. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 70(4), 3120–3134.
- Parker, G. G. (2021). Hybrid-electric and distributed propulsion for military platforms. *Journal of Defense Research and Engineering*, 4(1), 1–12.
- Schuller, R. D. (2022). Comparative analysis of power-to-weight ratios in electric vs. diesel combat platforms. *Journal of Power Sources*, 510, 230384.
- Schuller, R. D. (2022). Power-to-weight ratio optimization for electric combat vehicles. *Journal of Power Sources*, 510, 230384.
- Schuller, R. D. (2022). Thermal and acoustic signature reduction in electric combat vehicles. *Defense Technology*, 18, 412–425.
- Schuller, R. D. (2022). Uncertainty quantification in power-to-weight ratio models for electric combat vehicles. *Journal of Power Sources*, 510, 230390.
- Sells, J. T. (2021). Structural and weight constraints in military vehicle electrification. *Journal of Terramechanics*, 98, 45–57.
- Sells, J. T., & Foster, J. E. (2022). Energy storage requirements for electrified military ground vehicles. *Journal of Power Sources*, 520, 230852.
- Terzioğlu, H., Yalçın, G., & Kısa, M. (2019). Servomotorun SCADA ile kontrolü. *European Journal of Science and Technology*, 428–435. <https://doi.org/10.31590/ejosat.638394>
- Thomas, J. P. (2022). Logistics resilience through decentralized energy production in conflict zones. *Journal of Defense Management*, 12(2), 1–14.
- Thomas, J. P. (2022). The energy-logistics burden: A study of fuel consumption in deployed operations. *Journal of Defense Analytics*, 12(4), 201–215.
- Whittingham, M. S. (2021). Lithium batteries and the future of energy storage. *Nature Reviews Materials*, 6(4), 256–270.
- Yalçın, G., Neşeli, S., & Terzioğlu, H. (2019). Drone'lara genel bir bakış. In M. Turhan (Ed.), *Mühendislik alanında yeni ufuklar* (Bölüm). Gece Akademi. ISBN 978-605-80229-1-1
- Yalçın, G., Terzioğlu, H., Neşeli, S., & Ağacayak, A. C. (2019). Tarımsal ilaçlama için drone tasarımı. *1. Ulusal Mühendislikte Bilimsel ve Mesleki Çalışmalar Kongresi (UMUH BILMES 2019)*, 15–20.
- Zhang, X., et al. (2021). Power density limits of electric machines for aviation applications. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 68(7), 5565–5576.