aselsan

GÜVEN VEREN TEKNOLOJİ

ISSN 1300-2473

SAYI 123
EYLÜL 2026

DERGİ

GELECEĞİN HAREKAT ALANI VE TEKNOLOJİLERİ

aselsan
TÜRK SİLAHLI KUVVETLERİNİ GÜÇLENDİRME VAKFI'nın bir kuruluşudur.

Birliktelik

Birliktelik değerimizin ASELSAN kültüründeki karşılığı:

- Her durumda birlikte sorumluluk üstleniriz.
- Birbirimizle her durumda dayanışma içinde oluruz.
- Ortamda bulunmayanın hakkını koruruz.
- Ekip amaçları için birbirimizi cesaretlendiririz.
- İş sonuçlarına katkı sağladığını düşündüğümüz davranışları takdir ederiz.
- Bölümler arası iş süreçlerinin uyumu için bilgiyi ve deneyimi paylaşır, iş birliği yaparız.
- Farklılıklara saygı gösterir, farklılıklardan sinerji yaratırız.

Güven

Güven değerimizin ASELSAN kültüründeki karşılığı:

- Söylediğimizi yapar, yaptığımızı söyleriz.
- Açık, net ve şeffaf iletişim kurarız.
- Verdiğimiz sözleri tutarız.
- İşleri zamanında ve tam olarak teslim ederiz.
- Hatayı kimin yaptığına değil, sorunun çözümüne odaklanırız.

Gelişim

Gelişim değerimizin ASELSAN kültüründeki karşılığı:

- Sürekli öğrenir ve kişisel gelişimimizin sorumluluğunu alırız.
- Potansiyelimizi zorlayıcı hedeflerle keşfeder ve geliştiririz.
- Gelişim için geri bildirim alırız ve yapıcı geri bildirim veririz.
- İç ve dış paydaşlarımızın gelişimine katkı sağlarız.

Mükemmellik

Mükemmellik değerimizin ASELSAN kültüründeki karşılığı:

- Süreçlere uygun çalışır, süreçlerin etkinliğini sürekli izler ve iyileştirme önerileri sunarız.
- Kaynaklarımızı verimli kullanırız.
- Daha iyisi için bir işin nasıl yapılmayacağını değil nasıl yapılabileceğini konuşuruz.
- İşimizin izlenebilir, tekrar edilebilir olmasını sağlarız.
- Paydaşlarımızın ihtiyaç ve beklentilerini doğru analiz ve tespit eder, karşılıklı teyit ederiz.

Yenilik

Yenilik değerimizin ASELSAN kültüründeki karşılığı:

- Rutini sorgular, yeni fikirler üretir, yaratıcı çözümler deneriz.
- Değişim ihtiyacını anlar, destekler ve değişime öncülük ederiz.
- Hata yapmaktan korkmayız ve hataları bir öğrenme fırsatı olarak görürüz.
- Bireylerin farklı fikirlerini ifade etmelerini destekleriz.
- Dünyadaki yenilikçi yaklaşımları takip eder, proaktif bir anlayışla işlerimize yansıtırız.

GÜCÜMÜZ DEĞERLERİMİZ

Birliktelik Güven Gelişim Mükemmellik Yenilik

aselsan



KARADA

GÜVEN VEREN TEKNOLOJİ

Alanında en iyi ürünlerimiz ve oyun değiştirici teknolojilerimizle
tam bağımsızlık için varız!

aselsan

GELECEĞİN HAREKÂT ALANINDA TAM HAKİMİYET

Geleceğin harekât ortamı, yapay zekâ, otonomi, veri odaklı karar destek sistemleri ve ağ merkezli yapının birlikte oluşturduğu yeni bir güvenlik ekosisteminin ürünü haline geliyor.

Kara, hava, deniz, uzay ve siber alanların iç içe geçtiği bu yeni dönemde üstünlük; daha fazla platforma sahip olmaktan çok, doğru bilgiyi doğru zamanda işleyerek en hızlı ve en isabetli kararı verebilme yeteneğiyle sağlanacak.

Yapay zekâ destekli karar destek sistemleri, insansız hava, kara ve deniz araçları, sürü teknolojileri, elektronik harp, siber güvenlik, kuantum teknolojileri geleceğin harekât konseptlerinin temel yapı taşlarını oluşturuyor. Bu teknolojiler yalnızca operasyonel kabiliyetleri artırmakla kalmıyor; aynı zamanda caydırıcılık, esneklik ve sürdürülebilirlik açısından da yeni standartlar belirliyor.

Bu dönüşümün merkezinde ise entegrasyon yer alıyor. Farklı sensörlerden elde edilen verilerin tek bir ağ üzerinde birleştirilmesi, platformların gerçek zamanlı haberleşmesi geleceğin muharebe sahasında kritik avantaj sağlayacak. Böylece karar döngüleri kısalırken, tehditlere daha hızlı ve daha etkin karşılık verilebilecek.

Milli savunma sanayii açısından bakıldığında, teknolojik üstünlüğü korumanın yolu yalnızca mevcut ihtiyaçlara cevap vermekten değil, geleceğin harekât gereksinimlerini bugünden öngörerek yenilikçi çözümler geliştirmekten geçiyor. Yüksek katma değerli Ar-Ge çalışmaları, yerli ve millî teknolojiler ile güçlü ekosistem iş birlikleri, stratejik bağımsızlığı destekleyen en önemli unsurlar arasında yer alıyor.

Biz de ASELSAN olarak geleceğin güvenlik ortamını şekillendirecek kritik sistemleri, bu teknolojilerin harekât konseptlerine etkilerini ve savunma sanayiine sunduğu yeni fırsatları ele alıyoruz. Çünkü geleceğin savaş alanında başarının, değişimi öngören, teknolojiyi yönlendiren ve yeniliği sürekli kılan bir vizyon geliştirmekle mümkün olacağına inanıyoruz.

Uluslararası alandaki hakimiyet mücadelesinde, yeni nesil teknolojileri, otonom araçları, algoritmaları ve yapay zekâ tabanlı teknolojileri büyük bir avantaj olarak görüyoruz. Bu strateji doğrultusunda yarım asrı aşan birikimimizle çığır açıcı teknolojilere imza atıyoruz.

Dergimizin bu sayısında, geleceğin harekât ortamını şekillendirecek oyun değiştirici teknolojilerin gelişim hikâyelerine yakından tanıklık edeceksiniz. Aynı zamanda ülkemizin savunma alanındaki ihtiyaçlarına yönelik geliştirdiğimiz yenilikçi çözümleri, bu faaliyetlerin arkasındaki stratejik vizyonu ve geleceğe yönelik hedeflerimizi keşfetme fırsatı bulacaksınız.

Teknolojiyi yalnızca bugünün gereksinimlerine cevap veren bir unsur olarak değil, yarının güvenlik mimarisini inşa eden stratejik güç olarak ele alan bu sayımızı ilgiyle okuyacağınıza inanıyoruz.

Ahmet AKYOL
ASELSAN CEO



aselsan DERGİ

SAYI 123
EYLÜL 2026
ISSN 1300-2473

ASELSAN Elektronik Sanayi ve Ticaret Anonim Şirketi Adına Yayın Sahibi
AHMET AKYOL

Genel Yayın Yönetmeni
MEHMET ARTAR
Sorumlu Yazı işleri Müdürü
İBRAHİM BİLEKLİ
Yayın Kurulu
KADİR EMRE AKCİ
SERHAT BELEN
FIRAT DADAŞ
SEVCAN DAŞDAN
ESRA ERKAN
MUSTAFA ERKEK
RANA ERMİŞ
ECEM GÖZDE KARABULUT
TÜLAY KARADENİZ
İDİL EROL KIRIK
ÖVÜNÇ ÖZDEMİR
MEHMET BURAK SAAT
BARKIN SEYDİOĞULLARI
AYBÜKE TUFAN
AYBENİZ YİĞİT
Haber Merkezi
ERDİNÇ ÇELİKKAN
HATİCE MİRAY VURMAY GÜZEL
SİMGE KALKAN
Fotoğraf
İBRAHİM ÖZTÜRK
CEM TAŞKIN
Dağıtım
OSMAN ARDOĞAN
Tasarım
FİKRİ CUMHUR
MÜJDAT GÖÇERLİ
Yayın Tarihi
Sayı 123 - 07 EYLÜL 2026
Yayın İdare Adresi
ASELSAN Elektronik Sanayi ve Ticaret Anonim Şirketi
Mehmet Akif Ersoy Mahallesi İstiklal Marşı Caddesi, No: 16 Yenimahalle 06200, Ankara
Baskı Cilt
07 Eylül 2026
BAŞAK MATBAACILIK VE TANITIM HİZMETLERİ İTHALAT İHRACAT A.Ş
Macun Mah. Anadolu Bulv. Meka Plaza 5/7 Yenimahalle/Ankara 0312 397 16 17
Matbaa Sertifika No: 51529
Yayının Türü
Yerel Süreli Yayın



"Bir Ulusun asker ordusu ne kadar güçlü olursa olsun, kazandığı zafer ne kadar yüce olursa olsun, bir ulus ilim ordusuna sahip değilse, savaş meydanlarında kazanılmış zaferlerin sonu olacaktır. Bu nedenle bir an önce büyük, mükemmel bir ilim ordusuna sahip olma zorunluluğu vardır."



DEĞİŞEN SAVAŞ KONSEPTLERİNE ADAPTASYON
S/8



ÇELİKKUBBE'YE GİDEN YOL: KOMUTA-KONTROL EKOSİSTEMİNİN GELİŞİMİ
S/34



GELECEĞİN TANK VE ZIRHLI ARAÇ TEKNOLOJİLERİ
S/58

aselsan
TÜRK SİLAHLI KUVVETLERİNİ GÜÇLENDİRME VAKFI'nın bir kuruluşudur.

Dergide yayımlanan yazılardan, kaynak adı gösterilerek alıntı yapılabilir. Dergide yayımlanan yazılar yazarların kişisel görüşüdür. **ASELSAN** Elektronik Sanayi ve Ticaret Anonim Şirketini sorumlu kılmaz. **ASELSAN** Dergisi Basın Ahlak Yasasına uymayı taahhüt eder.

İÇİNDEKİLER

MODERN HARP SAHASINA BAKIŞ	6
DEĞİŞEN SAVAŞ KONSEPTLERİNE ADAPTASYON	8
ATEŞ DESTEĞİ AÇISINDAN MUHAREBE SAHASI DİNAMİKLERİNİN DÖNÜŞÜMÜ	20
ÇELİKKUBBE'YE GİDEN YOL: KOMUTA-KONTROL EKOSİSTEMİNİN GELİŞİMİ	34
HİBRİT GÖREV GRUBU: İDA'LARIN SAVAŞ GEMİLERİ İLE BİRLİKTE KULLANIMI	38
YENİ HAREKÂT ALANI: UZAY	48
GELECEĞİN TANK VE ZIRHLI ARAÇ TEKNOLOJİLERİ	58
TANKLARIN NEDEN MODERNİZASYONA İHTİYACI VARDIR?	66
KÜÇÜK DİL MODELLERİ	72
NÖROMORFİK HESAPLAMA	80
HİPERSONİK: GELECEĞİN HARBİNİ ŞEKİLLENDİREN HIZ	88
KUANTUM ALGILAMA: SAVUNMADA YENİ BİR HASSASİYET PARADİGMASI	98
İNSANSI ROBOTLAR	108
HYPERLOOP: MANYETİK LEVİTASYON VE LINEER MOTOR	118
KUANTUM SENSÖRLERİ: KONUMLANDIRMA, SEYRÜSEFER VE ZAMANLAMA	126
PLATFORMLARDAN KARAR ÜSTÜNLÜĞÜNE: GELECEĞİN HAREKAT ORTAMINI YENİDEN DÜŞÜNMEK	134



MODERN HARP SAHASINA BAKIŞ

Hızla gelişen teknoloji, artık hayatımızın her alanına etki eden ve her geçen gün etkisini arttıran önemli bir faktör. Bu bağlamda neredeyse her gün farklı bir alanda önemli bir teknolojik gelişmeye şahit oluyoruz.

Teknolojinin baş döndürücü bir hızla geliştiği bu dönemde, sivil inovasyonun savunma sanayii dinamiklerini domine etmeye başladığı kritik bir eşikteyiz. Yakın geçmişe kadar "çift kullanımlı" (dual-use) teknolojiler önce askeri laboratuvarlarda doğup sivile yayılırken, bugün bu akışın yön değiştirdiğine şahitlik ediyoruz.

Günümüzün modern harp sahası artık "çelik ve barut" devrinden "yazılım ve veri" odaklı bir yapıya geçişin somut çıktılarını sunuyor. Bu yeni ekosistemin en belirgin çıktısını da yapay zekâ (AI) ve transformer tabanlı modellerin karar alma döngülerine entegre edilmesiyle saniyeler mertebesine inen "tespit-teşhis-imha" süreçlerinde açıkça görebiliyoruz.

Savaş ortamı artık sadece fiziksel değil; elektronik harp, kuantum tabanlı şifreleme ve uzay tabanlı durumsal farkındalık sistemlerinin iç içe geçtiği çok boyutlu bir yapıya bürünmüş durumda.

Özellikle insansız sürü teknolojileri (İHA/İDA/İKA), geleneksel ağır zırhlı platformların yerini alarak maliyet etkin, asimetrik ve yüksek riskli görevleri otonom olarak icra eden unsurlar haline geldi. Böylece Kelly Johnson'un "Be Quick, Be Quiet, Be on Time" mottosuna artık "Be Asymmetric" de eklenmiş oldu.

Bu çerçevede günümüz savaşlarının; her bir unsurun birbirine bağlı olduğu "Savaş Nesnelerinin İnterneti" (IoBT) kavramıyla yönetilen, şeffaf, hiper-hızlı ve tamamen veri odaklı bir teknolojik platforma dönüşmüş olduğunu söylemek yanlış olmayacaktır.

Taha YÜCEL | Teknoloji ve Strateji Genel Müdür Yardımcısı



Bu dönüşüm sürecinde **TSYGMY** olarak bizler, bugün olduğu gibi gelecekte de **ASELSAN**'ı her daim öncü tutmak adına teknolojinin sadece takipçisi değil, yönlendiricisi olma vizyonuyla çalışmalarımıza büyük bir kararlılıkla devam edeceğiz.



DEĞİŞEN SAVAŞ KONSEPTLERİNE **ADAPTASYON**

Libya ve Suriye İç Savaşları, 2. Karabağ Savaşı, 2. Ukrayna Savaşı (24 Şubat 2022), Gazze, Hizbullah-Lübnan ve İsrail-İran Savaşları savunma ile ilgili çığır açan yeniliklerin adaptasyon olarak sahada izlendiği pek çok örnek sunuyor. Bunlar arasında dördüncü yılını tamamlamak üzere olan Ukrayna savaşının açık kaynaklarda detaylı olarak yer alan; insansız araçlar, hava savunma, erken ihbar ve komuta kontrol sistemleri, elektronik harp ile ilgili yenilikler ve sensör füzyonu, yapay zekâ kullanımı konularındaki adaptasyonları aynı zamanda asimetrik çözümleri de içeriyor.

Savaş sahasında yeniliklerin faydalı ömrünün üç aya kadar düştüğü Ukrayna'da savaşan ülkelerin akademisyenleri, start-up firmaları, askerler ve yurtiçi ve yurtdışındaki gönüllüler karşı tarafın sahaya getirdiği yeniliklere karşı en kısa zamanda önlem alıp etkisiz hale getirmek, daha iyisini veya en azından benzerini geliştirmek için yarışıyor.

Erdal ÇAKMAK | ASELSAN Yönetim Kurulu Danışmanı



Askeri anlamda “**Adaptasyon**”, silahlı kuvvetlerin değişen ortamlar, tehditler ve yeni operasyonel zorluklar karşısında taktiklerini, organizasyonlarını ve teknolojilerini değiştirerek uyum sağladığı süreçleri ve stratejileri ifade ediyor. “**İnovasyon**” barış zamanında, sorunları düşünmek için fırsat olduğunda ortaya çıkarken, “**Adaptasyon**” savaşın gelişimi ve sonuçları hakkında geri bildirim olduğunda ve kazanmak (veya kaybetmemek) için değişikliklerin yapılması gerektiğinde, çatışma sırasında meydana geliyor.



İnsansız Hava Araçları

Libya'da ve Suriye'nin Kuzeyinde düşman hava savunma unsurları ve savaş uçaklarına rağmen, elektronik harp desteği ile çok sayıda İHA/SİHA'nın, tank ve zırhlı araçlara, hatta hava savunma sistemlerine karşı koordineli taarruzlar yapması başarılı adaptasyon örnekleri arasında sayılıyor.

Karabağ savaşında da İHA'lar keşif/gözetleme kabiliyetleri ve düşman mevzilerine, tank ve zırhlı araçlara, hava savunma unsurlarına yaptıkları taarruzlarla savaşın kısa süre içinde kazanılmasında önemli rol oynadı. Ukrayna savaşında İHA ve SİHA'lar keşif/gözetleme görevi ile birlikte, lazer güdümlü mühimmat atarak ilerleyen Rus araç konvoylarını durdurdu ve ülkenin işgal edilmesini önledi. Karadeniz'de Yılan Adası savaşında SİHA'lar adadaki hava savunma sistemi ile birlikte ilk defa silahlı deniz hedeflerini ve bir helikopteri vurarak imha etti. SİHA'lar gayri-nizami harp dışında, denk askeri güçlerin savaşlarına da uyum sağlayacaklarını gösterdi.

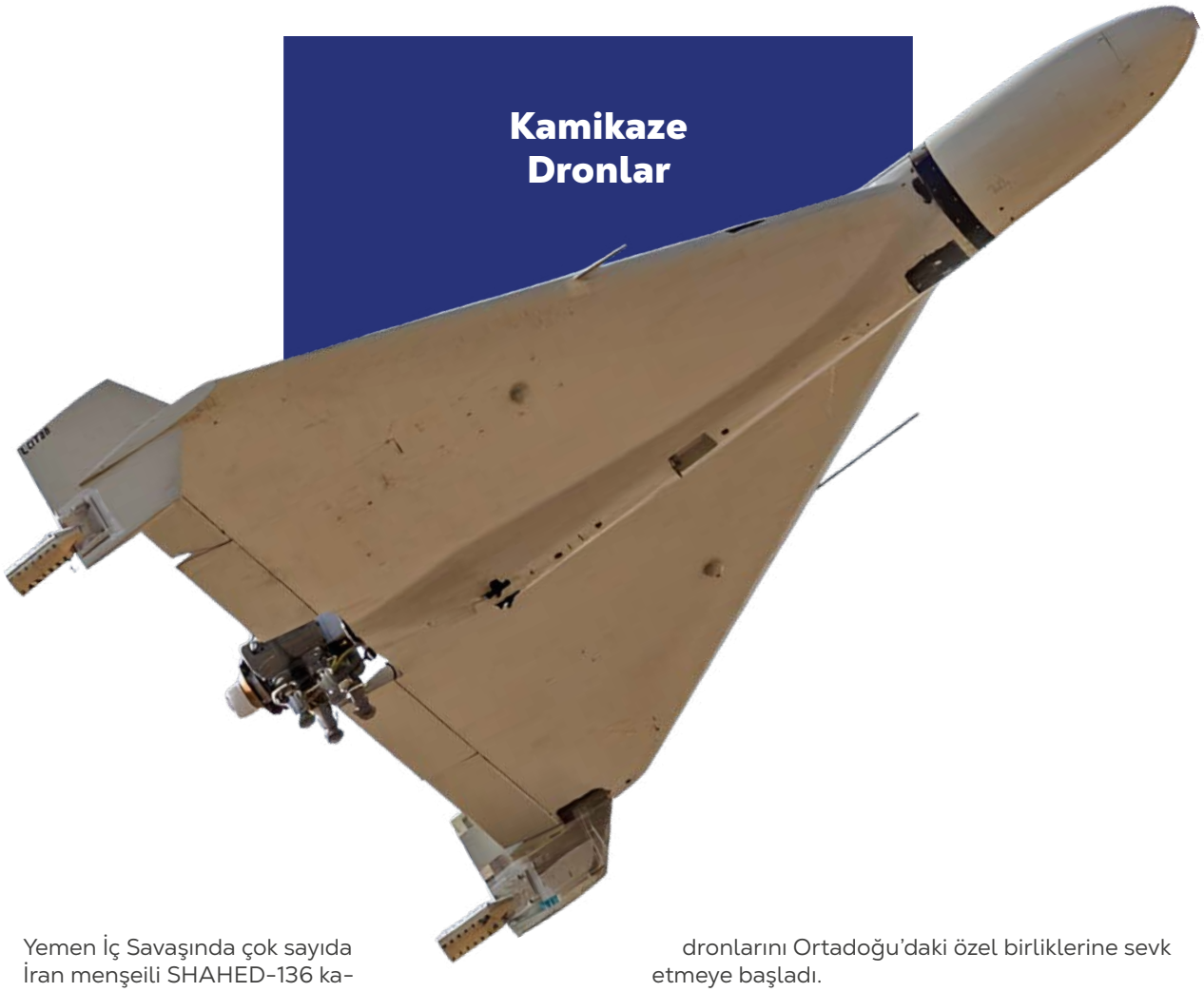


Hava Savunma

Ukrayna'nın hava savunma kabiliyeti savaşın "Yıldırım Savaşı"ndan "Yıpratma Savaşı"na dönüşmesinde önemli rol oynadı; savaşın ilk günlerinde Rus hava gücü çok üstün olsa da, Ukrayna elindeki hava savunma bataryalarını sık hareket ettirerek yerlerinin tespit edilip imha edilmelerini önledi. Pusu kuran hava savunma bataryaları Rus savaş uçaklarını, HİK uçaklarını ve stratejik bombardıman uçaklarını düşürdü. Ukrayna hava savunması daha sonra ABD ve Avrupa menşeli hava savunma sistemleri ile takviye edildi ancak çeşitlenen hava savunma füzelerinin tedarikinde yaşanan sıkıntılar Ukrayna'yı "FrankenSAM" diye adlandırılan eski hava-hava füzelerinin mevcut hava savunma sistemlerine adaptasyonu gibi asimetrik çözümlere yönlendirdi.

Hava ve füze savunma sistemlerinin füze tehditlerini önleme başarısı karşısında Rusya, füzelerine uçuşlarının terminal safhasında manevra yapma ve karşı tedbirler bırakma yetenekleri ekledi.

Kamikaze Dronlar



Yemen İç Savaşında çok sayıda İran menşeili SHAHED-136 kamikaze dron çok uzun mesafe kat edip beklenmedikleri yönden yaklaşıp petrokimya tesisleri, liman ve havaalanları gibi stratejik hedefleri vurarak hava taarruzunda yeni bir çığır açtı (2019). Rusya 2022 yılında İran'dan ithal ettiği ve daha sonra üretim tesisi kurarak seri üretimine geçtiği 1500+ km menzilli SHAHED-136/GERAN-2 kamikaze dronlar ile Ukrayna'da enerji santrallerini, enerji dağıtım altyapısını ve şehirleri hedef aldı. Geceleri kamikaze dronlar, seyir füzeleri ve yerden/uçaktan atılan balistik füzelerle yapılan hava taarruzlarında Ukrayna hava savunmasını şaşırtmak amacıyla daha düşük maliyetli, harp başlığı olmayan fakat radar izi bırakan GERBERA sahte hedef dronları da kullanılıyor. Kasım 2025'te 600 kadar kamikaze dron ve 36 füze ile Kiev şehrini hedef alan saldırıda, enerji şebekesinin vurulması sonucunda başkentin büyük kesiminde elektrik kesintileri meydana geldi.

SHAHED-136 ve varyantlarının sahadaki başarısını değerlendiren Ukrayna, ABD (LUCAS) ve Çin firmaları (M-9) da benzer kamikaze dronlar üretmeye başladı. ABD uydu haberleşme kabiliyeti ve elektro-optik sensörleri de eklediği LUCAS kamikaze dronlarını Ortadoğu'daki özel birliklerine sevk etmeye başladı.

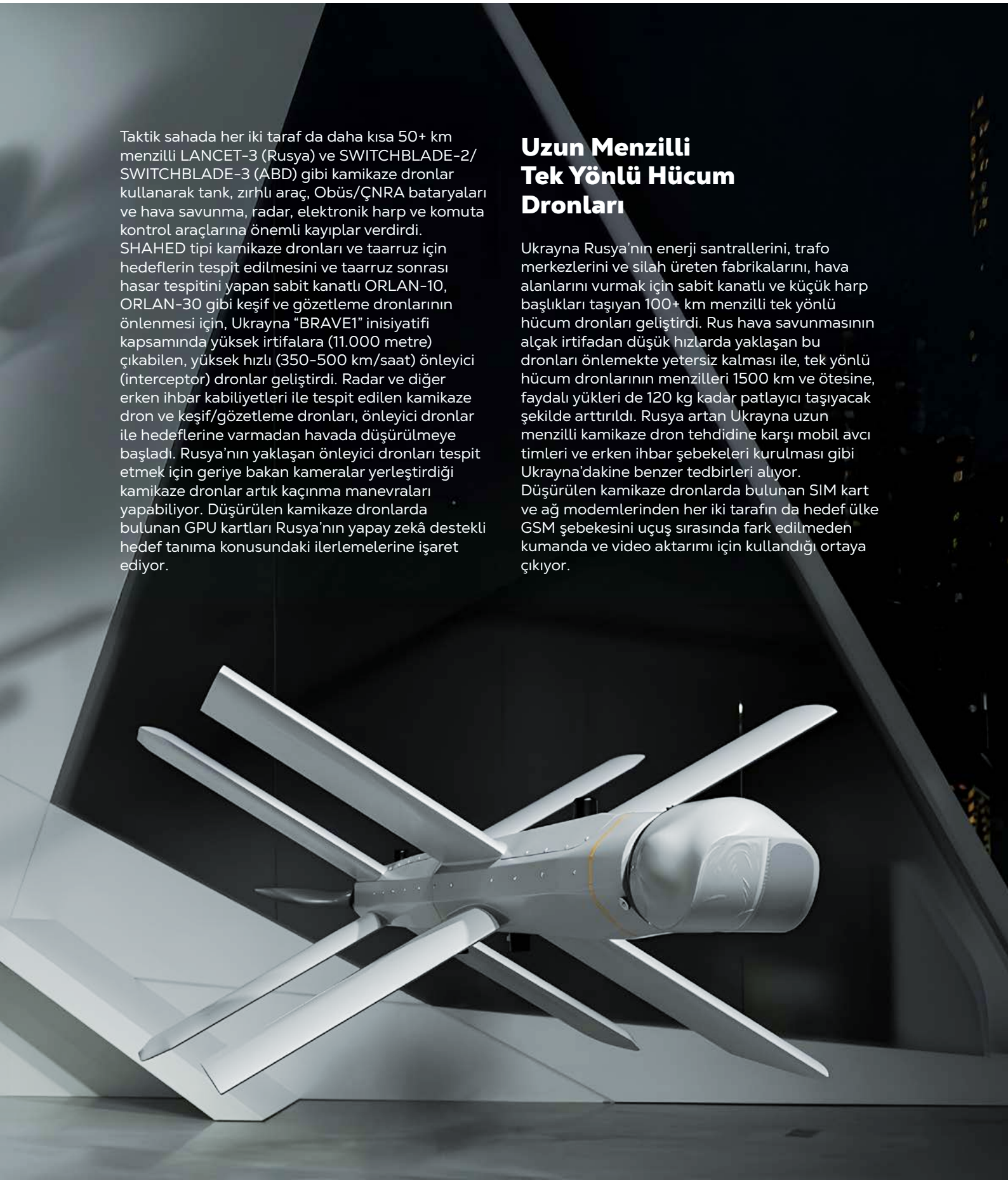
Ukrayna şehirleri ve altyapı üzerinde her gece tekrarlanan hava taarruzlarına karşı Sky Fortress, Zvook ve Fenek gibi akustik erken uyarı şebekeleri kurdu. 10.000'in üzerinde akustik sensörden gelen bilgiler yapay zekâ modellerinde kamikaze dron örnekleri ile eşleştirildiğinde GSM şebekesi üzerinden değerlendirme merkezlerine iletiliyor, sensör bilgileri birleştirilerek kamikaze dronun tipi, yaklaşma yönü, irtifası ve hız bilgileriyle hedef izleri oluşturuluyor. 500 USD maliyetli akustik sensörler, 5 km menzil ve 3000 metreye kadar yükseklikte uçan kamikaze dron ve seyir füzelerini tespit edebiliyor, mobil avcı timleri tespit edilen kamikaze dronları yolları üzerinde pusu kurarak kinetik silahlar ve sırttan atılan füzeler ile önlemeye çalışıyor.

Portatif radarlar ile de güçlendirilen önleme faaliyetine helikopter ve pervaneli uçaklar da katılmaya başladıktan sonra Rus kamikaze dronları R-60 hava-hava füzeleri taşımaya başladı, Rus ve ABD'li uzmanların Karabağ Savaşı sonrasında ortaya attıkları uzun süre havada kalabilen "hava mayını" öngörüsü gerçekleşti.

Taktik sahada her iki taraf da daha kısa 50+ km menzilli LANCET-3 (Rusya) ve SWITCHBLADE-2/ SWITCHBLADE-3 (ABD) gibi kamikaze dronlar kullanarak tank, zırhlı araç, Obüs/ÇNRA bataryaları ve hava savunma, radar, elektronik harp ve komuta kontrol araçlarına önemli kayıplar verdirdi. SHAHED tipi kamikaze dronları ve taarruz için hedeflerin tespit edilmesini ve taarruz sonrası hasar tespitini yapan sabit kanatlı ORLAN-10, ORLAN-30 gibi keşif ve gözetleme dronlarının önlenmesi için, Ukrayna "BRAVE1" inisiyatifi kapsamında yüksek irtifalara (11.000 metre) çıkabilen, yüksek hızlı (350-500 km/saat) önleyici (interceptor) dronlar geliştirdi. Radar ve diğer erken ihbar kabiliyetleri ile tespit edilen kamikaze dron ve keşif/gözetleme dronları, önleyici dronlar ile hedeflerine varmadan havada düşürülmeye başladı. Rusya'nın yaklaşan önleyici dronları tespit etmek için geriye bakan kameralar yerleştirdiği kamikaze dronlar artık kaçınma manevraları yapabiliyor. Düşürülen kamikaze dronlarda bulunan GPU kartları Rusya'nın yapay zekâ destekli hedef tanıma konusundaki ilerlemelerine işaret ediyor.

Uzun Menzilli Tek Yönlü Hücum Dronları

Ukrayna Rusya'nın enerji santrallerini, trafo merkezlerini ve silah üreten fabrikalarını, hava alanlarını vurmak için sabit kanatlı ve küçük harp başlıkları taşıyan 100+ km menzilli tek yönlü hücum dronları geliştirdi. Rus hava savunmasının alçak irtifadan düşük hızlarda yaklaşan bu dronları önlemekte yetersiz kalması ile, tek yönlü hücum dronlarının menzilleri 1500 km ve ötesine, faydalı yükleri de 120 kg kadar patlayıcı taşıyacak şekilde arttırıldı. Rusya artan Ukrayna uzun menzilli kamikaze dron tehdidine karşı mobil avcı timleri ve erken ihbar şebekeleri kurulması gibi Ukrayna'dakine benzer tedbirleri alıyor. Düşürülen kamikaze dronlarda bulunan SIM kart ve ağ modemlerinden her iki tarafın da hedef ülke GSM şebekesini uçuş sırasında fark edilmeden kumanda ve video aktarımı için kullandığı ortaya çıkıyor.





FPV Dronların Yükselişi

Ukrayna savaşı başlangıçta uzun cephe hattı boyunca topçu bataryalarının karşılıklı yoğun ateşlerine sahne oldu, Rusya ayda 50.000 – 60.000, Ukrayna tarafı da 15.000 – 20.000 obüs mermisi atıyordu. Ukrayna stoklarının hızla tükenmesi sorunu ile karşılaştığında, havan ve RPG roketatar mermilerini taşıyan FPV Dronlar ile Rus ilerlemesini durdurdu, FPV Dron pilotları dron saldırılarıyla tank, zırhlı araç, personel ve mühimmat taşıyan nakliye araçlarına ve topçu bataryalarına önemli kayıplar verdirdi. Ukrayna'nın aylık 30.000'i bulan yoğun FPV saldırıları sonucunda tanklar ve topçu/ÇNRA bataryaları cephe hattının gerisine çekilmek veya gizlenmek zorunda kaldı.

Küçük atölyelerde montajı yapıldığında 400 USD maliyeti olan FPV dronlar, sahada 1,5 - 2,5 kg'a kadar patlayıcı yükler eklenerek 5 - 15 km uzaklıktaki hedeflere gönderiliyor. Önce hemen tüm parçaları Çin'den ithal ederek başladığı FPV Dron üretiminde Ukrayna 2024'te yılda bir milyon dron üretim hedefini yakaladı, 2025'te ise dört milyon FPV dron üretilmiş olması bekleniyor. Ukrayna'da halen 200'den fazla dron üreten şirket var, FPV dron parçalarının yerlileştirilmesi devam ediyor. Rusya da karşı tarafı takip ederek hızla FPV dron üretimini artırıyor.

Ukrayna askeri istihbaratı "Örümcek Ağı" harekâtında, Rusya'da kamyonlar içine gizlediği 117 FPV Dron ile Rus askeri üslerine yaptığı saldırılarda 41 stratejik bombardıman uçağını yerde imha etti, zararın 7 milyar ABD Doları üzerinde olduğu tahmin ediliyor (01.06.2025). Ukrayna, yapay zekâ destekli hedef tanıma algoritmalarını Havacılık Müzesi'nde sergilenen Tu-95MS ve Tu-22M3 bombardıman uçakları üzerinde eğitti. Rusya'ya kaçak sokulan FPV dronlar kamyonlarla dört askeri hava üssünün yakınına getirildi.

Rus GSM şebekeleri üzerinden kontrol edilerek uçurulan FPV dronlar son safhada yapay zekâ desteği ile hedeflerini buldu. İsrail'in Haziran 2025 ayındaki hava saldırısı da benzer şekilde İran'a önceden taşınmış kamikaze dronların hava savunma sistemlerine saldırısı ile başladı.

Ukrayna zirai amaçlı tohum/ilaç gibi daha ağır yükler taşıyan dronlara küçük bombalar atacak düzenekler ve gece görüş kameraları ekleyerek geceleri Rus mevzilerine saldırılar düzenlemeye başladı. "Baba Yaga" adı verilen bombaatan dronlar da yüklerini arttıracak şekilde geliştiriliyor. Rusya da bomba ve mayın bırakan dronlar geliştiriyor.

Dronların görüş hattında RF haberleşme menzili ile kısıtlanan operasyon mesafesi, röle görevi yapabilen repeater dronlar ile uzatılıyor. Ukrayna ve Rusya yük taşıyan daha büyük dronlar ve sabit kanatlı İHA'lar ile çok sayıda FPV dronu karşı tarafın cephe gerisine indirerek 60 km'ye kadar derinlikte operasyon kabiliyetini elde etti.

FPV Dronlara Karşı Tedbirler

FPV dronların düşük maliyetlerine rağmen çok daha pahalı silah sistemlerine verdikleri zararlar sebebiyle, FPV dronların önlenmesi ve FPV dronlardan korunma tedbirleri tüm dünyada en çok üzerinde çalışılan konular arasına girdi. Aktif ve pasif koruma, elektronik, kinetik ve fiziki karşı tedbirler etkin menzillerinden çok birim angajman maliyetleri ile değerlendiriliyor.

FPV Dronların zarar vermesini önlemek için tank ve motorlu araçların, topların telden ağlar ve kafesler ile korunması en pratik ve maliyet etkin tedbirler arasına girdi. Lojistik destek için sık kullanılan yollar ve önemli merkezler tel kafesler ve balık ağları ile oluşturulan tüneller ile korunuyor.

Ukrayna'nın artan FPV dron saldırılarına karşı Rus Ordusu araçlar üzerine de dron tespit ve elektronik karıştırma ekipmanları yerleştiriyor. Çin'de, Rusya ve Ukrayna'da geliştirilip üretilen çeşitli tipte dron tespit cihazları yaklaşan dronları tespit ettiğinde uyarı vererek saklanma fırsatı verebiliyor. Askeri personel de üzerinde kişisel dron tespit/karıştırma cihazları taşıyor. Ukrayna FPV dron haberleşme frekanslarını sık değiştirerek tespit ve elektronik karıştırmayı zorlaştırıyor.

Rus ordusu 2023 yılı ilk aylarında fiber optik kumandalı FPV dronları kullanmaya başladı ve elektronik karıştırmadan etkilenmemesi sayesinde Kursk karşı saldırısında başarı kazandı. 15 km'den 60 km'ye kadar hazır sarılmış fiber optik bobinler Çin'den ithal edilebiliyor. Karıştırmadan etkilenmemesi dışında, emisyon yapmadığı için tespit edilemeyen ve RF haberleşmedeki görüş hattı kısıtlamalarından da etkilenmeyen fiber optik FPV dron kullanımında Ukrayna da Rusya'ya yetişmeye çalışıyor.

Otonomi

Haberleşme ve uydu navigasyonun etkin şekilde karıştırılması ve yanıltılması (spoofing) kamikaze ve FPV dronlar için alternatif çözümlerin öne çıkmasını sağladı. Her iki taraf da otonom navigasyon, hedef belirleme ve angajman ve istihbarat işleme için yapay zekâ algoritmalarını artan şekilde kullanmaya çalışıyor.

Rus GADFLY ve Ukrayna'nın SAKER dronları yapay zekânın hedef tespit ve teşhiste kullanıldığı sahadaki ilk FPV dron örnekleri oldu (2023). LANCET kamikaze dronun GPU kartları taşıyan bazı versiyonlarında görüntü bazlı navigasyon ve hedef tanıma algoritmaları kullanılıyor.

"Örümcek Ağı" harekâtında, 117 FPV Dronu 117 FPV pilotu uzaktan kontrol etmişti, çok sayıda dron ile sürü saldırısı yapmak için aynı sayıda dron pilotu gerekiyor. Hem Ukrayna hem de Rusya otonomi üzerinde çalışarak uçuş sırasında insan kumandası gerektirmeyen çözümleri geliştiriyor. Hedef tesbit/tanıma ve karıştırılabilen/yanıltılabilen GPS bağımlılığı olmayan görüntü tabanlı seyrüsefer algoritmaları da otonomi ile birlikte uzun menzilli tek yönlü kamikaze dronların, çok-rotorlu dronların ve İHA'ların kabiliyetleri arasında yer almaya başlıyor.





DRON ÜZERİNDE STARLINK ANTENİ

Havadan Atılan Kanatlı ve İtkili Mühimmat

Dron tehdidinden kurtulmak için topçu bataryalarının cephe gerisine çekilmesi ile, karada savaşan birlikleri desteklemek için uçaktan atılan uzun menzilli bombalar önem kazandı. Ukrayna dışarıdan yardım kapsamında verilen JDAM-ER kanatlı güdüm kitlerini ve SDB-I kanatlı bombaları Su-24 ve MiG-29 savaş uçaklarına entegre ederek yer hedeflerine karşı kullanmaya başladı. Rusya da UMPK serisi kanatlı güdüm kitlerini geliştirerek 250, 500, 1500 ve 3000 kg uçak bombalarını Su-34, Su-30SM ve Su-35S savaş uçaklarından atılan güdümlü uzun menzilli (60+ km) kanatlı bombalara dönüştürdü (2023). Rusya'nın 2024 yılında UMPK kanatlı güdüm kitlerinden 40.000 adet ürettiği, 2025 yılında da 70.000 adet üretilmesinin hedeflendiği biliniyor. 95 km menzilli UMPK-PD ve daha uzun menzilli turbo jet itkili kanatlı güdüm kitleri de sahada denenmeye başladı (2025).

Rus savaş uçakları karadaki birliklerin ilerleyişini desteklemek için her ay 3500 kadar kanatlı bomba atıyor. Şubat 2025'te NATO Müttefik Değişim Komutanlığı kanatlı bombaların önlenmesi ile ilgili yenilikçi çözümler yarışması düzenledi, yarışmayı kanatlı bombaların tespiti, teşhisi ve yörüngelerinin tespitini yapay zekâ algoritmaları ile yapan Alta Ares/Fransa firması kazandı. Video görüntülerini ve akustik sensörlerden gelen bilgileri değerlendiren yapay zekâ algoritmaları kanatlı bombanın düşeceği yeri kestirip elektronik karıştırma başlatılmasını ve dost birliklerin tedbir için erken uyarılmasını sağlıyor. Ukrayna kaynaklarında önleyici dronların da kanatlı bombalara karşı kullanılmaya başladığı ve başarılı olduğu yer alıyor.

Uydu Haberleşmesi

Keşif/Gözetleme uyduları ve yakın yörüngedeki haberleşme uyduları Ukrayna'nın savaşta beka kabiliyetini arttıran asimetrik avantajları arasında öne çıkıyor. Ukrayna müttefik ülkelerin sunduğu keşif/gözetleme imkanları dışında sivil/ticari amaçlı gözlem uydularından da bu konuda faydalanıyor. İsrail de İran'a yaptığı son hava saldırısı için uydulardan keşif imkanlarını değerlendirdi.

Savaşın başında Rusya'nın hava ve füze saldırıları ile askeri haberleşme altyapısını kaybeden Ukrayna Starlink uydu haberleşme terminalleri üzerinden stratejik haberleşme kabiliyetini yeniden kazandı. Starlink uydu haberleşmesine bağımlılık, Starlink kesintileri yaşandığında harekât kabiliyetinin büyük ölçüde kaybolmasına yol açabiliyor. Ukrayna'nın askeri haberleşme ve insansız araçların uzaktan güdümü için 20.000'den fazla Starlink uydu terminali kullandığı tahmin ediliyor. Starlink'in Ukrayna'nın savaş öncesi sınırlarını kapsayan hizmet alanında, Rus birlikleri de işgal ettikleri bölgelerde kaçak temin ettikleri Starlink terminallerini taktik haaberleşmede ve kamikaze dronların yönlendirilmesinde kullanıyor.

Ukrayna geliştirdiği kamikaze **İDA**'lar Rusya'nın Karadeniz Filosuna önemli kayıplar verdirdi (Mayıs 2023). **Kumanda ve görüntü aktarımında Starlink uydu terminallerini kullanan İDA**'lar Kırım, Karadeniz'in Kuzey ve Doğusunda Rus savaş gemilerine ve liman tesislerine, Kırım ile Rusya anakarasını birleştiren Kerç Köprüsü'ne saldırılar yapıyor.

İnsansız Deniz Araçları (İDA)

Rusya'nın Uçak ve helikopterlerle kamikaze İDA'ları önleme yapması karşısında Ukrayna İDA'lara hava savunma füzeleri yerleştirdi; 31 Aralık 2024'te bir Rus helikopteri, 03 Mayıs 2025'te de bir Rus Savaş Uçağı İDA'lardan atılan füzeler ile düşürüldü. Otonom hareket ve hedef tespit kabiliyeti olan daha küçük İDA'lar nehirlerde Rus teknelerini bulup imha etmek için kullanılıyor.



İnsansız Kara Araçları (İKA)

Rusya ve Ukrayna askerleri dron saldırıları sebebiyle destek sağlanamayan ileri mevzilere kumanya ve mühimmat ulaştırmak için kolay bulunan malzemelerden uzaktan kumandalı küçük insansız kara araçları ürettiler, bu araçlar yaralı askerlerin tahliyesi için de kullanıldı. Hafif İKA sınıfına giren bu kara araçların daha sonra hafif silah ve roketatarlar, elektronik harp/karıştırıcı elektronik cihazlar taşıyanları ve tank mayınları taşıyıp bırakabilenleri de geliştirildi. Fiber optik kumanda eklendiğinde küçük İKA'lar karıştırmadan etkilenmeden ve emisyon yapmadan ilerleme, görüş hattı kısıtı olmadan haberleşme ve yüksek çözünürlüklü video aktarma kabiliyetlerini kazandı. Mart 2025'te Ukrayna FPV dronlarla desteklenen silahlı İKA'lar ile ilk insansız kara taarruzunu gerçekleştirdi.



Yapay Zekâ

TIME dergisinin 26 Şubat 2024 kapağında "Ukrayna – İlk Yapay Zekâ Savaşı" yer aldı. Palantir ve Clearview gibi firmaların Ukrayna'ya uydu resimlerinin, sahadan ve açık kaynaklardan aktarılan bilgilerin, dron video görüntülerinin analizinde ve yüz tanıma konularında destek olmaları; geliştirdikleri algoritma çözümlerinin gerçek sahada denenmesini ve mükemmelleştirilmesini de sağladı.

2022 yılında Ukrayna geliştirdiği bulut tabanlı DELTA savaş yönetim sistemini kullanmaya başladı. DELTA çeşitli kaynaklardan alınan bilgi ve görüntüleri toplayarak cep telefonu, tablet ve bilgisayarlardan erişilebilen dijital bir harita üzerinde savaş alanının güncel resmini oluşturmayı, düşman kuvvetlerinin izlenmesini, dost kuvvetlerin ve ateş vasıtalarının koordinasyonunu sağlamayı amaçlıyor. DELTA Ukrayna silahlı kuvvetlerinin Starlink terminalleri üzerinden dağıtık ağ-tabanlı bir komuta-kontrol yapısını sürdürmesini temin ediyor. DELTA üzerinde her ay sahadan gelen 50.000'den fazla video görüntüsünü analiz ederek saklı hedefleri tespit eden, sahte hedefleri ayırabilen yapay zekâ uygulamaları da yer alıyor.

Üretimin Değişimi

Dijital dönüşüm ve esnek üretim teknolojileri, yeni karmaşık silah sistemlerinin tasarım ve sahaya aktarılması sürelerini kısaltıyor. Ukrayna gibi, Ukrayna'ya yardım eden ABD ve İngiltere de temel isterlerle göreve odaklı ürünler için geliştirme, sahada



test ve ilk teslimat sürelerini 24 ay ve altına düşürdü, üretimin hızla ölçeklenebilir olması talep ediliyor. Sahadaki hızlı değişim karşısında stoklar yerine, gerektiğinde hemen yenileyebilmek ve ihtiyacı yeterli sayıda karşılayabilmek tercih ediliyor.

Ukrayna Savaşı sahadaki askeri personelin kişisel teknik ihtiyaçlarının karşılanması açısından da bir adaptasyon örneği sunuyor; cephede savaşan Ukraynalı ve Rus askerlerin aileleri ve arkadaşları hayatta kalmaları için gerekli olacağını düşündükleri ilkyardım kitleri, basit gece görüş dürbünleri, DJI dronlar, cepte taşınabilen dron dedektörleri ve karıştırıcıları ve hatta Starlink terminallerini temin edip onlara gönderdiler; bir araya gelerek yardım grupları oluşturup cepheden gelen istek ve geribildirimlerle rekabetçi bir pazarın oluşumunu desteklediler. Yardım kuruluşları ve küçük girişimciler Çin'den gelen malzemeleri birleştirerek çeşitli tipte dronları ve küçük İKA'ları üreten atölyelerin (Putin'in ifadesiyle: Halkın Savunma Sanayii'nin) kurulmasını sağladı.

Ukrayna çeşitli inisiyatiflerle girişimcileri sahadaki sorunlara asimetrik çözümler geliştirmeye teşvik etti. Öne çıkan başarılı ürünler sanal marketlerde askeri birliklerin serbestçe tercih edip satın almalarına sunuldu. Başarılı Ukrayna örneğini değerlendiren ABD Kara Kuvvetleri onaylı yazılım, donanım ve sistem ürünlerinin yer alacağı G-TEAD (Global Tactical Edge Acquisition Directorate Marketplace) sanal marketini Eylül 2025 ayında faaliyete geçirdi. Kara Kuvvetleri birliklerine ve müttefik ülkelere hizmet verecek sanal markette sunulan ilk ürünler sevke hazır drone-savar sistemler oldu.

ABD, İngiltere, Hollanda, Danimarka ve Baltık ülkeleri, Ukrayna savaşı tecrübelerini dikkate alarak geliştirdikleri ürünleri Ukrayna'da saha koşullarında deneyerek mükemmelleştirmeye çalışıyor. Aynı ülkeler diğer yandan Ukrayna'dan teknoloji transferi yaparak ve kendi ülkelerinde ortak üretim tesisleri kurarak yeni ürünleri üretecek yerli üretim kapasitelerini oluşturuyor.

"... Şimdi yeni şeyler söylemek lazım"

21. Yüzyılın ilk çeyreğinde çoğu yakın coğrafyamızda cereyan eden savaş ve çatışmalar, silah ve silah sistem teknolojilerinde ülkelerin savunma sanayiilerini de yönlendirecek değişimlere yol açtı. Küresel tedarik zincirlerinden beslenen yeni ve küçük üreticiler hızla ölçeklenebilen modern üretim kabiliyetleri ile, yaşanan değişime kısa zamanda adapte oldular ve düşük maliyetli ancak sahada yıkıcı bir devrimi sürdürecek asimetrik çözümleri sundular. Yapay zekâ algoritmaları artan sensör ve haberleşme kabiliyetleri ile patlayan veri füzyon ve değerlendirme yükünü üstlendi. Tüm dünya ülkelerinin insansız hava, deniz ve kara araçlarına kolaylaşan erişimi, yaygınlaşan beklenmedik yeni kullanım yöntemleri savaş konseptlerini ve savaş alanlarındaki taktikleri değiştirdi.

Devam eden savaşın ve değişimin baskısıyla askeri yapılanmalar da yeni duruma adapte olarak kendisini yeniliyor. Ukrayna Haziran 2024'te, Rusya Kasım 2025'te insansız hava, kara ve deniz araçlarının geliştirilmesi ve savaşta kullanımını yönetecek İnsansız Sistemler Komutanlıklarını kuran ilk ülkeler oldu.

Geçen yüzyılın tanklar, helikopterler ve insanlı savaş uçakları gibi en kıymetli savunma araçlarının modern savaş sahalarındaki görevleri tartışılıyor. Dünün tehditleri, karşı tedbirleri, maliyetleri, hızları, erişim mesafeleri ve karar verme süreleri güncelliğini kaybediyor. Güvenlik isteği ve savunma ihtiyaçları değişmese de rekabetçi olmak ve hatta ayakta kalmak için, değişimi anlayarak her sahada uyum sağlamaya çalışmak ve hatta değişimi yönlendirmeye aday olmak gerekiyor.



ATEŞ DESTEĞİ AÇISINDAN **MUHAREBE SAHASI DİNAMİKLERİ**NİN DÖNÜŞÜMÜ

Barış döneminde icra edilen tatbikatlarda muharebe sahasına yönelik şartlar her ne kadar canlandırılmaya çalışılırsa çalışılsın, gerçek bir savaşta elde edilen tecrübenin yerini asla alamaz. Son yıllardaki Suriye, Libya, 2. Karabağ, Rusya-Ukrayna ve İran-İsrail savaşları muharebe sahasında önemli dinamik değişimler ortaya çıkarmıştır.

Yakın zamana kadar ülkeler savunma yapılarını, silahlarını ve sistemlerini kendi coğrafi özellikleri ve tehdit durumuna göre uyarlamış, ancak temelde 2'nci Dünya Savaşı taktik ve doktrinlerini esas alarak kurgulamış ve tedarik etmiştir. 1945 yılından bu yana gerçekleşen Kore, Vietnam, Irak (1'inci ve 2'nci Körfez Savaşları) ve Afganistan çatışma alanlarından alınan tecrübeler doğrultusunda ise bazı ülkeler savunma yapılarında değişikliğe gitmiş, ancak bu değişimler sınırlı kalmıştır.

Bu çalışmada, son 10 yılda muharebe sahalarında harekâtın ateş desteği açısından gerçekleşen dinamik değişimlerden önem arz edenler, Türk savunma sanayii ve ihtiyaç makamlarının müteakip dönem planlamalarına ışık tutmak maksadıyla ele alınmıştır.

(E) Tuğg. **Şenol ÇETİN**



Geleneksel askerî strateji ve doktrinler teknolojinin de gelişmesi ile birlikte sürekli değişime uğramaktadır. Hiçbir savaş bir öncekinin aynısı olmadığı gibi gelecek savaşlar da bugünün aynısı olmayacaktır. Bu nedenle **“geçmiş savaşlara hazırlanmak”** yanılgısına düşerek, “yetenek açığını giderme ve yeni yetenek kazanma” yerine **“araç/silah/sistem tedariki”** odaklı bir yaklaşım daha baştan sonu belli stratejik bir hata olarak kabul edilmelidir.

İstihbarat, Keşif ve Gözetleme

Bu alanda en köklü değişim İnsansız Hava Aracı (İHA) yeteneğinin gelişmesi ile olmuştur. Önceki dönemlerde insanlı keşif uçakları (yüksek irtifadan düşük çözünürlüklü fotoğraflar) ve kara gözetlemesi (azami 10-15 km) ağırlıklı yapılan keşif ve gözetleme faaliyeti sınırlı yetenek sağlarken, günümüzde kullanılan ve insansız olduğu için riski bulunmayan İHA'lar, azami derinlikte keşif ve gözetleme yeteneği ile birlikte anlık görüntü yeteneğini de beraberinde getirmiştir.

Bu yetenek muharebe sahasının sınırlarını artırmış, derinlikteki bölgelerde faaliyet gösteren birlikleri de açığa çıkarmış, hareketli hedeflerin dahi saniyeler içinde tespit edilip yüksek hassasiyetle vurulmasını mümkün kılmış, uzun menzilli silahların vuruş etkileri gözlemlenebilmiş, geri bölgedeki stratejik ve taktik hedefler (karargâh, mühimmat depoları, konvoylar, ihtiyat birlikleri, ateş destek birlikleri, lojistik tesisler vb.) büyük risk altına girmiştir. Bu durum, cephe hatlarının ve geri bölgelerin dahi düşman gözetlemesinden kaçınmasının neredeyse imkânsız olduğu bir "Şeffaf Muharebe Sahası" ortaya çıkarmıştır.

Sürekli ve anlık İHA gözetimi altında hareket etme zorunluluğu, geleneksel insan istihbaratını (HUMINT) zorlaştırmış, görüntü istihbaratı (IMINT) ve sinyal istihbaratı (SIGINT) verilerinin entegrasyonu ön plana çıkmıştır.

Uydu destekli keşif ve gözetleme faaliyetlerinde uyduların hedef üzerinden geçiş zaman aralıklarının uzunluğu nedeniyle yeterli anlık istihbarat desteği sağlanamamıştır. Sabit ve stratejik hedefler için yeterli istihbarat sağlansa da muharebe sahasındaki hareketli hedefler için kullanımı mümkün olmamıştır.

Hızla değişen ve yüksek miktarda verinin üretildiği modern savaş ortamında, yapay zekâ ve makine öğrenimi; hedef tespiti, sınıflandırma, sensör füzyonu, istihbarat veri tabanı oluşturmak ve karar destek sistemleri için kritik hale gelmiştir.

Komuta Kontrol ve Haberleşme

Muharebe sahası sınırlarının artması mevcut komuta kontrol ve haberleşme sistemini de gelişmeye zorlamıştır. Sahada artan sayısal bilgi ihtiyacı (sensörler, fotoğraf, görüntülü görüşme, anlık mesaj, ses, sosyal medya vb.) ve bunları işleme ihtiyaçları nedeniyle zaten mesafece yetersiz kalan askeri haberleşme sistemleri sivil haberleşme sistemleri ile takviye edilmek zorunda kalmıştır.

MUHAREBE SAHASI CEPHE GENİŞLİKLERİ

İCRA EDİLEN HAREKÂT	TOPLAM CEPHE GENİŞLİĞİ (km)	İCRA EDEN KOLORDU SAYISI (YAKLAŞIK)	KOLORDU BAŞINA DÜŞEN CEPHE GENİŞLİĞİ	MEVCUT DOKTRİNLERDE STANDART KOLORDU CEPHESİ
Ukrayna	1200	10	120 km.	12 - 15 km.
Karabağ	320	4	80 km.	
Fırat Kalkanı	104	1	104 km.	
Zeytin Dalı	148	1	148 km.	
Barış Pınarı	135	1	135 km.	
Bahar Kalkanı	90	1	90 km.	

Özellikle Rusya-Ukrayna savaşında, geleneksel radyo/telsiz sistemlerinin düşman elektronik harp (EH) ve istihbarat keşif ve gözetleme (İKG) unsurlarınca kolayca tespit edilmesi ve hedeflenmesi, uydu tabanlı (Starlink vb.), şifreli ve düşük görünürlüklü muhabere sistemlerine olan bağımlılığı artırmıştır. Bu bağımlılık o kadar büyük bir hale gelmiştir ki Elon Musk tarafından yapılan "Eğer Starlink'i kapatırsam Ukrayna'nın ön cephesi çöker" açıklaması durumu yeterince izah etmektedir. Ağ merkezli savaş yeteneği, özellikle Karabağ ve Rusya-Ukrayna savaşlarında kritik öneme sahip olmuştur.

Birçok fonksiyon alanının aynı anda koordine edilme ihtiyacı harekât merkezlerinin yapısında da önemli değişiklikleri beraberinde getirmiş, harekât merkezlerinin işletim esasları ve personel durumu yeniden belirlenmiş, sayısal harita kullanımı kaçınılmaz hale gelmiştir.

Sayısal elektronik işlemlerin yoğunluğu artmış, güç ve haberleşme sistemlerinin (bilgisayar, yazıcı vb.) araçtan bağımsız portatif hale getirilmesi ön plana çıkmıştır. Veri yoğunluğu ve güvenliği nedeniyle stratejik ve operatif birlik harekât merkezleri fiber optik alt yapının bulunduğu yer ve güzergâhlara yakın konuşlanmak zorunda kalmıştır.

Günümüz savaşları, karar alma süreçlerinin hızlanması ve merkeziyetçilikten dağıtık hale geçmesi ihtiyacını da beraberinde getirmiştir. Herkesin sadece bir üstü ile görüşmesi değil, herkesin herkesle görüşebileceği ve yüksek koordinasyon ihtiyacını gideren bir haberleşme sistemi mimarisini gerekli kılmıştır. Geleneksel hiyerarşik komuta kontrol (C2) yapıları, hedef tespit ve imha döngüsünün (Kill Chain) süresinin kısalması ihtiyacı nedeniyle yavaş ve yetersiz kalmıştır.

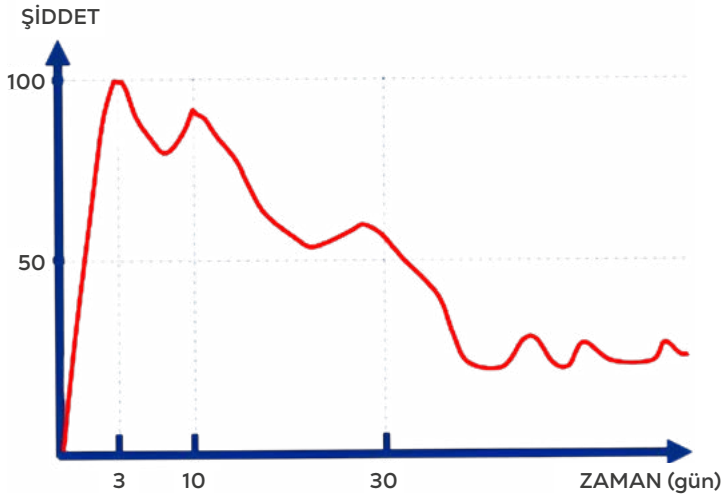
Taktik seviyede İHA'lar ve düşük maliyetli sensörlerin yaygınlaşması, alt seviye birliklerin (manga, bölük) bile yüksek çözünürlüklü durumsal farkındalığa sahip olmasını ve hedeflere hızlı tepki vermesini gerektirmiştir. Komuta yetki ve inisiyatifinin taktik seviyeye kayması hızlanmıştır. Bu kapsamda geleceğin taktik saha lider ve komutanlarının inisiyatif kullanma yeteneklerinin geliştirilmesi ve bu şekilde eğitilmeleri önem kazanmıştır.

Ateş Desteğinin Sağlanması ve Hedef Yönetimi

Harekâtın başlangıcından itibaren karşı tarafın ateş destek vasıtalarının ve mevzilerinin baskı altına alınması, komuta ve muhabere irtibatlarının parçalanması, baskın ve şok etkisi sağlanması gibi nedenlerle kara harekâtını icra eden manevra birlikleri kuvvetli ve iyi planlanmış ateş desteğine ihtiyaç duyarlar.

Harekâtın başlangıcında yüksek savaşma azim ve iradesine sahip manevra kuvvetleri, zaman uzadıkça ve savaşın süresi bilinmeze doğru gittikçe bu azim ve iradeden kayıplar yaşarlar. Zamanla harekât alanının durumu kısıtlı manevra ve ikmal imkânları elverdiğince kara ve hava ateş destek vasıtalarının karşılıklı düellosuna dönüşür. Bu durum savaşın son anlarına kadar gece ve gündüz bir süreklilik arz eder.

MANEVRANIN ZAMAN/ŞİDDET GRAFİĞİ



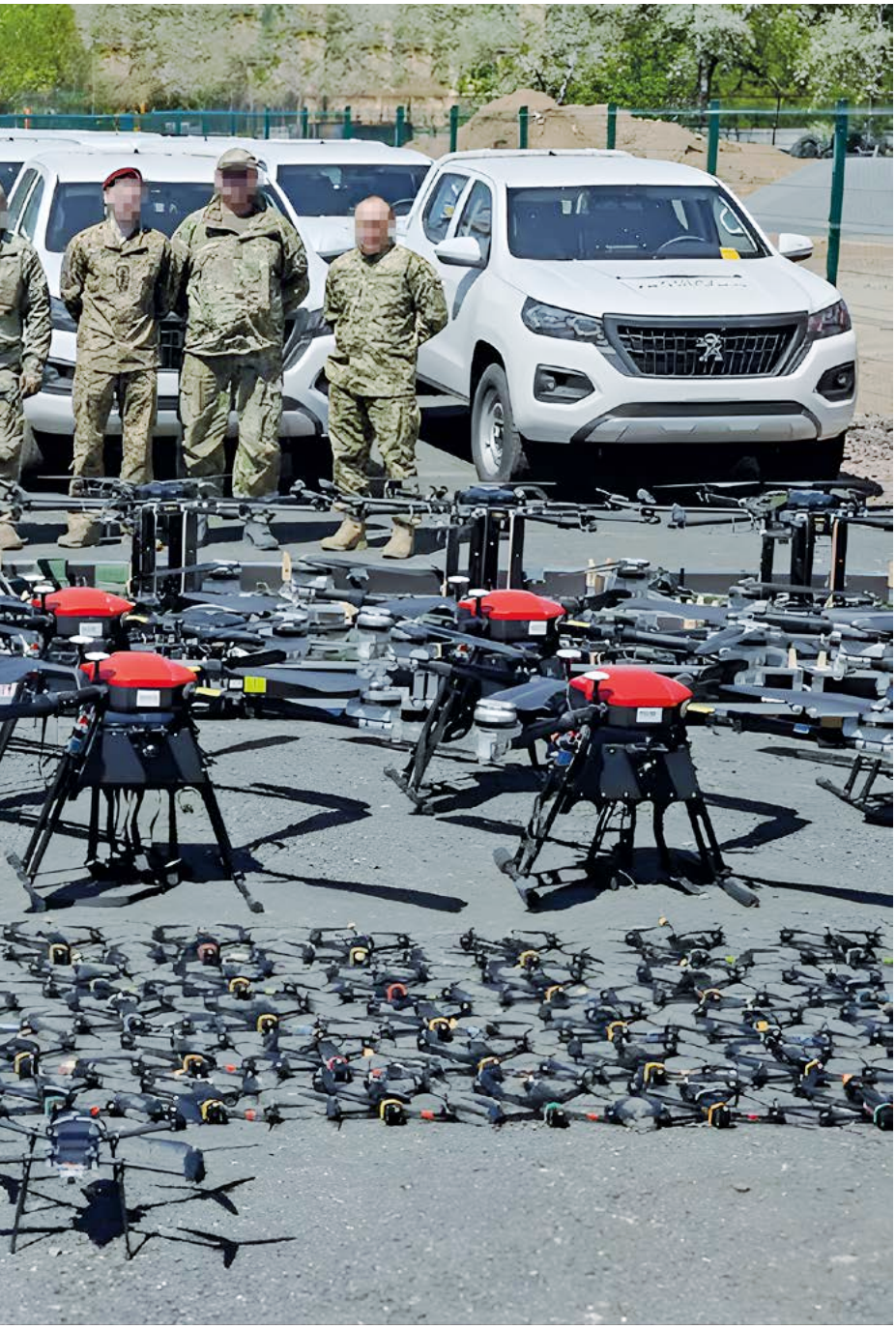
Şehirleşmenin artması ile birlikte gerek teröristle mücadele operasyonları gerekse de konvansiyonel savaşların ağırlıklı olarak meskûn mahaller ve/veya yakın çevrelerinde cereyan ettiği görülmektedir. Bu kapsamda, askeri avantaj ile sivil can ve mal kaybı arasındaki dengenin çok hassas kurulması, hedef yönetiminin en önemli bileşeni olmuştur. Hedef tanımlama aşamasında, yasal, ahlaki ve operasyonel kısıtlamalar dikkate alınarak, doğru hedefin doğru etkiyle vurulması kritik hale gelmiştir.

Sivil zayiatı ve ikincil hasarı en aza indirme zorunluluğu, hedef yönetimi süreçlerini daha da titiz hale getirmiştir. Hassas güdümlü mühimmatlar ve gelişmiş istihbarat, keşif ve gözetleme yeteneklerinin yaygınlaşması, hedeflerin daha net tanımlanmasını ve seçmeli imhasına imkân vermiştir.



Diğer yandan muharebe sahasındaki hedefler de hız ve çeviklik kazanmıştır. Hızla yer değiştirmek nasıl hedef için beka meselesi olmuşsa hedefi etki altına almak için ateş destek sürecinde hızlanmak da o kadar gerekli olmuştur. Düzensiz ve aniden ortaya çıkan hedeflere karşı ateş destek döngüsünün (Tespit et-Tanımla-Ateş Altına Al-Değerlendir) hızlanması kritik hale gelmiştir. Bu döngünün hızlanmasında özellikle insansız hava araçları (İHA/SİHA) ve gelişmiş ağ merkezli sistemler etkili olmuştur.

Ateş destek döngüsünde klasik ve katı hiyerarşik komuta içinde hareket dikte eden taktik ateş idare prensiplerinin hedeflerin ateş altına alınmasında zamanca yetersiz kaldığı görülmüştür. Çoğu zaman karar mekanizmaları devreye girinceye kadar hedef ya yer değiştirmiş ya da hedef niteliği kaybolmuştur. Bununla bağlantılı olarak, muharebe sahasında bekası tehlikeye girmiş ve tehditten bir an önce kurtulmak isteyen bir personelden hedefi ateş altına almak için maliyet/etkinlik kuralına dikkat etmesi zaten beklenemez hale gelmiştir.



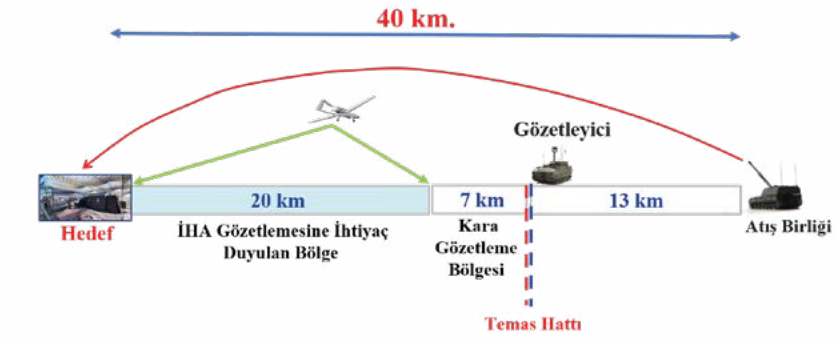
Muharebe sahasında keşif ve gözetleme yeteneklerinin artması ile birlikte tespit edilen hedef sayısında da artış yaşanmıştır. Bu durum hedeflerin takibi ve ateş destek vasıtalarının hedeflere süratle tahsisi maksadıyla yapay zekâ kullanımını da gerekli kılmıştır.

Günümüz muharebelerinde müşterek ateş koordinasyonu önem kazanmıştır. Kara, hava ve varsa deniz ateşlerinin tek bir komuta kontrol sistemi altında senkronize edilmesi gerekli hale gelmiştir.

Son 10 yıl göz önüne alındığında ateş desteğinde en büyük değişim şüphesiz ki Silahlı İnsansız Hava Araçlarının (SİHA) ateş desteği ve hedeflemedeki merkezi rolü olmuştur. SİHA'lar, hem sürekli gözetleme hem de hassas vuruş yeteneğini birleştirerek, hızlı ve ekonomik ateş desteği sağlamıştır. Bu durum, özellikle düşük yoğunluklu asimetrik çatışmalarda hava üstünlüğü sağlayamayan güçlere önemli bir avantaj sunmuştur.

Özellikle düşük kalibreli mühimmatla (81 mm ve 60 mm havan mühimmatı, tanksavar mühimmatı, 40 mm bomba atar mühimmatı vb.) yüklenen FPV dronlar isabetli bir atış kabiliyetine sahip silahlara dönüşmüştür. Bu tecrübe doğrultusunda bazı ülke orduları klasik havan birliklerinin sayısını azaltarak ateş desteği sağlamak üzere dron birlikleri kurma yönünde çalışma başlatmıştır.

DERİNLİKTE GÖZETLEME VE HEDEF TESPİT İHTİYACI



Topçu silahlarının uzun menzilleri nedeniyle temas hattından itibaren kara gözetlemesi ile kapatılamayan bölümü için tedbirler geliştirilmiş, topçu birliklerinin bünyesinde kendi atışlarının tanzim ve gözetlenmesi maksadıyla dron kısımları teşkil edilmiştir.





Savaşların başında "çok atım ve bölge kaplayacak şekilde ateş baskısı oluşturma" ateş destek konsepti, ilerleyen günlerde mühimmat ikmal ve üretim sıkıntılarının yaşanması ile birlikte "az ve yüksek isabetli atış" konseptine dönüşmek zorunda kalmıştır. Bu durumda da silahların elektronik atış kontrol sistemlerinin hassasiyeti ve hızı ön plana çıkmıştır.

Geçmiş savaşlarda yol şebekesinin azlığı, menzillerin kısalığı ve her türlü arazide hareket etme kabiliyeti nedeniyle tercih edilen ve paletli gövde üzerine monte edilen kundağı motorlu top/obüslerin bir kısmı yerini tekerlekli kundağa sahip top/obüslere bırakmıştır.

Kundağı tekerlekli top/obüsler; hızlı kuvvet aktarımlarında çekiciye ihtiyaç duymamaları, eski dönemlere oranla yol şebekesinin artması ve uzun menziller sayesinde mevzi kısıtı yaşamamaları, bakım ve hizmetlerinin göreceli kolaylığı, motor ve transmisyon gibi yüksek teknolojik üretim gerektiren parçalarının tedarik sorunlarının bulunmaması, barış döneminde kışla içi ve dışındaki arazilerde yolları bozmadan kolaylıkla hareket edebilmesi nedeniyle tercih sebebi olmuştur.

Konum belirleme, seyrüsefer ve sayısal atış kontrol yeteneklerinin artması; birliklerin hızlı yer değiştirmesi, birlik, personel ve araçların sayısal ortamda takibinin kolaylaşması ve özellikle uzun menzilli atışlarda isabet başarısının artmasını sağlamıştır. Aynı zamanda bu yetenek topçu birliklerinin silahların 30-50 m aralıklarla klasik mevzilenme şeklini değiştirmiş, bekanın sağlanması açısından dağınık tip mevzilenme yöntemine geçmesine fırsat tanımıştır.

Uzun menzilli füze imkân ve kabiliyeti de ateş desteğinin sağlanması açısından gerekli hale gelmiştir. Uzun menzilli vuruş yeteneği sadece cephede değil cephe gerisinde de zayiat miktarının artmasına ve tedirginliğe neden olmuştur. Yoğun ateş baskısı oluşturan ve 40-150 km. menzilde etkili olan çok namlulu roket ve füze sistemleri cephe gerisindeki lojistik tesisleri, ikmal konvoylarını, komuta merkezlerini ve ihtiyat unsurlarını hareket edemez hale getirmiştir.

Günümüz muharebelerinde artık hedefler sadece askeri hedefler değildir. Halkın azim, irade ve dayanma gücünü yok etmek amacıyla hükümet binaları, enerji merkezleri, limanlar, hava alanları, ulaşım şebekeleri, su şebekeleri, haberleşme ağları, üretim ve depolama tesisleri de stratejik hedefler olarak ateş altına alınan hedefler arasına dahil olmuştur. Kritik tesislerin nokta hava savunması da bu kapsamda önem kazanmıştır.

Elektronik Harp ve Siber Faaliyetler

Sosyal medya, dezenformasyon ve siber saldırılar, muharebe sahasının sanal bir uzantısı haline gelmiştir. İran-İsrail ve Rusya-Ukrayna çatışmaları, fiziksel saldırıların yanı sıra kamuoyu ve düşman morali üzerindeki bilgi harekatının eş zamanlı yürütülmesinin önemini göstermiştir.

Günümüz muharebelerinden alınan en büyük ders, bekanın artık sadece fiziki bir alanla sınırlı olmadığıdır. Ülkelerin askeri operasyonlarını siber, elektronik spektrum ve bilgi alanlarını eş zamanlı ve entegre bir şekilde yürütebilme yeteneği, ulusal beka için elzem hale gelmiştir.

Karabağ ve Ukrayna-Rusya savaşlarında, Elektronik Harp (EH) sistemlerinin düşman İHA'larını, güdümlü mühimmatlarını ve muhabere ağlarını köreltmedeki rolü açıkça görülmüştür. EH artık sadece bir destek unsuru değil, taarruz ve savunmanın ayrılmaz bir parçasıdır.

Düşman birliklerinin yerini belirlemek, iletişimlerini dinlemek veya karıştırmak için günde 24 saat kesintisiz çalışan mobil **EH sistemleri**, cephe hattının önemli bir bileşeni haline gelmiştir. İletişimi kesilen birliklerin harekât kabiliyeti ve beka şansları neredeyse sıfırlanmıştır.



Dost kuvvetlerin korunması, artık sadece fiziksel tehditlerden değil, elektromanyetik ve siber tehditlerden de sağlanmak zorundadır. Kritik komuta kontrol ve iletişim ağlarına yönelik siber saldırılar nedeniyle, askeri operasyonların siber güvenlik altına alınması, kuvvet korumasının ayrılmaz bir parçası haline gelmiştir.

Özellikle stratejik ve operatif seviyedeki komuta kontrol merkezlerinde siber taarruz unsurlarının harekât ile bütünleşik ve yüksek koordinasyon içinde hareket etmesi maksadıyla siber irtibat personeli veya temsilcisi bulundurulması, değerlendirilmesi gereken bir husus olarak ön plana çıkmıştır.

Hava Savunma

Hava savunma sistemlerinin varlığı, yetenekleri, etkinliği ve hava üstünlüğünün önemi bir kez daha teyit edilmiştir. Son 10 yılda yaşanan savaşların tamamından ders çıkaran ülkeler hava savunma sistemi üretim/tedariklerine önem ve öncelik vermiştir.

Klasik olarak hava savunmasını üç temel katmanda (alçak, orta ve yüksek irtifa) öngören doktrin ve konseptlerde önemli temel değişimler gözlemlenmiştir. Radar kesit alanı küçük ve ucuz



FPV dronlarla yüksek maliyetli hedeflere yapılan saldırılar karşısında klasik hava savunma silahları etkisiz kalmış ve/veya maliyet etkinlikleri sorgulanır duruma gelmiştir.

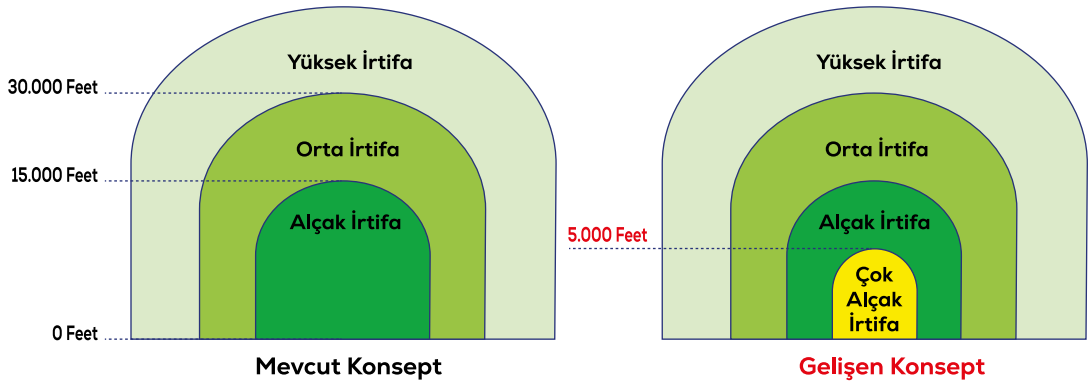
Hava savunma alçak irtifa katmanı iki kısımda (alçak ve çok alçak irtifa) değerlendirilerek "Çok alçak irtifa (0-5000 feet)" kısmı için EH destekli çeşitli özel dronsavar tedbirleri (parçacıklı mühimmat, av tüfeği, ağ atan karşı dron vb.) geliştirmek zorunda kalınmıştır. Dron tespit yeteneklerindeki çözümler, radar yayınlarının tespit edilme tehlikesine tedbir olarak radar tespitinden daha ziyade kamera ve optik tespit çözümlerine yönelmiştir.

İHA'ların (özellikle FPV Dronların) oluşturduğu yeni hava tehdidine karşı her cephede, İHA karşıtı sistemlerin (Elektronik Harp (EH), sinyal karıştırma vb.) geliştirilme yarışı başlamış, beka fonksiyonunun öncelikli odak noktası, dronları tespit etme ve imha etme yeteneğine kaymıştır.

Çok yüksek hızlarda seyreden hipersonik füzelerin hava savunma sistemlerine yakalanmadan hedefe ulaşması, hava savunma yeteneklerinin bu boyutta da geliştirilmesini gerekli kılmıştır.

İran-İsrail çatışması gibi hava savunma sistemlerinin kısa sürede yoğun olarak kullanıldığı durumlarda iki temel nokta ön plana çıkmıştır. İlki; aynı anda ve çok miktarda atılan füze, roket ve dronların hava savunma sistemlerinde oluşturduğu doygunluk (satürasyon) ve sonucunda yetersizlik, diğeri ise çok miktarda atım nedeniyle hava savunma mühimmatında yaşanan ikmal, tedarik ve üretim zorluklarıdır. Ucuz ve çok sayıda atılan roket, füze, dron gibi saldırı araçlarının hava savunma sisteminin başarısını önemli ölçüde düşürdüğü tecrübe edilmiştir.

HAVA SAVUNMA KONSEPTİNDE DEĞİŞİM




A1590



Hayatta Kalabilme (BEKA)

Keşif ve gözetleme yeteneklerinde artan tehlike ile birlikte birlik taktik komuta yerlerinin arazide konuşlanma taktikleri değişmiş, toplu-ca bir araya gelerek komuta yerini oluşturan araçlar ve çadırlar yerine daha korunaklı binaların bodrum katları veya yerin altına hazırlanan tüneller şeklinde konuşlanmaya gidilmiş, cepheye yakın taktik seviyede komuta yerleri ve alt birimleri ise fiziksel olarak bir araya gelmeyen dağıtık mimariye geçmek zorunda kalmıştır. Bu kapsamda uzaktan görüntülü görüşme imkân ve kabiliyeti önem kazanmıştır.

Karmaşık muharebe sahasında birliklerin dost ateşlerden etkilenmemesi maksadıyla harekât alanında tanıma ve tanıtma yeteneklerinin geliştirilmesi ve koordinasyon gayretlerinin artırılması, harekât merkezlerinde dost birliklerin yerlerinin (özellikle ileri hat birlikleri) sürekli takibi açısından tedbirler (araç takip cihazı, telsiz yerlerinin takibi, özel araç işaretleri, İHA telemetri verilerinin sayısal haritada takibi vb.) alınması birliklerin bekası açısından elzem hale gelmiştir.

Keşif ve gözetleme (İHA, Radar, EH vb.) yeteneklerinin artması her iki tarafın da birlik, araç, silah ve sistemlerinin hayatta kalabilmek için hızlı yer değiştirmesini gerekli kılmıştır. Sabit ve/veya mevzilenme sürati düşük araç ve silahların muharebe sahasında yaşama şansı hemen hemen kalmamıştır. Yoğun örtü ve gizleme sağlayan bölgeler dışında, çekili top/obüs ve diğer ağır silahların muharebe sahasında bekası neredeyse imkânsız hale gelmiştir.

Silah, sistem ve platformların daha tasarlanma aşamasında, ihtiyaç makamlarının tehdit durumunu genişleterek öngörülen sistemde birçok özelliğin bulunmasını talep etmesi, sistemlerin gerek boyut gerekse de maliyet olarak artmasını gerekli kılmaktadır.

Ancak bu durumun, o sistemin sahada en çok ihtiyaç duyulan manevra kabiliyetinin azalmasına ve aynı zamanda değerli bir hedef olmasına yol açtığı da düşünülmesi gereken bir gerçek olarak karşımıza çıkmıştır. Günümüz muharebe sahasında çok büyük sistemler yerine küçük ve yüksek manevra kabiliyetine sahip olan sistemlere ilgi artmıştır.



Lojistik

Ateş desteğinin kesintisiz sağlanmasındaki temel esasların birlik eğitimi, güçlü iletişim ağı ve modern silahlar olduğu kadar ikmal ve bakım desteğine de bağlı olduğu bir gerçek olarak karşımıza çıkmıştır. Yüksek yoğunlukta ve uzun süreli devam eden günümüz muharebelerinde mühimmat ve yedek parça stoklarının tükenme noktasına gelmesi ateş desteğinin sürdürülebilirliğini doğrudan etkilemiştir.

Böylece askeri-endüstriyel üretim tesislerinin uzun süreli çatışmaları destekleyebilme yeteneği savaşın kaderine etki eden stratejik bir unsur haline gelmiştir. Savaşın seyrini belirleyen asıl unsurlar arasına üretim hızı ve tedarik sürecinin dayanıklılığı da girmiştir.

Rusya-Ukrayna ve Karabağ Savaşlarında hassas vuruş yeteneğine sahip füzelerin kullanımı ve sonucunda mühimmat depolarının ve ana tedarik yollarının vurulması, cephe gerisindeki ikmal ve lojistiğin aksamasına neden olmuştur. Bu durum, ikmal hatlarının ön cepheye olan uzaklığının artık bir koruma sağlamadığını ve lojistik tesis ve ikmal noktalarının daha fazla dağıtılması gerektiğini göstermiştir.

Lojistik açıdan bir diğer önemli değişim ise dron kullanımı ve üretiminde yaşanmıştır. Dronların ucuz maliyetle her yerde üretimi, sivil amaçlı üretilen dronlardan da yararlanma, yapay zekâ ile destekli otonom hale gelmeleri, büyük savunma sanayii şirketlerinin tekelinden ve ülke ambargolarından çıkarak küçük grupların bile üretebileceği hale gelmesi, hatta çatışma alanlarında çok sayıda yerinde üretilebilmeleri mühimmat ve tedarik konseptlerini değiştirmiştir. Dronların modern bir akıllı mühimmat olduğu herkes tarafından kabul edilmiştir.

Artık savaşların geleceğinde manevra kabiliyeti yüksek, etkili, otonom, ucuz, hızlı üretilebilen ve kaybı göze alınabilen sistemlerin ön plana çıkacağı döneme girilmiştir.

Sonuç ve Değerlendirme

Savaş artık sadece cephede ve belirli bir zaman diliminde değil, yenilikçi düşüncelerle sürekli ve her yerdedir. Modern muharebe sahası hız, hassasiyet ve entegrasyon ekseninde dönüşmektedir. Geleceğin savaşlarının sadece üniformalı personel üzerinden yürütülen mücadele değil, bütün milli güç unsurlarının birlikte kullanıldığı savaşlara dönüşeceği artık görülen ve beklenen bir istikamettir.

Günümüz savaş ve çatışmaları, "yüksek teknoloji, düşük maliyet" yaklaşımlı sistemlerin (özellikle İHA'lar, EH) muharebe sahasındaki etkisini artırdığını göstermiştir. İHA/SİHA'lar, özellikle hava savunma sistemlerinin zayıf olduğu veya bastırılabildiği durumlarda, konvansiyonel kuvvet çarpanı haline gelmiştir.

Muharebe sahası artık çok boyutludur. Bu durumu kavrayamayan ve değişim arayışları içinde olmayan ordular günü geldiğinde yenik düşmeye mahkumdur.

Unutulmamalıdır ki, muharebe sahasında beklenen başarı daima gerçeklere ihtiyaç duyar.





DENİZDE KARADA
HAVADA UZAYDA

Alanında en iyi ürünlerimiz ve oyun değiştirici teknolojilerimizle
tam bağımsızlık için varız!

aselsan



ÇELİKKUBBE'YE GİDEN YOL: KOMUTA-KONTROL EKOSİSTEMİNİN GELİŞİMİ

Günümüzde JADC2, FMN ve ESC2S gibi projeler, komuta-kontrolü yalnızca teknik bir fonksiyon olmaktan çıkararak insan–makine-sensör bütünleşmesine dayalı çok alanlı bir karar ekosistemine dönüştürmektedir. Bu çalışma, C2'nin tarihsel gelişimini hem teknolojik hem doktrinel düzeyde analiz ederek modern askeri örgütlenmenin bilgi-odaklı karakterinin arka planını göstermektedir.

Komuta-kontrol (C2) kavramı, askeri literatürde operasyonel sanatın, stratejik düşüncenin ve teknolojik dönüşümün kavşak noktasında yer alır. Clausewitz'in "sürtünme" (friction) kavramı, karar alma süreçlerinin doğasında bulunan belirsizliklerin savaşın akışını nasıl etkilediğini açıklar. Komuta-kontrol, bu sürtünmeyi azaltma çabalarının merkezinde konumlanır. Jomini'nin savaş geometri teorileri, karar-uygulama ilişkisinin teknik ve örgütsel temellerini şekillendirirken; Mahan ve Douhet gibi strateji kuramcıları, komuta yapılarının kuvvet kullanımındaki sinerjik etkisini vurgulamıştır.

Soğuk Savaş döneminde strateji teorisyenleri Herman Kahn, Thomas Schelling, Lawrence Freedman nükleer çağın karar döngülerini analiz etmiş; böylece C2 askeri düşüncenin merkezî araştırma alanlarından biri haline gelmiştir. RAND Corporation ve MITRE gibi kurumların yayımladığı raporlar, komuta-kontrolü yalnızca askeri bir işlev olarak değil, bilgi işleme, sistem teorisi, haberleşme ve örgütsel davranışın kesiştiği bir disiplin olarak değerlendirmiştir.

1990'lardan sonra Alberts ve Garstka'nın "Network-Centric Warfare" çerçevesi, C2 literatürünü paradigmatik olarak değiştirmiş; sensör füzyonu, COP (Common Operation Picture), veri bütünleşmesi ve dağıtık karar mekanizmaları doktrinlere yerleşmiştir. 2010 sonrası JADC2 ve NATO'nun FMN/EC2S programları komuta-kontrolün artık çok alanlı, bulut tabanlı ve yapay zekâ destekli bir ekosisteme dönüştüğünü göstermektedir.

(E) Tuğg. **Yusuf ERGE**



1914-1945:
Analog ve İnsan-Merkezli Komuta-Kontrol Çağı

20'nci yüzyılın ilk yarısında komuta-kontrol yapıları sınırlı haberleşme, yavaş karar döngüleri ve insan sezgisine dayalı bir yapıdan oluşuyordu. I. Dünya Savaşı'ndaki Signal Corps modernizasyonu, telsiz kullanımını artırmış olsa da, iletişim çoğunlukla kesintili ve güvensizdi. Komutanlar savaş alanını tam olarak göremiyor; Clausewitz'in "savaş sisi" kavramı operasyonların temel karakterini belirliyordu.

1930'larda radar teknolojisinin ortaya çıkışı komuta-kontrolde bir kırılmaya sebep oldu. İngiltere'nin Chain Home ağı, erken tespit-karar-tepki zincirinin ilk sistematik modelini oluşturdu. ABD'nin SCR-270 radarlarının Pearl Harbor öncesi tespitlerinin işlenememesi, C2'nin sadece sensörlerle değil, karar mekanizmalarının bütünsel yapısıyla anlam kazandığını göstermiştir.

ABD Donanması'nın Combat Information Center (CIC) modeli, çoklu sensör verisinin merkezi bir operasyon odasında bir araya getirildiği ilk birleşik savaş bilgi merkezidir. Aynı dönemde Churchill War Rooms ve Pentagon War Room gibi stratejik komuta merkezleri, modern C2 mimarilerinin kurumsal öncülleridir.

Bu dönem, sensör teknolojilerinin, erken uyarı ağlarının ve entegre komuta faaliyetlerinin temellerinin atıldığı kurucu evredir.



1945-1990:
Soğuk Savaş Dönemi ve Stratejik Otomasyonun Yükselişi

II. Dünya Savaşı sonrası ortaya çıkan nükleer tehdit, karar sürelerinin dramatik biçimde kısalmasına neden olmuş; bu da komuta-kontrolde otomasyon ihtiyacını doğurmuştur. Bu dönemde C2'nin gelişimi teknoloji, örgütlenme ve stratejik doktrin açısından birbirini besleyen üç ana eksende şekillenmiştir.

ABD'nin SAGE (Semi-Automatic Ground Environment) sistemi, tarihin ilk büyük ölçekli dijital komuta-kontrol ağı olarak literatürde merkezi bir yer edinmiştir. SAGE, radar verilerini devasa bilgisayarlarda işleyerek tehdit analizi yapan ve gerçek zamanlı hava resmi oluşturan bir mimariydi.

1957'de kurulan NORAD (North American Aerospace Defense Command), transatlantik stratejik C2'nin sembolik modelidir. Bu sistem DEW Line (Distant Early Warning Line) ile başlayan zamanla BMEWS (Balistic Missile Early Warning System) ve NWS (North Warning System) radar zincirleri ve Cheyenne Mountain kompleksi ile devam eden süreçte Kuzey Amerika kıtasının erken uyarı–karar–tepki kapasitesini Kanada ile ortak hareket ederek kurumsal hâle getirmiştir. NORAD günümüzde faaliyetlerine devam etmektedir.

NATO'nun NADGE sistemi; Avrupa'daki ulusal radar ağlarını birleştirerek çok uluslu bir COP oluşturmuş; AWACS ve ACCS'in temelini atmıştır. Birleşik Krallık'ın ROTOR programı ve Fransa'nın STRIDA projeleri, Soğuk Savaş boyunca Avrupa'nın milli C2 mimarisinin teknik altyapısını şekillendirmiştir.

Sovyetler Birliği'nin Berkut ve A-35 sistemleri ise karşı-blok C2 yapılarını oluşturmuştur. Bu sistemler çoğu zaman merkeziyetçi olmaları nedeniyle esneklikten yoksun görülse de, Moskova çevresindeki entegre füze savunma mimarisi dönemin önemli teknolojik başarılarındandır.

1980'lerde mikroişlemci devrimi ile C2 dijitalleşmeye başlamış; Link-16, AEGIS, C2PC ve JOPES gibi sistemler ağ-merkezli harekâtın altyapısını hazırlamıştır.

1991-Günümüz:
Dijitalleşme, Ağ-Merkezlilik ve Çok Alanlı Komuta-Kontrol

1991 Körfez Savaşı, literatürde "ilk dijital savaş" olarak adlandırılır. GPS destekli birlik hareketleri, sensör füzyonu, uydu iletişimi ve Link-16 üzerinden gerçek zamanlı veri aktarımı; komuta-kontrolü bilgi merkezli bir yapıya taşımıştır.

ABD'nin GCCS (Global Command and Control System) ailesi müşterek harekât planlamasının kurumsal altyapısını oluşturmuş; COP kavramı stratejik seviyeye taşınmıştır. 9/11 sonrası dönemde Afganistan Mission Network (AMN), 50'den fazla ülkenin ortak bir görev ağı altında çalışmasını sağlayarak C2'nin çok uluslu operasyonlardaki rolünü genişletmiştir.

DCGS (Distributed Common Ground System) platformları, büyük veri ve görüntü istihbaratını komuta-kontrole entegre eden ilk sistemlerdir. NATO'nun FMN (Federated Mission Networking) doktrini ise çok uluslu C2 mimarisine bir standart kazandırmıştır.

2010'lu yıllarda C2, veri hacmi nedeniyle insan bilişsel kapasitesinin sınırlarını aşmaya başlamış; IBCS (Integrated), ABMS (Advanced Battle Management System), CAC2S (Common Aviation Command and Control System) ve C2BMC (Command and Control, Battle Management, Communications) gibi sistemler sensör ve atıcıları ortak bir karar mimarisi altında toplamıştır.

2020 sonrası dönemde JADC2 (Joint All-Domain Command and Control), çok alanlı komuta-kontrolün yeni paradigması olarak literatürde tartışılmaktadır. Bulut tabanlı komuta merkezleri, edge computing, otonom karar destek algoritmaları ve sensör–atıcı entegrasyonunun kuvvetler arası standartlaştırılması bu yeni çağın temel karakteristikleridir.

Common Operation Picture yani kısaca COP kavramı uzay, istihbarat, lojistik alanlarını da kapsayacak şekilde stratejik seviyeden taktik seviyeye kadar geniş bir alanda uygulama bulmuştur.

Sonuç ve Değerlendirmeler

Komuta-kontrol ekosisteminin son yüzyılda geçirdiği dönüşüm, yalnızca haberleşme teknolojilerindeki gelişmelerin veya bilgisayar sistemlerinin yaygınlaşmasının bir sonucu değildir. Bu dönüşüm aynı zamanda savaşın doğasının, karar verme süreçlerinin ve askerî organizasyon anlayışının yeniden şekillenmesini ifade etmektedir. Bir başka ifadeyle C2 sistemlerinin evrimi, savaşın nasıl icra edildiğinden çok, savaşın nasıl düşünüldüğünü değiştiren köklü bir paradigma değişimini temsil etmektedir.

İncelenen tarihsel süreç, komuta-kontrol mimarisinin üç temel evrim aşamasından geçtiğini göstermektedir. Birinci Dünya Savaşı ve İkinci Dünya Savaşı'nı kapsayan ilk dönemde komuta-kontrol büyük ölçüde insan tecrübesine, fiziksel haberleşme hatlarına ve komutanın sezgisel kararlarına dayanmıştır. Radar teknolojisinin ortaya çıkışı ve erken hava savunma ağlarının kurulması ise savaş alanının ilk kez sürekli gözlemlenebilmesini sağlayarak komuta süreçlerinde önemli bir dönüşüm başlatmıştır.

Soğuk Savaş döneminde nükleer caydırıcılığın ortaya çıkması, karar verme sürelerini saniyeler seviyesine indirirken komuta-kontrol sistemlerini yalnızca haberleşme altyapısı olmaktan çıkarıp stratejik caydırıcılığın temel unsurlarından biri hâline getirmiştir. Bu dönemde geliştirilen SAGE, NORAD, NADGE ve benzeri sistemler, günümüzün dağıtık dijital komuta mimarilerinin teknolojik öncüllerini oluşturmuştur. Aynı zamanda bilgisayar teknolojilerinin askeri karar süreçlerine dâhil edilmesiyle birlikte otomasyon kavramı C2 ekosisteminin ayrılmaz bir bileşeni hâline gelmiştir.

1990 sonrasında başlayan dijital dönüşüm ise komuta-kontrol anlayışında daha köklü bir kırılmaya işaret etmektedir. Sensörlerin, iletişim ağlarının, bulut bilişimin ve yapay zekâ teknolojilerinin birlikte çalışabildiği yeni mimariler sayesinde savaş alanı yalnızca fiziksel bir coğrafya olmaktan çıkmış; gerçek zamanlı veri akışlarıyla tanımlanan dinamik ve çok katmanlı bir bilgi ekosistemine dönüşmüştür. Günümüzde JADC2, FMN, IBCS, C2BMC ve benzeri sistemler, farklı kuvvet unsurlarını ortak bir karar ağı içerisinde birleştirmeyi hedeflemekte; karar üstünlüğünü (Decision Advantage) geleceğin en kritik askerî yeteneği olarak kabul etmektedir.

Clausewitz'in savaşın belirsizliğini açıklayan yaklaşımı ile Jomini'nin savaş alanını geometrik ilişkiler bütünü olarak ele alan kuramı, günümüz dijital C2 sistemlerinin iki temel düşünsel eksenini oluşturmaktadır. Modern sensör ağları, radar kapsama alanları, angajman bölgeleri, veri füzyon merkezleri ve çok alanlı harekât mimarileri, aslında bu iki klasik yaklaşımın günümüz teknolojileriyle yeniden yorumlanmış biçimleri olarak değerlendirilebilir.

Önümüzdeki dönemde komuta-kontrol sistemlerinin gelişim yönünü belirleyecek temel unsur ise yapay zekâ olacaktır. Ancak geleceğin C2 ekosistemi yalnızca daha fazla otomasyondan ibaret olmayacaktır. İnsan-makine iş birliği, açıklanabilir yapay zekâ, etik karar mekanizmaları, siber dayanıklılık, kuantum haberleşme, uzay tabanlı sensör ağları ve otonom platformların müşterek çalışması, yeni nesil komuta-kontrol mimarisinin temel bileşenleri hâline gelecektir. Bu nedenle geleceğin C2 sistemleri yalnızca daha hızlı karar veren yapılar değil, aynı zamanda belirsizlik altında güvenilir, dayanıklı ve birlikte çalışabilir karar ağları olmak zorundadır.

Sonuç olarak komuta-kontrol ekosisteminin yaklaşık yüz yıllık gelişim süreci incelendiğinde, değişmeyen temel unsurun karar üstünlüğü olduğu görülmektedir. Değişen ise bu üstünlüğün nasıl sağlandığıdır. Geçmişte bu üstünlük büyük ölçüde komutanın tecrübesi ve haberleşme hızına dayanırken, günümüzde veri füzyonu, yapay zekâ destekli analiz, ağ-merkezli mimariler ve çok alanlı entegrasyon belirleyici hâle gelmiştir. Bu dönüşüm, gelecekte savaş alanında üstünlük sağlayacak tarafın yalnızca daha fazla silaha sahip olan değil; veriyi daha hızlı işleyen, daha doğru analiz eden ve karar döngüsünü rakibinden daha kısa sürede tamamlayabilen taraf olacağını göstermektedir.

Bu çerçevede komuta-kontrol ekosisteminin evrimi, yalnızca askerî teknolojilerin gelişim hikâyesi olarak değil; aynı zamanda bilgi çağında stratejik üstünlüğün nasıl üretildiğini açıklayan disiplinler arası bir dönüşüm süreci olarak değerlendirilmelidir.



HİBRİT GÖREV GRUBU: İDA'LARIN SAVAŞ GEMİLERİ İLE BİRLİKTE KULLANIMI

Donanmaların işlevselliği; platform ve personel sayısı, bütçe limitleri ve ülke dinamikleri dolayısıyla sınırlandırılmaktadır. Bu nedenlerden dolayı Donanmalar her zaman yeterli sayıda ve yetenekte gemiye/platforma, yetişmiş insan gücüne sahip olamamaktadır. Donanma filolarındaki gemi sayısı nerelerde olabileceğimizi ve neler yapabileceğimizi belirler. Ancak sadece sayılar yeterli değildir: Bir platformun ne yapabileceği (bir etki oluşturmak için ne kadar yetenekli olduğu) giderek daha önemli hale gelmektedir.

İnsansız Deniz Aracı (İDA), su üstünde hareket eden farklı otonomi seviyelerindeki insansız araçları tanımlamaktadır. Sualtındaki insansız araçlar için uzaktan kumandalı araçlar (Remotely Operated Vehicle - ROV) veya otonom sualtı araçları (Autonomous Underwater Vehicle - AUV) tabirleri kullanılmaktadır. İnsansız sistemler, Deniz Kuvvetleri ve diğer askeri kuvvetlerin, özellikle düşmanlardan kaynaklanan yeni askeri zorlukların üstesinden gelmek için takip ettikleri birkaç yeni yetenekten biridir. İnsansız sistemler; sensörler, silahlar veya diğer faydalı yüklerle donatılabilir ve uzaktan, yarı otonom veya tam otonom olarak kullanılabilir.

(E) Tuğa. **Nilüfen ÇOTUK**



İnsansız deniz araçları (**İDA**); keşif, gözetleme, mayın harbi, denizaltı savunma harbi ve lojistik destek gibi çok sayıda görevde etkin şekilde kullanılabilir görülmektedir. Bu araçların **insanlı savaş gemileriyle entegre** edilmesi, deniz kuvvetlerinin kabiliyetlerinin artırılmasında kritik bir aşamayı temsil etmektedir.

İnsansız sistemlerin önemli bir avantajı, insanlı gemi ve uçaklara kıyasla tedarik edilmelerinin daha ucuz olmasıdır. Çünkü tasarımlarında insan operatörler için yer ve destek ekipmanı bulunması gerekmez. İnsansız sistemler, özellikle insanlı operatörlerin fiziksel dayanıklılığını zorlayabilecek uzun süreli görevler ya da insanlı operatörlerin yaralanma, ölüm ya da yakalanma riskinin yüksek olduğu görevlerde, bir başka ifadeyle "sıkıcı, pis, tehlikeli ve zor" (4D: Dull, Dirty, Dangerous, Difficult) görevler için kullanılabilir.

İnsansız ve otonom sistemlerin kullanımı durumsal farkındalık oluşturmakta ve bu da bize hızlı reaksiyon imkânı sağlamaktadır. Bunların entegrasyonu insan gücünde ve personel riskinde azalma, daha düşük işletme maliyetleri, daha fazla kalıcılık/dayanım, daha hızlı ve daha doğru veri işleme ve daha hızlı bir karar döngüsü sağlayacaktır.

Donanmaların insansız savaş sistemleri hedefi, insansız teknolojiyi deniz harekatlarına tam olarak entegre etmek olmalıdır. Çünkü insansız sistemler deniz kuvvetlerinin "daha hızlı anlamasını, daha hızlı hareket etmesini ve sürekli uyum içerisinde olmasını" sağlayacaktır.

İDA'lar, yapay zekâ algoritmaları ve sensör füzyonu sayesinde çevresel verileri analiz ederek görev kararlarını bağımsız biçimde verebilecek seviyeye gelmiştir. Üzerlerine konuşlanabilen sensör ve silah sistemleri sayesinde insanlı bir savaş gemisinin yapabileceği farklı görevleri, birden fazla İDA ile yapabilmek mümkün hale gelmektedir. ABD Task Force 66 Komutanı Tuğamiral Michael Mattis tarafından açıklanan bir analize göre bir muhrip tarafından yapılabilecek görevleri 20 İDA'yla ve 1/30 maliyetle yapmak mümkün olabilmektedir.

İnsanlı gemilerle birlikte kullanımda ise bu araçların gemi savaş yönetim sistemlerine entegre edilmesi, veri bağlarının güvenliği ve görev paylaşımı gibi unsurlar ön plana çıkmaktadır.

Geçtiğimiz yıllarda gelecek donanmaların nasıl olması gerektiğini araştıran çok sayıda çalışma yapılmıştır. Bu çalışmalarda temel olarak iki sonuç çıkmaktadır:

- Birincisi, daha fazla platforma ihtiyaç vardır. Bu da daha süratli ve ucuza inşa edilebilen insansız platformlar ile gerçekleştirilebilir.
- İkincisi, donanmaların görevlerini yerine getirmek için insanlı ve insansız platformların bir kombinasyonunu içeren daha güçlü bir Donanmaya ihtiyacı vardır. Bu maksatla, insanlı platformlar ile insansız sistemlerin birlikte çalışma konseptlerinin belirlenmesi gerekmektedir.

İnsanlı/insansız ekiplerin ve teknolojilerin kullanılması modern savaşı dönüştürecek, asimetrik ve hibrit operasyonları arttıracak, teknolojileri Donanmanın avantajına kullanacak ve savaşçıya savaşı kazanması için avantaj sağlayacaktır. Buna yönelik NATO, "yüksek yoğunluklu ve çok alanlı kolektif savunmaya hazırlıklı olmak üzere yeni savunma planları için gerekli kuvvet, yetenek, kaynak ve altyapıya" duyulan ihtiyacı vurgulamış ve 2018 yılında The Maritime Unmanned Systems (MUS) High Visibility Project adında bir proje başlatmıştır.

Gelecekteki harekatların, Müşterek Kuvvet yapısına sorunsuz bir şekilde entegre olması gereken çok alanlı yeteneklere dayanacağı açıktır. Bugün bile bu kuvvet yapısı insanlı ve insansız sistemlerle birleştirilmektedir. Dünya üzerinde Deniz Kuvvetlerinin birçoğu, insansız sistemleri mevcut organizasyon yapılarına dahil etmeye devam etmeye başlamıştır. Deniz İnsansız Sistemleri şu ana kadar Mayın Karşı Tedbirleri-MKT ve İstihbarat, Gözetleme ve Keşif-İGK gibi Deniz Harekatlarında kendilerini kanıtlamışlardır.



DÜNYADAKİ GELİŞMELER VE ÜLKE BAZLI İNCELEME

Amerika Birleşik Devletleri

ABD Donanması, insansız deniz araçlarının insanlı platformlarla koordineli olarak çalışmasını sağlayacak "Distributed Maritime Operations (DMO)" konseptini geliştirmiştir. Bu konseptte, insansız araçlar deniz harekât sahasında sensör ve silah platformu olarak kullanılmakta, insanlı gemiler ise komuta ve koordinasyon merkezleri olarak görev yapmaktadır. Sea Hunter, Ghost Fleet Overlord ve Orca XLUUV gibi projeler, bu entegrasyonun somut örnekleridir. Özellikle Sea Hunter, okyanus ötesi sefer yapabilen ilk otonom gemi olarak dikkat çekmiştir. 2023-2024 döneminde Pasifikte ve RIMPAC tatbikatlarında yapılan denemelerde, İDA'ların görev yükü olarak konteynerlerde taşınan sensör ve silahlar denenmiştir.



Bu konseptin en büyük avantajı, silah ve sensör sistemlerinin dağıtık olması sayesinde, bir platformun muhasım tarafından etkisiz hale getirilmesi durumunda, diğer platformlardaki sensör ve silahların kullanılabilir olmasıdır. Rusya-Ukrayna savaşında Rusya Karadeniz Filosunun Amiral Gemisi olan Moskva kruvazörünün Ukrayna tarafından batırılması sonucu Rusya büyük bir yetenek kaybına uğramıştır. Bu kruvazör üzerindeki sensör ve silahlar dağıtık bir şekilde İDA'lar üzerinde konuşlu olsaydı, MOSKVA kruvazörünün batırılması ile yaşanan yetenek kaybı yaşanmayacağı aşikardır.

Bu konseptin ikinci avantajı ise, küçük (<50 m) gemilerin büyük savaş gemilerine kıyasla inşa edilebilecekleri tersanelerin çok daha fazla olmasıdır. Örneğin, Türkiye'deki 80 civarındaki tersanede 50 metreden küçük gemiler inşa edilebilirken, 100 metre üzerindeki gemileri inşa edebilecek tersane sayısı 10'un altındadır.

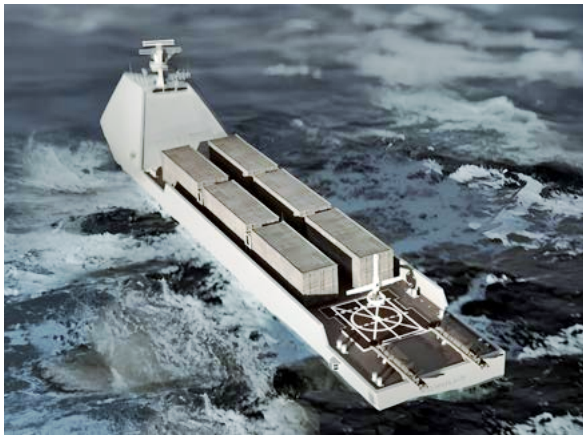
Üçüncü avantaj ise inşa süreleridir. 100 metre civarlarındaki bir savaş gemisinin inşa süresi 36 ayları bulurken, bir İDA'nın inşası 12 aydan daha kısa sürede tamamlanabilmektedir. Bir savaş durumunda, aynı anda çok sayıda tersanede kısa sürede savaş gemisi inşa edebilmek savaşın kazanılması açısından önemli bir parametre olacaktır.



ABD'de devam eden birkaç orta ölçekli İDA projesi bulunmaktadır; Saronic tarafından inşa edilen 45 metrelik bir İDA olan "Marauder" ve Amerika'nın en büyük askeri gemi üreticisi olan Huntington Ingalls Industries (HII) tersanesi 57 metrelik bir İDA olan " Romulus"u geliştirmektedir. Bu projelerin tümü tamamen modüler yükleri öngörmektedir. Marauder, iki adede kadar 40' ISO veya dört adede kadar 20' ISO konteyneri taşıyabilmektedir.



ROMULUS 190, ticari standartlarda bir gövde üzerine inşa edilmiş, modüler, yapay zekâ destekli bir insansız deniz aracıdır. ROMULUS'un yeniden yapılandırılabilir tasarımı, insansız hava sistemlerine karşı koyma (C-UAS), istihbarat, gözetleme ve keşif (ISR), saldırı operasyonları ve insansız su altı araçlarının (UUV) ve insansız hava araçlarının (İHA) fırlatılması ve kurtarılması gibi görevleri destekleyecektir.



Ekim 2025 sonlarında, Shield AI'nın Hivemind otonomi yazılımı HII'nin Odyssey Otonom Kontrol Sistemi ile ROMULUS platformuna entegre edilmiştir. ROMULUS 190, 25 knot'a kadar hız ve 2.500 deniz mili menzile ulaşabilmektedir.

Avrupa

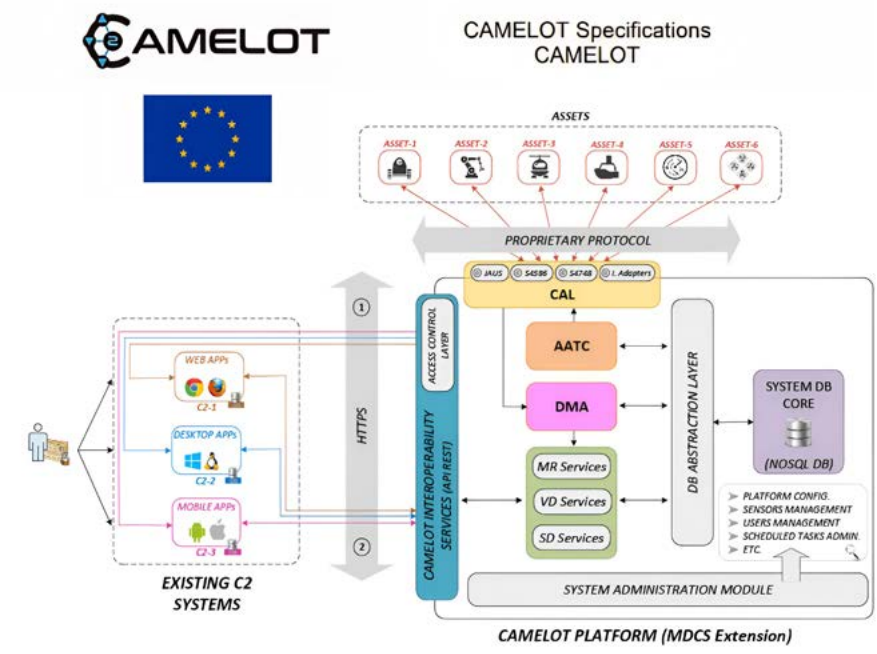
Avrupa Birliğinin Horizon 2020 programı kapsamında 2017 yılında başlatılan CAMELOT projesi ile insansız sistemler için komuta kontrol mimarisinin belirlenmesi ve ilgili modüllerin geliştirilmesi hedeflenmiştir. Başta İngiltere ve Fransa olmak üzere birçok Avrupa birliği ülkenin katıldığı proje 2021 yılında tamamlanmıştır. CAMELOT projesinde yapılan çalışmaların NATO tarafından geliştirilen STANAG 4817 ile uyumlu olması hedeflenmiştir.

Birleşik Krallık tarafında da son yıllarda "İnsansız sistemler ile Denizaltı Savunma Harbi – DSH" konusunda önemli çalışmalar yapmaktadır. Bu projelerden biri olan "Project CABOT" ile İngiltere anakarası üzerinden Kuzey Atlantik bölgesinde,

özellikle Rusya Federasyonu denizaltı tehdidine yönelik olarak, insansız su üstü ve sualtı araçlarının kullanımı ile denizaltıların tespiti, sınıflandırılması, takibi ve önlenmesi hedeflenmektedir.

Birleşik Krallık Kraliyet Donanması, "NavyX" programı kapsamında insansız sistemleri test etmekte ve Type 23 fırkateynleriyle entegrasyon çalışmalarını yürütmektedir. MAST (Maritime Autonomy Surface Testbed) insansız deniz aracı, bu kapsamda hem keşif hem de mayın tarama görevlerinde denenmiştir. İngiltere'nin stratejisi, insanlı gemilerin sensör menzilini ve operasyonel süresini artıracak kuvvet çarpanı etkisi oluşturmaktır. İngilizlerin İDA kullanım konseptinde, İDA'ları ileri gözetleyici olarak kullanmak ve düşmanın ilk tespitini İDA'lar tarafından yaptıktan sonra mümkünse ilk angajmanı da İDA'lar üzerinden gerçekleştirmek bulunmaktadır.

Kraliyet Donanması'nın Geleceğin Hava Hakimiyet Sistemi (FADS) konseptinin bir parçası olarak BAE Systems, Type 83 muhribini desteklemek üzere düşük maliyetli, hızlı inşa edilebilen, mürettebatsız ya da asgari mürettebatlı gemiler önermektedir. Sensör-Etkileyici Platformlar (SEP) adı verilen bu İDA'lar gelecekte dağıtık hava savunma mimarisinin önemli bir unsurunu oluşturabilir.



Type 83 muhribindeki komuta ekibinin kontrolü altında yarı bağımsız çalışacak olan SEP'ler yaklaşık 100 metre boyundadır. Her platform, kendi radarı ve uzaktan komutalı silah sistemlerinin yanı sıra 32 adede kadar dikey fırlatma sistemi (VLS) ile donatılabilmektedir. Minimum müretebatlı konfigürasyonunda, SEP'in çalışması için yalnızca 6 personelin gerekeceği hesaplanmıştır. Otomasyon sayesinde yangın ve yara savunma faaliyetlerinin yönetilebileceği değerlendirilmektedir. Az sayıda mürettebatla bir gemiyi yönetmekle, özellikle de silah fırlatabilen tamamen otonom bir savaş gemisini sahaya sürmek arasında çok büyük bir fark vardır. Bu boyutlardaki bir gemide temel seyir güvenliği, denizde yakıt ikmali, bakım ve arıza durumunda müdahale gibi konuları çözmek için hâlâ yapılması gereken işler mevcuttur.



Hollanda Kraliyet Donanmasının Çok Fonksiyonlu Destek Gemisi (Multifunctional Support Ship – MSS) projesi, eski adıyla TRIFIC & MICAN Projesinin temel amacı, düşük maliyetli ve az personel gerektiren gemiler ile filodaki mevcut savaş gemilerinin kabiliyetlerini arttırmaktır. Bu gemilerin mevcut fırkateynler ile birlikte görev yaparak hava savunma füzeleri başta olmak üzere, Elektronik Harp, uzun menzilli hassas mühimmat (dolanan mühimmat, vb.) ve gözetleme/istihbarat faydalı yüklerini taşıyabilmesi hedeflenmiştir.



Başlangıçta 2 adet olacak şekilde gemi tedarik sözleşmesi Hollanda DAMEN tersanesi ile imzalanmıştır. Tasarım, sivil amaçlı olarak halihazırda kullanılan DAMEN Fast Crew Supplier ticari gemisinin askerileştirilmiş versiyonudur. İlk geminin 2026 yılında, ikinci geminin ise 2027 yılında teslim edilmesi hedeflenmektedir.

Çin Halk Cumhuriyeti

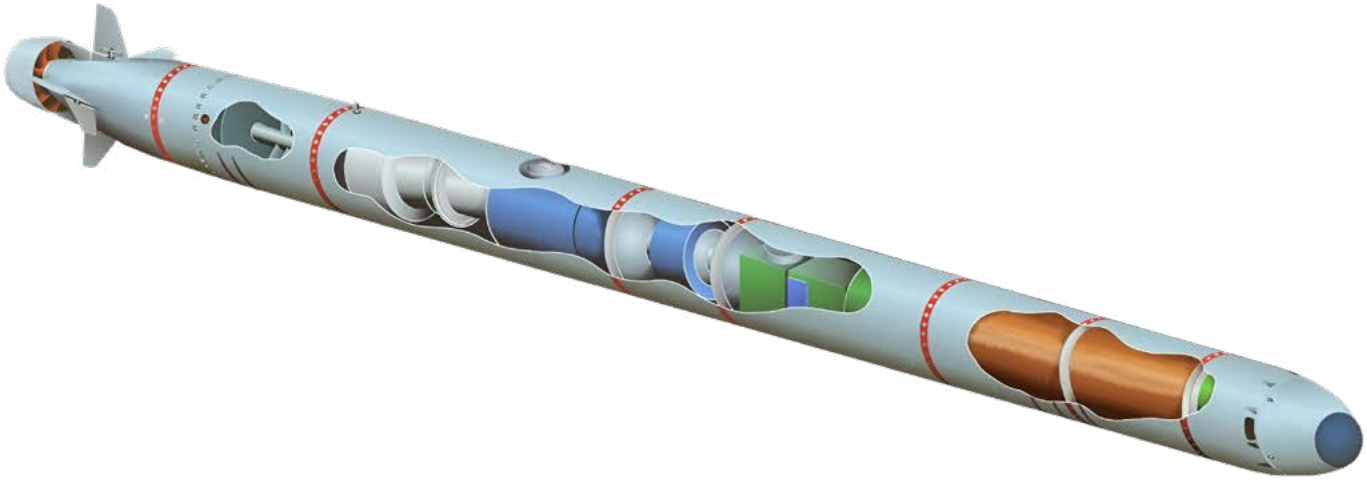
Çin, insansız deniz araçları konusunda son yıllarda ciddi yatırımlar yapmıştır. JARI-USV projesi, çok rollü bir insansız savaş gemisi olarak geliştirilmektedir. JARI-USV, radar, sonar ve füze sistemlerini otonom biçimde kullanabilmekte, insanlı savaş gemileriyle birlikte görev yapabilmektedir. Çin Donanması'nın hedefi, Güney Çin Denizi gibi tartışmalı bölgelerde İDA'ları gözetleme ve savunma unsuru olarak yaygın biçimde kullanmaktır.



Rusya Federasyonu

Rusya, insansız su üstü araçlarından ziyade otonom sualtı araçlarında fark oluşturabilecek sistemler geliştirmiştir. Nükleer tahrikli insansız denizaltı "Poseidon" dikkat çekmiştir. Daha önce Rus kod adı Status-6 olarak bilinen ve Rubin Tasarım Bürosu tarafından üretildiği bildirilen Poseidon; hem konvansiyonel hem de nükleer savaş başlıkları taşıyabilen, 20 m boyunda ve 100 ton ağırlığında, 100 kts sürate sahip otonom, nükleer enerjiyle çalışan torpido benzeri bir insansız sualtı aracıdır. Poseidon, stratejik caydırıcılık konseptinde insanlı denizaltılarla koordineli olarak kullanılmak üzere tasarlanmıştır.

Bunun yanında, Surrogat gibi insansız sistemler, tatbikatlarda insanlı platformlarla birlikte test edilmiştir. Surrogat, nispeten büyük bir konformal sonar dizisine ve yüksek su altı hızlarına işaret eden bir pump jet iticisine sahiptir. Ayrıca, akustik olmayan bir denizaltı tespit sistemi olan SOKS (System Obnarujenia Kilvaternovo Sleda) ile donatılmıştır. Bu sistem, denizaltının izini sürmek için geride kalan kimyasalları ve radyasyonu tespit etmektedir. SOK'ların sensör olarak platforma dahil edilmesi, AUV'nin denizaltılara karşı tasarlandığını göstermektedir.





Türkiye

Türkiye, son yıllarda insansız deniz araçları alanında hızla gelişen ülkeler arasında yer almaktadır. Başta ASELSAN ve Sefine Tersanesi tarafından geliştirilen MARLIN İDA olmak üzere, METEKSAN-ARES, HAVELSAN-YONCA ONUK ve DEARSAN tarafından geliştirilen ULAQ, SANCAR, SALVO İnsansız Deniz Araçları farklı harp nevilerinde yeteneklerini başta Deniz Kurdu Tatbikatı, NATO REPMUS (Recognized Environmental Picture, Maritime Unmanned Systems) Denemeleri ve TSK EH Denemeleri olmak üzere sergilemişlerdir.

Dünyadaki gelişmeler ile karşılaştırıldığında Türkiye'nin oldukça iyi bir seviyede olduğu, kısa sürede insansız deniz araçlarının insanlı platformlarla koordineli olarak çalışmasını sağlayacak bir donanmaya sahip olabilecek teknik yeterliliğe sahip olduğu değerlendirilmektedir.

Operasyonel ve Stratejik Etkiler

Harbin doğası temel itibariyle değişmez, ancak son dönemde harbin karakteri süratle değişmektedir. Harbin doğasının temeli, yıkıcı ve yok edici olmasıdır. Tarih boyunca örneklerini silah, platform ve sensörleri kapsayan harp araç ve gereçlerinde meydana gelen büyük gelişmeler ve nihayetinde ateş gücünün ortaya çıkardığı fark ile gösteren harbin karakteri, günümüzde yine önemli bir dönüşüm aşamasındadır. Ancak günümüzde teknolojinin geldiği seviye nedeni ile bu defa dönüşüm baş döndürücü bir hızda gerçekleşmektedir.

Tarihsel gelişimi içerisinde kürek, yelken, buhar, katı ve sıvı yakıtlar ile nükleer güç tahrik sistemleri hayata geçmiş ve dönemlerinin hâkim gücünü oluşturmuştur. Tekne yapıları ahşaptan, çelik ve kompozit malzemeye dönüşmüş, orta çağda gülle atan topların yerini bugün güdümlü mermiler ve dünyayı bir uçtan bir uca kadar kat edebilen balistik füze sistemleri almıştır. Günümüzde ise yapay zekâ destekli insansız otonom sistemler yeni bir dönemin başlangıcı olmuştur.

İDA'ların insanlı gemilerle birlikte kullanımı, deniz savaşlarının doğasını önemli ölçüde değiştirecektir. Öncelikle riskli bölgelerde insan kaybı azalacak, deniz harekâtlarının daha geniş alanlarda sürdürülmesine olanak tanınacaktır. Ayrıca, otonom sistemlerin sürekli görev yapabilme kapasitesi, keşif ve gözetleme faaliyetlerinde süreklilik sağlayacaktır. Ancak, İDA'ların etkinliği büyük ölçüde şu teknolojilere bağlı olacaktır;

- **Otonomi Yazılımları ve İnsan-Makine İş birliği:** Otonomi ve robotikte yaşanan gelişmeler, önemli bir kuvvet çarpanı olarak harp konseptlerinde bir devrim potansiyeline sahiptir. Artırılmış otonomi, harekât kabiliyetini doğrudan artırmak üzere insansız sistemlerin çok çeşitli görevleri icra etmesine olanak sağlayacaktır. Yüksek otonomi seviyesi ise insan-operatörlerin sürekli girdi yapma ihtiyacı ortadan kaldırılacaktır. Bu durum, insanın, çoklu insansız sistemleri (sürü) aynı anda üst-düzeyde kontrol edebilmesine, sevk ve idaresine olanak sağlayacak ve operatörlerin düşünsel yükünü azaltarak, komuta kararları almasını ve diğer üst seviye görevleri yerine getirebilmesini sağlayarak etkinliği arttıracaktır. Makinelerin kritik birer takım arkadaşı olarak değerlendirildiği, insanlar ve makineler arasında meydana getirilen bir takım, devrimsel bir iş birliğine olanak sağlayacaktır. İnsan-makine iş birliği, insansız sistemlerin "Donanmaları güçlendirecek bütünleşmiş insanlı/insansız sistemler" vizyonunu karşılamak üzere gereklidir. Geleceğin deniz harekatları insanlar ve insansız sistemler arasında daha çok iş birliği gerektirecektir. Otomatik seyir (Denizde Çatışmayı Önleme Tüzüğü – DÇÖT kurallarının otomatik uygulanması) ve Görev Planlaması kritik yeteneklerdir.
- **Haberleşme ve Karşılıklı Çalışabilirlik:** İnsanlı ve insansız sistemlerin dinamik birleşiminden oluşan bir kuvvette, insansız sistemlerin birbirleri ve insan paydaşları ile sistem ve ortam üzerinden iletişim kurabilmesi, bilgi paylaşabilmesi ve iş birliği zorunludur. Güvenli, düşük gecikmeli, karıştırmaya dayanıklı haberleşme sistemleri önemli bir ihtiyaçtır.
- **Ana Tahrik Sistemi:** Uzun süreli görev yapabilen, bakım ihtiyacı ve arıza oranları düşük sistemler
- **Sensör ve Silah Sistemleri:** Süratli üretilebilir, ucuz ve harp sahasında etkili sistemler

Bu dört başlıkta önde olan ülkelerin, gelecekteki deniz savaşlarını kazanmak için aday ülkeler olacağı değerlendirilmektedir.

Gelişmiş ülkelerin sahip olduğu büyük donanmaları, çok sayıda küçük kamikaze bot ve güdümlü mermi kullanabilen asimetrik tehditlerin bertaraf edebildiği simülasyonlar ile 2002 yılında gösterilmiştir.

Ukrayna Rusya savaşında Karadeniz'de bu simülasyonlar kısmen doğrulanmıştır. Rusya'nın Karadeniz filosunun üçte biri, donanması olmayan Ukrayna tarafından insansız deniz araçları ile imha edilmiştir.

Gelecekteki deniz savaşlarında da İDA'ların kullanımı ile bu simülasyonların gerçeğe dönüşme olasılığının yüksek olduğunu düşünülmektedir.

Gelecek Perspektifi

Gelecekte deniz kuvvetlerinin insanlı ve insansız savaş gemilerinden oluşan hibrit görev grupları şeklinde olacağı öngörülmektedir. Bu filolarda insanlı gemiler komuta merkezleri olarak görev yaparken, insansız araçlar keşif, taarruz ve savunma görevlerini üstlenecektir. Yapay zekâ ve otonom karar sistemlerinin gelişmesiyle birlikte İDA'lar, deniz harp sahasında bağımsız taktik kararlar alabilecek seviyeye ulaşacaktır.

Deniz Kuvvetleri, esas olarak donanmaların karşı karşıya geleceği, açık denizlerde harekât icra etmesinin yanı sıra sahile dayalı/yakın harekatlar da icra etmek durumundadır. Sahile yaklaştıkça, platformlara yönelik tehditler de yoğunlaşacaktır. Her bölgede, Donanmalar muhasımın güdümlü mermilerine, denizaltılarına, siber ve elektronik taarruzlarına karşı saldırmak, aldatmak ve savunmak maksadıyla yeterli sayıda platform ve doğru tip yetenekler ile harekât icra edebilmelidir. Böylece geleceğin donanması doğru yeteneklerde insansız sistemler ile daha geniş ve daha yetkin olmalı ve daha hızlı erişime sahip olmalıdır.

İnsansız sistemlerin geleceğin donanmasının bütünleşmiş bir parçası olması gerektiğine dair bir soru işareti bulunmamaktadır. Bu tip sistemler otonomi ve makine öğrenmesi ile birleştiğinde daha fazla avantaj sağlayacaklardır. Ayrıca bu sistemler büyük miktarlarda tedarik edilebilecek maliyette ve önemli bölgelerdeki varlığımızı genişletecek yapıda da olmalıdır.

Sonuç olarak, insansız deniz araçlarının insanlı savaş gemileriyle entegrasyonu, geleceğin donanmalarını daha esnek, dayanıklı ve etkili hale getirecektir. Ancak bu dönüşümün başarılı olabilmesi için başta otonomi ve güvenli/kesintisiz haberleşme olmak üzere olgunlaştırılması gereken teknolojik alanlar bulunmaktadır.




L400

YENİ HAREKÂT ALANI:
UZAY



(E) Alb. İsmail Ergün KOCABIÇAK

20’nci yüzyılın son çeyreğinden itibaren harekâtın hava boyutuna yeni bir boyut daha (**uzay**) eklenmiş ve silahlanma yarışı bu boyuta da taşınmıştır. Bu bağlamda, hava ve uzay birbirinin devamı olarak görülmeye başlanmış ve “**aerospace**” kavramı geliştirilerek satıhta icra edilen görevler uzayda da benzer şekilde icra edilmeye başlanmıştır.



Tarihin ilk zamanlarından itibaren gökyüzü ve ötesinin zihinlerde oluşturduğu sorular ile bu sorulara ilişkin cevap arayışı insanlığın bugünkü teknoloji seviyesine ve uzay çağına ulaşması konusundaki en önemli motivasyon unsuru olmuştur.

Başlangıçta stratejik özerklik ve prestij kaygıları ülkelerin uzay çalışmaları için temel gerekçeyi teşkil etmiştir. Uzayda var olmanın avantajlarını tecrübe eden ülkeler bu alanda önemli yatırımlar yaparak, 1960’larda küresel bir yarışı başlatmıştır. Yıllar içinde uzay yarışı ağırlıklı olarak savunma ve güvenlik gerekçelerinden beslenmiş ancak kaçınılmaz olarak tüm sektörlerde etkisini hissettirmiştir.

Aktörleri ve birbirini takip eden tarihsel gelişim dönemleri dikkate alındığında uzaya yaklaşım geniş kapsamlı bir politika çerçevesine dönüşmüştür. Savunma ve güvenlik boyutunda uzay askerî harekâta katkıları bakımından I. Dünya Savaşı’ndan sonraki dönemde hava kuvvetinin gelişimine benzer bir süreçten geçmektedir. Erişim, üst geçiş, küresel kapsama, uzun süreli uçuş, konumlama, manevra, beka ve önemli mevki sağlama gibi avantajları sayesinde uzay sistemleri, savaşın her seviyesinde (stratejik, operatif ve taktik) kullanan tarafa ayırt edici bir üstünlük sağlamaktadır.

Diğer kuvvetler genellikle operatif ve stratejik seviyeye geçmeden önce taktik seviyede savaşırken, uzay kuvveti savaşın bütün seviyelerinde eş zamanlı olarak harekât icra etme yeteneğine sahiptir. Uzay sistemleri çatışmanın, konvansiyonel, konvansiyonel olmayan (nükleer), asimetrik (terörle mücadele), savaş dışı askerî harekât, insani yardım ve barışı koruma gibi bütün boyutlarında etki ortaya çıkarmaktadır.

Savunma & Güvenlik Ortamı Öngörüsü

Savunma ve Güvenlik yeteneklerine yön veren gelişmeleri ve buna bağlı olarak uzayın gelecekte bu alanda üsleneceği rolleri daha kapsamlı ele alabilmek için güvenlik ortamı, teknoloji ve savaşın karakteri bağlamında bir gelecek projeksiyonunu ortaya koymak faydalı olacaktır.

Geleceğin güvenlik ortamı temel olarak; çok kutupluluğun belirginleşmesi, "Nükleer Kulüp"ün küçülmeden varlığını sürdürmesi, küresel iklim değişikliği sebebiyle uluslararası anlaşmazlıkların göçler, su ve gıda konularında kendini göstermesi, ekonomik açıdan ise ABD ve Çin rekabetinin sürmesi ekseninde tahayyül edilebilir.

Geleceği şekillendirecek teknolojilere yönelik olarak, yapay zekâ ve otonomiye, artan işlem gücüne (kuantum teknolojileri), uzun menzilli hassas angajman yeteneğine sahip silah sistemlerine, enerjiye (verimlilik & temiz enerji), biyoloji ve biyomekaniğe ve nihayetinde uzay teknolojilerine dayalı bir öngörü ortaya konabilir.

Yukarıda bahsi geçen teknolojileri dikkate aldığımızda, savaşın karakterine yönelik öngörü için ise "insan algısı ötesinde hız ve karmaşıklık" ifadesi en anlamlı tanımlama olacaktır. İnsan makine etkileşimi, yapay zekâ ve otomasyon bizleri bu tanımlamaya götüren temel etkenler olarak ön plana çıkmaktadır. Hız ve karmaşıklık aynı zamanda bilgi & karar üstünlüğünü belirleyici unsur haline getirecektir. Bu noktada, yoğun veriden hızlı bilgi üretme (veri füzyonu & analiz), değişen tehdit ortamını gerçek zamanlı olarak izleme (ortam farkındalığı/durumsal farkındalık), geniş alanda etkin komuta-kontrol (geniş alanda kesintisiz haberleşme ağı), sensör ile silah platformları entegrasyonu, otonom operasyon (ağ merkezli yetenekler/harekât) gelişim gösterecek temel fonksiyonlar olarak tanımlanabilir.

Başka bir deyişle; statik, reaktif, etki alanı bölgesel, yığınaklanma prensibine dayalı, genel imha konseptiyle operasyon planlayan, tek/az boyutlu istihbarat ile beslenen 20'nci yüzyılın silahlı kuvvetleri 21'inci yüzyılda; çevik, proaktif, etki alanı küresel, yüksek manevra kabiliyeti ile yüksek mobiliteye sahip, hassas hedefleme yetenekleri artmış ve bilgi üstünlüğü için istihbarat füzyonunu önceleyen bir yapıya dönüşmektedir. Bu dönüşüm kapsamında uzay, sunduğu yetenekler ve imkânlar ile küresel erişim olanakları çerçevesinde silahlı kuvvetlerin en önemli kuvvet çarpanı ve yeni harekât alanı olarak ön plana çıkmaktadır.

Savunma ve Güvenlik İçin Uzay

Savunma ve Güvenlik ortamı ve buna bağlı olarak silahlı kuvvetler yapısındaki dönüşümler; satıh kuvvetlerinin (kara, deniz, hava) operasyonlarının desteği, görüş alanı ötesi haberleşme ve lojistik, ilgi alanında az sayıda unsur ile etki, eş zamanlı yürütülen doğrudan harekât, güvenlik operasyonları, kalıcılık, nüfuz etme ve çeviklik ihtiyacı, hassas angajman ve karar üstünlüğü için yeni yeteneklerin kazanılmasını gerektirmektedir. Bu noktada; farklı seviyelerde, geniş etki alanına sahip çok boyutlu ağ merkezli çoklu ortam harekâtının (multi domain operations) başarısı için uzay yeteneklerinin güç unsurlarına entegrasyonu ve katkısı vazgeçilmez bir hal almaktadır.

Hava ve uzay farklı özellikler gösterir. Ancak askeri unsurlar için bu iki ortam birbirinin kesintisiz devamıdır. Harp prensipleri uzay harekâtında da aynen geçerlidir. Uzay harekâtının icrasına doğrudan etkisi olan uzay ortamının sağladığı; erişim, üst geçiş, küresel kapsama, uzun süreli uçuş, konumlama, manevra, beka ve önemli mevki sağlama gibi avantajları da mevcuttur.

Bugün için "hâkim tepe" olan uzay, aslında silahlı kuvvetlerin harekât icra ettiği ortamlar içinde jeopolitik önemi en fazla olan ortamdır. Uzay, doğası gereği küreseldir, coğrafi bölge, karasuyu ve hava sahası kısıtları bulunmaz. Uzay görev alanlarında icra edilen fonksiyonlar askeri uzay kavramı çerçevesinde uzayın askerî harekâta yönelik rollerini tanımlamaktadır. Bu doğrultuda askeri olarak uzay görev alanları, literatürde farklı yaklaşımlar ile farklı sınıflandırmalar yapılabiliyor olmakla birlikte, Uzay Destek, Kuvvet Artırma, Uzay Kontrol ve Uzaydan Kuvvet Kullanımı olarak sınıflandırılabilir.

Uzay Destek temel olarak, uzaya erişim, uyduların yörüngeye yerleştirilmesi, görev yörüngesinin muhafazası ve bu amaçla gerçekleştirilen yörünge operasyonları ve uydu kaynaklı verilerin kullanıma sunulabilmesine yönelik gerçekleştirilen her türlü işlemleri ve fonksiyonları içermektedir.

Kuvvet Artırma, satıh (kara-deniz-hava) kuvvetlerinin harekât etikliğini artırmaya yönelik fonksiyon ve yetenekleri bünyesinde barındırmaktadır. Bu yönüyle de uzayın "Kuvvet Çarpanı" etkisini ifade etmektedir. Daha açık deyişle uzaydan istihbarat, gözetleme ve keşif (İGK), haberleşme, çevresel gözlem (meteoroloji dahil), navigasyon, erken ihbar Kuvvet Artırma görev alanı kapsamında gerçekleştirilen fonksiyonlardır.

Uzay Kontrol; bir yandan uzaya güvenli ulaşım ve kesintisiz bir uzay kullanım olanağı sağlarken, aynı olanakların düşmana tanınmaması anlamına gelmektedir. Bunu başarmak için oluşturulacak uzay gücünün; uzayı gözlemleme, uzayı kullanma, dost kuvvetlerin uzay yeteneklerine düşman tarafından zarar verilmesini önleme ve düşmanın uzaydan yararlanmasını engelleyebilme yeteneklerine sahip olması gerekmektedir.

Uzaydan Kuvvet Kullanımı; askeri operasyonları desteklemek için uzaydan yerdeki ve uzaydaki hedeflere karşı güç kullanılması/saldırı anlamına gelmektedir. Bu yetenek, uzay programlarının askerî harekâta yönelik olan en aktif bölümünü oluşturmaktadır. Taarruz yetenekleri ele alındığında, savunma amaçlı olmak üzere geliştirilecek yetenekler, uzaydan veya satıhtan yönelecek hasım tehdidini etkisiz hale getirme amacıyla uzayda silah sistemlerine sahip olunmasını gerektirecektir. Bu nokta da aslında Uzay Kontrol ve Uzaydan Kuvvet Kullanımı görev alanları, içerdikleri sistemler ve gerçekleştirilen fonksiyonlar bağlamında kesişmektedir. Taarruz noktasında Uzaydan Kuvvet Kullanımı, Uzay Kontrol görev alanından taarruz yeteneklerinin savunma amaçları dışında konvansiyonel bir harbin bağımsız unsuru olarak doğrudan saldırı amacıyla kullanılması yönüyle ayrılmaktadır.

Bu doğrultuda savunma ve güvenlik bağlamında uzay; satıh kuvvetlerinin desteği noktasında harekâtın etkinliğini artıran bir kuvvet çarpanı ve tehdit oluşturan, hedef alınan ve bu yönleriyle de bizatihi çatışmanın gerçekleştiği alan olarak taarruzî rolleri çerçevesinde iki farklı düzeyde etki sağlamaktadır.



Bu iki rolün, birbirinin alternatifi değil, aksine tamamlayıcısı ve gelişim sürecinin evreleri olarak görülmesi gerekmektedir. Askeri uzay görev alanları ile uzayın askerî harekâtta rolleri arasındaki korelasyona bakacak olursak, temel tespit olarak:

• Uzay Destek, Kuvvet Artırma ve Uzay Kontrol görev alanının Uzay Alanı Farkındalığı (UAF)'na yönelik fonksiyonları askeri uzayın Kuvvet Çarpanı rolünü,

• Uzay Kontrol kapsamında Tedâfüî ve Taarruzî fonksiyonlar ile Uzaydan Kuvvet Kullanımı fonksiyonları askeri uzayın Taarruzî rolünü ortaya koymaktadır.

Uzay Yeteneklerinin Harekâta Katkıları

Birinci Körfez Savaşı (1991), ABD ordusunun küresel konumlandırma sistemlerini ve diğer uzay tabanlı yeteneklerini kullanması nedeniyle sıklıkla "ilk uzay savaşı" olarak anılmaktadır. Bu, ABD'nin uzay yetenekleri olmayan rakiplere karşı yürüttüğü birçok çatışmanın ilkidir. Otuz yıl sonra, Rusya-Ukrayna savaşı belki de ilk iki taraflı uzay savaşı olarak ayrı bir öneme sahiptir. Bu iki önemli harekât arasında geçen süre zarfında uzay yetenekleri, pek çok farklı seviyedeki harekâtta kullanılmıştır. Yaklaşık 30 yıllık bu serüven kapsamında uzay yeteneklerinin askeri amaçlı kullanımı ve harekâta olan katkılarını sistematik bir yaklaşım ile ele alırsak ön plana çıkan kullanım durumları/fonksiyonlar aşağıda özetlenmiştir:

Komuta-Kontrol ve Haberleşme: Uzayın, satıh kuvvetlerinin desteği kapsamındaki en çarpıcı ve vazgeçilmez katkısı olarak dikkati çekmektedir. Her şartta kesintisiz ve güvenli iletişim için özellikle genişleyen ilgi alanının beraberinde getirdiği artan görüş alanı ötesinde iletişim ihtiyacı uydu haberleşmesini vazgeçilmez kılmaktadır. Uydu haberleşmesi münferit bir fonksiyon olarak sağladığı avantajlar yanında komuta-kontrol, hava-füze savunma, ateş destek gibi birçok fonksiyonun etkinliği için de en kritik altyapı olma özelliğine sahiptir.

İstihbarat, Gözetleme ve Keşif: Barış zamanından itibaren ihtiyaç duyulan hedef istihbaratının üretilmesi amacıyla farklı yörüngelerde konuşlandırılmış uydular ile karasuyu ve hava sahası kısıtlaması olmaksızın görüntüleme yapılması, elektronik ve sinyal istihbaratı toplanması için veriler alınması bilgi üstünlüğüne katkı sağlamaktadır. Coğrafi veri uygulamaları ile de; yüksek doğruluklu haritalar, sayısal yükseklik modelleri, kontrol noktaları ile doğruluğu artırılmış ortofotolar, ilgili platformlar için yüksek kalitede görselleme verisi sağlayarak operasyonel etkinliği önemli ölçüde artırmaktadır.

Konumlama, Seyrüsefer ve Zamanlama: Harekât alanında, hassas angajman, etkin haberleşme, intikal ve konuşlanma (mobilite), lojistik destek gibi alanlarda satıh kuvvetlerine katkı sağlamaktadır. Konumlama, seyrüsefer ve zamanlama, uydu haberleşmesi ile birlikte kullanıldığında dost-düşman birlik takibi, harekât alanı durumsal farkındalığı, personel kurtarma, hassas manevra ile yakın hava desteği ve çatışmayı önleme kapsamında ikâme edilemeyecek yetenekler sunmaktadır.

Çevresel Gözlem ve Meteoroloji: Harekât alanının karakterizasyonu, harekât planlama, arazi analizleri (çıkarma/indirme bölgesi, termal iz, değişiklik ve kamuflaj tespiti, vb.) süreçlerinde önemli yetenekler sunmaktadır. Güvenilir ve sıklıkla güncellenen meteoroloji verisi; satıh kuvvetlerinin harekât planlaması, lojistik destek, uzay harekâtı planlaması (özellikle görüntüleme, haberleşme ve navigasyon uydu sistemleri üzerindeki etkilerinin öngörülmesi) bağlamında etkinliğini önemli ölçüde artırmaktadır.

Erken İhbar ve Füze Savunması: Uydu sistemleri, balistik füze tehdidinin "boost" (ilk ateşleme) anında tespitini mümkün kılmaktadır. Uzay platformunun, satıhta konuşlu sensörler ile bütünleşik operasyonu ile yeteri kadar önceden füze ikazının alınması, muhtemel fırlatma yeri ve muhtemel etki alanının tespiti vasıtasıyla silah sistemleri ile tehdidin bertaraf edilmesi sürecinde yeterli reaksiyon süresini kazanılarak, pasif korunma tedbirlerini uygulama, aktif savunma sistemlerini harekete geçirme imkanına kavuşulmaktadır.

Yukarıda özetlenen faaliyet alanlarına yönelik uzay sistem ve yetenekleri ötesinde Uzay Kontrol ve Uzaydan Kuvvet Kullanımına yönelik geliştirilecek yetenekler (uzay alanı farkındalığı ve taarruzî uzay yetenekleri) ve sahip olunacak sistemler; stratejik caydırıcılık, satıh ve uzay hedeflerine hassas angajman ve imha kapasitesi, karar üstünlüğü, hasımın uzay kabiliyetlerini yok etme/etkisizleştirme ve hasımın satıh kuvvetlerinin uzay desteğini engelleme gibi harbin kazanılmasına doğrudan etki edecek seviyede harekâta katkı sağlama potansiyeline sahiptir.

Halen devam eden Rusya-Ukrayna savaşı gerginlik anından itibaren uzayın askeri harekâta olan etkileri ve katkısı noktasında en çarpıcı örnekleri bizlere sunmaktadır. Rusya-Ukrayna savaşında uzay sistemlerinin kullanımı; uydu

haberleşmesi, konumlama, seyrüsefer ve zamanlama, istihbarat, gözetleme ve keşif, durumsal farkındalık ve komuta-kontrol alanlarında ön plana çıkmaktadır. Bu fonksiyonlara yönelik talebi karşılama noktasında yetersiz kalan askeri sistemlerin oluşturduğu boşluğu ticari sistemler/hizmetler kapatmaktadır. Bilgi ve karar avantajı elde etmek için ön plana çıkan uzay yetenekleri, buna mukabil karşı uzay yeteneklerinin de harekât alanında kendini daha yoğun bir şekilde göstermesi sonucunu doğurmaktadır.

Rusya-Ukrayna savaşı geleceğin harekât ortamının potansiyel habercisi olarak uzaya ilişkin bazı dersler sunmaktadır:

Ukrayna, Şubat 2022'deki işgalden bu yana, ulusal bir uzay kapasitesi olmamasına rağmen, hızla gelişen ticari pazardan, veri ve hizmetler satın alarak bu durumu telafi etmiştir. ABD ve Avrupalı ticari firmaların (Starlink, Planet Labs., Maxar, vb.) uzay tabanlı haberleşme ile istihbarat, gözetleme ve keşif varlıklarını savaş alanında etkili bir şekilde kullanmıştır.

SpaceX firması Ukrayna'ya, ilk etapta 5.000 Starlink uydu terminali göndermiştir. Bunlar, kritik harekât alanı iletişimini ve bilgi paylaşımını sağlamak için kullanılmıştır. Ayrıca Starlink, baz istasyonları ile diğer altyapıları tahrip edilmiş olması nedeniyle bağlantısı kesilen sivil nüfus merkezlerini de birbirine bağlamıştır. Haberleşme dışında, uzay tabanlı yer gözlem hizmetleri Rusya-Ukrayna savaşında küresel medya ve sivil toplum kuruluşları tarafından insan hakları ihlallerini ve savaş suçlarını takip etmek için de kullanılmaktadır. Bu kapsamda sağlanan veriler, sivil hedeflere yönelik saldırılara ilişkin kanıtların yanı sıra Rusya'nın ve Ukrayna'nın cephe hatlarındaki askeri konumuna ilişkin gerçek durumlarını da ortaya koymaktadır.



STARLINK UYDU TERMİNALLERİ

Karşı uzay yetenekleri (kinetik, elektromanyetik ve siber olmak üzere üç ana grupta tanımlanabilir) kapsamında siber ve elektronik karıştırmanın kinetik uzay saldırılarından daha muhtemel olduğu görülmüştür. Siber saldırılar uzay enkazı oluşturmadığından, önleyici füzeler yapmaktan daha ucuz olduğundan, inkar edilebilirlik sunduğundan ve muhtemelen silahlı misillemeyi teşvik etme olasılığı düşük olduğundan gelecekte de ilk aşamada kullanılacak karşı uzay yetenekleri olarak ön plana çıkmaktadır.

Rusya-Ukrayna savaşında da Rusya'nın karşı uzay saldırıları elektromanyetik ve siber alanla sınırlı kalmıştır. İşgalden yalnızca bir saat önce Rusya, ViaSat'ın KA-SAT ağının yer tabanlı altyapısına bir siber saldırı başlatarak Ukrayna Hükümeti ve ordusu da dahil olmak üzere binlerce Avrupalı kullanıcının yaygın bir kesinti yaşamasına neden olmuştur. Özellikle Küresel Konumlandırma Sistemi (GPS) sinyallerine Rusya'nın yaptığı müdahaleler, Ukrayna'nın yeteneklerini zayıflatma, birçok güdümlü mühimmat ve insansız sistemin operasyonunu olumsuz etkileme noktasında ön plana çıkmıştır. Bu durum genel anlamda, silahların hedeflerini ıskalama riskini artırmakta, hassasiyet eksikliğini telafi etmek için doygunluk saldırılarının daha fazla kullanılmasını gerektirmekte ve aynı zamanda ikincil hasar riskini de artırmaktadır. Ayrıca karşı uydu saldırılarına karşı yedeklilik ve çok sayıda uydudan oluşan alçak yörüngede uydu takımları temelinde yetenek geliştirmenin uzay yeteneklerinin bekası ve sürdürülebilirliği bakımından ön plana çıkacağı görülmektedir.

Ticari bir sistem olarak Starlink'in harekât alanına entegrasyonu ve ticari uzaktan algılamanın taktiksel kullanımı çığır açıcı niteliktedir. Ticari uzay yeteneklerinin çatışmalarda/harekât alanında kullanımı ve etkisi arttıkça, bunlara yönelik tehdidin artması ve birer doğal hedef haline gelmeleri kaçınılmazdır. Uluslararası toplum, "bir muharibin savaş çabalarına doğrudan ve bilerek katkıda bulunan üçüncü taraflara, orantılılık sınırları dahilinde ve minimum ikincil hasara neden olacak şekilde saldırılabileceği" yönündeki yerleşik ilkeyi kabul etmektedir. Diğer bir deyişle; eğer ticari bir sistem, harekât alanında askeri yetenekler sağlamak için kasıtlı olarak kullanılıyorsa, savaş zamanında meşru bir hedef olarak görülebilmektedir. Bu noktada, ticari uzay varlıkların ne zaman ve nasıl korunacağı önemli bir politik ve askeri konu olarak ortaya çıkmaktadır.

Yeni Harekât Alanı Olarak Uzay

Uzay tabanlı uygulamalar ve bu uygulamalar için yörüngeye yerleştirilen sistemler nitelik ve nicelik olarak artıkça, çoklu ortam harekâtı icra edebilmek bakımından uzayın vazgeçilemez ve ikâme edilemez yetenekler sunduğu tecrübe edilmektedir. Bununla birlikte, yakın dönem harekât tecrübeleri uzaydaki her türlü varlığın (sivil, ticari veya askeri) bir ülkenin milli güç unsurlarından biri halini almaya başladığını gösterdiğinden, tehdit kavramı tehdidin yöneleceği ortam ve sistemler noktasında da uzayı ön plana çıkarmaktadır.

Yakın geçmişe kadar savaşın uzay alanına yayılması kuvvetli bir ihtimal olarak görülmemiş veya ancak bu yeteneğe sahip birkaç önemli ülke arasında tam ölçekli konvansiyonel bir harbin çatışmayı uzaya taşıyacağı düşünülmüştür. Bu düşünceyi destekleyen en önemli varsayım, konvansiyonel harpte caydırıcılığın devam edeceği ve uzay sistemlerine çeşitli vasıta ve yöntemlerle saldırının kolaylıkla göze alınmayacağı olmuştur.

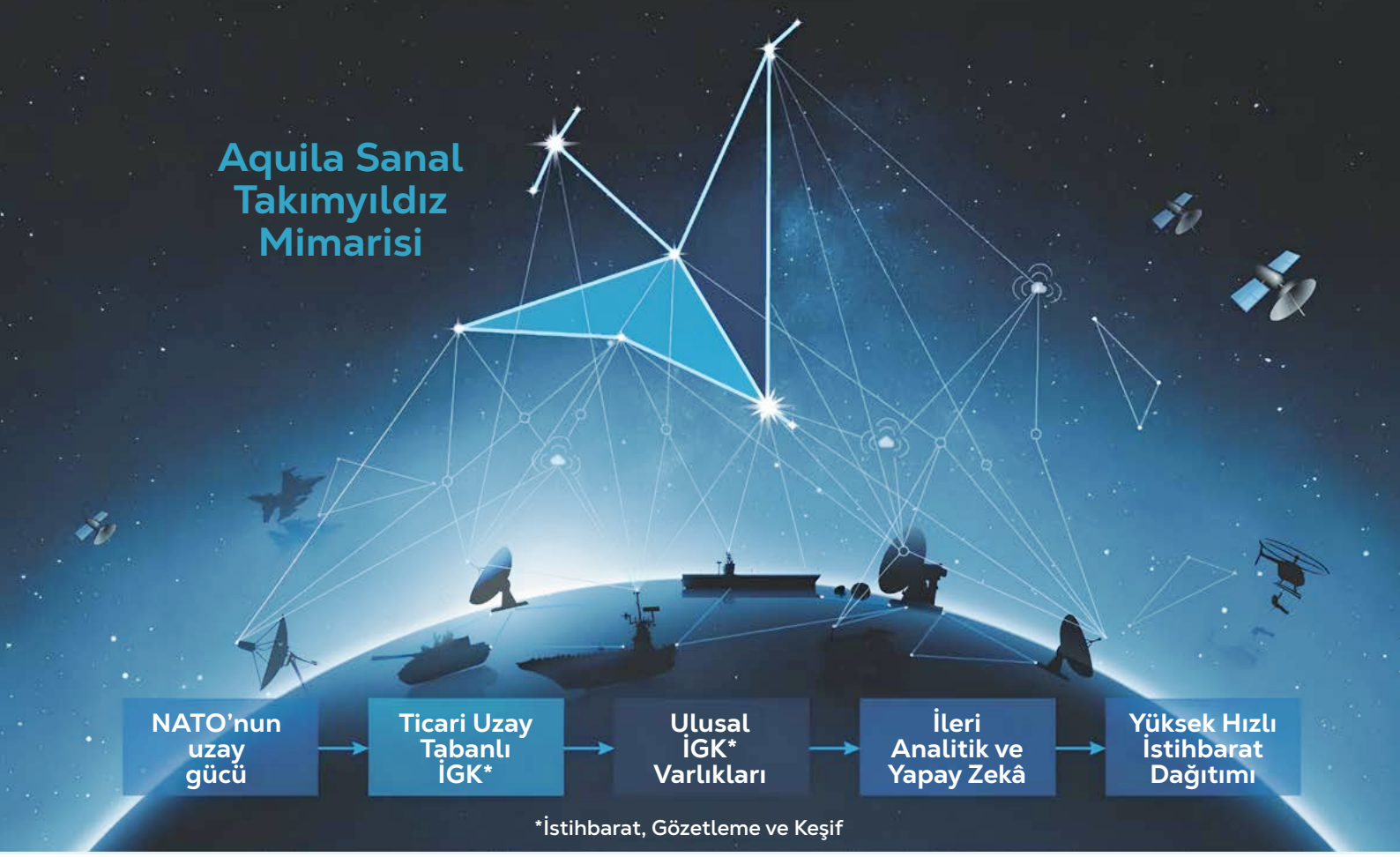
Ancak Çin'in kinetik imha silahı ile Fengyun 1C uydusunu imha etmesiyle ve benzer testi Hindistan'ın da 2020 yılında gerçekleştirmesiyle ABD, Rusya, Çin ve Hindistan'ın karşı uydu (anti-satellite – ASAT) alanındaki yetenekleri uluslararası kamuoyu nezdinde teyit edilmiştir. Bununla birlikte, bu ülkeler dışında başta Fransa olmak üzere diğer ülkelerin de bu konuda çalışmalar yaptığı tahmin edilmektedir. Bu da göstermektedir ki artık uzay askerî açıdan güç gösterimi aracı ve caydırıcılık unsuru haline gelmiştir.

Bu gelişmeler, uzayı diğer tüm harekât alanları ile daha fazla entegre olmaya doğru itmektedir. Ayrıca uzayı "Stratejik Seviyeye" limitleyen bakış açısı değişerek, Kuvvet Artırma yetenekleri bağlamında taktik sahada da bir kuvvet çarpanı, Uzay Kontrol & Uzaydan Kuvvet Kullanımı yetenekleri temelinde ise başlı başına çatışmanın yaşanacağı alan olma yönünde bir gelişimi zorlamaktadır.

Bu durum uzayın artık münferit bir harekât alanı olarak ele alınmaya başladığı bir dönemi beraberinde getirmiş ve nihayetinde NATO 2019 yılında uzayı resmen yeni harekât alanı olarak deklare etmiştir. Bu deklarasyon aslında geleceğin harekâtına ve harekât ortamına yönelik ip uçlarını da bizlere sunmaktadır. Uzayın kendisi bir boşluk olsa da, gelecekte oradaki herhangi bir savaş boşlukta gerçekleşmeyecektir; karada veya denizde başlayan savaşlar uzaya kadar uzanacaktır. Uzayda saldırıya uğramak ise, sadece uzayda karşılık vermek anlamına gelmeyeceğinden, topyekün bir harbin habercisi olabilecektir.

Birleşik NATO Kabiliyeti

İttifakın Uzay Tabanlı Sürekli Gözetleme Kabiliyeti





Türkiye'de Uzay

Ülkemizde uzay ile ilgili faaliyetlerin başlangıcı 1960'lı yıllara dayanmaktadır. Uydu haberleşme yer istasyonu uzay yetenekleri ile ilgili ilk varlığımız olarak kayda geçmiştir. Uzun yıllar haberleşme uydularından istifade edilmesi ile sınırlı olan uzay serüvenimiz, 1994 yılında TÜRKSAT serisinin ilk uydusunun yörüngeye yerleştirilmesi ile önemli bir aşama kat etmiştir. Takiben 2003 yılında haberleşmeye, Bilsat uydusu vasıtasıyla, görüntüleme (yer gözlem) yeteneği de eklenmiştir.

2000 yılında Hv.K.K.lığının, TSK adına uzay yeteneklerini geliştirmek üzere uzay ile ilgili ilk yapılanmayı gerçekleştirmesi bu alanda yeni bir süreci başlatmıştır. Bu süreçte TSK tarafından sahip olunacak uzay yetenekleri ve uydu istemlerine yönelik TSK Uzay Yol Haritası oluşturulmuş, önemli uydu sistemi projeleri tanımlanarak hayata geçirilmeye başlanmış ve nihayetinde Hv.K.K.lığı bağlısı olarak Uzay Komutanlığı teşkil edilmiştir. Eş zamanlı olarak sivil ve ticari alanda da atılımlar gerçekleştiren Türkiye'nin uzay ekosistemi, ülkemizin kendi uydusunu tasarlayıp üretebilen ülkelerden biri olmasını sağlayan gelişmelere yönelik önemli adımları içeren yaklaşık 30 yıllık bir tarihçeyi ortaya çıkarmıştır.

Söz konusu 30 yıllık tarihçe kapsamında geliştirilen ve yakın döneme (2030'lu yıllara kadar) kadar kazanılması planlanan yetenekler, temel uzay faaliyet alanları bazında aşağıda özetlenmiştir:

- Yer Gözlem alanında aktif (SAR) ve pasif (EO) görüntüleme, elektronik destek, ilgi yer istasyonları, kullanıcı yazılım & donanımları.
- Haberleşme alanında TÜRKSAT 6A Uydusu, TÜRKSAT Yenileme Uyduları, uydu yer istasyonları ve kontrol merkezleri ile kullanıcı terminalleri.
- Uzaya Erişim (Fırlatma) alanında Sonda roketi, hibrit roket motoru (Ay Görevi), fırlatma merkezi.



- Uzay Alanı Farkındalığı kapsamında optik temelli uzay gözlem, analiz, kontrol ve yönetim için yazılım araçları.
- Uzay Araştırmaları bakımından iki aşamalı (sert iniş ve yumuşak iniş) planlanan Ay görevi (uzay aracı ve yer sistemi), astronot yetiştirilmesi ve uzaya ilk Türk astronotun gönderilmesi.
- Uydu Tabanlı Navigasyon alanında ise, Uzay Tabanlı GNSS Düzeltme Sisteminin hayata geçirilmesi.

ASELSAN ve Uzay

Gelecekte ülkelerin uluslararası ortamdaki konumunun, etkilerinin ve prestijinin uzayın ne ölçüde kullanıldığı ile doğru orantılı olacağı inancını taşıyarak uzay çalışmalarını sürdüren ASELSAN; şirket yapısı, faaliyet alanları ile uydu ve uzay teknolojileri ile etkileşimi dikkate alındığında kendini "Eşik Uzay Şirketi (Verge Space Company)" olarak konumlamaktadır.

Türkiye'nin uzay ekosisteminde ASELSAN, üretim katmanı aktörü olarak hem uzay kesiminde (Upstream) hem de Yer ve Kullanıcı Kesiminde (Downstream) ürün ve hizmetlere sahiptir. ASELSAN küresel uzay teknolojilerine yönelik değişim ve eğilimleri de dikkate alarak iki farklı boyutta uzay yetenekleri geliştirmektedir. Bu boyutlardan ilki; temel uzay uygulama alanlarında oldukça yüksek performans ile birlikte yüksek güvenilirlik ve görece uzun görev ömürleri sunan büyük uydular (uydu kütlesi›500 kg) kapsamında geliştirilen Aktif ve Pasif Görüntüleme, GEO Haberleşme ile Uydu Tabanlı Navigasyon alanlarında görev yükleri, görev yükü ekipmanları ile platform ekipmanlarıdır. Bu ürünleri ile ASELSAN ekosistemde;

- Uzay Kesiminde, görev yükleri, veri sıkıştırma kayıt ve formatlama birimleri, kripto birimleri, F/O jiroskop ve görev yükü veri indirme alt sistemi,
- Yer Kesiminde, Uydu Yer İstasyonunda görev yükü ile ilgili veri işleme alt sistemleri, kripto ve şifre çözme birimleri ve Haberleşme Kontrol Merkezleri,
- Kullanıcı Kesiminde ise uydu haberleşmesi ön planda olmak üzere her türlü uydu haberleşmesi terminali ve alıcılar konularında ülkemizin öncü çözüm merkezi olarak konumlanmıştır.

Bununla birlikte küresel uzay sektörü derin dönüşümlerden geçmektedir. Uzay sektörünü geniş ölçüde etkileyen ana eğilimler analiz edildiğinde hızlı genişleme, yıkıcı teknolojik bağlam ve daha zorlu bir operasyonel ve jeopolitik ortam ön plana çıkan üç temel eğilim olarak görülmektedir. Uzay pazarlarını yenilikçi planlar ve iş modelleri ile ele geçirmeyi amaçlayan, özel sermayeye dayalı girişimlerle öne çıkan, uydularda küçülme ve risk kabul seviyesinde artış ile rafta hazır birim bileşen kullanımını önceleyerek maliyet ve takvim avantajı sağlayan Yeni Uzay veya Uzay 4.0 adı verilen uzaya yönelik yeni ticari odaklı yaklaşım ASELSAN'ın uzaya ilişkin stratejisi kapsamında ikinci boyutu teşkil etmektedir.

Bu kapsamda, ASELSAN Yeni Uzay yaklaşımıyla Elektronik Destek, LEO Haberleşme ve uzay savunma yetenekleri bağlamında sistem çözümü sunmaya yönelik gayretleri ile ön plana çıkmaktadır. Bu alanlarda çözümler sunabilmek bakımından; programlanabilir uydular (uydu platformu dahil) ve sensörler, esnek/işlemsel görev yükleri (sayısal işlemci birimler), uydu takımları için uydular arası optik bağlantı, aktif faz dizili antenler, soğutmalı IR dedektörler, yüksek bant genişliğine sahip alıcılar, uzay tabanlı veri işleme ve uydu takımı yönetimi için Yapay Zeka (Artificial Intelligence-AI) uygulamaları, seri üretilebilir uydular ve uydu seri üretim yaklaşımları konularında çalışmalara hız verilmektedir.

GELECEĞİN TANK VE ZIRHLI ARAÇ TEKNOLOJİLERİ

Kara harp alanı insanlık tarihinin en eski harp alanıdır. Kara harbinin tarihteki seyrinde; 8.yy'da barutun ve 13.yy'da ateşli silahların Çinliler tarafından icadı, 19.yy'da makineli tüfeklerin ve 20.yy'da motorlu araçların, tankların ve uçakların kullanılmaya başlaması muharebe sahasında oyun değiştirici etkiler yapmıştır.

Savaş, ilk olarak karada başlayarak gelişen teknolojiyle birlikte farklı alanlara doğru genişlemiştir. Bu durum, Kara Kuvvetleri'nin diğer kuvvetler (deniz ve hava) ile müşterek, çok uluslu ve askerî olmayan diğer unsurlar ile de birlikte harekât icra edebilme yeteneğine sahip olmasını gerekli kılmıştır.

Bulunulan dönemin ihtiyaçları ve teknolojinin sağladığı imkanlar çerçevesinde harp silah ve araçlarının ateş gücü, beka, hareket kabiliyeti ve komuta kontrol yeteneklerinde zaman içinde önemli gelişmeler sağlanmıştır. Benzer şekilde tank teknolojisi de 20'nci yüzyıl boyunca; özellikle II. Dünya Savaşı, Soğuk Savaş dönemi, Körfez Savaşı ve modern asimetrik çatışmaların ortaya çıkardığı gereksinimleri karşılamak için sürekli yenilenmiştir. Bu yenilenme, yalnızca teknik kapasite artışıyla sınırlı kalmamış, tankların taktik rolü, organizasyon içindeki konumu ve dijitalleşme seviyesi de dönemin askeri ihtiyaçlarına paralel olarak dönüşmüştür.



Bu yazıda, tank ve zırhlı araçların geleceğine yönelik daha sağlıklı bir değerlendirme yapılmasına katkı sunması amacıyla; günümüzün harekât ortamı, muharebe sahası fonksiyon alanları, **tank ve zırhlı araçların kara harbindeki rolü ve geleceğin harp ortamında tanklara neden ihtiyaç duyulacağı** hususlarına yer verilmiştir.

(E) Alb. Eşref DEMİRDAĞ

Modern harp silah ve araçları, sahip olan taraf için önemli bir kuvvet çarpanı haline gelmiştir. Öyle ki, bu durum; güçler arasındaki dengenin bozularak muharebelerin asimetrik güçler arasında yaşanmasına ve açık alanlardan meskûn mahallere doğru kaymasına neden olmuştur. Geçmişte düzenli ordu ile yapılan konvansiyonel savaş yerini daha çok devlet dışı silahlı aktörlerin de yer aldığı hibrit savaşlara bırakmaktadır. Bununla birlikte; hibrit ortamda harekatta, konvansiyonel savaşlarda başvurulan birçok usul, yöntem ve taktik kullanılmaya devam etmektedir. Bu nedenle, hibrit harekatın yanı sıra konvansiyonel savaşın her zaman ihtimal dahilinde olduğu asla göz ardı edilememelidir.

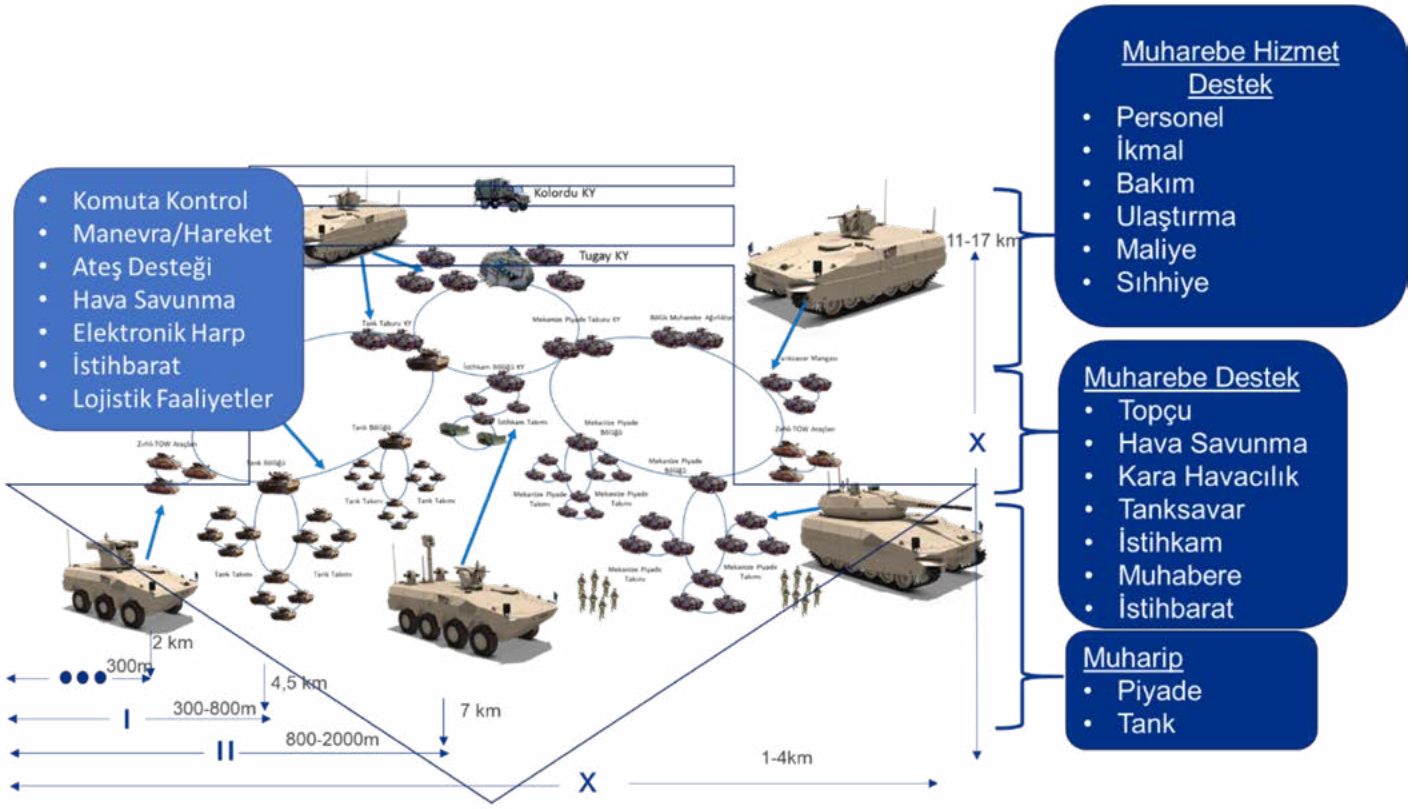
Günümüzde modern harekât ortamı artık, artan karmaşıklık ve geleneksel alan sınırlarının belirsizleşmesiyle karakterize edilmektedir.

Modern harekât ortamına yönelik olarak NATO; Kara, Deniz, Hava, Siber ve Uzay olmak üzere beş alanı kapsayan Çok Alanlı Harekât (Multi-Domain Operations) Konseptini açıklamıştır. Konsept ile, "İttifakın istenen yer ve zamanda birleşen etkiler ortaya çıkarmasını sağlamak için, tüm operasyonel alanlar ve ortamlarda askeri faaliyetlerin askeri olmayan faaliyetlerle senkronizasyonu" amaçlanmıştır.

Muharebe Sahası Fonksiyon Alanları

Muharebe gücünü hiçbir faaliyet, silâh, sınıf veya kuvvet tek başına oluşturamaz. Faaliyet ve sistemlerin doğru bileşimi gücü oluşturur. Komutanlar, faaliyetleri ve kaynakları "tamamlayıcı etki, destekleyici etki ve asimetrik etki" olmak üzere üç temel konseptin ışığı altında birleştirerek ortaya çıkan "Karma Etki" ile bu gücü oluşturur. Değişik kuvvetlerin farklı imkân ve kabiliyetlerinin birleştirilmesi ve bir noktaya toplanması ile tamamlayıcı etki oluşturulur. Tank piyade iş birliği, hava savunma ve topçu birliklerinin tank ve piyadeden oluşan manevra birliklerini desteklemesi buna örnek gösterilebilir.

Muharebe gücünün etkin yönetimi, "Komuta Kontrol, Manevra, Ateş Desteği, Hava Savunma, Elektronik Harp, İstihbarat ve Lojistik Faaliyetler" olmak üzere yedi ana fonksiyon alanındaki yönetim sistemleri ile sağlanmaktadır. Bu fonksiyon alanlarındaki faaliyetlerin yerine getirilmesi için birlikler; Muharebe, Muharebe Destek ve Muharebe Hizmet Destek" birlikleri şeklinde teşkil edilmiştir. Örnek olarak, Tugay seviyesindeki birliklerin sınıf isimleriyle birlikte muharebe sahasındaki temsili yerleşimi aşağıda verilmiştir:



Şekil 1 - KARA MUHAREBE SAHASI FONKSİYON ALANLARI

Tank ve piyadeden oluşan muharip birlikler kara birliklerinin esas muharebe gücünü oluşturur ve muharebe sahasının en önünde yer alır. Muharip birliklerin ana teçhizatı olan tank ve zırhlı araçların; ateş gücü, hareket kabiliyeti ve zırh koruma özellikleri en üst seviyeye çıkartılmıştır. Diğer sınıf ve silahlarla koordineli olarak, ateş manevra ve darbe etkisinden faydalanarak düşmana yaklaşmak ve onu yok etmek muharip birliklerin esas görevidir. Bu görevin yerine getirilmesinde tank ve piyade birbirlerinin tamamlayıcı unsurlarıdır. Muharip gücün, ihtiyaç duyulan yer ve zamanda topçu tarafından sürekli ateş desteğinin sağlanması, hava savunma sistemleri ile hava tehditlerine karşı korunması, taarruz yeteneği için hava kuvvetleri desteğinin sağlanması, haberleşme ve elektronik harp desteklerinin sağlanması muharebe görevinin başarılması için olmazsa olmaz tamamlayıcı ve destekleyici unsurlardır.

Tanklar ve Zırhlı Araçlar

Yakın dönemde yaşanan hibrit savaşlar, modern zırhlı birliklerin teknoloji ve taktiklerinin denendiği çok sayıda muharebeye sahne olmuştur. Özellikle Ukrayna Rusya Savaşında RF Kara Kuvvetlerinin yaşadığı tank ve zırhlı araç kayıpları ve bu kayıpları veriş şekli, tankların modern harp sahasındaki rolüne ve geleceğine ilişkin değerlendirme yapılmasına olanak sağlamıştır. Javelin ve NLAW gibi modern seyyar tanksavar füzelerinin ve kamikaze İHA'ların tanklara karşı etkili oldukları görülmüştür. Ayrıca zırhlı araçların yerini tespit etmek ve hedef almak için kullanılan İHA'lar, tankların görünürlüğünü artırarak daha savunmasız hâle getirmiştir.



Rus kuvvetlerinin, yoğun mayınlı alanlarda ve tanksavar füzeleriyle donatılmış savunma hatlarında ciddi zayiatlar vermesi, tankların muharebe sahasında tek başına yeterli olmayacağı öğretisini bir kez daha doğrulamıştır. Tankların etkin bir şekilde kullanılabilmesi için hava savunma sistemleri, piyade birlikleri ve elektronik harp unsurlarıyla yakın eş güdümün hayati olduğu gerçeği teyit edilmiştir. Tankların taktik ve teknik kullanımına aykırı olarak, RF'nin bazı saldırılarında tankları, destekleyici piyade unsurları veya hava desteği olmaksızın kullanması, bu araçların pusuya düşmesine ve imha edilmesine yol açmıştır. Bu durum, zırhlı birliklerin etkili bir şekilde kullanılabilmesi için iyi planlanmış müşterek operasyonların gerekliliğini bir kez daha göstermiştir.

Savaş, klasik tank ve zırhlı araç tasarımlarının beka kabiliyetine ilişkin hususları da öne çıkarmıştır. Örneğin, tanksavar füzelerine karşı aktif koruma sistemleri (AKS) kullanımının önemi ortaya çıkmıştır. Ayrıca daha düşük radar ve termal izi ile gelişmiş elektronik savunma sistemleri gibi teknolojilerin önemi artmıştır.

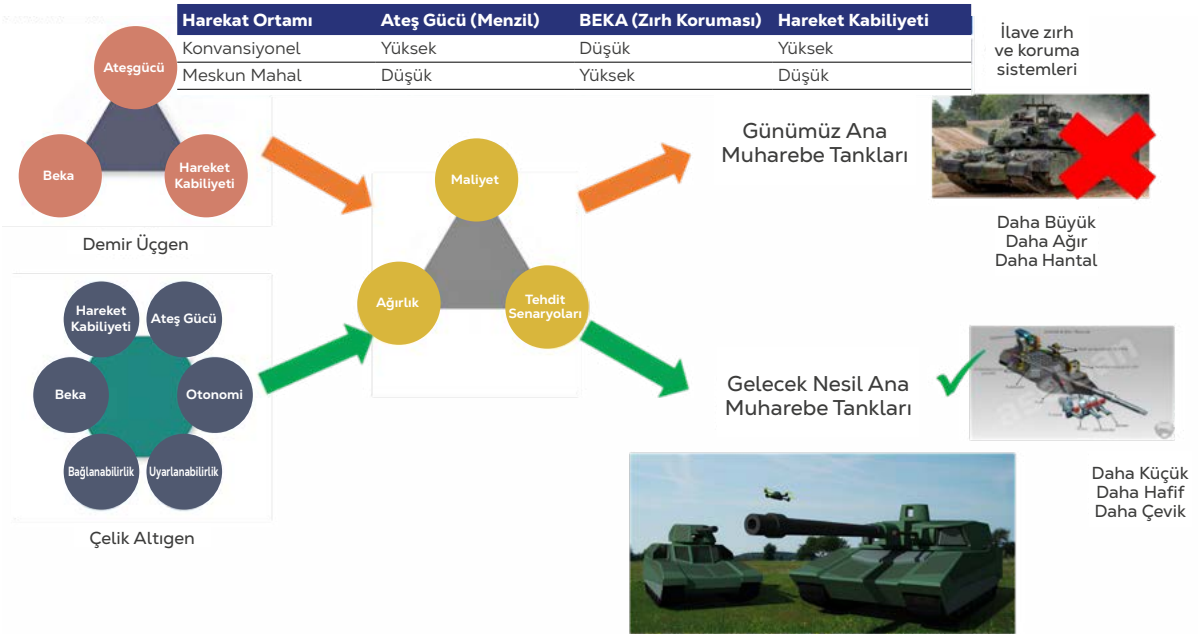
Yapılan tespitler ve yakın dönem muharebe sahası tecrübelerinden de anlaşılacağı üzere tank ve zırhlı araçlar hem konvansiyonel harp hem de hibrit harp ortamında vazgeçilmez bir silah sistemi olarak kullanılmaya devam etmektedir. Sahip olduğu yüksek ateş gücü, yüksek hareket kabiliyeti ve yüksek koruma özellikleri ile oluşturulan ateş, sürat ve baskın etkisi tankları kara harekatının vazgeçilmez silahı yapmaktadır. Ateş gücü, hareket kabiliyeti ve beka yeteneklerinin en üst seviyede optimize edildiği silah sistemi olan tanklar bu özellikleriyle kara gücünün en etkili kara silahı olmaya gelecekte de devam edecektir. Bu gerçekten hareketle birçok ülke tarafından, ihtiyaç ve teknoloji değerlendirmeleri doğrultusunda envanterlerindeki tankların modernizasyonu ve/veya yeni tank tedarik edilmesine yönelik çalışmalar yürütülmektedir.

Aşağıdaki tabloda Avrupa'da yürütülen tank programları örnek olarak verilmiştir:

ÜLKE	ADET	TİP	AÇIKLAMA
Almanya	123	Leopard 2A8	Mayıs 2023, KNDS Almanya, 18 adet Leopard 2A8 (105 adet opsiyonlu), 2025-2026'da teslimat
Norveç	54	Leopard 2A8 NO	Mart 2023, KNDSAlmanya, Leo 2A7 NO, Leo 2A8 NO versiyonuna yükseltilecek. CORTEX Typhon C-UAS
Litvanya	44	Leopard 2A8	Aralık 2024, Almanya ile ortak tedarik anlaşması, İlk Zırhlı Birlik, 1 Tb. Leo2 A8, 2 tabur CV90
İsveç	44	Strv 123B	Kasım 2024, KNDSAlmanya, Leo2A8, 2027-2031'deteslimat
İsveç	124	Strv 123A	Mevcut Leo2 AS (Strv 122)'lerin yükseltilmesi
Hollanda	46	Leopard 2A8	Eylül 2024, Leopard 2A8, 2011 'den bu yana ilk operasyonel AMT'ler olacak, 2027-2030'da teslimat
Hırvatistan	40-50	Leopard 2A8	Kasım 2024, KNDS Almanya, 2027-2030'da teslimat
Çek Cum.	61	Leopard 2A8	2030 ve sonrası
Çek Cum.	70	Leopard 2A4	Aralık 2024, Rheinmetal tarafından yenilenmiş İsveç tankları, 2026'da teslimat
Polonya	1,000	K2	Temmuz 2022, 180 adet 2025'te, 820 adet 2026 ve sonrasında Polonya'da üretim,
Polonya	250	M1A2 SEPv3	Nisan 2022, Teslimat 2026'ya kadar devam edecek.
Polonya	28	M1A2 SEPv2	Eğitim amaçlı kullanılmaktadır.
Polonya	116	M1A1	Ocak 2022
Romanya	54	M1A2 SEPv3	Kasım 2023
İngiltere	148	Challenger 3	Mayıs 2021, Rheinmetall BAE Systems Land (RBSL), 2027-2030'da teslimat. EuroTrophy takılabilir olacak.
Türkiye	250	Altay	2025 ve sonrası
Fransa	200	Leclerc XLR	2020 (50), 2021 (50), Aralık 2024 (100) 160 adet 2030 sonuna, 40 adet 2035 sonuna kadar tedarik edilecek

Tablo 1 - Avrupa Tank Tedarik Programları (Kaynak: Jane's Defence)

Burada sorulması gereken, yazımızın da konusu olduğu üzere, tankın bugün ve gelecekte hangi yeteneklere sahip olacağıdır. Bu kapsamda yürütülen ve öne çıkan çalışmaları iki ana kategoriye ayırmamız daha doğru olacaktır. Birinci kategoride, demir üçgen tasarım kriterlerine göre geliştirilmiş kendi içinde üç nesilde gruplandırılan, günümüze kadar geliştirilen ve modernize üçüncü nesil tanklar, ikinci kategoride ise, çelik altıgen tasarım kriterlerine göre geliştirme çalışmaları halen devam eden dördüncü nesil tanklar yer almaktadır. Bu sınıflandırmaya göre öne çıkan yeni tank tasarım kriterleri aşağıda verilmiştir:



Şekil 2 - TANK TASARIM KRİTERLERİ

3'üncü nesil modern ana muharebe tankları, günümüzün yeni tank teknolojilerinin uygulandığı ALTAY gibi yeni tasarım ürünü veya önceki versiyonlarının modenizasyonu ile geliştirilen tanklardan oluşmaktadır. Bunlara, Leopard 2A8, Leclerc XLR, Challenger 3, M1A2 SEPv3/v4 gibi modernize tankları örnek verebiliriz. Mevcut tasarım kriterlerine ilave olarak, geleceğin harp ortamı gereksinimleri doğrultusunda otonomi, modülerlik ve bağlanabilirlik kriterlerine göre yürütülen ve 4'üncü nesil tanklar arasında yer alması planlanan ALTAY T3, K3, M1E3, MGCS vb. gelecek nesil ana muharebe tankı çalışmalarında geleceğin teknolojilerinin de kullanılması öngörülmektedir.

Tank ve Zırhlı Araçlar İçin Yeni Teknolojiler

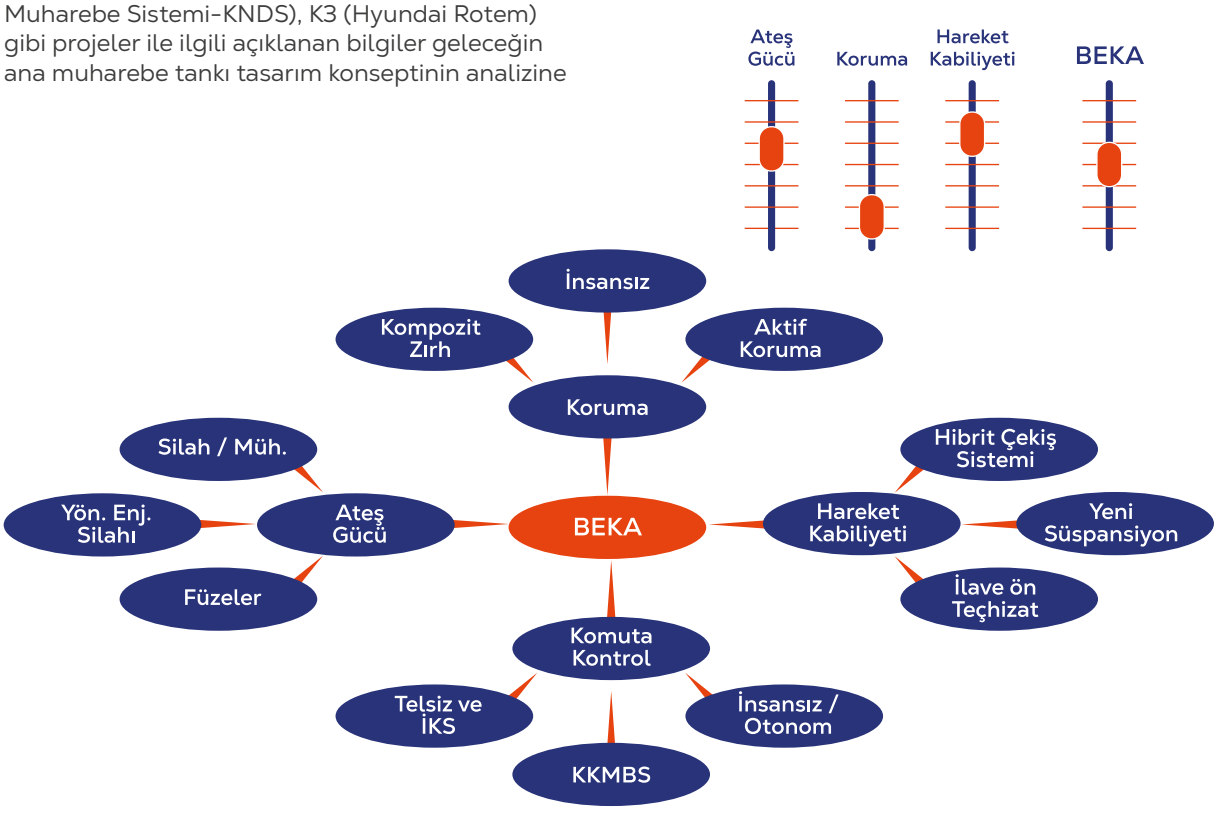
Tanklara yönelik yeni tehditlerin ortaya çıkması tankların bu tehditlerin üstesinden gelebilecek şekilde yeniden tasarlanmasını gerekli kılmıştır. Yeni nesil ana muharebe tankı programlarında ateş gücü, hareket kabiliyeti, beka, sensörler, komuta kontrol ve sürdürülebilirlik konularında çalışmalar yürütülmektedir. Modernize üçüncü nesil tanklarda uygulanan yeni teknolojiler ile yeni konsept tank çalışmaları kapsamında her biri farklı gelişim aşamalarında olan; M1A3 tankının mühendislik versiyonu M1E3 (General Dynamics Kara Sistemleri-GDLS), T-14 Armata (Rus Ural Tasarım Bürosu), Avrupa'nın gelecekteki tankı MGCS (Ana Kara Muharebe Sistemi-KNDS), K3 (Hyundai Rotem) gibi projeler ile ilgili açıklanan bilgiler geleceğin ana muharebe tankı tasarım konseptinin analizine olanak sağlamaktadır. Geleceğin tank teknolojileri kapsamında yürütülen çalışmaları aşağıda görülen başlıklarda inceleyebiliriz.

Yeni/Yakın Vadeli Teknolojiler (0-10 Yıl)

Ateş Gücü

Akıllı/Programlanabilir Mühimmatlar: Hafif zırhlı hedeflere ve piyade birliklerine karşı parçacıklı, hava infilaklı ve programlanabilir tapalı tank topu mermileridir. M1A2 SEP v3, Leopard 2A8 ve Type 99 tanklarında kullanılmaktadır. Diğer modern tanklarda da yaygınlaşacağı öngörülmektedir.

Güdümlü Mermiler/Hassas Mermiler: Klasik tank mühimmatının etki mesafelerinin ötesindeki hedeflere uzun menzilde hassas vuruş sağlamak için uçuş sırasında düzeltme yapabilen GPS/INS veya arayıcı başlıklı mermilerdir. Rus tanklarında kullanılmıştır. Sırasıyla 9M112 Kobra HEAT, 9M116, 9M117, 9M119 füzeleri ve versiyonlarının kullanıldığı çeşitli mühimmatlar 1980'li yılların başından itibaren geliştirilmiş ve kullanılmaya başlanmıştır. ARMATA tankında yeni geliştirilen 9M119M1 füzeli 3UBK21 Sprinter sisteminin kullanılmasının düşünüldüğü ve menzilin daha da artırılacağı açık kaynaklarda belirtilmektedir. İsrail tarafından LAHAT, Ukrayna tarafından, KOMBAT, KONUS, FALARICK sistemlerinin geliştirildiği bilinmektedir.



Şekil 3 - TANKLARDA YENİ TEKNOLOJİLER



Yapay Zekâ Destekli Gelişmiş Atış Kontrol Sistemi: Sensör füzyonu ile mürettebatın bilişsel yaptığı iş yüklerinden olan hedef tespit teşhis ve tanımanın yapay zekâ destekli atış kontrol sistemiyle otomatik yapılması ile daha hızlı atış çevrim süreleri ve balistik düzeltmelerin otomatik yapılması hedeflenmektedir. Belirtilen özelliklere sahip gelecek nesil VOLKAN Tank Atış Kontrol Sistemine yönelik ASELSAN'da çalışmalar başarıyla yürütülmektedir.

Hayatta Kalma

Aktif Koruma Sistemleri (APS): Güdümlü tanksavar füzesi ve RPG vb. tanksavar roketi tehditlerini zırha çarpmadan önce yakalayan veya şaşırtan fiziksel ve işlevsel imha sistemleri modern tanklarda yaygın olarak kullanılmaya başlamıştır. Geleceğin tanklarında da vazgeçilmez bir gereksinim olmaya devam edecektir. Batı ülkelerindeki modern tanklarda TROPHY (Rafael), zırhlı muharebe araçlarında ise IRON FIST (IMI) aktif koruma sistemlerinin yaygınlaşmakta olduğu görülmektedir. ASELSAN geliştirdiği AKKOR, PULAT gibi sistemleri ile bu alanda dünyada başı çeken birkaç firma arasına girmiştir.

Modüler Kompozit ve Reaktif Zırh: Sahada daha kolay onarım/değişim ve göreve özel koruma paketleri ile daha etkin ve sürdürülebilir beka sağlanması hedeflenmektedir.

İz Yönetimi: Radar, kızılötesi, görsel ve akustik bantlarda tespiti azaltmak için kaplamalar, şekillendirme ve egzoz yönetimi çalışmaları ile tankın tespitinin azaltılması hedeflenmektedir.

Sensörler, EH ve Komuta

Sensör Füzyonu ve 360° Durumsal Farkındalık: Panoramik kameralar, termal, LIDAR/radar (izin verilen yerlerde), mürettebat için ekranlara veya mürettebat kaskına entegre edilmektedir. Gelecek, veri edinme, işleme ve paylaşma konusunda giderek daha karmaşık ve güçlü yöntemlere büyük ölçüde bağımlıdır. Sistemlerin yerleştirilmesi, güç gereksinimleri, korunması ve tam kapasiteyle kullanılma yeteneği, tasarım değerlendirmelerinde öne çıkmaya devam edecektir.

İHA, İKA ve dolanan mühimmat, beka sistemleri, veri paylaşımı mürettebata ilave yük getirmemeli, otomasyon ile bazı bilişsel ve fizikler yüklerin mürettebattan alınması ve gereken durumlarda ilave mürettebat 'sistem operatörü' olarak düşünülmelidir.

Muharebe Sahası Ağ iletişimi / C4I Entegrasyonu: Paylaşılan taktik görüntü için insansız hava araçlarına, diğer araçlara, askerlere ve daha üst kademelere güvenli veri bağlantıları sağlanabilmektedir.

Entegre İHA'lar (İHA'lar): Keşif ve hedef belirleme için tanktan fırlatılan küçük keşif İHA'ları tank ve zırhlı araçlara entegre çalışabilmektedir. Söz konusu sistemlerin kablosuz şarj edilerek görev sürelerinin artırılmasına yönelik çalışmalar yapılmaktadır.

Araçtan Fırlatılan Dolanan Mühimmat: Tank tarafından taşınan/kontrol edilen kısa menzilli saldırı İHA'ları ile özellikle görüş hattı ötesindeki hedeflerin tespiti ve imhası amaçlanmaktadır. Konsept tank çalışmaları kapsamında tanıtılan Rheinmetall tarafından geliştirilen KF-51 tankında HERO 120 Starter sistemi kullanılmıştır.

Lojistik ve Sürdürülebilirlik

Öngörücü Bakım Ve Dijital İkizler: Yerleşik sensörlerin durum bazlı bakım için sistemlerin sağlık durumunu bildirmesi, arızaların oluşumu öncesinde gerekli önleyici müdahalenin yapılarak arızaların azaltılması hedeflenmektedir.

Modüler Görev Yükleri: İlave mürettebat taşıma, istihkamcılık, komuta veya kurtarma için tak-çalıştır modüller ile muharebe sahası ihtiyaçlarının karşılanmasında uygulama ve kullanım etkinliğinin artırılması hedeflenmektedir.

Ortaya Çıkan/Gelecekteki Teknolojiler (10+ Yıl)

Yüksek Enerjili Yönlendirilmiş Enerji Silahları (DEW): Sensörleri, optikleri veya gelen tehditleri kısa mesafelerde işlevsel imhası için lazer silahlarının geliştirilmesine yönelik çalışmalar yapılmaktadır. Yüksek yerleşik güç gerektirmesi nedeniyle hazırlık seviyesi henüz düşüktür.

Elektromanyetik Raylı Toplar (uzun vadeli konsept): Çok yüksek hızlı fırlatıcılar teknolojik olarak cazip olmakla birlikte büyük güç/termal çözümler gerektirmektedir.

Yakıt Hücreleri ve Tam Elektrikli Tahrikler: Hibrit Tahrik Sistemleri teknolojik hazırlığının yüksek olması nedeniyle kısa vadede kullanılmaya başlaması ihtimal dahilindedir. Teknolojilerde sağlanacak ilerlemeye bağlı olarak yakıt hücreleri ve tam elektrikli tahrik sistemleri ile yüksek elektrik gücünün elde edilmesi mümkün olabilecektir.

Gelişmiş Malzemeler ve Meta Malzemeler: Daha hafif, daha güçlü zırh, sensörleri yanıltmak için spektrumları değiştiren uyarlanabilir (adaptif) kamuflaj sistemlerinin kullanılması ile tank ağırlığının ve görünürlüğünün azaltılması mümkün olabilecektir.

Daha Yüksek Otonomi Seviyeleri / İsteğe Bağlı Olarak İnsanlı Operasyon: Uzaktan kullanım, yarı otonom karar döngüsünde bir insanı tutma (man in-the-loop) ve bazı muharebe görevleri için gözetimli tam otonom (man on-the-loop) kullanım seçenekleri mümkün olacaktır. Etik ve yasal faktörler hangi teknolojinin benimseneceği hususunda belirleyici olacaktır.

Sürü Entegrasyonu: Keşif, aldatma ve doğrudan saldırı için küçük İHA/OSA/robot sürülerini kontrol eden merkez görevi gören tanklar konseptinin benimsendiği tanıtılan geleceğin tankı çalışmalarında görülmektedir.

Kuantum Sensörleri ve Haberleşme: Bugünkü teknoloji seviyesiyle pratik saha kullanımından daha uzak olmakla birlikte, potansiyel olarak daha düşük tespit edilebilirliğe sahip iletişim veya sensör yeteneklerine sahip olunmasını amaçlayan çalışmalar sürdürülmektedir. Muharebe Sahası Sistemlerinin İnterneti (Internet of Battlefield Things- IoBT) kapsamında, ağ teknolojisi, bulut bilişim ve uç bilişim (edge computing), yapay zekâ ve makine öğrenmesi, siber güvenlik, veri füzyonu ve analitiği teknolojilerinden faydalanılmaktadır. Bu teknolojiler sayesinde diğer alanlarda (deniz, hava ve uzay) bulunan platformlar arasında da hızlı ve güvenli haberleşmenin sağlanması hedeflenmektedir.

Bu teknolojiler geleceğin tanklarını nasıl şekillendirecek?

Zırh Merkezli Hayatta Kalma Yeteneğinden Sistem Merkezli Hayatta Kalma Yeteneğine Geçiş

Ağır pasif kompozit zırh önemini korumaya devam edecek, ancak aktif koruma, iz azaltma ve ağ iletişimi ile tamamlanacaktır (ve bazen kısmen değiştirilecek). Hayatta kalma yeteneği katmanlı bir sisteme dönüşmektedir.



Şekil 4 - KARA ANA MUHAREBE SİSTEMİ (MAİN GROUND COMBAT SYSTEM-MGCS)

Dağıtık Bir Ağda Sensör-Atıcı Merkezi Olarak Tanklar

Tank, gerçek zamanlı paylaşılan bir taktik resimde bir merkez olacak ve sensör verilerini (İHA, piyade, uydular) alıp gereken diğer unsurlara sağlayacak. Bu, sensör-atıcı zaman çevrimini kısaltacak ve ağdaki en uygun atıcıya dağıtılmış ateş gücüne olanak tanıyacaktır.

Daha Küçük Mürettebat / İsteğe Bağlı Olarak İnsanlı Araç ve Kuleler

Otomasyon (otomatik doldurucu, navigasyon yardımcıları, yapay zekâ hedefleme asistanları), mürettebat azaltmalarına veya uzaktan komutalı kullanıma olanak tanıyacaktır. Mürettebatla, azaltılmış mürettebatla veya tamamen uzaktan (yasal/etik sınırlamalarla) çalışabilen, isteğe bağlı olarak insanlı tasarımların uygulanması beklenmektedir.

Görev Uyumluluğu ve Yaşam Döngüsü İyileştirmeleri

Modüler kuleler, yük bölmeleri ve elektronikler, iyileştirmeleri daha hızlı ve daha ucuz hale getirir. Aynı şasi, modülleri değiştirerek tank, komuta aracı, hava savunma, havan veya istihkam aracı olarak kullanılabilecektir.

Enerji Merkezli Tasarım

Güç üretimi, depolama ve dağıtımı önemli bir tasarım kriteri haline gelmektedir. Elektrik mimarisi sensörleri, elektronik harp, yönlendirilmiş enerji silahları ve gelecekteki diğer sistemleri destekleyebilmelidir. Lojistiğin, enerji yönetimine (şarj, yakıt hücreleri) ve yerel enerji ikmallerine doğru kayacağı değerlendirilmektedir.

Doktrin ve Taktikler:

Daha Yüksek Tempo, Daha Dağıtık

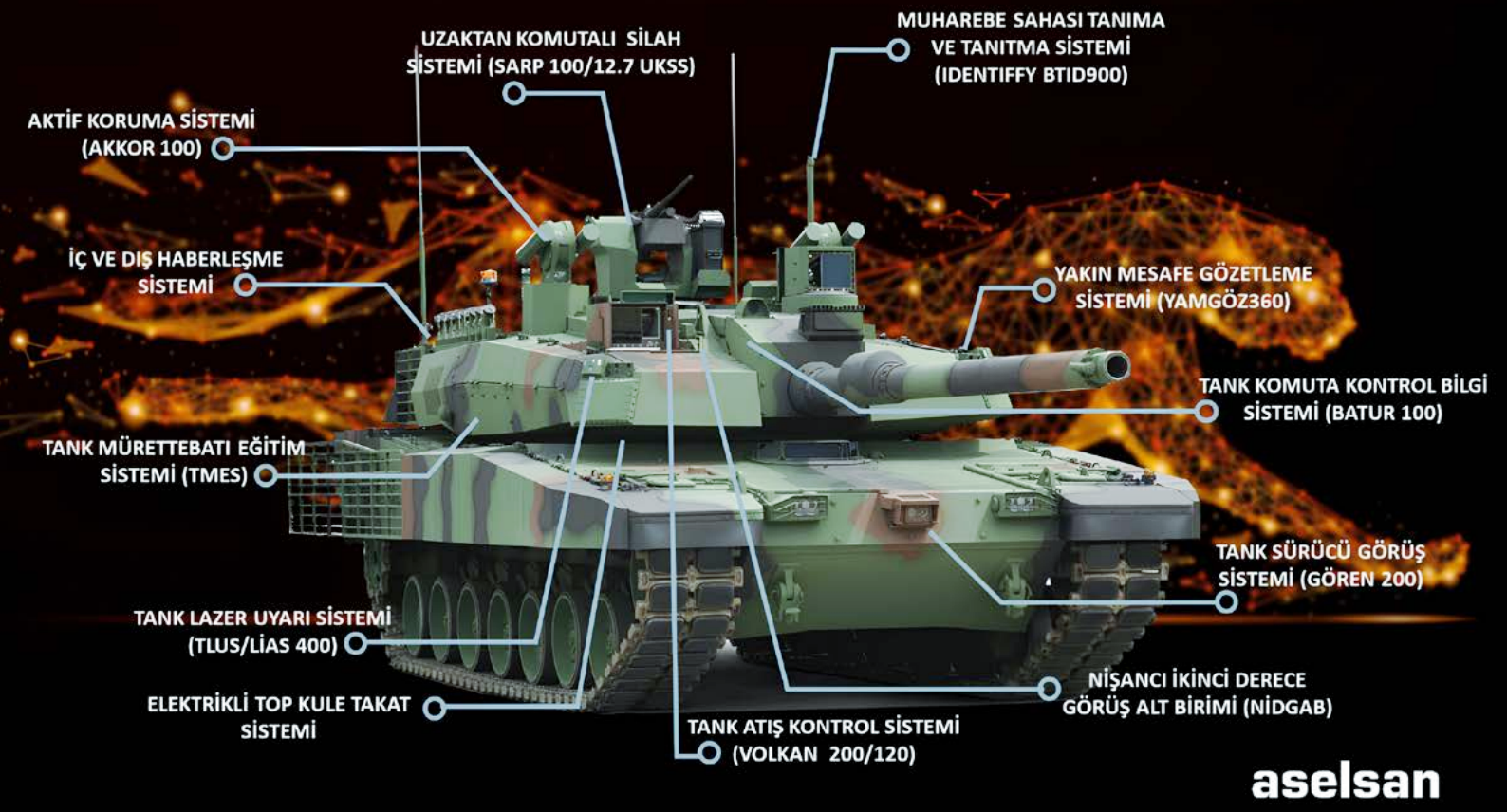
İHA'lar ve uzaktan kumandalı platforma entegre silahların daha fazla kullanımı, uzun menzilli hassas atış yetenekleri sayesinde yıpratıcı toplu zırhlı saldırılardan kaçınılması ve bunun yerine sensör güdümlü hızlı angajmanlarla dağıtılmış, ağ tabanlı manevraların tercih edileceği değerlendirilmektedir.

Sonuç

Ana muharebe tanklarının her nesil sürekli gelişmesi ve yeni nesil tankların ateş gücü, hayatta kalma ve hareket kabiliyeti özelliklerinde artışlar olması beklenmektedir. Sensörlerin eklenmesiyle tanklar artık savaş alanında daha belirgin bir rol oynayabilir hale gelecektir. Tipik olarak doğrudan ateş ve hatta dolaylı ateş desteği rolünde kullanılması durumunda da, ek sensörlerin dahil edilmesi ve entegre ağ oluşturma yetenekleri, tankın daha büyük bir ağ bağlantılı savaş alanı grubunun bir düğümünü oluşturmasına izin verebileceği öngörülmektedir.

Almanya ve Fransa'nın birlikte yürüttüğü ve Avrupa'nın gelecekteki (2040 ve sonrası) tankı olarak gösterilen Ana Kara Muharebe Sistemi (Main Ground Combat System-MGCS) projesinde de bu konsept doğrultusunda çalışılmaktadır. Bu konseptte sadece tanklardan oluşan bir birlik yapısı yerine ana muharebe sistemi ve ona entegre hareket eden insanlı ve insansız diğer kara ve hava (İHA'lar) muharebe araçlarından oluşan bir birlik yapısı öngörülmektedir. Tankın muharebe sahasındaki bu rolü nedeniyle, yeni konsept tank proje isimlerinde "tank" yerine Almanya-Fransa örneğinde Kara Ana Muharebe Sistemi (MGCS), ABD örneğinde ise geleceğin belirleyici, karar silahı (Future Decisive Lethality) gibi isimler kullanılmaktadır.

Ana muharebe tankları, dünya kara kuvvetlerinde kullanımlarını sürdürmek için güçlü bir desteğe sahip ve 2040'lı yıllarda ana muharebe tankının yeni nesline doğru nesilsel bir geçişe tanık olacağız.



TANKLARIN NEDEN **MODERNİZASYONA İHTİYACI** VARDIR?

Günümüz muharebelerinde artık konvansiyonel savaş yerini hibrit savaşlara bırakmış, muharebe ortamları düzenli orduların bulunduğu açık araziler ve kırsaldan paramiliter güçlerin ve gayri nizami unsurların yer aldığı meskûn mahallere taşınmış, doğrudan bir çatışma ortamı yerini öngörülemeyen ortamlara terk etmiştir. Muharebe sahası, komuta kontrol sistemleri ile entegre olmuş, yapay zekâ desteği ile daha hızlı karar alabilen ve hedefini ilk atışta vurabilen sistemlerin savaş alanına dönüşmüş, daha çok teknolojik gelişmelerin ve öngörülemeyen tehditlerin yoğunlaştığı bir ortam hâline gelmiştir. Bu anlamda daha önceleri tankların en büyük düşmanı yine tank iken günümüz muharebelerinde buna ilave olarak anti-tank güdümlü füzeleri (ATGM), hava unsurları, silahlı insansız hava araçları (SİHA ve kamikaze drone), akıllı mühimmatlar ve el yapımı patlayıcılar (EYP) devreye girmiş, bu değişen tehdit ortamı mevcut tankların atış ve beka yeteneklerinin geliştirilmesi ihtiyacını ortaya çıkarmıştır.

(E) Alb. Adem KAVAS

Gelişen ve çeşitlenen bu silahlara karşı tanklar; artık daha hızlı karar almayı sağlayan komuta kontrol sistemlerine, alınan kararı en etkili şekilde uygulayacak atış kontrol sistemlerine, termal iz yönetimi, aktif ve pasif beka tedbirleri ile daha çok korunmaya ve değişen ortamlara göre hızla adaptasyonu sağlayabilecek modüler tasarımlara ihtiyaç duymaktadır. Bu bağlamda tank modernizasyonu, yalnızca platformun hareket kabiliyetini artırmakla kalmayıp muharebe etkinliğini ve beka kabiliyetini artırmak açısından stratejik önem taşımaktadır. Teknolojik gelişmeler ve değişen muharebe şartları sonucunda Türk Silahlı Kuvvetleri (TSK) envanterinde bulunan M60 ve Leopard serisi tankların modernizasyon ihtiyacı oluşmuş ve bu tanklarımız daha büyük silah kalibresine, gelişmiş komuta kontrol ve atış kontrol sistemlerine, zırh ve aktif koruma yeteneklerinden hareket kabiliyetlerinin artırılmasına kadar yeni yeteneklere kavuşturulmuş ve değişen muharebe şartlarında hem diğer tanklarla hem de oluşan asimetrik tehditlerle savaşabilecek kabiliyetlerle donatılmışlardır. Her iki modernizasyon programında da başarıyla görev alan ASELSAN, tank konusunda kazandığı bu tecrübe ile ALTAY tankının tüm ana Elektronik, Elektro-Optik ve Elektro-Mekanik Alt Sistemlerini geliştirmiş ve kalifikasyonu tamamlanan ALTAY tankı TSK'ya teslim edilmiştir.

Tankların kullanılmaya başlanılmasından itibaren günümüze kadar çeşitli sebeplerle tankların devrinin kapandığına yönelik değerlendirmeler sıklıkla yapılmıştır. Fakat tanklar, her zaman yeni koşullara adapte olarak muharebe sahasındaki vazgeçilmez silah olmaya devam etmiştir. Ukrayna ve Karabağ Savaşları'nda tankların hizmet dışı kalması durumu incelendiğinde bu durumun; tankların yetersiz ya da eski nesil donanıma sahip olması ve taktiksel kullanım hatalarının bir sonucu olduğu değerlendirilmektedir. Dünyanın önde gelen tank üreticilerinin halen tank modernizasyon çalışmalarına devam ettikleri ve yeni nesil tanklar geliştirdikleri görülmektedir. Bu değerlendirmeler ışığında envanterdeki tanklarımız son teknoloji sistemlerle modernize edilerek değişen muharebe koşullarına uygun hale getirilmektedir.

ATIŞ YETENEĞİ GELİŞTİRME
- **Yeni Nesil Atış Kontrol Sistemi**
- **Elektrikli Top ve Kule Takat Sistemi**
- **Uzaktan Komutalı Silah Sistemi**

KORUMA SEVİYESİ GELİŞTİRME
- **Kule/Gövde İlave Balistik Koruma**
- **Reaktif Zırh**
- **İlave Mayın Koruma**
- **İç Astar Koruması**

ARTTIRILMIŞ BEKA YETENEĞİ
- **Aktif Koruma Sistemi**
- **Tank Komuta Kontrol ve Bilgi Sistemi**
- **Tank Lazer Uyarı Sistemi**
- **Yakın Mesafe Gözetleme Sistemi**
- **Sürücü Görüş Sistemi**
- **İklimlendirme Sistemi**
- **Yardımcı Güç Ünitesi**
- **Sesli Uyarı Sistemi**
- **Muharebe Sahası Tanıma ve Tanıtma Sistemi**



"Tank, sahada piyadeye ateş desteği veren, düşman zırhlı unsurlarını imha eden, zorlu arazi şatlarında dahi üstün hareket kabiliyeti ile görevini icra eden zırhlı bir savaş aracıdır". Başka bir ifade ile "Tank, yüksek manevra kabiliyeti ve ateş gücüne sahip, komutanın vurucu gücü ve vazgeçilmez bir karar silahıdır".

Ana muharebe tankları:

- Yüksek tehdit ortamlarında zırhlı taarruz ve savunma operasyonlarının belkemiğini oluşturur,
- Mekanize piyade unsurlarına entegre olarak derinlikte manevra ve ateş yeteneği sunar,
- Özellikle açık arazide zırh-zırh angajmanlarında üstünlük sağlamak amacıyla tasarlanmıştır ve düşman hatlarının yıkılması, savunmanın delinmesi, ateş ve manevra üstünlüğünün sağlanması gibi kritik görevlerde kullanılır.

Günümüz tankları; hareket kabiliyeti, atış yetenekleri (silah ve atış kontrol sistemleri), komuta kontrol, durumsal farkındalık ve beka kabiliyetleri ile teknolojiye ayak uydurmuş, yapay zekanın da desteği ile ateş ve manevra yeteneğini daha da geliştirmiştir. Yeni nesil tanklara nazaran bir önceki nesil olarak tanımlayabileceğimiz tankların işte bu zırh-zırh angajmanında veya değişen muharebe ortamındaki diğer silahlara karşı muharebe etkinliğini koruması için modernize edilmesi ve yeni nesil tank yeteneklerine kavuşturulması ihtiyacı artık kaçınılmaz bir gerçektir. Tank birlikleri; ateş gücü, hareket yeteneği, beka kabiliyetleri ile her çeşit muharebede sürekli harekât (manevra ve ateş) olanak ve yeteneği sağlar. Ateş gücü olarak; atış kontrol ve uzaktan komutalı silah sistemleri vasıtasıyla uzak mesafelerden hedefin tespit ve teşhisini müteakip doğru silah ve mühimmat ile ilk atışta vurabilme kabiliyeti, hareket yeteneği olarak muharebe ağırlığına sahip bir tankın sahada en etkili şekilde manevra ve engellerden geçebilme yeteneğini sağlayacak bir güç grubuna sahip olunması ve beka tedbirleri olarak yeterli bir zırh, aktif koruma, komuta kontrol ve durumsal farkındalık yeteneklerine haiz olunması bir tankın olmazsa olmazlarındandır.

Tank teknolojisi, 20'nci yüzyıl boyunca özellikle II. Dünya Savaşı, Soğuk Savaş Dönemi, Körfez Savaşı ve modern asimetrik çatışmalar ekseninde ciddi bir dönüşüm geçirmiştir. Bu dönüşüm, yalnızca teknik kapasite artışıyla sınırlı kalmamış, tankların taktik rolü, organizasyon içindeki konumu ve dijitalleşme seviyesi de dönemin askeri ihtiyaçlarına paralel olarak dönüşmüştür.

Tank gelişimi, genel olarak aşağıdaki nesiller üzerinden sınıflandırılır:

1'inci Nesil (1945-1960):

Bu jenerasyona ait tanklar II. Dünya Savaşı sonrası geliştirilen ve "evrensel tank" işlevi gören platformlardır. Hem ateş gücü hem koruma hem de hareket kabiliyetinde dengeli bir yapıya sahiptirler.

Örnekler: Centurion (İngiltere), T-54/T-55 (Sovyetler Birliği), M48 Patton (ABD)

2'nci Nesil (1960-1970):

Bu dönemde gece görüş sistemleri, KBRN (Kimyasal, Biyolojik, Radyolojik, Nükleer) koruması, gelişmiş mühimmat (APDS, HEAT, HESH, APFSDS) ve ilk elektronik sistemlerle donatılmış tanklar öne çıkar. Koruma yerine daha fazla hareket kabiliyeti ve ateş gücüne odaklanılmıştır.

Örnekler: M60 Patton (ABD), T-62 (SSCB), Leopard 1 (Batı Almanya), Chieftain (İngiltere)

3'üncü Nesil (1970-Günümüz):

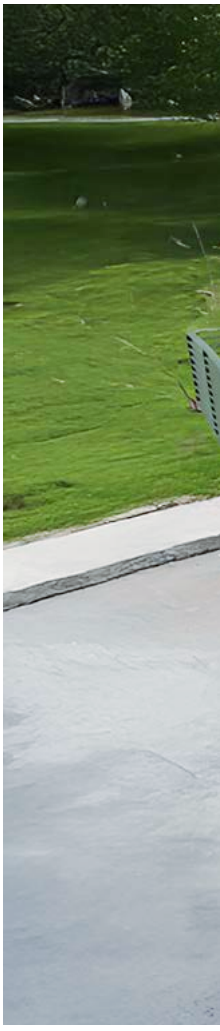
Kompozit zırh, artan silah kalibreleri, gelişen motor güçleri, stabilize silah sistemleri ve dijital atış kontrol sistemleri bu jenerasyonun ayırt edici özellikleridir. Hareket halindeyken yüksek isabetlilik ve daha fazla menzilde etkili angajman kapasitesi sunarlar.

Örnekler: M1 Abrams (ABD, Leopard 2 (Almanya), Challenger 2 (İngiltere), T-90 (Rusya), Leclerc (Fransa), Merkava III/IV (İsrail) vb.

Modernize 3'üncü Nesil ve 4'ncü Nesil (Günümüz ve Gelecek):

Ağ destekli komuta kontrol sistemleri, gelişmiş sensör teknolojileri, artan koruma paketleri, aktif koruma sistemi entegrasyonu ve uzaktan komutalı silah sistemleri gibi ileri teknolojileri içerir.

Örnekler: Leopard 2A8 (Almanya), M1A2 SEP v4 (ABD), T-90MS ve T-14 Armata (Rusya), Merkava IV Barak (İsrail), Leclerc XLR (Fransa), K2 Black Panther (Güney Kore) ve ALTAY (Türkiye).



Tankların modernize edilmesinin bazı temel nedenleri şunlardır:

1. **Yeni Tehditlere Karşı Koyma:** Gelişmiş silah sistemleri ve mühimmatlara karşı savunma yapmasına yardımcı olur.

2. **Hayatta Kalma Kabiliyetini Artırır:** Zırh geliştirme çalışmaları ve aktif koruma sistemleri ile hayatta kalabilme (beka) tedbirleri artırılır.

3. **Ateş Gücünü Artırır:** Geliştirilmiş silahlar, mühimmatlar (akılı mühimmat, toptan atılabilen kamikaze drone ve güdümlü füzeler vb.), ateş kontrol sistemleri ve termal görüntüleme yetenekleri ile imha yetenekleri artırılır.

4. **Yeni Savaş Alanı Rollerine Uyum Sağlama:** Tanklar, çöller, ormanlar ve kentsel alanlar dahil olmak üzere çeşitli ortamlarda görev yapmak üzere yeniden tasarlanmaktadır. Geliştirmeler arasında gelişmiş hareket kabiliyeti, amfibi yetenekler ve her türlü hava koşulunda performans için sensörler yer almaktadır.

5. **Durumsal Farkındalığı Artırma:** Modern tanklar, ağ destekli komuta kontrol sistemlerine entegre edilmekte ve gelişmiş sensörler, termal görüntüleme ve savaş alanı yönetim sistemleriyle donatılmıştır. Bu geliştirmeler, mürettebatın düşmanları daha etkili bir şekilde tespit etme, tanımlama ve onlarla çatışmaya girme yeteneğini artırır.

6. **Hareket Kabiliyetini Artırma:** Modernize edilmiş tanklar, hız, ivme ve manevra kabiliyetini artırmak için genellikle daha güçlü motorlara, gelişmiş palet ve süspansiyon sistemlerine sahip olur.



Eski (sağda) ve Modernizasyonu Tamamlanmış (solda) Leopard 2A4 Tankı

7. **Maliyet Etkinliği:** Mevcut tankların modernizasyonu, tamamen yeni araçlar geliştirip üretmekten daha hızlı ve uygun maliyetlidir. Tankların modernizasyonu, orduların mevcut lojistik ve onarım sistemlerini kullanmaya devam etmesini sağlayarak ek altyapı ihtiyacını azaltır.

8. **Stratejik ve Taktiksel Üstünlüğü Koruma:** Modernize edilmiş bir tank birliği, teknolojik ve taktiksel üstünlük göstererek potansiyel düşmanları caydırabilir.

Tankların modernizasyonu, envanterdeki silahların hizmet ömürlerini uzatmalarına, muharebe kabiliyetlerini geliştirmelerine ve yeni zorluklara uyum sağlamalarına olanak tanır.

Modernizasyonu gerçekleştirilecek tanklar genelde uzun süre kullanımda olduklarından detaylı bakım ihtiyacına sahip platformlar olarak görevlerini icra etmeye çalışmaktadırlar. Etkin bir modernizasyonun bu ihtiyaca da çare olması, modernizasyon projesinin başarımını arttıracağı gibi kullanıcı memnuniyetine de katkı sağlayacaktır. Bu doğrultuda FASBAT veya "Overhaul" olarak adlandırılan, Fabrika Seviyesi Bakım/Tamir (revizyon) adımlarını da içeren etkin bir modernizasyonun aşamaları aşağıdaki gibi olmalıdır:

1. Modernize edilecek tanklar ilgili birliklerinden ön testler yapılarak teslim alınırlar. Gerçekleştirilen ön testlerde hangi sistemde ne gibi arızaları olduğu tespit edilerek bakım/onarım süreci başlatılır.

2. Tank teslim alındıktan sonra üzerindeki sistemler sökülerek arıza tespit edilenler bakım/onarım kanallarına sevk edilir, modernizasyon sonrası ihtiyaç duyulmayacak parçalar yedek parça olarak muhafaza edilmek üzere ilgili kademeye teslim edilir, sağlam olan diğer parçalar ise muhafaza edilir.

3. Tank detaylı bir FASBAT (Fabrika Seviyesi Bakım/Tamir) sürecine tabi tutulur. Bu süreçte tankın üzerindeki boya kumlama yöntemiyle sıyrılır. Yorulma beklenen veya aşınmış parçalar yenileri ile değiştirilir.

4. Yüzeylerde aşınmadan dolayı işlem/tadilat gerektiren durumlarda ilgili işlemler uygulanır. Bu arada modernizasyon ile eklenecek sistemler sebebiyle tank üzerinde yeni işlem gerektiren bir yüzey bulunuyorsa, önceden hazırlanmış tadilat bilgi paketine göre ilgili işlemler uygulanır.

5. Paralelde ön test sırasında saptanamayacak arızalara yönelik olarak bazı parçalar ayrıca test/ölçüme tabi tutulur. Örneğin güç grubu bremze test düzeneğinde test edilerek olası hatalar tespit edilerek gerekli işlemler başlatılır.

6. Kumlanan parçaların kaplama/boyaları gerçekleştirilerek tekrar montaj aşamasına geçilir.

7. Montaj sırasında daha önce tankta bulunan parçaların yanında, modernizasyon ile eklenen parçalar entegrasyon bilgi paketinde belirtilen montaj sırasıyla tanka entegre edilir.

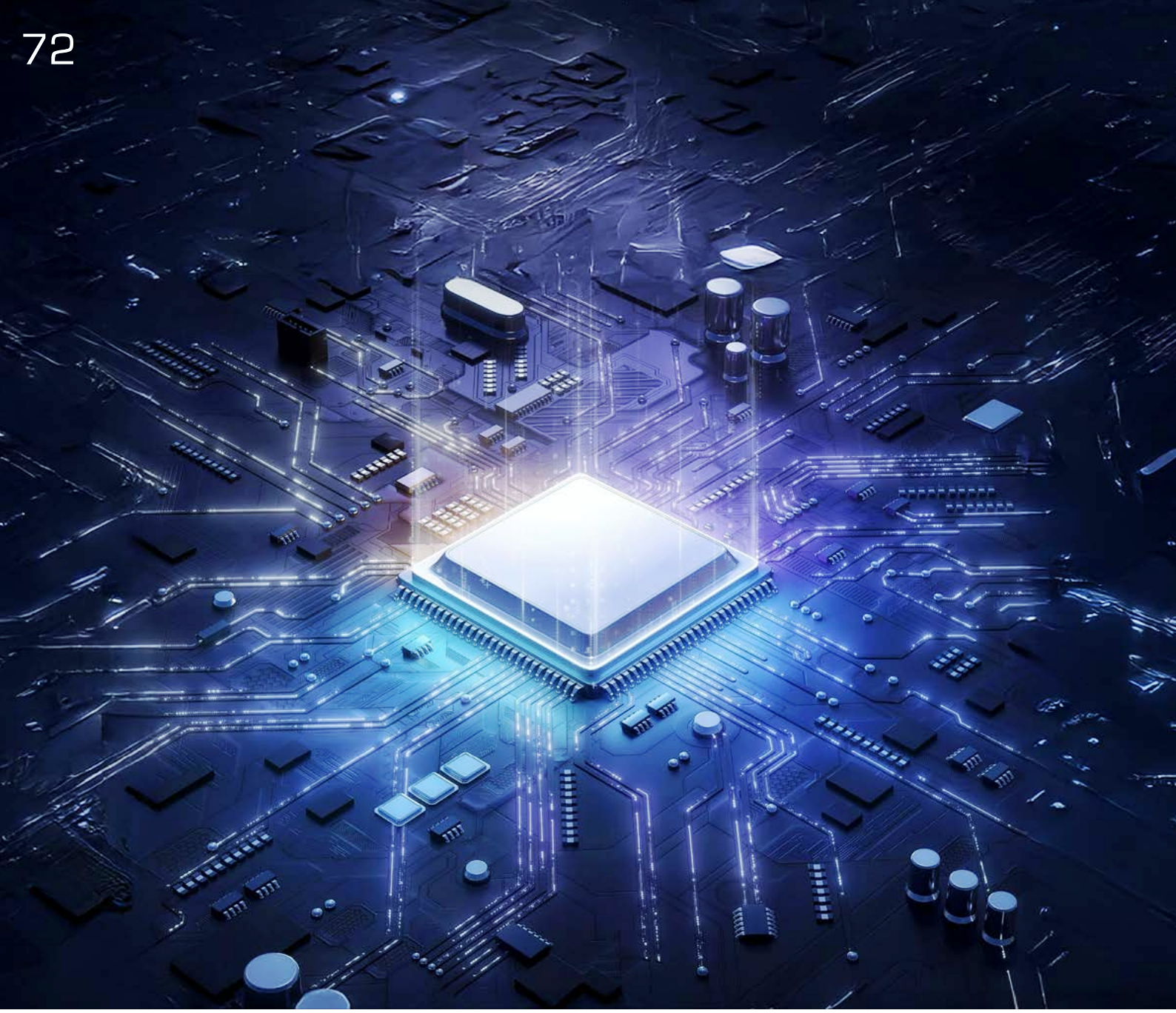
8. Tüm birimlerin montajı tamamlanmasının ardından tank hem mobilite hem de görev donanımlarına yönelik fonksiyonel testlere tabi tutulur.

9. Sorun görülmemesi durumunda kabul işlemlerine yönelik hazırlıklara başlanır ve kabul testlerinin ardından tank envantere tekrar alınır.

Sonuç olarak; tank modernizasyonu, sadece mevcut platformların ömrünü uzatmak değil aynı zamanda onları geleceğin muharebe ortamına hazırlamak anlamına gelmektedir. Zırh, aktif koruma, durumsal farkındalık, güç grubu, komuta kontrol entegrasyonu ve atış kontrol sistemlerindeki iyileştirmeler sayesinde tanklar; beka, hareket ve ateş üstünlüğü açısından çağın gereksinimlerini karşılayabilir ve özellikle son dönemde artan asimetrik savaş ya da gayri nizami harp şartlarına uyumlu hâle getirilebilir.







KÜÇÜK **DİL MODELLERİ**

Küresel savunma ekosisteminde yapay zekâ tartışmaları çoğu zaman “en büyük” modellere odaklanmaktadır. Oysa sahadaki gerçek operasyonel ihtiyaçlar, kısıtlı işlem gücü ve katı güvenlik gereksinimleri dikkate alındığında, oyunu sessiz ve derinden değiştirme potansiyeline sahip başka bir sınıf gündeme gelmektedir: Küçük Dil Modelleri (Small Language Models – SLM).

Bu makale Küçük Dil Modellerinin ne olduğunu, hangi teknolojik eğilimlerin sonucu olarak öne çıktığını, harekât yeteneklerine olası etkilerini, savunma sanayiinde ve özellikle de ASELSAN için nasıl bir ticarileşme potansiyeli sunduğunu ele almaktadır.

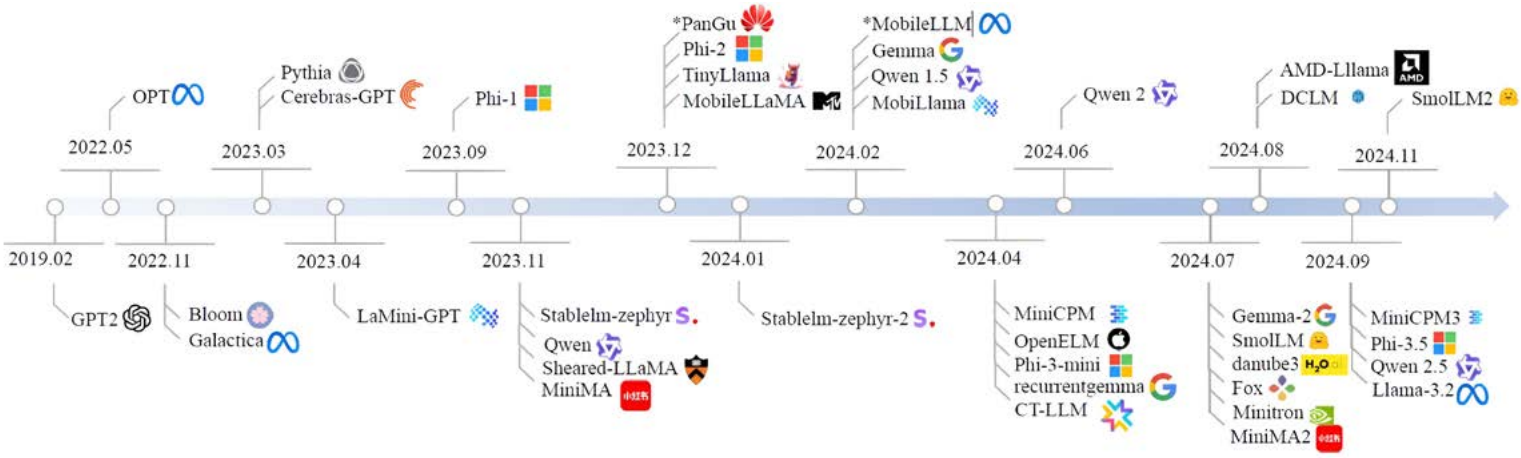
Dr. Cihan Emre KEMENT



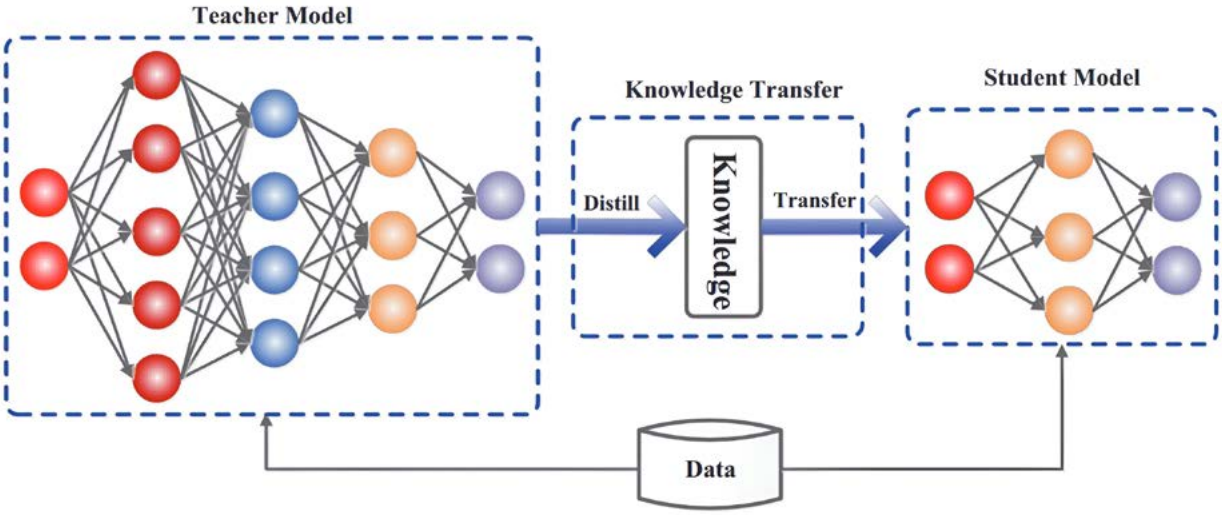
Küçük Dil Modeli (SLM) Nedir?

Küçük dil modeli, doğal dili işleyip üretebilen; ancak parametre sayısı, hesaplama ihtiyacı ve bellek kullanımı açısından klasik büyük dil modellerine (LLM) göre çok daha kompakt kalan sistemleri ifade etmektedir. Büyük dil modelleri yüz milyarlar, hatta kimi mimarilerde (GPT-4, GPT-5 gibi) trilyonlar mertebesinde parametre içermekteyken; SLM'ler genellikle birkaç milyon ile birkaç milyar parametre aralığında konumlanmaktadır. Bu fark, yalnızca teknik bir ölçek meselesi değil; aynı zamanda kullanım senaryolarını belirleyen stratejik bir ayrım olarak göze çarpmaktadır.

Mimari açıdan bakıldığında SLM'ler, LLM'lerle aynı temel prensiplerle çalışmaktadır. Çoğu SLM transformer tabanlı yapılara dayanmaktadır. Sözcükler gömme (embedding) katmanları ile sayısal vektörlere dönüştürülmekte, konumsal kodlama ile kelime sırası modele aktarılmakta, çok katmanlı dikkat (attention) mekanizmaları bağlamı öğrenmekte, son aşamada ise bir lineer katman ve softmax yapısı olası çıktıları belirlemektedir. Yani "küçüklük", mimarinin yapısından değil, ölçeğin ve parametre sayısının bilinçli şekilde sınırlandırılmasından kaynaklanmaktadır.



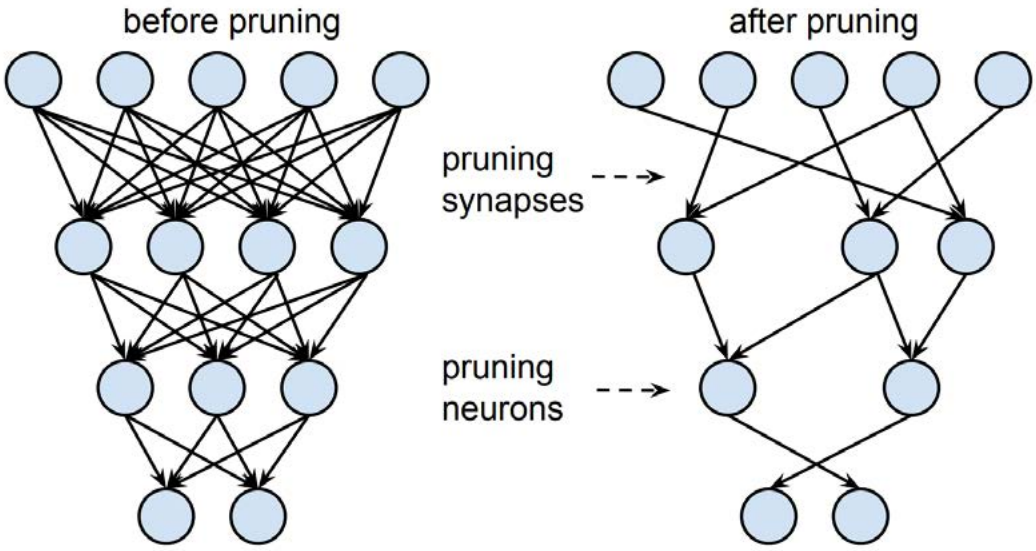
Şekil 1 - KÜÇÜK DİL MODELLERİ VE PİYASAYA ÇIKTIKLARI TARİHLER



Şekil 2 - BİLGİ DAMITMA İLE MODEL KÜÇÜLTME

SLM'ler genelde LLM'lerin ölçeklerinin küçültülmesi ile elde edilmektedir. Bu ölçek küçültme işlemi sistematik tekniklerle gerçekleştirilmektedir. En yaygın yaklaşımlardan ilki, bilgi damıtma (knowledge distillation) olarak adlandırılmaktadır. Bu yöntemde, önceden eğitilmiş büyük bir "öğretmen" modelin çıktıları referans alınmakta ve daha küçük bir "öğrenci" model, öğretmenin cevaplarını ve olasılık dağılımlarını taklit edecek şekilde eğitilmektedir. Böylece küçük model, tek tek tüm veriye yeniden maruz kalmadan, büyük modelin deneyimini yoğunlaştırılmış biçimde devralmaktadır.

İkinci önemli ölçek küçültme tekniği, budama (pruning) olarak öne çıkmaktadır. Sinir ağındaki bazı bağlantılar veya nöronlar, model çıktısına anlamlı katkı sağlamamaya başladığında bunlar tespit edilmekte ve kaldırılmaktadır. Böylece ağ daha seyrek hâle gelmekte, hem parametre sayısı hem de çalışma zamanındaki hesaplama yükü düşmektedir. Bu süreç, SLM'lerin yalnızca depolamada değil, gerçek zamanlı çalışmada da verimli olmalarını sağlamaktadır.

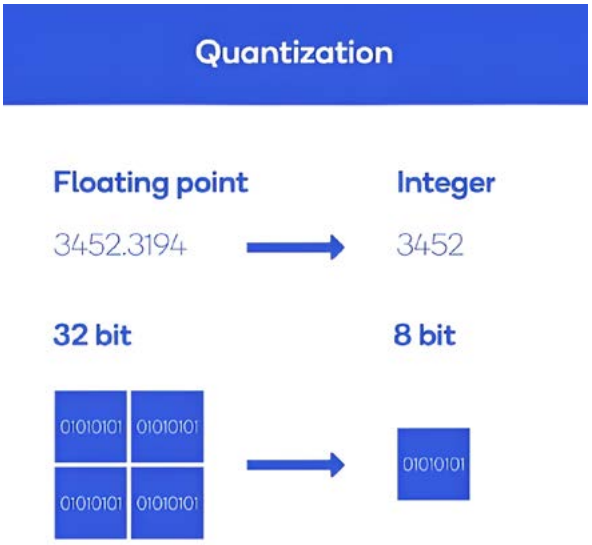


Şekil 3 - BUDAMA İLE MODEL KÜÇÜLTME

Üçüncü ölçek küçültme tekniği olarak niceleme (quantization) kullanılmaktadır. Burada, eğitim sırasında tipik olarak 32-bit kayan noktalı (float) olarak tutulan ağırlıklar, 8-bit gibi daha düşük hassasiyetli temsillere indirgenmektedir. Bu sayede bellek kullanımı ve bant genişliği ihtiyacı önemli biçimde azalmaktadır. Özellikle gömülü sistemlerde ve mobil donanımlarda bu teknik belirleyici rol oynamaktadır.

Son olarak, düşük-rank ayrıştırma (low-rank factorization) ve düşük-rank uyarlama (low-rank adaptation – LoRA) benzeri teknikler ile büyük dil modelleri küçültülebilmektedir. Bu yöntemlerde büyük boyutlu ağırlık matrisleri, daha küçük matrislerin çarpımı şeklinde ifade edilmekte; böylece model, parametre sayısını ciddi biçimde azaltırken belirli görevlerdeki başarımını koruyabilmektedir. Bu yapı, SLM'lerin farklı görevlere hızlı ve hafif biçimde uyarlanabilmesini de kolaylaştırmaktadır.

Tüm bu sıkıştırma tekniklerinin sonucu olarak ortaya çıkan SLM'ler, LLM'lere kıyasla çok daha az kaynak tüketirken; belirli görevlerde benzer performanslar sergileyebilmektedir. Bu nedenle SLM'ler, "LLM'lerin zayıf kardeşi" olmaktan ziyade, belirli işlevleri çok verimli biçimde yerine getiren uzman asistanlar olarak konumlanmaktadır.

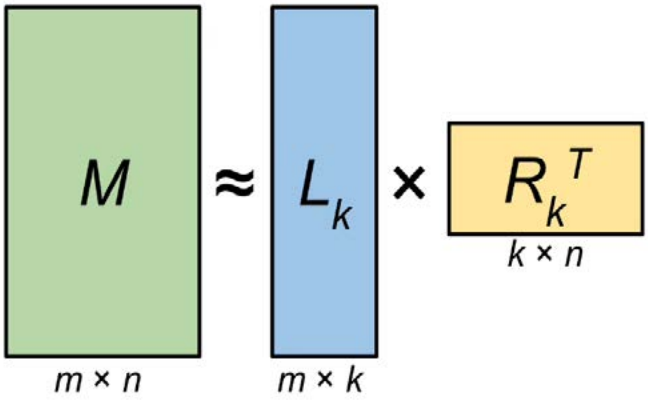


Şekil 4 – NİCELEME İLE MODEL KÜÇÜLTME

Teknolojik Gelişim Öngörüsü

Yapay zekâ alanında son yıllara parametre sayısı ve model boyutu açısından yapılan yarış damga vurmaktadır. Bir yanda GPT-5 sınıfı sistemlerin trilyon seviyesinde parametreye ulaştığı tahmin edilmekte, diğer yanda DeepSeek V3 gibi modeller yüzlerce milyar parametreyle eğitilmektedir. Bu devasa ölçek, çok etkileyici yetenekleri mümkün kılmakla birlikte; eğitim maliyeti, enerji tüketimi, veri gereksinimi ve altyapı karmaşıklığını da beraberinde getirmektedir.

Tam da bu noktada SLM yaklaşımı, dengeleyici bir unsur olarak sahneye çıkmaktadır. Son dönemde iki paralel eğilim gözlemlenmektedir. Birincisi, mixture-of-experts (MoE) adı verilen karma model yapılarıdır. Bu mimarilerde model, birçok uzman alt-ağdan oluşmakta; her istekte yalnızca ilgili uzmanlar aktive edilmektedir. Böylece eğitim aşamasında çok büyük bir ağ kullanılmakta, ancak çalışma zamanında etkin parametre sayısı düşürülerek SLM benzeri verimlilik elde edilmektedir.



Şekil 5 - DÜŞÜK RANK AYRIŞTIRMA

İkinci eğilim ise, büyük modellerden sistematik biçimde türetilen damıtılmış SLM varyantlarıdır. Burada büyük bir temel model, genel bilgi ve beceri havuzu olarak kullanılmakta; daha sonra belirli görevler için ondan damıtılmış, kompakt SLM sürümleri üretilmektedir. Bu küçük modeller, dar tanımlı işlerde büyük modellere oldukça yakın sonuçlar vermekte, fakat bunu çok daha düşük maliyetle ve daha geniş dağıtım imkânıyla gerçekleştirmektedir.

Ekonomik öngörüler de bu teknik yönelimi desteklemektedir. Uluslararası piyasa analizleri, SLM pazarının orta vadede çift haneli büyüme oranlarıyla genişlemeye devam edeceğini öngörmektedir. Bu büyümenin ardında birkaç temel faktör bulunmaktadır: kurumların bulut bağımlılığını azaltma isteği, veri gizliliği ve regülasyon baskıları, enerji verimliliği kaygıları ve edge/on-prem çözümlere yönelik artan talep. Kısacası, SLM'ler hem teknik hem ekonomik açıdan "sürdürülebilir yapay zekâ" vizyonunun merkezi bir bileşeni hâline gelmektedir.

Özellikle sıkı şekilde regüle edilen sektörlerde (savunma, enerji, sağlık v.b.) verinin güvenli ağ dışına çıkmaması önemlidir. Bu alanlarda, dev LLM'leri bulut üzerinden kullanmak, her zaman kabul edilebilir bir seçenek olmamaktadır. SLM'ler ise kurum içi veri merkezlerinde, taktik saha sunucularında hatta gerektiğinde platform üzerinde çalışabilme imkânı sunmaktadır. Bu yönüyle hem yasal gereklilikleri hem de operasyonel ihtiyaçları aynı anda karşılayan nadir teknolojilerden biri olarak öne çıkmaktadır.

Harekât Yeteneklerine Etkisi

Savunma bağlamında esas soru, "SLM'ler ne kadar küçük, ne kadar hızlı?" değil; "Bu modeller harekât yeteneklerine nasıl somut katkılar sunabilir?" sorusu olmaktadır. Cevap, kara, deniz, hava ve siber alanlarda farklı fonksiyonlar için olmakla beraber benzerdir: insanın bilişsel yükü azaltılabilir, bilgi akışı anlamlandırılabilir ve karar alma süreçleri desteklenebilir.

Komuta Kontrol:
Metin Selinden Operasyonel Resme

Modern harekât ortamında komuta kontrol sistemleri, çok farklı kaynaklardan gelen verileri aynı anda yönetmek durumundadır. Birlik raporları, mesaj trafiği, açık kaynak istihbarat akışları, sensör ve radar log'ları vb. yoğun veri selinin içinden kritik bilgiyi zamanında çekebilmek, insan operatörün üzerinde ciddi bir bilişsel yük oluşturmaktadır.

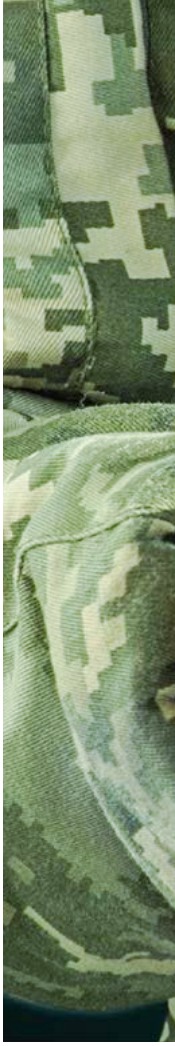
SLM'ler, komuta kontrol sistemlerinin içine gömülü doğal dil arayüzlü karar destek katmanları olarak bu yükü hafifletebilir. Model, farklı kaynaklardan gelen metinsel verileri özetleyip önceliklendirebilir ve kritik anomalileri işaret edebilir. Komutan veya operatör, karmaşık sorguları doğal dilde ifade ederek (Örnek: "Son iki saat içinde X bölgesinde tespit edilen İHA'ları ve bunlara karşı alınan tedbirleri özetle") sisteme yöneltebilir; SLM bu isteği uygun veri sorgularına çevirerek anlamlı bir rapor hâlinde geri sunabilir. Böylece metin seli, yönetilebilir bir operasyonel resme dönüştürülebilir.

İstihbarat:
Gürültüden Anlamlı Sinyale

İstihbarat fonksiyonlarında en büyük problem, veri kıtlığı değil; aksine, aşırı veri bolluğu olmaktadır. Açık kaynak istihbaratı (OSINT), sosyal medya akışları, haberler, bloglar, saha raporları ve teknik log'lar, sürekli artan bir hacimde üretilmektedir. Bu verinin tamamının insan analistler tarafından satır satır okunması pratikte mümkün olmamaktadır.

SLM'ler bu noktada, bir tür "ön işleme ve triyaj katmanı" olarak görev yapabilir. Model, gelen veriyi otomatik olarak sınıflandırıp belirli anahtar kelimelere veya kavramlara göre etiketleyebilir, risk skorları üretebilir ve dikkat edilmesi gereken anormallikleri vurgulayabilir.

Böylece analistler, tüm veriyi eşit şekilde taramaya uğraşmak yerine, modelin işaret ettiği öncelikli segmentlere odaklanabilir. Ayrıca SLM'lerin kurum içi altyapılarda ve kapalı ağlarda çalıştırılabilmesi, hassas istihbarat verisinin dış ortamlara taşınması gerekliliğini ortadan kaldırmakta; böylece bilgi güvenliği açısından önemli bir avantaj sağlamaktadır.





Ateş Desteği ve Hava Savunma:
İnsan Kontrolünde Akıllı Katman

Ateş desteği ve hava savunma uygulamalarında, SLM'ler insanın komutasını güçlendiren akıllı karar destek katmanları olarak konumlandırılabilirler. Farklı sensörlerden gelen tehdit bilgileri, radar tespitleri ve taktik resim, SLM tarafından semantik düzeyde bir araya getirilebilir ve operatöre anlaşılır açıklamalar hâlinde sunulabilir.

Örneğin model, "Bu hedefin önceliğinin yüksek olmasının nedeni; hem kritik bir varlığa 3 km'den az mesafede bulunması, hem de radar kesitinin tehdit dokümanlarındaki İHA sınıfı X ile uyumlu olmasıdır." şeklinde, angajman kararının arkasındaki mantığı açıklayabilir. Böylece operatör, yalnızca bir hedef listesi görmek yerine sistemin önerileri hakkında yorum yapabilir ve gerektiğinde müdahalede bulunabilir. Bu yaklaşım ile durumsal farkındalık artırılırken insan–makine iş birliği de güçlendirilmiş olur.

Manevra, Otonom Sistemler ve Beka

İnsansız hava, kara ve deniz araçları, boyut, ağırlık, güç ve hesaplama kaynağı açısından ciddi kısıtlar altında tasarlanmaktadır. Bu platformlara devasa LLM'ler yerine SLM'lerin entegre edilmesi, teknik açıdan daha gerçekçi ve sürdürülebilir bir seçenek sunmaktadır. SLM, görev bilgisayarında çalışan hafif bir "görev ortağı" olarak, platformun sensör verilerini doğal dil açıklamalarına dönüştürebilir; operatöre veya görev planlayıcıya durum farkındalığı sağlayabilir.

Örneğin, "Mevcut rota üzerinde ilerlenmesi hâlinde 5 dakika içinde düşük irtifa radar kapsamasına girilmesi beklenmektedir; alternatif rota Y ile tespit olasılığı azaltılmaktadır." şeklinde bir açıklama, hem insan operatörün güvenini artırmakta hem de sistemin davranışını şeffaflaştırmaktadır. Benzer şekilde, beka kapsamında SLM, radar ve sensör verilerini analiz ederek yaklaşan tehditlere karşı erken uyarı mesajları üretilebilir; bu mesajlar, karmaşık teknik detaylar yerine anlaşılır, görev odaklı özetler hâlinde sunulabilir.

Savunma Sanayiinde Potansiyel Kullanım Alanları

SLM'lerin savunma sanayiinde sistemlere gömüldüğünde değer üreten yeniden kullanılabilir yazılım bileşenleri olarak kullanılma potansiyeli bulunmaktadır. ASELSAN için SLM tabanlı çözümler, hem mevcut ürün portföyünü güçlendirebilir hem de yeni nesil ürünlerin önünü açabilir.

Komuta kontrol sistemlerinde SLM'ler, operatör arayüzü ile veri tabanı, mesaj trafiği ve sensör füzyon katmanları arasında "akıllı tercüman" rolü üstlenebilir. Bu sayede kullanıcı, karmaşık menüler ve sorgu dilleri yerine doğal dilde sorular yöneltip sistemden doğal dilde, bağlama uygun cevaplar alabilir. Bu durum hem sistemleri öğrenme sürelerini kısaltabilir hem de yüksek tempo altındaki operasyonlarda hata riskini azaltabilir.

İnsansız sistemlerde SLM'lerin görev ortağı olarak konumlanması, insan–makine etkileşimini geliştirebilir. Operatör, platforma yalnızca düşük seviyeli komutlar göndermek yerine; "bölge X'i keşfet, düşman unsuru bulunması hâlinde uzak dur ama görüntü kaydı al" gibi daha üst düzey yönergeler verebilir; SLM bu talimatları alt sistemlerin anlayacağı teknik görevlere çevirebilir. Görev sonrası raporlama süreçleri de yine SLM'ler tarafından otomatikleştirilebilir ve böylece mürettebatın üzerindeki dokümantasyon yükü azaltılabilir.

Radar ve elektronik harp sistemleri açısından bakıldığında, SLM'ler özellikle radar sinyallerinin analizi ve anlamlandırılmasında yardımcı olabilir. Operatörler sistemlerle "soru–cevap" ilişkisi kurabilir. "Bu radar izi ne anlama gelmektedir?", "X tehdidi için hangi çalışma modu önerilmektedir?" gibi sorular, hızla ve bağlama duyarlı biçimde yanıtlanabilir. Bu yaklaşım ile sistemin kullanılabilirliği artırılabilir.

Siber güvenlik alanında da SLM'ler, log analizi, saldırı göstergelerinin metinsel açıklaması ve güvenlik operasyon merkezlerinde (SOC) analistlere destek olunması gibi görevlerde devreye girebilir. Güvenlik olayları; ham, karmaşık log satırları yerine, saldırı zincirinin mantıksal adımlarını açıklayan özetlere dönüştürülebilir. Böylece analistler, daha yüksek hacimli olay akışıyla baş edebilir ve kritik vakaları daha hızlı tespit edebilir.

Savunma Sanayiinde Ticarileşme Potansiyeli

Dünya genelinde SLM ve LLM tabanlı savunma çözümleri, yalnızca Ar-Ge projeleri olarak kalmamakta; giderek daha fazla sayıda ticari ürün ve uzun vadeli iş ortaklığına dönüşmektedir. Anduril–OpenAI iş birliği kapsamında karşı-İHA sistemlerinde yapay zekâdan yararlanılması, Meta'nın Llama modellerini ulusal güvenlik uygulamalarının kullanımına açması ve Scale AI'in ABD ordusu için geliştirdiği Donovan karar destek platformu, bu dönüşümün dikkat çeken örnekleri arasında yer almaktadır.

Bu örnekler birkaç temel ticarileşme modeline işaret etmektedir. Birincisi, SLM tabanlı bileşenlerin doğrudan savunma ürünlerine gömülmesi ve bu bileşenlerin ürünün ayrıştırıcı özelliği hâline gelmesidir. Komuta kontrol, hava savunma, radar veya insansız sistem projelerinde "akıllı asistan" modüllerinin standart bir bileşen olarak sunulması, hem ürün değerini yükseltmekte hem de tekrar kullanılabilir yazılım varlıkları üzerinden maliyet avantajı sağlamaktadır.

İkincisi, savunma ve güvenlik kurumlarına yönelik SLM platformu yaklaşımıdır. Burada üretici firma, yerli veriyle eğitilmiş ve yerli altyapıda koşan bir temel SLM platformu sunmakta; kurumlar kendi ihtiyaçlarına göre chatbot, raporlama asistanı, eğitim simülatörü veya istihbarat analizi araçlarını bu platform üzerinde geliştirmektedir. Böyle bir model, hem lisans gelirleri hem de sürekli bakım, güncelleme ve özelleştirme hizmetleri üzerinden sürdürülebilir bir pazar oluşturmaktadır.

Üçüncü model, on-prem ve edge AI hizmetleridir. Yüksek güvenlik gerektiren müşteriler, verilerinin asla kurum dışına çıkmadığı, tüm hesaplamanın kendi ağlarında gerçekleştiği çözümler talep etmektedir. SLM'ler, düşük donanım gereksinimleri sayesinde bu beklentiyi karşılayabilmekte; küçük veri merkezlerine, saha sunucularına ve hatta platform üzerindeki gömülü bilgisayarlara kadar inebilmektedir. Bu sayede hem siber güvenlik hem de operasyonel esneklik açısından cazip bir teklif ortaya çıkmaktadır.

Son olarak, SLM tabanlı çözümlerin sivil–askerî çift kullanımlı alanlarda ticarileştirilmesi de mümkün olabilmektedir. Hava trafik yönetimi, kritik altyapı güvenliği, afet yönetimi, sınır gözetleme gibi alanlarda geliştirilen sistemler, savunma projelerinden türetilen SLM bileşenleri ile zenginleştirildiğinde; uluslararası pazarlarda rekabetçi, yüksek katma değerli ürün aileleri ortaya çıkabilir.



Bu durum, savunma sanayiinin klasik ihracat kalemlerine ek olarak, yazılım ve yapay zekâ temelinde yeni bir büyüme ekseni ortaya çıkarabilir.

Sonuç & Değerlendirmeler

Küçük dil modelleri, sınırlı donanım üzerinde çalışabilmeleri, kuruma özel verilerle nispeten hızlı biçimde özelleştirilebilmeleri ve on-prem/edge mimarilerle uyumlu olmaları sayesinde; savunma projelerinde pratik, güvenli ve ekonomik bir teknoloji olarak öne çıkmaktadır.

Operasyonel açıdan bakıldığında SLM'ler, komuta kontrol, istihbarat, ateş desteği, hava savunma, otonom sistemler, radar/EH ve siber güvenlik gibi alanlarda insanın bilişsel yükünü azaltmakta, bilgi selini anlamlı hâle getirmekte ve karar süreçlerini desteklemektedir. Bu katkı, doğrudan muharebe sahasındaki performansa ve beka kabiliyetine yansımaktadır. Teknolojik açıdan ise SLM'ler; regülasyon, enerji verimliliği ve veri güvenliği gibi kritik faktörlerle uyumlu bir yapay zekâ çerçevesi sunmaktadır.

Elbette bu olumlu tabloya rağmen, SLM'lerin sınırlamaları da bulunmaktadır. Daha az parametre, bazı karmaşık akıl yürütme senaryolarında yetersiz kalabilmekte; uzun metinlerde bağlamı koruma konusunda zorluklar yaşanabilmektedir. Ayrıca tüm üretken modellerde olduğu gibi, halüsinasyon ve hatalı çıkarım riski bulunmaktadır. Savunma bağlamında bu riskler, güçlü doğrulama katmanları, insan denetimi, güvenli eğitim verisi zinciri ve siber güvenlik önlemleri ile yönetilmek durumundadır.

Bu nedenlerden dolayı en dengeli yaklaşım, SLM ve LLM'leri birbirinin alternatifi değil, tamamlayıcısı olarak ele alan hibrit mimari yaklaşımı olabilir. Taktik seviye, düşük gecikme ve gizlilik gerektiren görevlerde SLM'ler devreye girerken; stratejik seviye, geniş bağlamlı analiz ve simülasyonlarda ise daha güçlü LLM'ler kullanılabilir. İki katman arasında açık görev tanımları, güvenlik sınırları ve izleme mekanizmaları kurularak hem verimlilik hem de güvenlik açısından güçlü bir bütünsel yapı elde edilebilir.

Sonuç olarak küçük dil modelleri; savunma sanayiinde yalnızca LLM'lere "daha ucuz bir alternatif" değil, yeni nesil harekât yeteneklerinin ve ticari ürün ailelerinin çekirdeği olabilecek niteliktedir. Önümüzdeki dönemde kritik soru "Hangi harekât fonksiyonlarını, hangi SLM mimarileriyle ve hangi LLM katmanıyla destekleyerek dönüştürmeliyiz?" olacaktır. Bu soruya verilecek yanıt, savunma teknolojilerinin önümüzdeki on yılını büyük ölçüde şekillendirecektir.

NÖROMORFİK HESAPLAMA

Nöromorfik hesaplama, biyolojik sinir sistemlerinin bilgi işleme prensiplerini elektronik donanım düzeyinde taklit etmeyi amaçlayan, gelecek nesil bilgi işlem teknolojileri arasında stratejik öneme sahip bir yaklaşımdır. Geleneksel von-Neumann mimarisinin işlemci-bellek ayrımından kaynaklanan darboğazları, artan veri yoğunluğu ve gerçek zamanlı işleme gereksinimleri karşısında giderek daha belirgin hale gelmektedir. Nöromorfik mimariler ise enerji verimliliği, düşük gecikme süresi ve olay-tabanlı (spike-based) işleme kabiliyetleriyle bu zorluklara radikal bir alternatif sunar.

Savunma sanayiinde, nöromorfik hesaplama özellikle uçta hesaplama, otonom platformlar, radar ve elektronik harp, hedef tespiti, hipersonik tehditlere karşı hızlı reaksiyon sistemleri ve sensör füzyonu gibi kritik görevlerde giderek daha fazla benimsenmektedir. Bu uygulamalarda milisaniyeler ölçeğinde karar verme zorunluluğu, nöromorfik donanımların geleneksel GPU/CPU tabanlı çözümler karşısındaki stratejik avantajlarını ortaya koymaktadır.

Biyolojik sinir ağlarının düşük enerjili ve yoğun paralel işlem yapısını modelleyen nöromorfik çipler, klasik yapay sinir ağlarından farklı olarak yalnızca spike geldiğinde işlem yapar. Bu da özellikle radar sinyalleri, geniş spektrum izleme ve yüksek hızda hareket eden hedeflerin tespitinde kayda değer avantaj sağlar.

Nöromorfik platformlar, yalnızca performans değil, aynı zamanda enerji altyapısına esneklik de kazandırır. Uzun görev süreleri, sessiz çalışma ve düşük ısı üretimi gibi özellikler, otonom kara araçlarından hava savunma radar sistemlerine, erken ihbar ağlarından yönlendirilmiş enerji silahlarına kadar geniş bir savunma uygulama yelpazesinde operasyonel avantaj sağlar.

Son yıllarda DARPA, Avrupa Birliği ve büyük savunma sanayii firmalarının desteklediği projeler sayesinde nöromorfik hesaplama, stratejik Ar-Ge önceliği haline gelmiştir. Intel Loihi 2, IBM NorthPole, BrainScaleS-2 ve BrainChip Akida gibi çip projeleri, bu teknolojinin araştırma laboratuvarlarından saha ve üretime geçiş potansiyelini somut biçimde göstermektedir.



Muhammet SERT

Bu makale, nöromorfik hesaplamanın teknik temellerini, savunma sanayiindeki operasyonel gereksinimlerle olan ilişkisini ve bu teknolojinin radar ile elektronik harp sistemlerinde ortaya çıkarabileceği olası stratejik dönüşümü bütünsel bir bakış açısıyla ele almayı hedeflemektedir.

Nöromorfik Hesaplamanın Tarihçesi

Nöromorfik hesaplamanın kökeni, sinir sisteminin bilgi işleme mekanizmalarının elektronik devrelerle modellenmesine yönelik ilk teorik çalışmaların başladığı 1950'li yıllara uzanır. McCulloch-Pitts tarafından geliştirilen ilk yapay nöron modeli, sinirsel hesaplamanın matematiksel temellerini atmış; bunu izleyen on yıllarda biyolojik sinapsların elektriksel davranışlarını açıklayan modeller geliştirilmiştir. Ancak günümüzdeki anlamıyla "nöromorfik mühendislik" kavramı, Carver Mead'in 1980'lerin sonunda CMOS tabanlı analog devrelerle nöron ve sinaps davranışını fiziksel olarak taklit etmeyi önerdiği çalışmasıyla literatüre girmiştir.

1990'lı yıllar boyunca nöromorfik sistemler ağırlıklı olarak çok geniş çapta tümleştirilmiş (VLSI) analog devreler üzerine kurulmuş deneysel yapılardan ibaretti. Bu ilk nesil mimariler, biyolojik zaman sabitlerini elektronik devreler üzerinde ölçekli biçimde taklit edebilse de üretim toleransları, gürültü hassasiyeti ve ölçeklenebilirlik gibi sınırlamalar nedeniyle geniş kullanım alanı bulamamıştır.



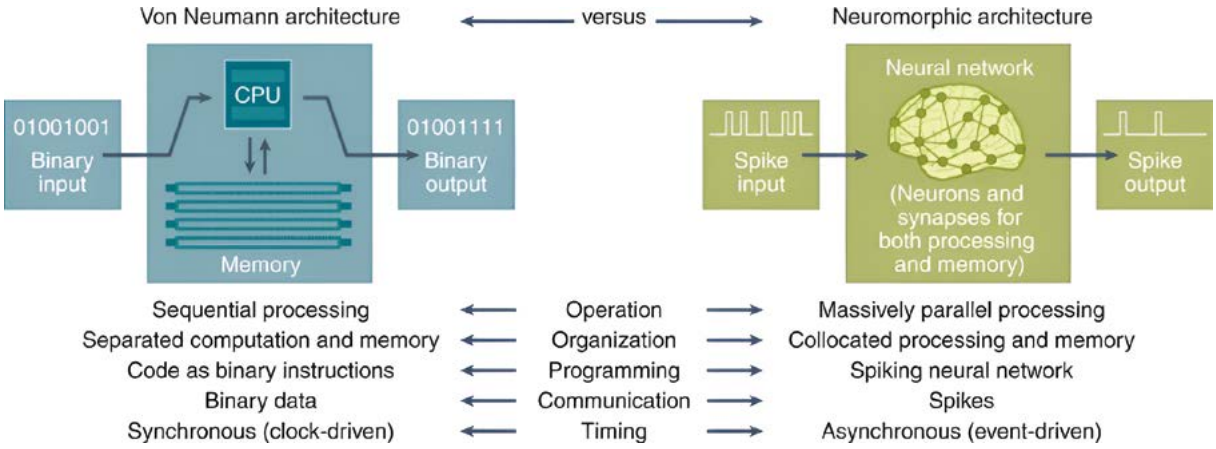
2000'li yılların ortasında hem dijital sistem tasarımındaki gelişmeler hem de büyük ölçekli nöromorfik mimari araştırmalarına ayrılan kurumsal fonlar (ör. DARPA SyNAPSE Programı) teknolojinin yeniden ivme kazanmasını sağlamıştır. Bu dönemde memristörün fiziksel olarak doğrulanması, nöromorfik araştırmalarda dönüm noktası olmuştur; çünkü memristörler, sinaptik ağırlıkların analog ve kalıcı şekilde temsil edilebilmesine imkân tanıyarak klasik dijital belleğin ötesinde biyolojik sinapsa yakın bir davranış sunmuştur.

2010'lu yıllar ikinci büyük sıçrama dönemidir. IBM'in TrueNorth çipi, enerji verimliliği ve ölçeklenebilirlik açısından standart CPU/GPU mimarilerine göre büyük avantaj kazanarak nöromorfik hesaplamanın endüstriyel ölçekte mümkün olduğunu göstermiştir. Aynı dönemde Avrupa Birliği'nin İnsan Beyni Projesi (HBP) kapsamında geliştirilen BrainScaleS mimarisi, analog hızlandırılmış nöral dinamikleri donanım seviyesinde gerçekleştirmiş; Manchester Üniversitesi'nin SpiNNaker sistemi ise yüksek ölçekli spike tabanlı hesaplamanın yazılım tarafından kontrol edilebilir çok çekirdekli bir yapıda nasıl çalışabileceğini kanıtlamıştır.

2020'lere gelindiğinde Intel Loihi 2 ve IBM NorthPole, düşük güç tüketimi, uçta öğrenme, bellek-içi hesaplama ve sıkı zamanlama kontrolü gibi gelişmiş fonksiyonlarla nöromorfik mimarileri ticari uygulamalara yaklaştırmıştır. Bugün nöromorfik hesaplama; radar sinyal işleme, elektronik harp, otonom platformlar ve hipersonik tehditlere karşı yüksek hızlı algılama sistemleri dahil olmak üzere savunma sanayiinde kritik bir araştırma alanı haline gelmiştir. Bu teknolojik gelişim günümüzde çeşitli çip platformlarıyla somutlaşmıştır.

Beyinden İlham Alan Çipler

Biyolojik sinir sisteminin temel çalışma prensipleri -düşük enerji tüketimi, yoğun paralel işleme ve olay tabanlı bilgi akışı- bugün nöromorfik çiplerin tasarımında yeniden yorumlanmaktadır. Geleneksel von-Neumann mimarisi, işlemci ile belleğin ayrı fiziksel bölgelerde konumlanması nedeniyle "Getir - Yürüt - Kaydet" döngüsünde yüksek miktarda veri transferi gerektirir (Şekil 1). Bu yapı, özellikle yüksek bant genişliği isteyen radar, görüntü işleme ve elektronik harp uygulamalarında bellek duvarı olarak bilinen performans sınırına yol açar.



Şekil 1 - VON-NEUMANN VE NÖROMORFİK MİMARİLERİNİN KIYASLAMASI

Nöromorfik mimariler ise bellek ve hesaplamayı aynı konuma yaklaştırarak, tıpkı biyolojik nöronlarda olduğu gibi yalnızca bir spike gerçekleştiğinde işlem yapan olay-tabanlı bir davranış sergiler. Bu yaklaşım, hem enerji verimliliğinde büyük kazanımlar sağlar hem de karar verme döngülerinde gecikmeyi milisaniyeden mikro saniyeye kadar düşürür. Radar sinyal işleme, spektrum farkındalığı ve hedef tespiti gibi savunma uygulamalarında bu fark operasyonel üstünlük anlamına gelmektedir.

Beyinden İlham Alan Çipler:
Ayrıntılı Karşılaştırma

Aşağıdaki tablo; Intel Loihi 2, IBM NorthPole, BrainScaleS-2, SpiNNaker-2 ve BrainChip Akida çiplerinin teknik ölçeğini, mimari yaklaşımlarını ve savunma alanındaki olası kullanım çerçevesini kapsamlı olarak özetlemektedir.

ÇİP	PİYASAYA ÇIKIŞ YILI	YAKLAŞIK NÖRON / SİNAPS	MİMARİ / YAPI	ÜRETİM PROJESİ	ÖNE ÇIKAN ÖZELLİKLER	UYGULAMA ÖRNEKLERİ
Intel Loihi 2	2021	~1M nöron / ~120M sinaps	Dijital SNN, olay tabanlı DSP birimleri	Intel 4 (≈4-7 nm)	On-chip öğrenme, enerji-verimli SNN eğitimi, mikro-saniye tepki [4]	Uçta karar verme sistemleri, robotik algı, düşük güç sınıflandırıcılar
IBM NorthPole	2024	~224M nöron / ~45M sinaps	Dijital, SRAM-içi hesaplama	12 nm	A100'e göre 25x enerji verimi, bellek-işlem birleştirilmiş mimari [5]	Görüntü sınıflama, radar hedef ayrıştırma, insansız sistemlerde algı
BrainScaleS-2	2020 prototip / 2022 stabil sürüm	~50M analog nöron / ~5M analog sinaps	Analog hızlandırılmış nöron modeli + memristör temelli sinaps	65 nm analog CMOS	Gerçek zamanın 1000 kat hızında hesap üretme kabiliyeti [11]	Hızlandırılmış radar önişleme, nörofizik simülasyonu
SpiNNaker-2	2022	~10M yazılım nöron eşdeğeri / Dijital zamanlamalı sinaps	152 çekirdekli ARM tabanlı çok-çekirdekli yapı	22 nm	Spike yönlendirmede 10^9 paket/sn kapasite [12]	EH benzetimi, spektrum yoğunluk analizi, RF davranış modelleme
BrainChip Akida	2021	~100M nöron / ~8-10M sinaps	Dijital SNN, olay tetiklemeli	22 nm	mW seviyesinde güç, uçta öğrenme, ticari ürün olgunluğu [13]	Gömülü radar sınıflayıcı, sensör füzyonu, hedf tanıma

Tablo 1 - NÖROMORFİK ÇİPLERİN ÖZELLİKLERİ

Bu çiplerin her biri nöromorfik hesaplamayı farklı bir yaklaşım ile gerçekleştirmektedir: Loihi 2 öğrenmeye odaklı dijital Spiking Neural Network'lerle (SNN), NorthPole isteğe bağlı bellek-içi hesaplama ile, BrainScaleS-2 fiziksel analog hareket eşlemesiyle, SpiNNaker-2 ise devasa ölçekli spike yönlendirmesiyle öne çıkar. Akida ise düşük güç gömülü sistemlere yönelik ticari olgunluğu en yüksek modeldir.

GPU Kıyaslaması:
NVIDIA A100 Üzerinden Analiz

Bugün savunma uygulamalarında yaygın kullanılan hızlandırıcıların başında NVIDIA A100 GPU gelmektedir. 400W güç tüketen bu mimari, yoğun Evrişimsel Sinir Ağları (Convolutional Neural Network - CNN) tabanlı işlemlerde yüksek performans sunsa da veri hareketi enerji tüketiminin %60'ından fazlasını oluşturmaktadır.

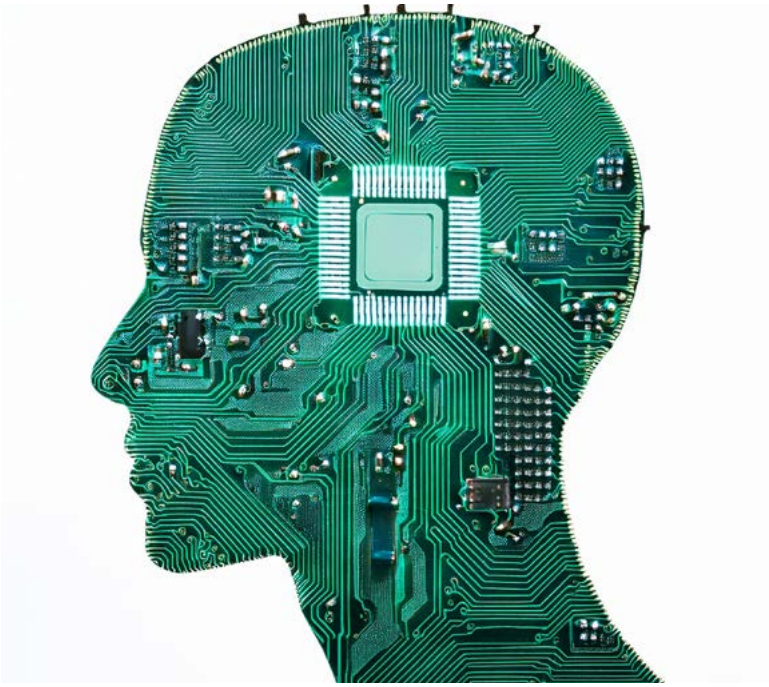
Nöromorfik çipler, spike-tabanlı olay işleme sayesinde bu darboğazı temelden çözmekte ve A100'e kıyasla çarpıcı iyileştirmeler sunmaktadır:

- Loihi 2, spike-tabanlı öğrenmede A100'e göre 100 kat enerji verimliliği sağlar.
- NorthPole, görüntü çıkarımında 25 kat enerji verimi ve daha düşük gecikme rapor etmiştir.
- BrainChip Akida, radar ve akustik algı testlerinde 100–1000 kat güç avantajı göstermiştir.
- BrainScaleS-2, analog hızlandırma sayesinde hesaplamayı 1.000 kat hızlandırabilir ve GPU gecikmesini mikro-saniye düzeyine indirebilir.
- SpiNNaker-2, devasa paralel yönlendirme kapasitesiyle RF/EH simülasyonlarında GPU yerine geçebilecek ölçeklenebilirlik sunmaktadır.

Bu kıyaslamalar, nöromorfik çiplerin özellikle milisaniye altı reaksiyon gerektiren radar, hipersonik hedef algılama, spektrum yönetimi ve elektronik harp uygulamalarında GPU mimarilerine göre belirgin bir avantaj sağlayabileceğini göstermektedir.

Harekât
Yeteneklerine Etkisi

Nöromorfik hesaplama, harekât sahasında giderek karmaşıklaşan tehdit ortamına karşı daha hızlı karar, daha düşük enerji tüketimi ve daha yüksek otonomi sağlayarak operasyonel etkinliği doğrudan artırmaktadır. Özellikle hipersonik füze tehditleri, düşük radar kesit alanlı hedefler, yoğun elektromanyetik karıştırma ortamları ve dağıtık sensör ağları gibi yeni nesil



harekât koşulları, klasik GPU/CPU mimarilerinin tepki süresi ve güç tüketimi açısından sınırlarına ulaşmasına neden olmaktadır.

Nöromorfik mimarilerin en kritik üstünlüğü, mikro-saniyeler düzeyinde tepki süresiyle gerçek zamanlı hedef tespiti ve sınıflandırma yapabilmesidir. Örneğin Intel Loihi 2, olay tabanlı öğrenmede NVIDIA A100'e kıyasla 100 kat daha düşük enerjiyle işlemleri tamamlayabilmektedir. IBM NorthPole mimarisi ise görüntü çıkarımında A100'e göre 25 kat daha yüksek enerji verimliliği sunarak otonom sistemlerde görev süresini önemli ölçüde uzatmaktadır.

Bu performans farkı, harekât ortamında şu alanlarda belirleyici avantaj sağlar:

1. **Hipersonik tehditlere karşı erken tespit:** Mikro-saniye seviyesinde işlenen radar yankıları, hedefin manevrasını kavrama ve önleme çözümlerini optimize etme kabiliyetini artırır. Nöromorfik çiplerin olay-tabanlı yapısı, yüksek hızlarda bile sürekli sinyal akışını düşük gecikmeyle analiz edebilir.

2. **Elektronik harp altında dayanıklılık:** Spike-tabanlı işleme, gürültü ve karıştırmaya karşı doğal bir direnç sağlar. BrainScaleS-2 mimarisi, analog nöral dinamikleri kullanarak karıştırma altındaki sinyal sürekliliğini 1.000 kat hızlandırılmış zaman ölçeğinde modelleyebilir.

3. **Uçta otonom karar verme:** Enerji tüketiminin mW seviyesinde olması, İHA/İKA/İDA ve sınır hattı radarlarında enerji lojistiğine bağımlılığı azaltır. Akida çipi, cihaz üzerinde (on-device) öğrenme kabiliyeti sayesinde değişen tehdit desenlerine karşı harekât sahasında adaptif analiz gerçekleştirebilir.

4. **Dağıtık sensör ağlarında gecikmesiz füzyon:** SpiNNaker-2'nin 10^9 spike/sn yönlendirme kapasitesi, çoklu radar ve EH düğümlerinden gelen verilerin gerçek zamanlı olarak füzyonunu mümkün kılar.

Bu nedenlerle nöromorfik hesaplama, modern harekât ortamında hem tehdit algılama süresini kısaltmakta hem de karar üstünlüğü sağlamaktadır.

Savunma Sanayiinde Potansiyel Kullanım Alanları

Nöromorfik hesaplama, savunma sanayiinde giderek artan hız, enerji verimliliği ve otonomi gereksinimlerine doğrudan yanıt veren bir teknoloji olarak öne çıkmaktadır. Hem radar ve elektronik harp sistemleri gibi yüksek bant genişliğine sahip sensör platformlarında hem de uçta karar veren otonom sistemlerde sağladığı düşük güç tüketimi ve mikro-saniye seviyesindeki gecikme performansı, bu mimariyi geleceğin savunma çözümlerinde kritik bir kolaylaştırıcı haline getirmektedir. Savunma Sanayii Başkanlığı tarafından yayımlanan çeşitli OTAĞ sonuç raporlarında da (ör. Geleceğin Yapay Zekâ Teknolojileri OTAĞ Sonuç Raporu, 2025; RF Teknolojileri OTAĞ Sonuç Raporu, 2021) yapay zekâ ve özellikle olay-tabanlı hesaplamanın, yüksek tepki hızı gerektiren görevlerde stratejik önem kazandığı vurgulanmaktadır.

Radar ve Erken İhbar Sistemleri

Nöromorfik çipler, radar yankılarının çok düşük gecikmeyle işlenmesi sayesinde hedef tespiti, sınıflandırması ve iz takibini hızlandırabilir. IBM NorthPole'un GPU'ya göre 25 kat daha yüksek enerji verimliliği sağlaması, erken ihbar radarlarında işlem yükünün sahada taşınması açısından önemli bir teknoloji avantajıdır. Hipersonik tehditlerde kritik olan "algılama-takip-karar" zinciri, nöromorfik tasarımlarla mikro-saniyeler seviyesinde hızlandırılabilir.

Elektronik Harp (EH) Sistemleri

EH'de çevrim süreleri ve reaksiyon hızları belirleyicidir. Intel Loihi 2'nin spike-tabanlı öğrenme yeteneği sayesinde geniş bant spektrumda anlık karıştırıcı tespiti ve adaptif karşı tedbir üretimi mümkün olabilir. Ayrıca olay-tabanlı işleme, yoğun gürültü altında bile dayanıklı veri akışı sağlayarak karıştırmaya karşı direnç artırır. BrainScaleS-2'nin analog hızlandırma yeteneği, karmaşık RF sinyallerinin gerçek zamanın 1000 kat üstünde modellenmesini mümkün kılmaktadır.

Otonom Kara, Deniz ve Hava Platformları

Uçta hesaplama ve düşük güç tüketimi, İHA/İKA/İDA gibi otonom platformlar için kritik gereksinimlerdir. BrainChip Akida'nın miliwatt seviyesinde çalışabilmesi ve cihaz üzerinde öğrenme kapasitesi, sahada değişen tehdit desenlerine adaptasyonu mümkün kılar. Özellikle sensör füzyonu, rota optimizasyonu, dost-düşman ayrımı ve çevresel farkındalık gibi görevlerde nöromorfik platformlar klasik CNN tabanlı sistemlere göre daha hızlı reaksiyon verebilir.

Dağıtık Sensör Ağları ve Sınır Güvenliği

SpiNNaker-2'nin 10^9 spike/sn yönlendirme kapasitesi, çok sayıda sensörden gelen verinin gerçek zamanlı olarak füzyonunu mümkün kılar. Bu özellik, sınır gözetleme radarları, elektro-optik kuleler, yer sensörleri ve akustik/termal sensör ağlarının entegre çalıştığı büyük ölçekli operasyonlarda kritik öneme sahiptir. OTAĞ raporlarında da modüler sensör ağlarının ve akıllı veri dağıtım sistemlerinin gelecek dönemde temel beklentiler arasında olduğu vurgulanmıştır.

Sinyal ve Görüntü İstihbaratı (SIGINT / IMINT)

Nöromorfik mimariler, sürekli akış hâlindeki verilerde anomalileri çok düşük gecikmeyle tespit edebilir. Bu nedenle RF izleme, düşman haberleşme analizi ve gerçek zamanlı görüntü akışlarında hedef davranış tespiti gibi istihbarat görevlerinde kullanım potansiyeli bulunmaktadır.

IBM NorthPole'un yüksek bant genişliği gerektiren görüntü çıkarımında gösterdiği başarı, bu yeteneği doğrulayan bir örnektir.

Ticarileşme Durumu

Nöromorfik çip ekosistemi hâlen gelişme aşamasındadır; ancak Akida ve NorthPole gibi ticari olgunluğa yakın ürünler, gömülü sensörler ve otonom platformlarla entegrasyon için hazır durumdadır. Loihi 2 araştırma amaçlı sunulmakta, BrainScaleS-2 akademik odaklı kullanılmakta, SpiNNaker-2 ise geniş ölçekli simülasyonlarda aktif olarak değerlendirilmektedir. Savunma odaklı ticarileşme özellikle ABD DARPA, AB HBP, Avustralya Savunma Bakanlığı ve Asya-Pasifik bölgesindeki programlar tarafından hızlandırılmaktadır.

ASELSAN İçin Potansiyel Kullanım Alanları

ASELSAN'ın radar, elektronik harp ve otonom sistem portföyü dikkate alındığında nöromorfik platformların uygulanabileceği kritik alanlar özetle şu şekildedir:

- **Radar hedef tespiti ve sınıflandırması:** Hipersonik hedef analizi ve düşük RKA tespiti için mikro-saniye gecikme avantajı,
- **EH tehdit tanıma ve adaptif karşı tedbir üretimi:** Geniş bant spektrumda spike-tabanlı, düşük gecikmeli sinyal analizi,
- **[İHA/İKA/İDA] uçta algılama ve navigasyon:** Enerji verimliliği ile uzun görev süresi ve otonomi artışı,
- **Dağıtık sensör füzyonu:** SpiNNaker-benzeri platformlarla geniş ölçekli füzyon ağları.

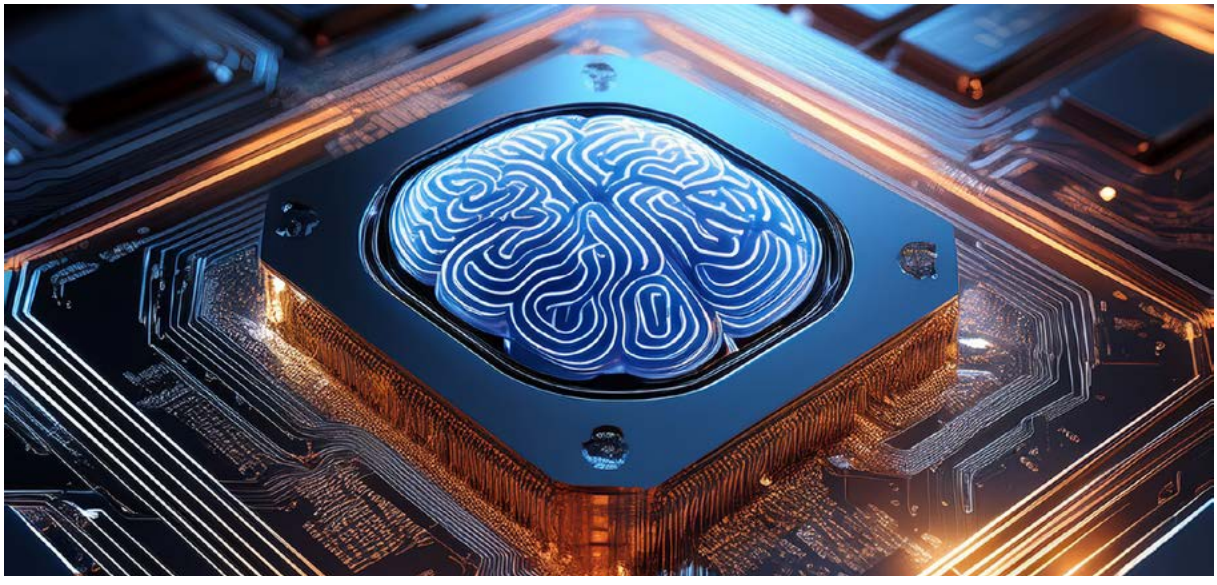
Bu alanlar, ASELSAN'ın mevcut ürün ailelerinde (ör. radar, EH, İHA/İKA/İDA faydalı yükleri, sınır gözetleme çözümleri) teknolojik sıçrama fırsatı sunmaktadır.

Teknolojik Gelişim Öngörüsü

Nöromorfik hesaplama bugün Teknoloji Hazırlık Seviyesi (THS) 4–6 aralığında değerlendirilmektedir; yani kavramsal ispat ve laboratuvar prototiplerinden, sınırlı saha testlerine geçiş aşamasındadır. Intel Loihi 2 ve SpiNNaker-2 gibi sistemler araştırma kullanımında kalırken, BrainChip Akida ve IBM NorthPole ticari ürünleşme yolunda THS 6–7 seviyelerine yaklaşmıştır.

Önümüzdeki 10+ yılda, nöromorfik hesaplamanın üç ana eksende olgunlaşması beklenmektedir:

1. **Geniş ölçekli entegrasyon:** Memristör tabanlı sinaptik belleklerin üretim süreçlerine dahil edilmesiyle nöron ve sinaps yoğunluğunun 10–100 kat artması öngörülmektedir.
2. **Gerçek zamanlı otonomi:** Radar, elektronik harp ve insansız sistemlerde mikro-saniye altı karar döngüleri yaygınlaşarak nöromorfik mimarileri klasik GPU/CPU hızlandırıcılarının tamamlayıcısı olmaktan çıkarıp birincil işlemci haline getirecektir.
3. **Uçta öğrenme (edge learning):** Donanım destekli çevrim içi öğrenme yetenekleri, askeri sistemlerde veri merkezine bağımlılığı azaltacaktır.



Bununla birlikte bazı zorlukların da ortaya çıkması beklenmektedir. Analog memristörlerin üretim tekrarlanabilirliği, gürültü hassasiyeti, standartlaştırma eksikliği ve uygulama geliştirme ekosisteminin sınırlı olması geçiş sürecindeki temel kısıtlardır. Ayrıca nöromorfik mimarilerin savunma uygulamalarında yaygınlaşması için güvenlik sertifikasyon süreçlerinin netleşmesi gerekmektedir.

Bu gelişim çizgisi, nöromorfik platformların 2035 sonrasında birden fazla savunma alanında olgun çözümler sunacağını göstermektedir.

Sonuç ve Değerlendirmeler

Nöromorfik hesaplama, önceki bölümlerde ortaya konulduğu üzere, savunma sanayiinde mikro-saniye ölçekli karar verme, düşük güç tüketimi, yüksek ölçeklenebilirlik ve gürültü-karıştırma dayanımı gibi kritik operasyonel üstünlükler sunarak geleceğin "oyun değiştirici" teknolojilerinden biri olma potansiyeline sahiptir. Radar, elektronik harp, otonom sistemler ve dağıtık sensör ağlarında sağladığı hız ve enerji avantajı, bu mimarileri geleneksel GPU/CPU merkezli yaklaşımın ötesine taşımaktadır.

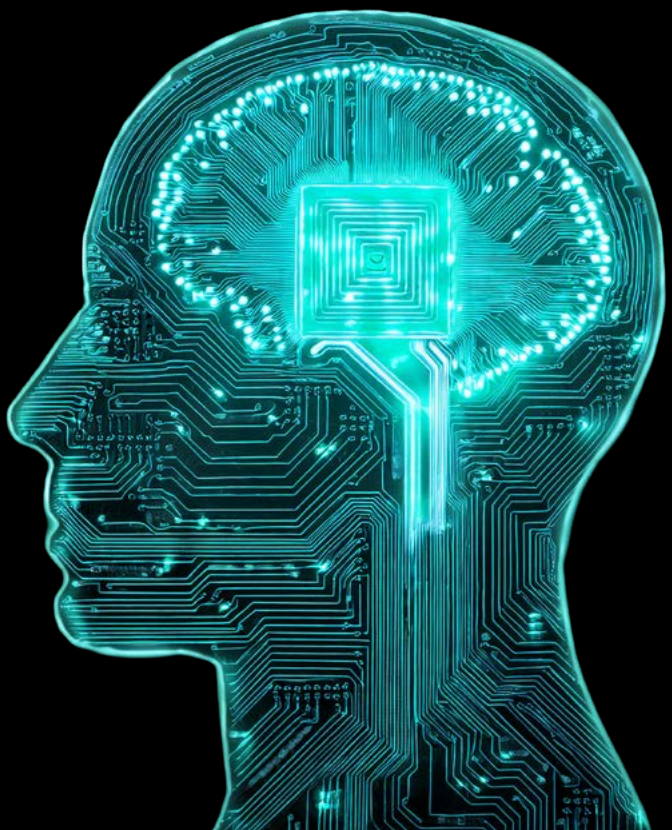
Türkiye'nin bu alanda küresel ölçekte rekabet edebilmesi için üç stratejik eksenin eş zamanlı yürütülmesi önem arz etmektedir:

1. **Uluslararası iş birlikleri ve teknoloji transferi:** Avrupa Birliği'nin Ufuk Avrupa programı kapsamında yürütülen "Geleceğin Yeniden Yapılandırılabilir Süperiletken ve Fotonik Teknolojileri" projesi, düşük güçte yüksek hızlı hesaplama birimlerinin geliştirilmesine yönelik önemli bir ekosistem oluşturmaktadır . Savunma uygulamalarında nöromorfik hızlandırıcıların bu altyapılarla bütünleşmesi hem tasarım olgunluğunu artıracak hem de teknoloji transferi kanallarını güçlendirecektir.

2. **Milli memristör ve sinaptik bellek geliştirme kapasitesinin güçlendirilmesi:** ODTÜ ULTRAMEMS laboratuvarında yürütülen "MEMS nöristör" araştırmaları, mekanik tabanlı sinaptik elemanların güvenilir şekilde üretilebilirliğini göstermektedir. Bu çalışmalar, analog sinaptik bellek teknolojilerinin yerlileştirilmesi için güçlü bir başlangıçtır. ASELSAN'ın bu laboratuvarlarla kuracağı erken dönem ortak geliştirme modelleri, yerli nöromorfik donanım yol haritasının hızlanmasını sağlayacaktır.

3. **Çift kullanım (dual-use) stratejilerinin benimsenmesi:** Nöromorfik işlemcilerin hem savunma hem de sivil alanlarda -akıllı kameralar, endüstriyel otomasyon, enerji izleme, akıllı şehir sensörleri- kullanılabilir olması, birim maliyetleri düşürerek teknolojinin ticarileşmesini kolaylaştıracaktır. Böylece savunma için geliştirilen çekirdek teknolojiler geniş pazarda ölçek kazanabilecektir.

Bu aşamalar bütünleştiğinde, Türkiye'nin 2035 sonrasında radar, elektronik harp ve otonom sistemlere yönelik globalde lider ürünler geliştirmesi mümkün görünmektedir.





HAVADA

GÜVEN VEREN TEKNOLOJİ

Alanında en iyi ürünlerimiz ve oyun değiştirici teknolojilerimizle
tam bağımsızlık için varız!

aselsan



HİPERSONİK: GELECEĞİN HARBİNİ ŞEKİLLENDİREN HIZ

Bu makale, modern savunma sanayiinin en kritik kırılma noktalarından biri olan hipersonik teknolojisini teknik, stratejik ve ekonomik açılardan incelemektedir. Hipersonik hızlarda (Mach 5 ve üzeri) seyreden sistemlerin karşılaştığı aerotermodinamik zorluklar, plazma kalkanı oluşumu ve kontrol mekanizmaları ele alınmış; bu sistemlerin mevcut balistik ve seyir füzelerinden farkları ortaya konmuştur. Çalışma, NATO ve Türkiye perspektiflerini de içerecek şekilde, hipersonik silahların savunma doktrinleri üzerindeki dönüştürücü etkisini ve 2030 sonrası için öngörülen teknolojik trendleri analiz etmektedir.

Murat Özgür DOĞAN

Hipersonik Nedir?

Hipersonik teknoloji, modern harp sahasında "zaman ve mekan" algısını radikal bir biçimde değiştiren, 21. yüzyılın askeri devrimini (Revolution in Military Affairs - RMA) temsil eden, konvansiyonel ve nükleer caydırıcılık doktrinlerini kökten sarsan bir yetenektir. Geleneksel olarak ses hızının beş katı (Mach 5) ve üzerindeki hızlarda uçuş yapabilen sistemleri ifade eden "hipersonik" kavramı, sadece bir sürat eşiği değil; aerodinamik, termodinamik ve malzeme biliminin iç içe geçtiği çok disiplinli bir "ekstrem mühendislik" alanıdır. Bu teknoloji, yüksek hızın yanına yüksek manevra kabiliyeti ve atmosfer içi düşük irtifa seyir yeteneğini ekleyerek mevcut hava savunma sistemlerini etkisiz kılmayı hedeflerken, Soğuk Savaş dönemindeki kıtalararası balistik füze (ICBM) yarışının aksine, tespit edilebilirlik süresini minimize eden, önleme penceresini daraltan ve stratejik sürpriz etkisini maksimize eden bir yöne yönelmiştir.

Dünya genelinde bu teknolojik yarış iki ana eksende şekillenmektedir. Amerika Birleşik Devletleri, "Hızlı Küresel Vuruş" (Prompt Global Strike) konsepti çerçevesinde dünyanın herhangi bir noktasındaki yüksek öncelikli hedefi bir saatten kısa sürede imha etme kabiliyetine odaklanırken; Rusya ve Çin, mevcut Amerikan füze savunma sistemlerini (THAAD, Aegis vb.) aşabilecek asimetrik bir karşı-güç oluşturma hedefindedir. Örneğin, Rusya'nın Avangard hipersonik süzülme aracı, atmosferin üst katmanlarında Mach 27 gibi ekstrem hızlara ulaşarak mevcut hiçbir hava savunma sisteminin tepki veremeyeceği bir angajman zarfı oluşturmaktadır. Teknik açıdan hipersonik uçuşu süpersonik uçuştan ayıran temel fark, havanın artık "ideal gaz" gibi davranmamasıdır. Bu hızlarda aracın önündeki şok dalgaları yüzeye o kadar yakınlaşır ki (shock layer), ortaya çıkan termal enerji moleküler bağları koparak aracın sadece havada süzülmesini değil, aynı zamanda bir "kimyasal reaktör" içerisinde hareket etmesini zorunlu kılar. Bu makalede, söz konusu fiziksel zorlukların üstesinden gelmek için geliştirilen inovatif çözümler ve Türkiye'nin bu küresel rekabetteki stratejik hamleleri analiz edilecektir.



OREŞNİK HİPERSONİK ORTA MENZİLLİ BALİSTİK FÜZESİ

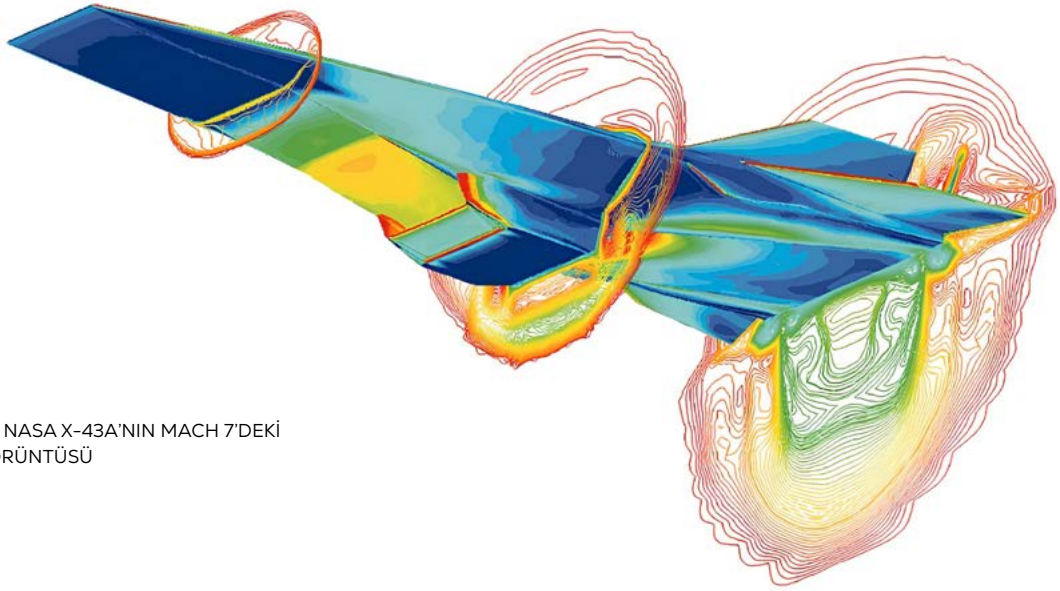
Hipersonik uçuş, temel olarak Mach 5 ve üzerindeki hız rejimini ifade etmekle birlikte, bu sistemlerin geliştirilmesindeki temel zorluklar sadece yüksek hıza dayanıklılık değil; aynı zamanda bu hızda sürdürülebilirlik ve yönetilebilirlik üzerinedir. Bu rejimde akış fiziği, klasik süpersonik uçuş karakteristiklerinden farklı olarak termodinamik ve akışkanlar mekaniğinin sınırlarını zorlayan karmaşık fenomenlere dayanır. Özellikle aerotermodinamik ısınma ve entalpi bağlamında, havanın kinetik enerjisi "stagnation point" (durma noktası) bölgelerinde yoğun bir termal enerjiye dönüşerek havanın sadece ısınmasına değil, kimyasal olarak ayrışmasına (dissociation) neden olmaktadır. Oksijen ve azot molekülleri atomlarına ayrılırken ortaya çıkan bu yüksek entalpi miktarı geleneksel soğutma yöntemlerini imkansız kıldığından, yüzeyden gaz sızdırarak bir ısı kalkanı oluşturmaya dayanan "terlemeli soğutma" (transpiration cooling) gibi inovatif yöntemler üzerinde çalışılmaktadır.

İtki sistemleri açısından bakıldığında, süpersonik yanma (Scramjet) mekanizması bu teknolojinin kalbinde yer almaktadır. Klasik ramjet motorlarında hava yanma odasına girmeden önce ses altına yavaşlatılırken, Mach 5 ve üzeri hızlarda bu yavaşlatma aşırı ısınmaya ve basınç kaybına yol açmaktadır. Scramjet teknolojisinde ise hava yanma odasından süpersonik hızla geçmekte; hidrojen veya endotermik hidrokarbon gibi yakıtların bu hava akımı içerisinde milisaniyeler içinde yanması gerekmektedir. Bu durum, saniyede yaklaşık 2 kilometre hızla giden bir hava akımı içinde bir mumu sönmeden yakmaya eşdeğer bir mühendislik harikası olarak kabul edilmektedir. Ayrıca, laminer akışın türbülanslı akışa dönüştüğü "sınır tabaka geçişi" (boundary layer transition) süreci, ısı transferini 3 ila 8 kat artırarak aracın yapısal olarak erimesine yol açabilecek en kritik teknik risklerden birini oluşturmaktadır.

Hipersonik hızda seyreden sistemlerin geliştirilmesi aşamasındaki diğer önemli problemler ise ısıl etkiler, plazma oluşumu ve yörünge kontrolüdür. Aracın önündeki havanın sıkışmasıyla oluşan şok dalgaları, devasa bir kinetik enerjiyi ısıya dönüştürerek gövde sıcaklığını 2000°C ve üzerine çıkarabilmekte, bu da gelişmiş seramik kompozit materyallerin kullanımını zorunlu kılmaktadır. Ortaya çıkan bu aşırı sıcaklık, aracın etrafındaki hava moleküllerini iyonize ederek radyo dalgalarını bloke eden bir plazma kılıfı oluşturmaktadır. "İletişim kesintisi" (blackout) olarak adlandırılan bu durum, veri bağı ve GPS sinyallerinin alınmasını imkansız hale getirerek sistemin operasyonel güvenliğini tehdit etmektedir. Son olarak, hem yüksek hızda ilerlemek hem de manevra yapmak kontrol yüzeyleri üzerinde muazzam bir yük oluşturduğundan, geleneksel aerodinamik kontrolcülerin yetersiz kaldığı bu noktada reaksiyon kontrol sistemlerinin (RCS) entegrasyonu kritik bir gereklilik olarak öne çıkmaktadır.



HİPERSONİK KABİLİYETLİ BİR HAVA UNSURU



Şekil 1 – NASA X-43A'NIN MACH 7'DEKİ CFD GÖRÜNTÜSÜ

Hipersonik çalışmaların tarihsel gelişimi, havacılık ve uzay mühendisliğinin sınırlarını zorlayan üç ana evreden oluşmaktadır. İlk evre, 1940'lı yıllarda Peenemünde'de geliştirilen Alman V-2 roketleri ile başlamıştır. Bu roketler, atmosferden çıkış ve tekrar giriş (re-entry) esnasında hipersonik hızlara ulaşan ilk insan yapımı nesneler olmuştur. 1960'lı yıllarda ise ABD'nin X-15 deneme uçağı projesi, bir insanın Mach 6.7 hızına ulaşmasını sağlayarak hipersonik uçuşun biyolojik ve aerodinamik sınırlarını test etmiştir. Ancak o dönemde, şok dalgalarının ortaya çıkardığı aşırı ısınmanın modellenememesi (hesaplamalı akışkanlar dinamiği - CFD eksikliği) ve bu sıcaklıklara dayanıklı hafif kompozitlerin bulunmayışı, teknolojinin operasyonel bir silaha dönüşmesini on yıllarca geciktirmiştir.

21.yüzyılın başında 3. Evre olarak adlandırılan dönemde, işlemci gücündeki artış ve malzeme bilimindeki devrim, hipersonik sistemleri laboratuvar ortamından çıkarıp harp sahasına taşımıştır. Günümüzde bu sistemler, çalışma prensiplerine göre iki temel kategoriye ayrılmaktadır:

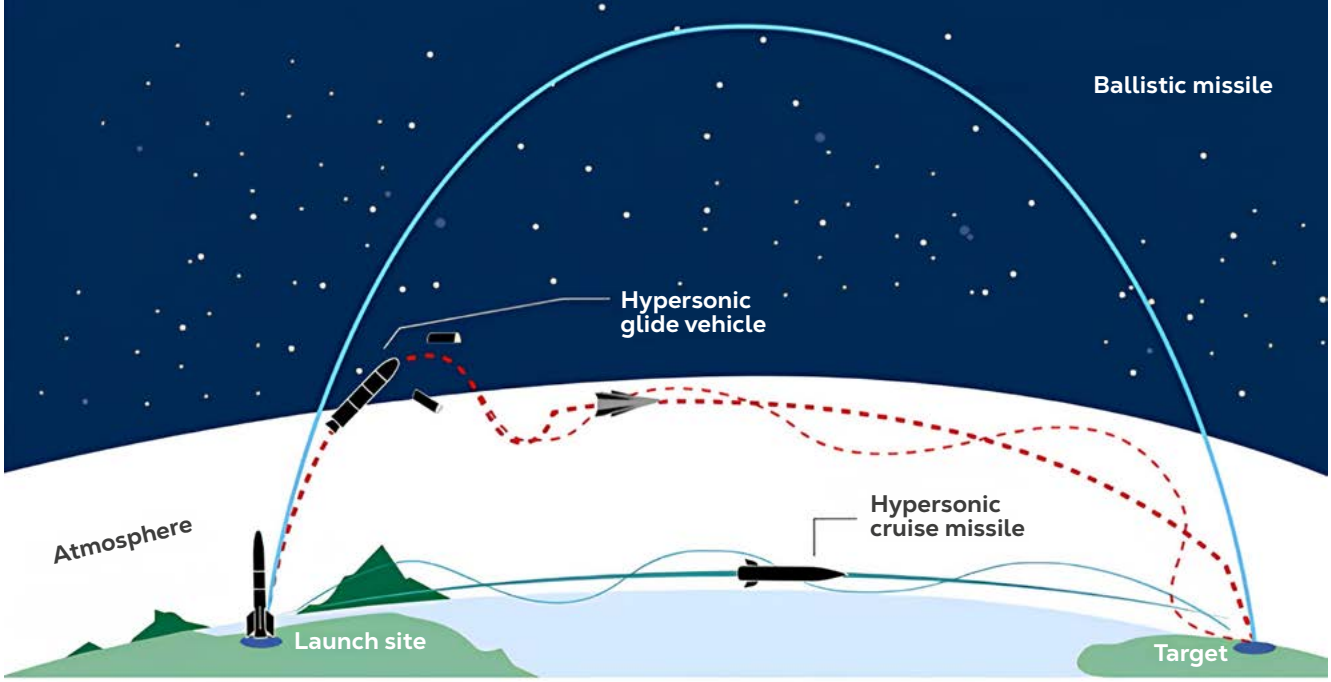
Hipersonik Süzülme Araçları (Hypersonic Glide Vehicles - HGV): Bu sistemler, geleneksel bir balistik füze taşıyıcısı ile atmosferin üst katmanlarına (exo-atmospheric) çıkarılır. Ancak balistik füzelerin aksine, ayrıldıktan sonra bir süzülme gövdesi gibi davranarak atmosfere tekrar girer ve hipersonik hızlarda, tahmin edilemez manevralar yaparak hedefe yönelir. Rusya'nın Avangard ve Çin'in DF-17 sistemleri bu teknolojinin en gelişmiş örnekleridir. HGV'lerin en büyük avantajı, çok yüksek irtifada süzülürken hava savunma radarlarının görüş alanının (horizon) altında kalarak tespit süresini minimize etmesidir.

Hipersonik Seyir Füzeleri (Hypersonic Cruise Missiles - HCM): HGV'lerin aksine, bu füzeler tüm uçuş süreci boyunca atmosfer içinde kalır ve sürekli bir itki sistemiyle (scramjet) hareket eder. Scramjet motorlar, hareket halindeki havayı ses hızının üzerinde bir hızla yanma odasına alıp yakıtla buluşturarak süpersonik yanma gerçekleştirir. Bu süreçte hiçbir hareketli parça (türbin) kullanılmaz; aracın hızı kendi kompresyonunu sağlar. Rusya'nın gemiden atılabilen Zircon füzesi ve ABD'nin HACM projesi bu sınıftadır. HCM'ler, HGV'lere göre daha alçak irtifadan uçtukları için tespit edilmeleri çok daha zordur.

Günümüzde Rusya'nın Ukrayna sahasında Kinzhal (havadan atılan hipersonik balistik füze) mühimmatını kullanması, hipersonik çağın sadece teorik bir yarış değil, aktif bir harekât yeteneği olduğunu kanıtlamıştır. Bu durum, stratejik dengelerin artık saf menzil üzerinden değil, "önlenemez hız ve manevra" üzerinden kurulduğu yeni bir savunma paradigmasını başlatmıştır.



SERAMİK MATRİS KOMPOSİT MALZEME



Source: GAO analysis of Department of Defense data from GAO-21-378. Figure not drawn to scale.

Şekil 2 – HCV, HGV VE BALİSTİK FÜZE HAREKETLERİ

Harekat Yeteneklerine Etkisi

Hipersonik sistemler, harp sahasında sadece hızı değil, "tespit edilemezlik" ve "önlenemezlik" parametrelerini de kökten değiştirmektedir. Bu yeteneklerin operasyonel etkileri üç ana başlıkta incelenmelidir:

- **Taarruz Konsepti: Balistik ve Seyir Füzeleri ile Teknik Karşılaştırma**

Geleneksel Kıtalararası Balistik Füzeler (ICBM), atmosfer dışına çıkan ve yerçekimi etkisiyle hedefe yönelen öngörülebilir bir Kepler yörüngesi izler. Bu durum, savunma tarafındaki radarların ve uydu tabanlı erken uyarı sistemlerinin (SBIRS), füzeyi fırlatılış anından itibaren takip ederek vuruş noktasını matematiksel olarak hesaplamasına olanak tanır. Hipersonik sistemler ise bu paradigmayı iki şekilde yıkar:

- Yörünge Karmaşıklığı: Hipersonik Süzülme Araçları (HGV), atmosferin üst katmanlarında (40-100 km) "skipping" (sektirme) manevraları yaparak radar ufkunun altında kalır.
- Manevra Kabiliyeti: Geleneksel füzelerin aksine hipersonik füzeler, terminal safhada (hedefe yönelirken) yanal manevralar yapabilir. Bu, savunma füzesinin (interceptor) hesaplanan önleme noktasını sürekli boşa çıkarır.

- **Taarruz Konsepti: Stratejik Etkiler ve "Hızlı Küresel Vuruş"**

Hipersonik teknoloji, "Hızlı Küresel Vuruş" (Prompt Global Strike) doktrininin teknik omurgasını oluşturur. Bu doktrin, dünyanın herhangi bir noktasındaki zaman duyarlı bir hedefin (örneğin mobil bir füze rampası veya terör lideri) dakikalar içinde imha edilmesini öngörür. Ancak bu kabiliyet, "stratejik istikrar" üzerinde ciddi bir risk oluşturur.

- Çift Kullanımlı Muğlaklık: Hipersonik bir füzenin konvansiyonel mi yoksa nükleer mi başlık taşıdığı, hedef vurulana kadar ayırt edilemez.
- Karar Verme Süresinin Daralması: Savunma tarafı, gelen tehdidin niteliğini anlamaya çalışırken "kullan ya da kaybet" ikilemiyle karşı karşıya kalır; bu da nükleer tırmanma riskini (escalation) artırır.

- **Savunma Konsepti: Temel Stratejik Yaklaşımlar ve Karşı-Tedbirler**

Mevcut hava savunma doktrinleri (Patriot PAC-3, S-400, THAAD), belirli hız ve irtifa limitleri dahilinde hareket eden hedefler için tasarlanmıştır. Hipersonik tehditlerin Mach 10+ hızları ve atmosferik manevraları, bu sistemlerin atış kontrol radarlarının hedefe kilitlenme (lock-on) süresini imkansız kılacak kadar kısaltır.

- Uzay Tabanlı Sensörler: Hipersonik araçların radar ufku altında kalmasını engellemek için, dünya yörüngesine yerleştirilen alçak irtifa sensör ağları (HBTSS) ile kesintisiz takip zorunlu hale gelmiştir.
- Yönlendirilmiş Enerji Silahları (HEL): Fiziksel bir önleme füzesinin hipersonik bir füzeyi yakalamasındaki zorluk, savunma tarafını "ışık hızıyla" vuran lazer silahlarına yöneltmiştir. Megavat sınıfı lazerler, hipersonik aracın zaten aşırı ısınmış olan dış yüzeyine ek ısı yükleyerek yapısal bütünlüğünü bozmayı hedefler.

ASELSAN ve Savunma Sanayiinde Potansiyel Kullanım Alanları

Hipersonik teknoloji sadece bir füze teknolojisi değildir; aynı zamanda yeniden kullanılabilir uzay araçları ve çok hızlı lojistik transferler için de bir kapıdır. NATO, hipersonik tehditlere karşı "Entegre Hava ve Füze Savunması" (IAMD) konseptini güncellemektedir. İttifak, özellikle Rusya'nın Kaliningrad gibi stratejik bölgelerdeki hipersonik varlığına karşı sensör füzyonuna odaklanmaktadır.

- **Türkiye Perspektifi ve Güncel Çalışmalar (2024-2025)**

Türkiye, ROKETSAN ve TÜBİTAK SAGE aracılığıyla ramjet ve scramjet motor teknolojileri üzerine ciddi yatırımlar yapmaktadır. GÖKHAN füzesi projesiyle başlayan ramjet süreci, Türkiye'nin orta vadede hipersonik hızlara ulaşma vizyonunun temelini oluşturur. Türkiye'nin asimetrik harp tecrübesi, hipersonik teknolojiyi İHA sistemleriyle entegre etme potansiyelini de barındırmaktadır. Türkiye, hipersonik teknoloji yarışına "kademeli motor teknolojisi" stratejisiyle dahil olmuştur. 2025 yılı itibarıyla Türk savunma sanayii şu somut adımları atmaktadır:

GÖKHAN ve Ötesi: TÜBİTAK SAGE tarafından yürütülen GÖKHAN ramjetli hava-hava füzesi, Türkiye'nin yüksek hızlı mühimmatlar konusundaki temel taşıdır. 2025 başı itibarıyla gerçekleştirilen testlerde, değişken debili yakıt kontrol sistemlerinin başarısı, Türkiye'yi scramjet (hipersonik motor) çalışmalarına bir adım daha yaklaştırmıştır.

HİS-S (Hipersonik Sistemler) Projeleri: ROKETSAN bünyesinde yürütülen ileri itki sistemleri çalışmaları, katı yakıtlı roket motorlarından scramjet motorlara geçişi hedeflemektedir. Özellikle mühimmatların terminal safhada (hedefe yönelirken) sergilediği yüksek manevra kabiliyetleri üzerine odaklanılmıştır. Bu sistemler, Türkiye'nin Mavi Vatan ve sınır ötesi operasyonlarında "A2/AD" (Erişimi Engelleme ve Bölgeden Men Etme) kabiliyetini artırmayı hedeflemektedir.

Hava Savunma Entegrasyonu (SİPER Üstü): Türkiye sadece taarruz değil, savunma tarafında da hipersonik tehditleri algılayabilecek Çok Fonksiyonlu Atış Kontrol Radarları (ASELSAN) üzerinde çalışmaktadır. Hipersonik füzelerin düşük radar kesit alanı ve plazma etkisiyle gizlenmesine karşı, X-Bant ve L-Bant radarların füzyonu üzerine Ar-Ge faaliyetleri yoğunlaşmıştır .

Malzeme Bilimi ve Yerlileşme: Bursa Teknik Üniversitesi (BTÜ) ve TUSAŞ gibi kurumlar, 2000°C üzerine dayanıklı Ultra Yüksek Sıcaklık Seramikleri (UHTC) ve karbon-karbon kompozitler üzerinde çalışmaktadır. Bu malzemeler, yerli hipersonik araçların "burun konisi" ve "kanat hücum kenarları" için kritik öneme sahiptir.

2026 Yol Haritası: Cumhurbaşkanlığı 2026 Yıllık Programı'na göre hipersonik platformlar; kuantum teknolojileri ve yapay zeka ile birlikte "öncelikli stratejik alan" olarak tanımlanmıştır. Bu, devlet nezdinde çok yıllı bir bütçelendirme ve Ar-Ge desteği anlamına gelmektedir.



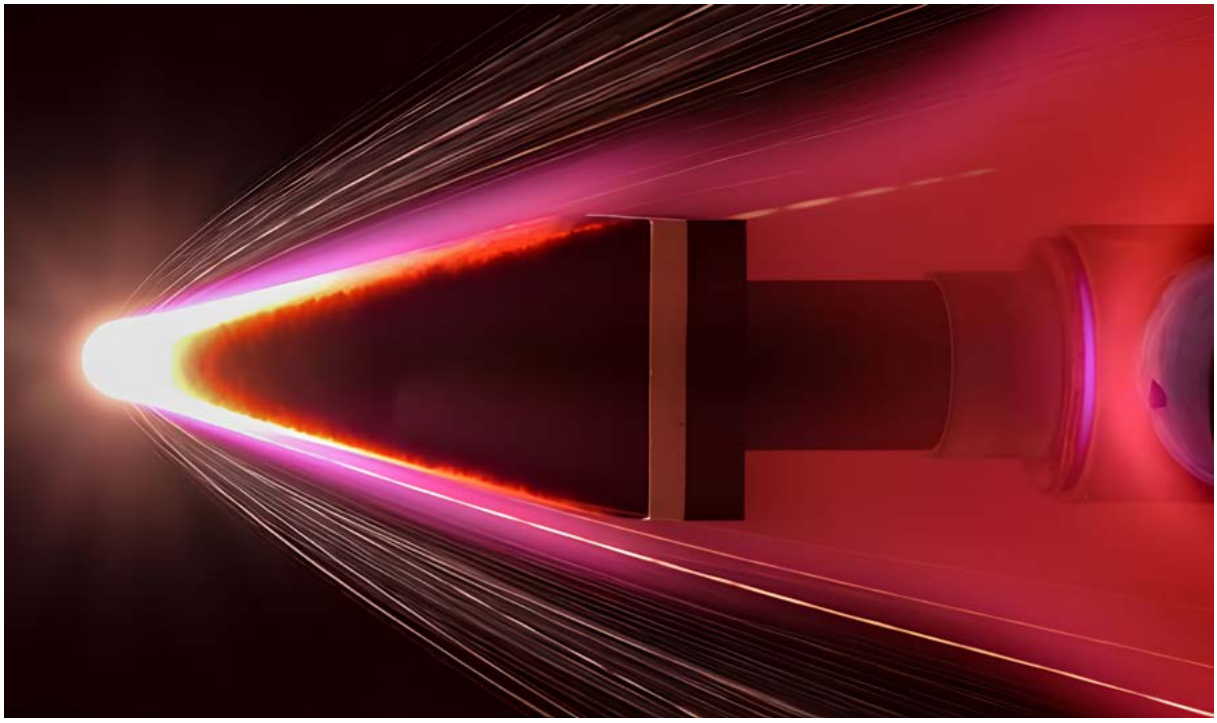
HİPERSONİK FÜZELERİN FIRLATILMA ANI

Savunma Sanayiinde Ticarileşme Potansiyeli

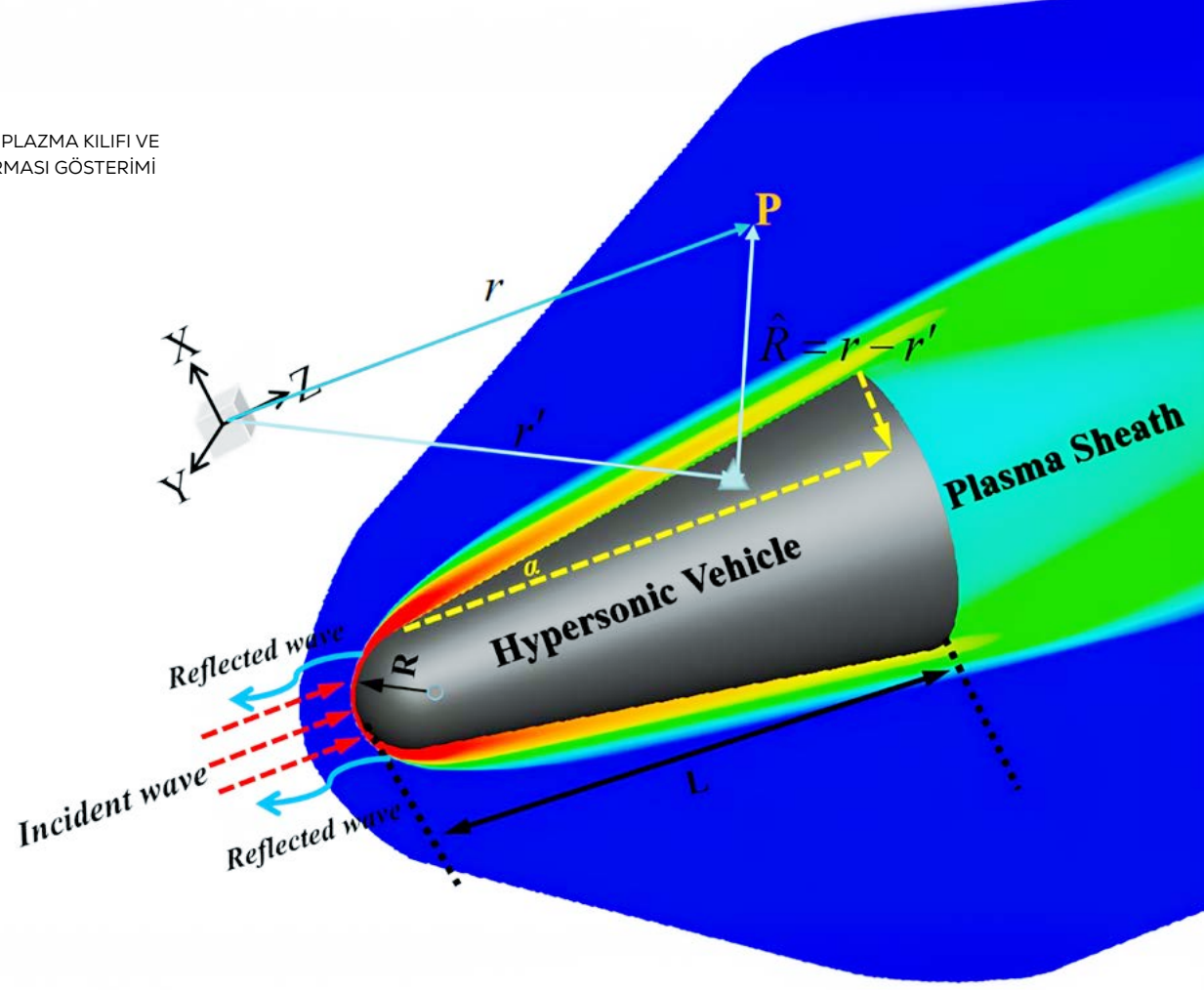
Hipersonik teknolojilerin ticarileşme süreci, sadece savunma sanayiine odaklı bir gelişimden ziyade, sivil havacılık ve uzay taşımacılığını da içine alan çok katmanlı bir ekonomik projeksiyon sunmaktadır. 2025 yılı itibarıyla, küresel hipersonik pazarının 2030 yılına kadar yıllık ortalama %12,5 bileşik büyüme oranı (CAGR) ile 15 milyar doları aşması beklenmektedir. Bu büyüme, sadece nihai ürün bazında değil; malzeme bilimi, alt bileşen üretimi ve test altyapısı gibi devasa bir ekosistemin ticarileşmesiyle ivme kazanmaktadır. Savunma pazarındaki bu genişlemenin temel itici gücü "maliyet etkinlik" odaklı üretim teknolojileridir. Geleneksel üretim yöntemleriyle imal edilmesi neredeyse imkansız olan karmaşık scramjet yanma odaları ve içsel soğutma kanalları, katmanlı üretim (3D Printing) teknolojileri sayesinde ticari olarak uygulanabilir hale gelmiştir. Inconel 718 veya özel titanyum alaşımlarının kullanıldığı bu yöntem, parça başına üretim maliyetini %40 oranında azaltırken, teslimat sürelerini de hatırı sayılır oranda düşürmektedir. Öte yandan pazar, sadece Lockheed Martin, ROKETSAN veya Raytheon gibi ana platform üreticileri ile sınırlı kalmamakta; yüksek sıcaklığa dayanıklı MEMS tabanlı navigasyon üniteleri, özel radom materyalleri ve ekstrem koşullara dayanıklı sensör üreticileri için niş bir alt pazar ekosistemi oluşmaktadır.

Ticari verimliliği sağlamak adına geliştirilen endotermik yakıt teknolojileri, yakıtın sadece bir enerji kaynağı değil, aynı zamanda bir soğutucu (heat sink) olarak kullanılmasını sağlar. Yakıt, yanma odasına girmeden önce gövde üzerindeki aşırı ısıyı absorbe ederek kimyasal bir değişime uğrar ve bu süreç ticarileşmenin önündeki termal bariyeri aşmak için anahtardır.

Mevcut roket teknolojilerinde kilogram başına binlerce doları bulan fırlatma maliyetleri, atmosferik oksijeni yakıtla birleştiren scramjet tabanlı fırlatma platformları ile 1/10 oranına indirilme potansiyeline sahiptir. Bu durum, düşük yörünge (LEO) ekonomisinin ve uzay madenciliği gibi geleceğin ticari faaliyetlerinin önünü açan en kritik ekonomik çarpanlardan biri olarak değerlendirilmektedir. Tüm bu potansiyele rağmen, hipersonik sistemlerin ticarileşmesi önündeki nihai engel uçuş sertifikasyonu ve sınırlı test imkanlarıdır. Dünyada hipersonik hızlarda test yapabilecek rüzgar tüneli sayısının azlığı, "Dijital İkiz" (Digital Twin) ve yüksek başarımlı hesaplama (HPC) tabanlı simülasyon pazarının büyümesine yol açmıştır. Türkiye gibi bu alanda yeni oyuncu olan ülkeler için, yerli hipersonik test altyapılarının ve yüksek hızlı aerodinamik simülasyon kapasitelerinin kurulması, küresel pazardan pay alabilmek için teknik ve stratejik bir ön şart olarak karşımıza çıkmaktadır.



Şekil 3 – HİPERSONİK PLAZMA KILIFI VE HABERLEŞME KARARMASI GÖSTERİMİ

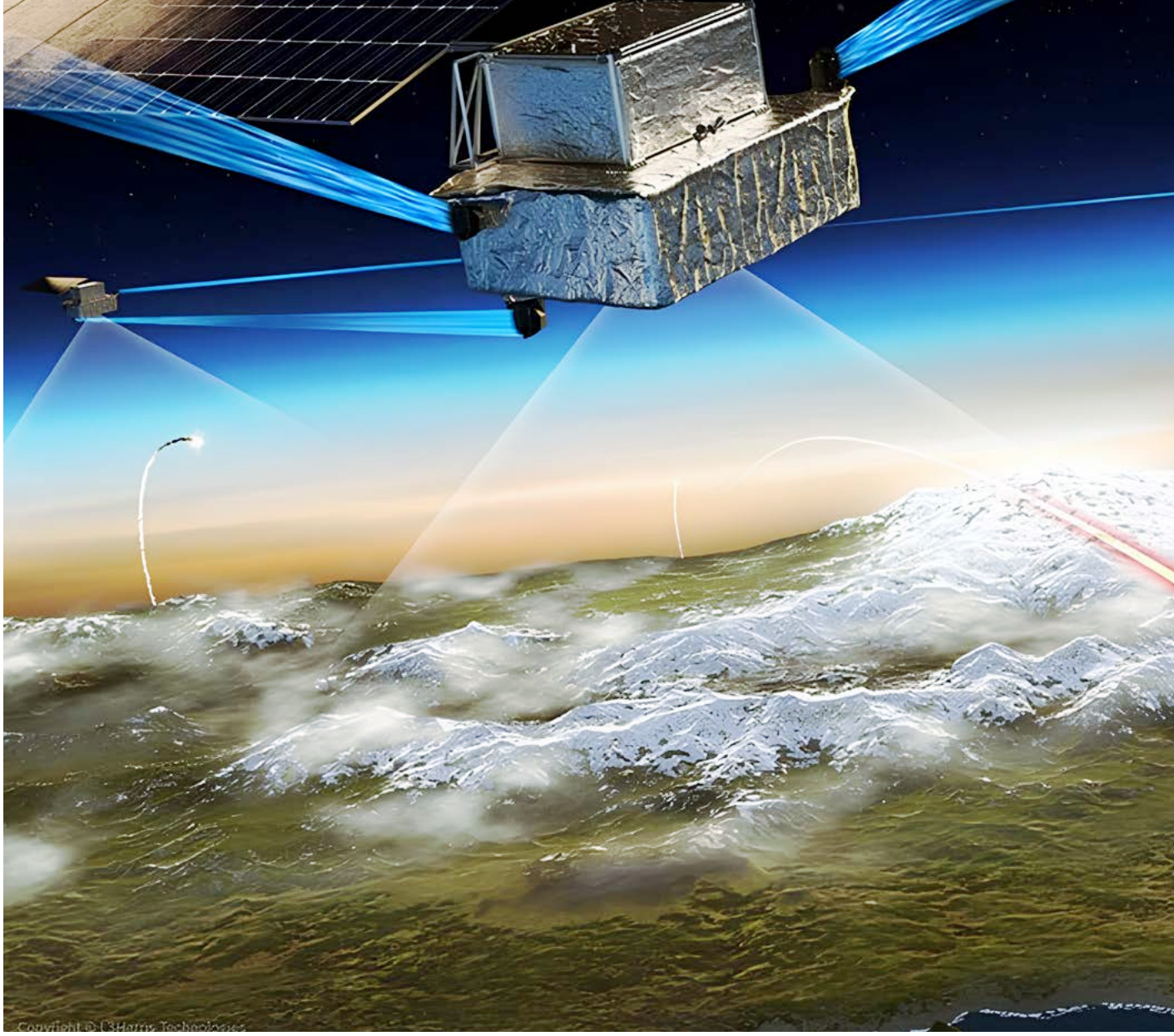


Riskler

Hipersonik teknolojilerin beraberinde getirdiği stratejik riskler, teknik kabiliyetlerinin ötesinde, küresel güvenlik mimarisini temelden sarsan bir yapı arz etmektedir. Bu teknolojinin en kritik risklerinden biri, literatürde "savaş başlığı muğlaklığı" (warhead ambiguity) olarak tanımlanan durumdur. Geleneksel balistik füzelerin aksine, hipersonik araçların atmosfer içindeki öngörülemez manevra kabiliyeti, hedef ülkenin gelen mühimmatın nükleer mi yoksa konvansiyonel mi olduğunu ayırt etmesini imkansız kılmaktadır. Bu belirsizlik, kriz anlarında karar vericileri saniyeler içinde nükleer misilleme kararı almaya zorlayarak, yanlış hesaplamalar sonucu küresel çapta bir tırmanışa (escalation) yol açma potansiyeli taşımaktadır. Dolayısıyla, hipersonik hız sadece fiziksel bir sürat değil, aynı zamanda diplomatik ve stratejik düşünme sürelerini yok eden bir unsurdur.

Bu daralan karar penceresi, savunma tarafında yapay zeka ve otonom sistemlere olan bağımlılığı artırarak yeni bir etik paradoksu tetiklemektedir. "Hyperwar" olarak adlandırılan bu yeni harp ortamında, insan idrak sınırlarını aşan saldırı hızlarına ancak başka bir yapay zeka ile karşılık verilebilmesi, insanın karar döngüsünden (human-in-the-loop) çıkmasına neden olmaktadır. Algoritmaların kendi aralarındaki etkileşimiyle şekillenen bu süreçte, bir sistem hatasının veya hatalı bir tehdit algısının otomatik bir savaşı başlatma riski, otonom silahların etik sınırlarını yeniden tartışmaya açmaktadır. Savaşın hızının diplomasiden daha hızlı aktığı bir dünyada, insani muhakemenin devre dışı kalması, uluslararası güvenliğin teknik bir algoritma hatasına teslim edilmesi riskini doğurmaktadır.

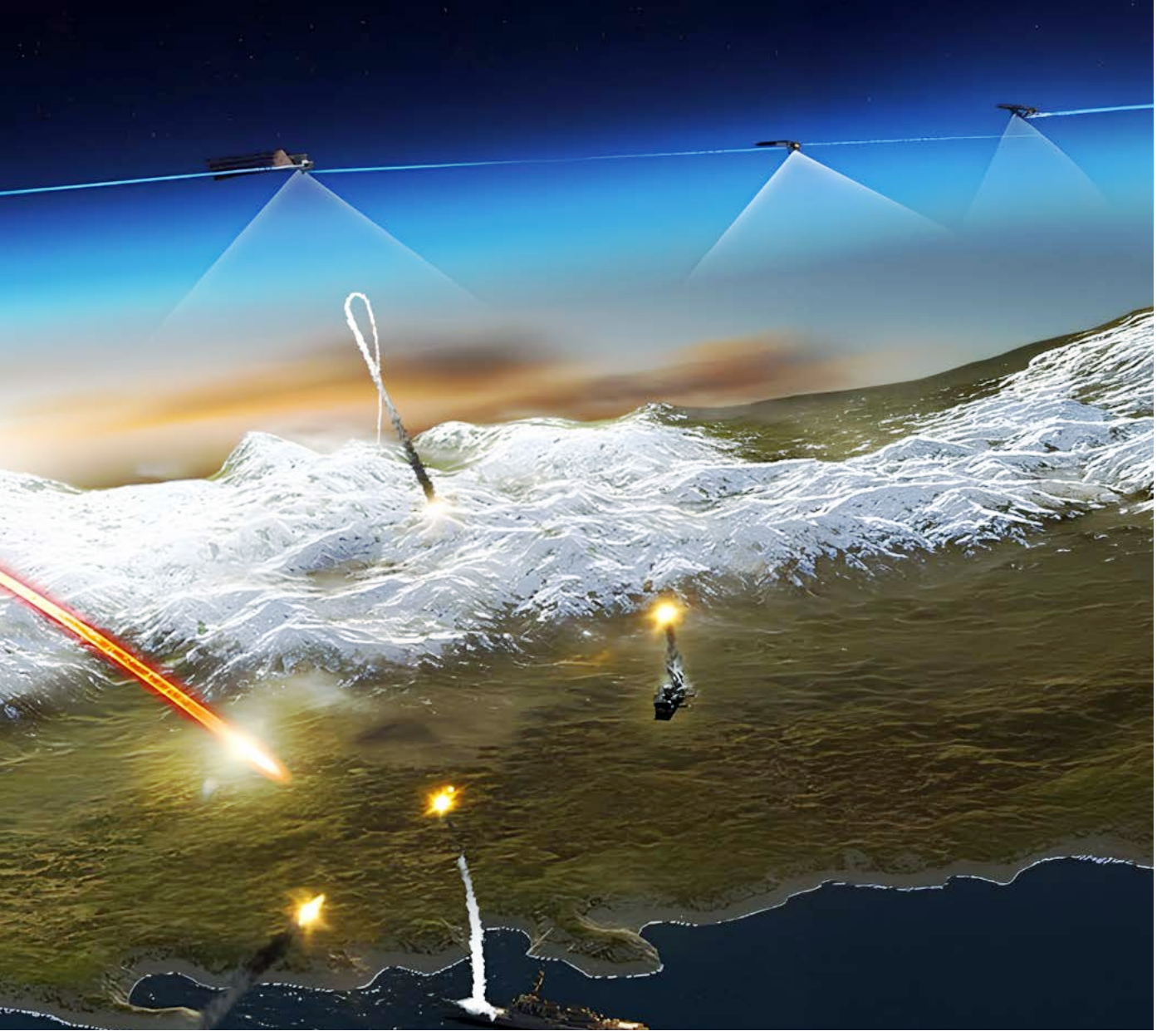
Teknik sınırlılıklar cephesinde ise, hipersonik sistemlerin vaat ettiği bu hızın sürdürülebilirliği noktasında ciddi bariyerler mevcuttur. Aracın etrafını saran plazma kılıfının neden olduğu haberleşme kararması (blackout), sadece veri bağını koparmakla kalmayıp, mühimmatın kendi hassas sensörlerini de işlevsiz hale getirebilmektedir. Bu durum, "hızlı ancak kör" bir mühimmatın, hedeften saparak istenmeyen sivil kayıplara veya yanlış hedeflerin vurulmasına yol açma ihtimalini artırmaktadır. Ayrıca, ekstrem sıcaklıklar altında yapısal bütünlüğünü korumaya çalışan malzemelerin yorulma limitleri, sistemin güvenilirliğini (reliability) sorgulanır kılmaktadır. Bu teknik kısıtlar ve etik boşluklar, hipersonik silahların kontrolüne yönelik mevcut uluslararası hukuk anlaşmalarının ve Uzay Antlaşması (Outer Space Treaty) gibi metinlerin yetersiz kaldığını göstermektedir. Mevcut hukuki vakumun doldurulmaması, bu teknolojinin sadece bir savunma aracı değil, küresel istikrarı bozan kontrolsüz bir güç çarpanı olarak kalmasına neden olacaktır.



Gelecek Teknoloji Trendler- 2030 Ötesi

Yapılan güncel teknoloji trend analizleri ve küresel savunma projeksiyonları incelendiğinde, hipersonik sistemlerin 2030 ve sonrasında saf hızın ötesine geçerek akıllı, otonom ve sürdürülebilir bir yapıya bürüneceği öngörülmektedir. Bu geleceğin merkezinde, keşif ve gözlem amaçlı tasarlanan otonom hipersonik insansız hava araçları (İHA) yer almaktadır; bu platformlar hem stratejik derinlikte istihbarat toplama kabiliyetine sahip olacak hem de mevcut hiçbir hava savunma sistemi tarafından engellenemeyen operasyonel bir üstünlük sunacaktır. Bu sistemlerin sürdürülebilirliği için malzeme biliminde devrimsel bir dönüşüm yaşanması beklenmekte, özellikle uçuş esnasında oluşan mikro çatlakları ve aşınmaları giderebilen, kendi kendini onaran (self-healing) akıllı termal koruma sistemleri üzerine çalışmalar yoğunlaşmaktadır.

Savunma tarafında ise hipersonik tehditleri etkisiz hale getirebilmek için "hıza karşı ışık hızı" stratejisi benimsenerek, megavat sınıfı anti-hipersonik lazer sistemlerinin (HEL) geliştirilmesi ön plana çıkmaktadır. Bu sistemlerin etkinliğini kırmak amacıyla taarruz sistemlerine entegre edilecek olan yapay zeka destekli otonom kaçınma algoritmaları, füzenin hedefteki savunma sistemini algıladığı anda milisaniyeler içinde rota değiştirerek "savunulamaz" saldırı profilleri oluşturmasına olanak tanıyacaktır. Ayrıca, hipersonik uçuşun en büyük teknik engellerinden biri olan haberleşme kararmasını (blackout) aşmak adına, aracın etrafındaki plazma tabakasını bir iletken gibi kullanan plazma antenleri veya manyetik alanlar aracılığıyla plazma akışını yönlendirerek veri akışını sağlayan "iletişim pencereleri" teknolojisi, 2030 sonrası harekat ortamının standart bir bileşeni haline gelecektir.



Şekil 4 – UYDU TABANLI HİPERSONİK ERKEN TESPİT VE UYARI SİSTEMİ

Sonuç & Değerlendirmeler

Hipersonik teknoloji, havacılık ve savunma tarihinin en radikal dönüşümlerinden birini simgelemektedir. Hız, manevra kabiliyeti ve düşük irtifa seyir yeteneğinin birleşimi, savunma doktrinlerinde "mutlak güvenliğin" artık mümkün olmadığını, bunun yerine "sürekli hazır olma" ve "teknolojik üstünlük" döneminin başladığını göstermektedir. Türkiye'nin bu yarışta ramjet ve scramjet teknolojilerine yaptığı yatırımlar, sadece bir silah sistemi geliştirme çabası değil, aynı zamanda malzeme biliminden kuantum hesaplamaya kadar geniş bir yelpazede teknolojik sıçrama yapma iradesidir. Sonuç olarak, hipersonik sistemlerin geleceği; fiziksel sınırların zorlandığı laboratuvarlardan ziyade, bu gücü yönetecek olan stratejik akıl, etik çerçeve ve uluslararası iş birliği zemininde belirlenecektir. Türkiye'nin bu teknolojik yarışta yer alması, sadece askeri bir zorunluluk değil, aynı zamanda yüksek teknoloji ihracatı ve stratejik bağımsızlık için kritik bir hamledir. 2030'lu yıllar, bu hız yarışında kontrolü elinde tutan devletlerin küresel hiyerarşiyi belirlediği bir dönem olacaktır.



KUANTUM ALGILAMA: SAVUNMADA YENİ BİR HASSASİYET PARADİGMASI

Kuantum fiziği, maddenin ve enerjinin atom altı ölçekteki davranışlarını açıklayan temel kuramsal çerçeve olarak, klasik mekanik ve klasik elektromanyetizmanın yetersiz kaldığı pek çok olgunun anlaşılmasını mümkün kılmıştır. "Kuantum" kavramı, fiziksel niceliklerin sürekli değil, ayrık ve en küçük birimler (kuantalar) hâlinde tanımlandığı modern yaklaşımı ifade eder. Elektron ve foton gibi temel parçacıkların hem dalga hem parçacık özelliği göstermesi, ölçüm yapılıncaya kadar birden fazla kuantum durumda (süperpozisyon hâlinde) bulunabilmesi ve konum–momentum ile zaman–enerji gibi bazı değişken çiftlerinin aynı anda istenilen düzeyde hassasiyetle ölçülememesi, kuantum mekaniğinin ayırt edici özellikleri arasındadır. Bu ilkeler yalnızca mikroskobik dünyanın betimlenmesi açısından değil, aynı zamanda yeni nesil bilgi işleme, haberleşme ve ölçüm teknolojilerinin kuramsal temelini oluşturması bakımından da kritik öneme sahiptir.

Dr. Nur ERBAŞ ERİM



Bu bağlamda kuantum algılama, kuantum sistemlerinin süperpozisyon, dolanıklık, Heisenberg belirsizlik ilkesi, spin dinamikleri ve sıkıştırılmış kuantum durumları gibi özelliklerini kullanarak fiziksel büyüklükleri klasik sensörlerin erişemediği doğruluk ve çözünürlük düzeylerinde ölçmeyi hedefleyen bir teknoloji alanı olarak tanımlanır. Kuantum algılama; zaman ve frekans ölçümü, manyetik alan haritalama, ivme ve açısal hız ölçümü, elektromanyetik sinyal tespiti ve atomik ölçekli malzeme karakterizasyonu gibi geniş bir uygulama yelpazesinde klasik sınırların ötesinde performans sunma potansiyeline sahiptir. Atomik saatler, atom interferometreleri, optik pompalı manyetometreler, elmas NV-merkezli sensörler, sıkıştırılmış ışık (squeezed light) tabanlı optik sistemler ve dolanıklık tabanlı radar/kuantum aydınlatma mimarileri bu teknolojik alanın öne çıkan örneklerindendir.

Literatür çalışmaları, kuantum sensörlerin özellikle sinyal-gürültü oranının düşük olduğu ve klasik yöntemler açısından zorlayıcı kabul edilen ölçüm koşullarında belirgin üstünlük sağlayabildiğini göstermektedir. Kuantum metroloji kuramına göre, uygun kuantum durumları kullanılarak standart kuantum limiti yerine Heisenberg ölçeğinde ölçüm hassasiyetine ulaşmak kuramsal olarak mümkündür. Sıkıştırılmış ışık kullanan interferometrelerde kuantum gürültüsü azaltılarak algılama sınırlarının ötesine geçilebildiği ve hassasiyetin artırılabildiği gösterilmiştir. Dolanık foton kaynakları ve kuantum aydınlatma yaklaşımlarıyla da, özellikle radar benzeri sistemlerde düşük sinyal-gürültü oranlarında anlamlı performans artışı sağlanabildiğine ilişkin bulgular mevcuttur.

Kuantum algılama teknolojilerinin önem kazanmasında savunma ve güvenlik alanındaki gelişen ihtiyaçlar da belirleyici rol oynamaktadır. Küresel konumlama sistemlerinin (GPS ve diğer GNSS altyapıları) karartıldığı veya aldatıldığı ortamlarda seyrüsefer ihtiyacı, düşük radar kesit alanına sahip platformların tespiti, sessiz denizaltıların izlenmesi, yeraltı tünel ve tesislerine yönelik keşif faaliyetleri ile kritik altyapıların sismik ve manyetik açıdan sürekli gözetimi, klasik algılama yöntemlerinin sınırlarına yaklaşıldığı ve yeni çözümlerin zorunlu hâle geldiği başlıca alanlardır. Bu bağlamda kuantum sensörler; yüksek doğruluklu zaman ve frekans referansları sunmaları, GPS'ten bağımsız konumlama kabiliyeti sağlamaları ve manyetik ile gravitasyonel değişimleri olağanüstü hassasiyetle ölçebilmeleri sayesinde modern harekât ortamında stratejik üstünlük kazandırabilecek kilit teknolojilerden biri olarak değerlendirilmektedir.

2. Kuantum Algılamanın Kuramsal Temelleri

Kuantum algılama teknolojilerinin merkezinde, ölçüm hassasiyetini artırmak amacıyla kuantum mekaniğinin temel ilkelerinin sistematik ve denetimli biçimde kullanılması yer alır. Bu kapsamda süperpozisyon, kuantum dolanıklığı, Heisenberg belirsizlik ilkesi, kuantum tünelleme, koherans ve dekoherans süreçlerinin kontrolü ile kuantum gürültüsünün sıkıştırılması (quantum noise squeezing) gibi fiziksel mekanizmalar, kuantum algılama sistemlerinin performansını belirleyen temel unsurlar olarak öne çıkmaktadır.

2.1. Süperpozisyon

Kuantum süperpozisyon, bir sistemin ölçüm yapılıncaya kadar birden fazla özdurumun doğrusal bileşimi hâlinde bulunabildiğini ifade eder. İki yollu interferometreler veya atom interferometreleri gibi düzeneklerde bu özdurumlar arasındaki göreli faz farkı; ivme, yerçekimi veya manyetik alan gibi çevresel etkiler tarafından değiştirilir ve girişim desenindeki kaymalar üzerinden yüksek hassasiyetle ölçülebilir.

Ölçüm doğruluğu, faz belirsizliğinin ne kadar azaltılabildiğine bağlıdır; bu da kullanılan parçacık sayısı, koherans süresi ve kuantum durumunun türü (ayrık foton, sıkıştırılmış durum, çok parçacıklı dolanık durum vb.) ile doğrudan ilişkilidir.

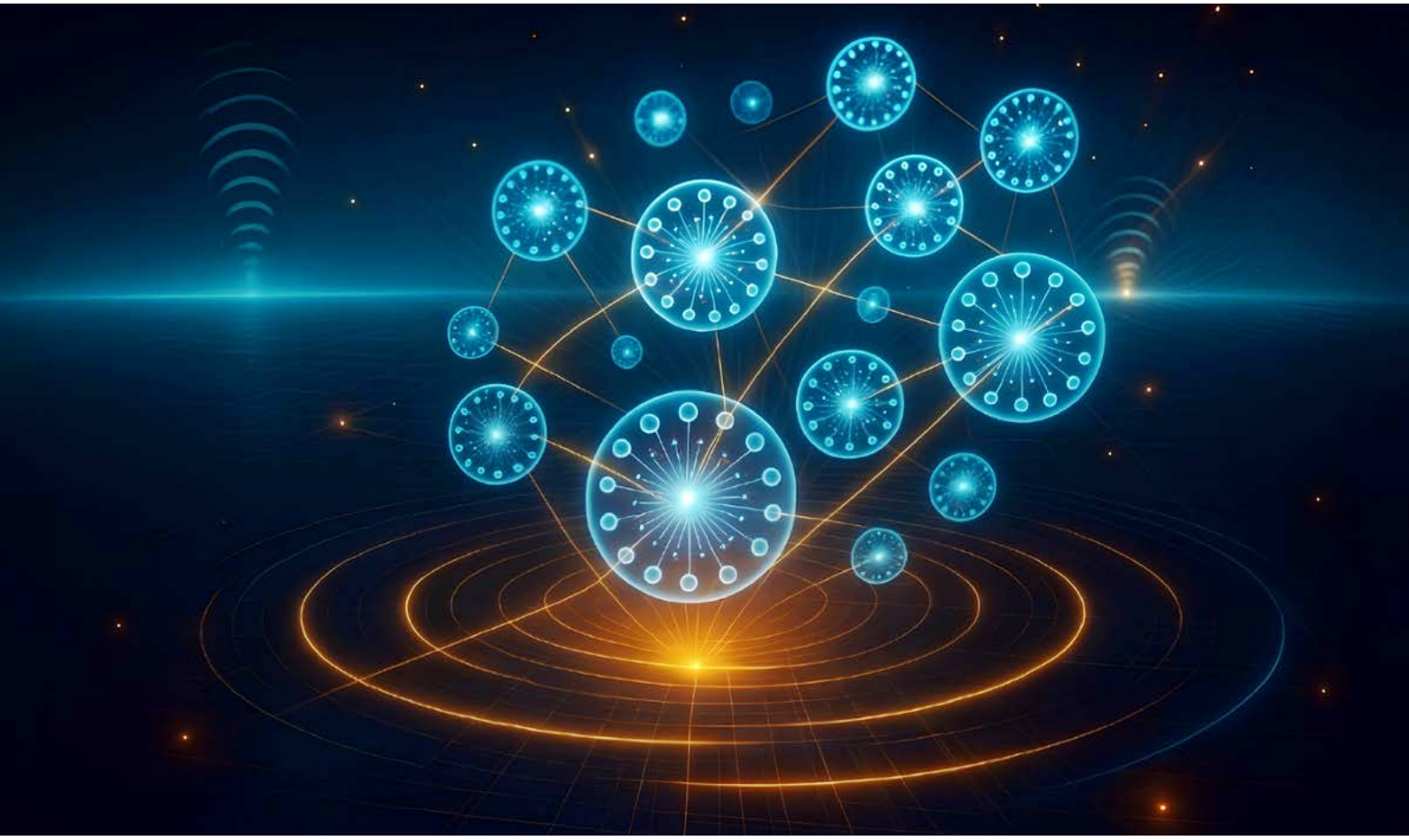
2.2. Dolanıklık ve Kuantum Korelasyonlar

Kuantum dolanıklığı, iki veya daha fazla parçacığın kuantum durumlarının klasik istatistiksel modellerle açıklanamayacak biçimde birbirine bağlı olmasını ifade eder. Dolanık çiftlerin veya çok parçacıklı dolanık durumların kullanımı, ölçüm belirsizliğini klasik yöntemlerle ulaşılabilen sınırların altına indirebilir ve bu nedenle kuantum metrolojide temel bir hassasiyet artırma mekanizması olarak değerlendirilir. Bu tür korelasyon yapıları, Şekil 1'de şematik olarak gösterildiği üzere, dolanık parçacık çiftleri arasında klasik iletişim kanallarının gerektirmediği karşılıklı bilgi bağı oluşturarak ölçüm doğruluğunun kuantum sınırlarına taşınmasına olanak sağlamaktadır.

Kuantum aydınlatma ve kuantum radar çalışmalarında gönderilen foton ile sistemde tutulan idler foton arasındaki dolanıklık, yoğun gürültü ve kayıp koşullarında dahi hedef-sinyal ayrımını iyileştirerek klasik radar algılayıcılarına göre avantaj sağlayabilmektedir.

2.3. Belirsizlik İlkesi ve Kuantum Metroloji

Heisenberg belirsizlik ilkesi, konum–momentum veya faz–parçacık sayısı gibi eşlenik değişken çiftlerinin belirsizliklerinin çarpımının belirli bir alt sınırın altına indirilemeyeceğini ortaya koyar. Kuantum metrolojisi ise dolanık ya da sıkıştırılmış kuantum durumlarının kullanımıyla standart kuantum limitinin ötesine geçilebildiğini ve ölçüm hassasiyetinin Heisenberg limitine yaklaşacak şekilde iyileştirilebileceğini göstermektedir. Sıkıştırılmış ışığın kullanımıyla büyük ölçekli interferometrik ölçüm sistemlerinde kuantum gürültüsünün azaltılabildiği ve algılama hassasiyetinin deneysel olarak iyileştirilebildiği gösterilmiştir.



Şekil 1 - KUANTUM DOLANIKLIĞINA DAYALI BİLGİ KORELASYONU YAPISININ ŞEMATİK GÖSTERİMİ.
(GÖRSEL YAPAY ZEKÂ İLE OLUŞTURULMUŞTUR.)

2.4. Kuantum Tünelleme ve Süperiletken Cihazlar

Kuantum tünelleme, parçacıkların klasik olarak aşamayacakları potansiyel engelleri geçebilmesini sağlayan temel bir kuantum etkisidir. Süperiletken Josephson bağlantıları ve SQUID (Superconducting Quantum Interference Device) gibi sensörlerin çalışma prensibi bu olguya dayanı. SQUID tabanlı süperiletken cihazlar, çok zayıf manyetik alan değişimlerini algılayabilecek düzeyde hassastır ve bu nedenle kuantum manyetrometri alanında standart referans sensörler olarak kullanılmaktadır.

2.5. Koherans, Dekoherans ve Gürültü Mühendisliği

Pek çok kuantum sensör mimarisinin performansı, ölçümde kullanılan kuantum durumlarının koherans süresinin korunabilmesine bağlıdır. Çevresel etkileşimlerden kaynaklanan dekoherans, kuantum faz bilgisini bozarak hassasiyeti sınırlar. Bu nedenle ultra saf malzemeler, düşük gürültülü süperiletken devre mimarileri, dynamic decoupling ve spin-eko tabanlı hata bastırma yöntemleri, özellikle spin tabanlı ve süperiletken tabanlı algılayıcı mimarilerinin temel tasarım bileşenleri hâline gelmiştir.

2.6. Spin Dinamikleri ve Atomik Geçişler

Optik pompalı manyetometreler ve NV-merkezli elmas algılayıcılar, spin durumlarının dış manyetik alanlarla etkileşimine dayalı çalışan kuantum sensörlerdir. Bu sensörlerde manyetik alan, spin seviyeleri arasındaki enerji farkını değiştirir; böylece alandaki çok küçük değişimler bile yüksek hassasiyetle tespit edilebilir. NV merkezleri, atomik ölçeklerde manyetik alan dağılımlarını görüntüleyebilirken, optik manyetometreler son derece zayıf manyetik alanları ölçebilecek düzeyde duyarlılık sunmaktadır.

Benzer şekilde atomik saatlerde kullanılan hiperince yapı geçişleri de spin tabanlı kuantum seviyelerine dayanır ve çevresel etkilere karşı son derece kararlı frekans referansları üretir. Bu yapı, zaman ve frekans ölçümlerinde klasik yöntemlerin ulaşamayacağı doğruluk seviyelerine erişilmesini mümkün kılmaktadır.

3. Kuantum Sensör Tipleri: Öne Çıkan Platformlar

Kuantum sensörler, kuantum mekaniğinin temel ilkelerini kullanarak zaman, konum, manyetik alan, yerçekimi ve elektromanyetik etkileşimleri klasik sensörlere kıyasla çok daha yüksek hassasiyetle ölçen aygıtlardır. Savunma uygulamaları açısından öne çıkan başlıca sensör türleri aşağıda özetlenmiştir.

3.1. Atomik Saatler

Atomik saatler, atomlardaki belirli kuantum geçiş frekanslarını esas alarak çalışan ve günümüzde bilinen en hassas zaman referanslarını üreten sistemlerdir. Sezyum, stronsiyum ve iterbiyum atomlarında kullanılan bu geçişler, optik atomik saatlerde 10^{-18} düzeyine ulaşan frekans doğruluğunun elde edilmesine olanak tanımaktadır. Bu tür cihazlar, GPS sinyallerinin kesildiği veya aldatıldığı durumlarda dahi bağımsız ve güvenilir zaman referansı sağlayarak seyrüsefer, haberleşme ve hassas güdümlü silah sistemlerinin koordinasyonu gibi askerî uygulamalar için kritik önem taşımaktadır.

3.2. Atom İnterferometreleri

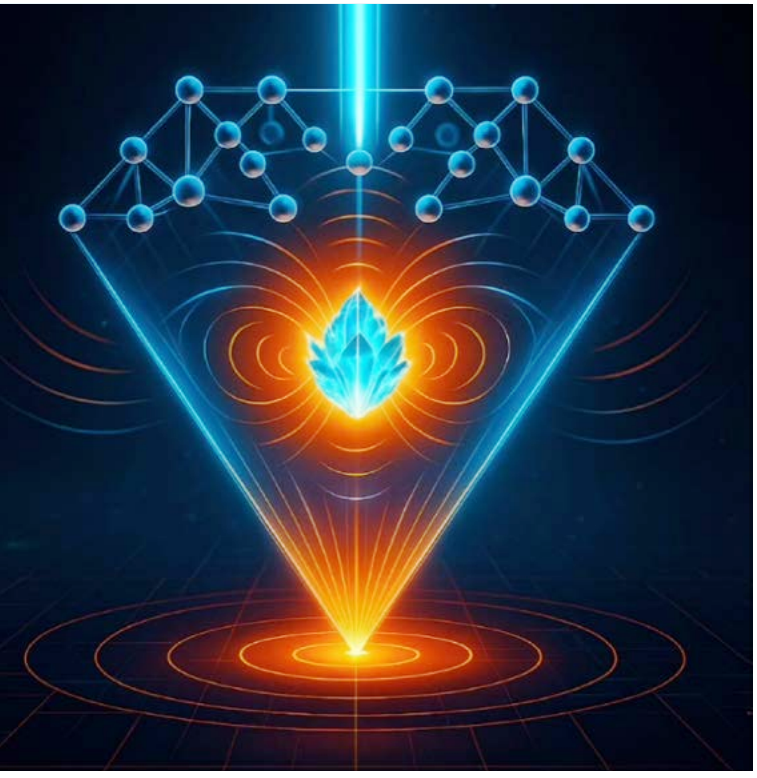
Atom interferometreleri, atom dalgalarının girişim ilkelerini kullanarak ivme ve yerçekimini hassas biçimde ölçen sensörlerdir. Başlangıçta temel fizik deneylerinde kullanılan bu sistemlerin taşınabilir prototipleri geliştirilmeye başlanmış olup, uzun vadede yeraltı yapı tespiti, gravitasyonel haritalama ve GNSS'e bağımlılığı azaltan navigasyon çözümleri için güçlü bir aday olarak görülmektedir.

3.3. Optik Pompalı Manyetometreler

Optik pompalı manyetometreler (OPM), alkali metal atomlarının spin düzenini ışıkla kontrol ederek manyetik alan değişimlerini ölçer. Kriyojenik soğutma gerektiren SQUID sistemlerine kıyasla daha kompakt ve saha kullanımına uygun olan bu sensörler, savunmada manyetik imza tespiti, sualtı gözetimi ve kritik altyapı güvenliği gibi görevlerde önemli bir seçenek hâline gelmektedir.

3.4. NV-Merkezli Elmas Sensörleri

Elmas kristalinde yer alan azot–boşluk (NV) merkezleri, spin durumları optik pompalama yöntemleriyle kontrol edilebilen ve kuantum duyarlılığına sahip atomik ölçekte kusur yapılarıdır. NV merkezlerinin enerji seviyeleri, dış manyetik alan, sıcaklık ve mekanik gerilme gibi çevresel etkilerle değişir; bu da söz konusu değişimlerin yüksek doğrulukla ölçülmesini mümkün kılar. Bu özellikleri sayesinde NV merkezleri, nanoskopik manyetik alan haritalaması, malzeme karakterizasyonu ve entegre devrelerde hata tespiti gibi uygulamalarda önemli bir konuma sahiptir.



Şekil 2 - AZOT–BOŞLUK (NV) MERKEZLİ ELMAS YAPISININ MANYETİK ALAN DUYARLILIĞINA DAYALI ALGILAMA PRENSİBİNİN ŞEMATİK GÖSTERİMİ. (GÖRSEL YAPAY ZEKÂ İLE OLUŞTURULMUŞTUR.)

Savunma perspektifinden bakıldığında NV-tabanlı sensörler, platform manyetik iz yönetimi, sualtı gözetimi ve düşük görünürlük stratejilerine karşı manyetik imza tespitinde çarpıcı avantajlar sunmaktadır. Şekil 2'de NV merkezlerinin kristal yapı içindeki konumlanışı ve dış manyetik alana gösterdiği kuantum yanıtın kavramsal temsili sunulmaktadır.

3.5. Kuantum Radar ve Kuantum Aydınlatma Sistemleri

Kuantum radar, dolanık foton çiftlerini kullanarak düşük görünürlüklü hedeflerin yüksek gürültü ortamlarında tespitini amaçlar. Kuantum aydınlatma yaklaşımı, gönderilen foton ile elde tutulan eşi arasındaki korelasyonu kullanarak geri dönen zayıf sinyallerden dahi anlamlı bilgi çıkarabilmektedir. Mikrodalga bandındaki deneyler, bu teknolojinin belirli koşullarda klasik radar sistemlerine kıyasla hata oranını azaltabildiğini göstermiştir. Bununla birlikte uzun menzil ve geniş bantta çalışan tam ölçekli kuantum radar sistemleri henüz geliştirme aşamasındadır ve orta–uzun vadeli savunma araştırma gündeminin bir parçası olarak değerlendirilmektedir.

4. Kuantum Algılama Ekosistemi: Savunma Hâkimiyeti ve Yeni Nesil Pazar Dinamikleri

Kuantum algılama teknolojileri, çağdaş harekât ortamının giderek daha karmaşık hâle gelen gereksinimlerine yanıt veren stratejik bir dönüşüm ekseni oluşturmaktadır. Modern muharebe sahası; elektromanyetik spektrumun yoğun biçimde kullanıldığı, uydu tabanlı navigasyon altyapısının elektronik harp ile hedef alındığı, düşük radar görünürlüğüne sahip platformların tehdit oluşturduğu ve sualtı ile yeraltı faaliyetlerinin öne çıktığı bir karaktere sahiptir. Bu bağlamda kuantum sensörler, yalnızca mevcut algılama sistemlerinin performans limitlerini genişletmekle kalmamakta, aynı zamanda geleneksel askerî doktrinlerin temellerini de yeniden şekillendirme potansiyeli taşımaktadır.

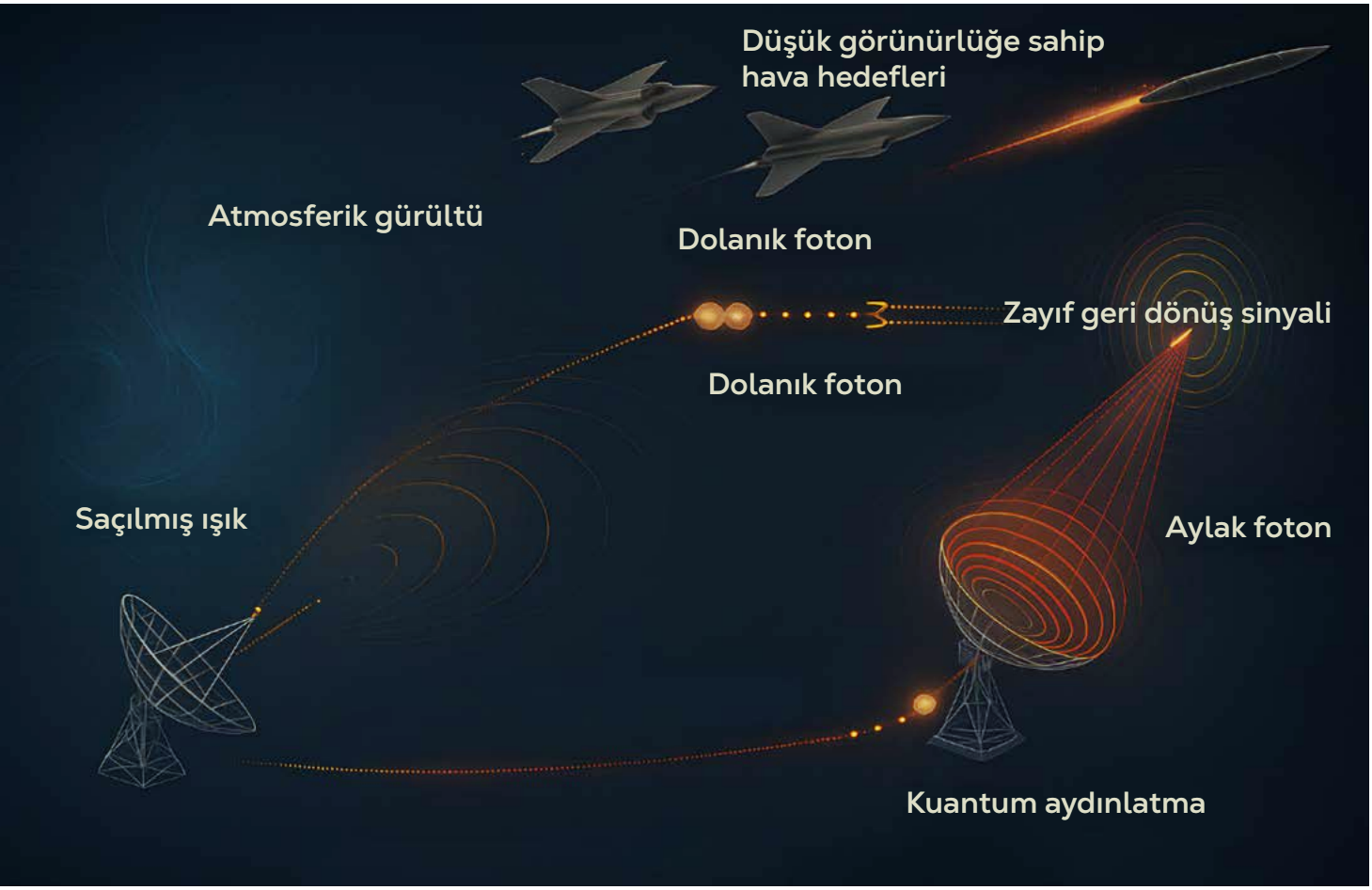
4.1. Harekât Yeteneklerine Etkisi

Bu alt başlık altında kuantum algılama teknolojilerinin sahadaki operasyonel kabiliyetlere doğrudan nasıl yansıdığı ele alınmaktadır.

4.1.1. GPS'ten Bağımsız Navigasyon ve Zaman Hâkimiyeti

Uydu tabanlı konumlama ve zaman senkronizasyon sistemleri, modern orduların komuta-kontrol yapısının temelini oluşturur. Uzun menzilli silah sistemlerinden hassas güdümlü mühimmatlara kadar pek çok askerî kapasite, bu altyapılar sayesinde doğru konum ve zaman bilgisiyle çalışmaktadır. Ancak bu sistemler; sinyal karartma, karıştırma, sinyal aldatma, siber saldırılar ve uydulara yönelik fiziksel müdahaleler gibi tehditlere karşı savunmasızdır.

Kuantum ivmeölçerler, atom interferometre tabanlı jiroskoplar ve optik atomik saatler ise dış bir referans sinyaline ihtiyaç duymadan konum ve zaman bilgisi üretebildikleri için, bu zafiyeti azaltma potansiyeline sahiptir. Bu sistemler, uzun süreli görevlerde konum hatasını klasik ataletsel navigasyon çözümlerine göre birkaç mertebe düşürebilmekte ve platformların elektronik harp faaliyetlerinden etkilenmeden görev yapmasına olanak tanımaktadır. Bu nedenle zamanın ve konum bilgisinin bağımsız şekilde üretilebilmesi, modern harekât kabiliyetinde yeni bir üstünlük alanı oluşturmakta ve orduların operasyonel etkinliğini doğrudan etkilemektedir.



Şekil 3 - DOLANIK FOTON TABANLI KUANTUM RADAR MİMARİSİNİN BİRDEN FAZLA DÜŞÜK GÖRÜNÜRLÜKLÜ HEDEFİ YÜKSEK GÜRÜLTÜ KOŞULLARINDA TESPİT ETME PRENSİBİNE İLİŞKİN KAVRAMSAL GÖSTERİM (GÖRSEL YAPAY ZEKÂ İLE OLUŞTURULMUŞTUR.)

4.1.2. Düşük Görünürlüklü Hedeflerin Tespiti ve Erken Uyarı Mimarileri

Düşük radar kesit alanına sahip uçaklar, hipersonik mühimmatlar ve radar soğurucu yapılar, mevcut radar mimarileri açısından algılama ve takip zorlukları oluşturmaktadır. Dolanıklık temelli kuantum radar ve kuantum aydınlatma yaklaşımları, özellikle termal gürültünün baskın olduğu ortamlarda hedef-sinyal ayrımını iyileştirme kapasitesiyle dikkat çekmektedir. Gönderilen foton ile sistemde tutulan idler foton arasındaki kuantum korelasyonu, geri dönen zayıf sinyalde dahi kullanılabilir bilgi üretmekte, böylece klasik radarların sinyal-gürültü limitlerinin ötesine geçilebilmektedir. Bu prensip, Şekil 3'te kavramsal olarak gösterilen çoklu hedef tespit senaryosunda olduğu gibi, dolanık foton korelasyonlarının gürültü altındaki izlerin ayrıştırılmasına imkân tanıyan yeni bir algılama mimarisi ortaya koymaktadır.

Bu yaklaşımın teknolojik olarak olgunlaşması hâlinde hava sahası gözetimi, erken uyarı mimarileri ve füze savunma sistemleri kuantum seviyesinde yeni bir algılama katmanı kazanabilecek; böylece düşük görünürlüklü platformlara dayalı gizlilik konseptinin harekât etkinliğine ilişkin mevcut denge orta–uzun vadede değişebilecektir.

4.1.3. Sualtı ve Denizaltı Harekâtı

Sualtı harbi, elektromanyetik dalgaların hızla sönümlendiği, akustik yayılımın karmaşık çevresel koşullara bağlı olduğu ve düşük görünürlük taktiklerinin yaygın biçimde uygulandığı bir harekât alanıdır. Bu ortamda kullanılan klasik sonar sistemleri, aktif çalıştıklarında akustik enerji yayarak tespit edilme riskini artırmakta, pasif modda ise hedeflerin düşük akustik iz bırakan manevraları karşısında sınırlı kalabilmektedir. Optik pompalı manyetometreler ve NV merkezli elmas sensörler ise çok zayıf manyetik alanları algılayabildikleri için metalik gövdelerin oluşturduğu manyetik imzaları pasif olarak tespit edebilmekte ve denizaltı platformlarının sessiz seyir avantajını önemli ölçüde azaltabilmektedir. Bu duruma ilişkin konsept bir tasvir, Şekil 4'te sunulmuştur.

Bu gelişmeler, sualtı algılama mimarisinde akustik temelli yöntemlerin baskınlığını kırarak yeni bir sensör paradigmasının oluşmasına zemin hazırlamakta ve sualtı harekâtında algılama üstünlüğünün yeniden tanımlanmasına yol açmaktadır.

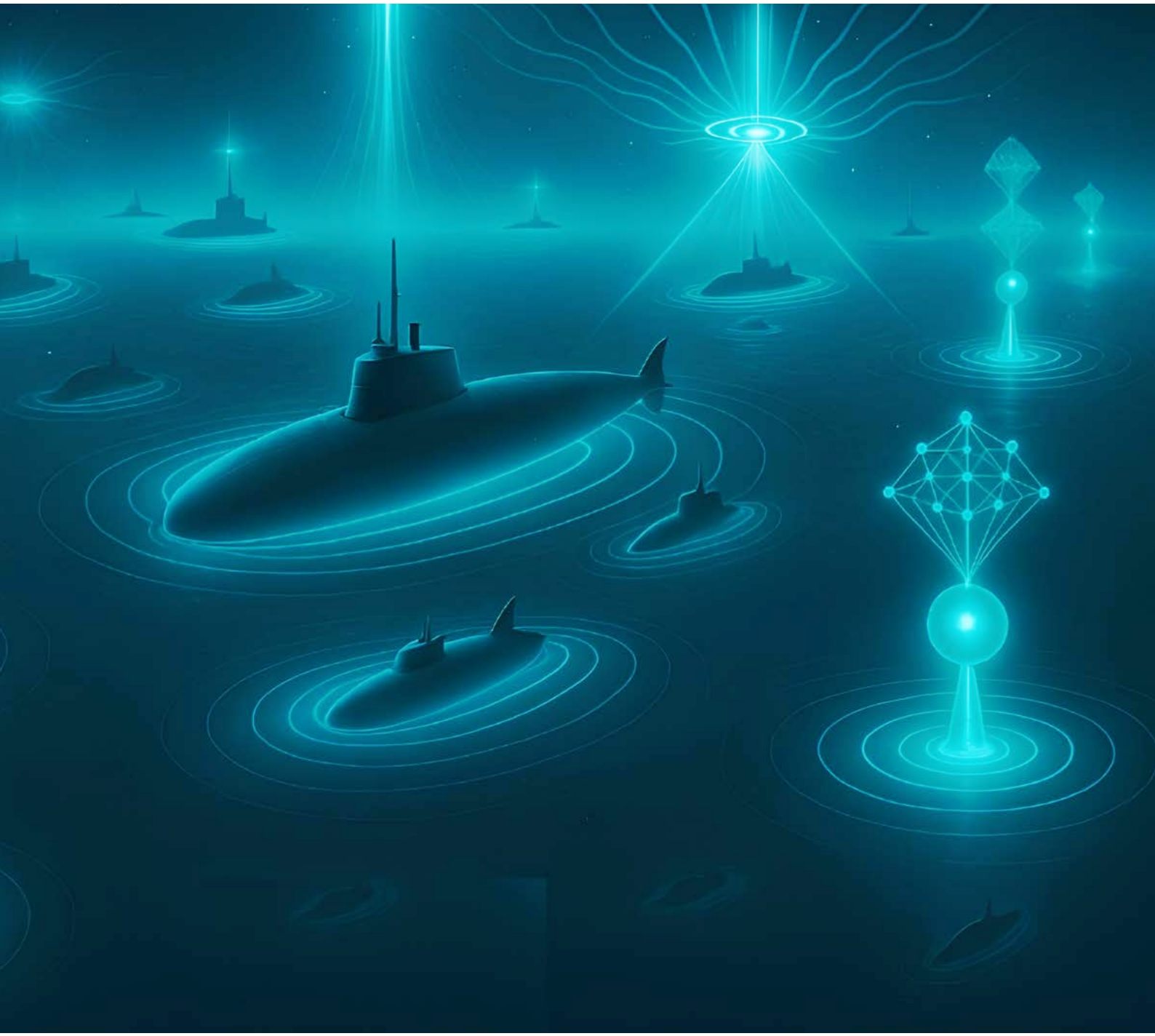
4.1.4. Jeofiziksel İzleme ve Kritik Altyapı Güvenliği

Savunma sahasında yeraltı tünelleri, cephanelikler, sığınaklar, füze rampaları ve altyapı bileşenlerinin gizlenmesi yaygın stratejilerdendir. Atom interferometresine dayalı gravimetreler, bu tür yapıların oluşturduğu yerçekimi anomalilerini klasik sensörlerden daha hassas şekilde tespit edebilmekte; elektromanyetik görünmezlik uygulamalarıyla dahi saklanabilen unsurları ortaya çıkarabilmektedir. Kritik altyapıların (enerji iletim hatları, barajlar, ulaşım



koridorları, askerî üsler vb.) çevresine yerleştirilecek kuantum sensör ağları ile sismik, manyetik ve gravitasyonel anomalilerin gerçek zamanlı takibi mümkün hâle gelebilir. Böylece kritik tesislerin güvenlik seviyesi, algılama spektrumunun genişletilmesiyle yeni bir boyut kazanmaktadır.

Genel olarak değerlendirildiğinde kuantum algılama, konumlama, zamanlama, tespit, teşhis ve harekât planlama süreçlerinde karar vericilere daha yüksek doğruluk ve güvenilirlik sunarak çok boyutlu harekât konseptine doğrudan katkı sağlamaktadır.



Şekil 4 - SUALTINDA DENİZALTILARIN MANYETİK İMZALARININ PASİF TESPİTİ İÇİN TEMSİLİ KUANTUM ALGILAMA KONSEPTİ. (GÖRSEL YAPAY ZEKÂ İLE OLUŞTURULMUŞTUR.)

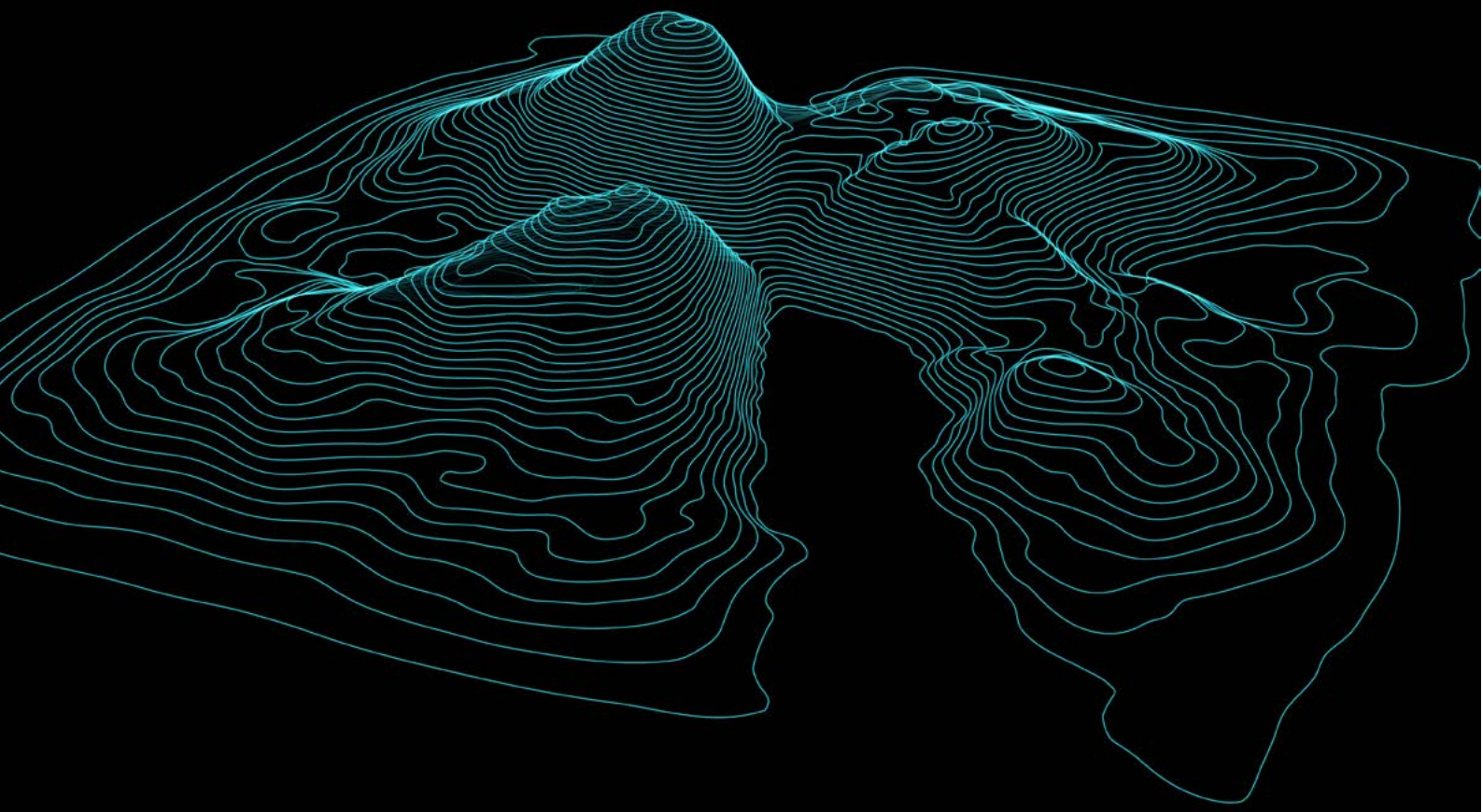
4.2. Savunma sanayiinde potansiyel kullanım alanları

Mevcut savunma sanayii; radar, elektronik harp, seyrüsefer, haberleşme ve komuta-kontrol sistemleri alanlarında kayda değer bir mühendislik birikimine sahiptir. Kuantum sensör teknolojileri, bu mevcut yeteneklerin ileri bir safhaya taşınması için doğal bir genişleme alanı oluşturmaktadır. Uydu ve uzay platformlarında kuantum zaman referanslama, kara/hava/deniz platformlarında kuantum destekli seyrüsefer modülleri, kuantum radar ve elektronik harp sistemleri, manyetik imza analizi ve sualtı gözetim çözümleri ile kritik altyapı ve sınır güvenliği için dağıtık sensör ağları, savunma sanayii açısından öne çıkan başlıca uygulama alanlarıdır. Mevcut radar, navigasyon, haberleşme ve komuta-kontrol ürün aileleriyle uyumlu ve modüler kuantum sensörlerin geliştirilmesi, hem operasyonel yetenekleri yükseltecek hem de yüksek katma değerli ihracat ürünleri için yeni bir zemin oluşturacaktır.

Bu alanlara ek olarak kuantum algılama, savunma teknolojilerinin dönüşümünde çarpan etkisi yapabilecek üç kritik açılım sunmaktadır. İlk olarak, uydu bağımlılığını azaltan kuantum tabanlı navigasyon çözümleri, uzun süreli devriye, denizaltı intikali ve GNSS karartmasının uygulandığı harekât sahalarında stratejik hareket serbestisi sağlayacaktır. İkinci olarak, kuantum manyetometre ve gravimetri tabanlı algılama sistemleri, yeraltı füze siloları, tüneller, sığınaklar ve elektromanyetik görünmezlik malzemeleriyle maskelenmiş tesislerin tespitinde mevcut istihbarat yöntemlerinin ötesine geçme imkânı sunmaktadır. Üçüncü olarak, elektronik harp ortamında kuantum avantajı, geleneksel radar karıştırma ve aldatma tekniklerinin karşısında yeni savunma ve saldırı imkânları doğurmaktadır. Bu tablo, geleceğin elektronik harp ortamının yalnızca spektrum hâkimiyeti değil, kuantum bilgi hâkimiyeti ekseninde şekilleneceğine işaret etmektedir.

4.3. Ticarileşme potansiyeli

Uluslararası piyasa projeksiyonlarına göre kuantum sensör tabanlı çözümlerin 2030'lu yıllar itibarıyla savunma, uzay sistemleri, hassas üretim, otonom araçlar, enerji altyapısı izleme ve medikal teşhis gibi sektörlerde milyarlarca dolarlık bir ekonomik değere ulaşacağı öngörülmektedir. Bu durum, savunma sanayii aktörleri açısından yalnızca bir teknoloji tedariki değil, aynı zamanda stratejik bir pazar konumlanması fırsatını da beraberinde getirmektedir.



Kuantum sensörlerin ticarileşme sürecini hızlandıran temel dinamikler arasında, askerî platformlara yönelik konumlama ve zaman hâkimiyeti çözümleri, düşük görünürlüklü hedeflerin tespiti için geliştirilen kuantum radar prototipleri, manyetik imza analizi tabanlı sualtı gözetim sistemleri ve yerçekimi anomalilerinin ölçümüne dayalı jeofiziksel izleme uygulamaları yer almaktadır. Bu tür çözümler, hem savunma sistemleri hem de sivil kullanım alanları için yüksek katma değerli ürün ailelerinin ortaya çıkmasına zemin hazırlamaktadır. Özellikle kuantum ivmeölçerler ve interferometrik jiroskop tabanlı ataletsel seyrüsefer modülleri, GNSS bağımlılığını azaltarak karıştırma ve aldatma gibi tehditler karşısında üstünlük sağlayan kritik alt bileşenler olarak ön plana çıkmaktadır.

Kuantum algılama teknolojilerinin ticarileşmesini destekleyen bir diğer unsur, çift kullanımlı (dual-use) ürün geliştirme potansiyelidir. Sivil sektörlerde enerji altyapılarının izlenmesi, deprem öncüllerinin tespiti, biyomedikal görüntüleme, yarı iletken üretiminde nanoskopik hata teşhisi ve otonom sistemlerin güvenli navigasyonu gibi alanlarda kuantum sensör tabanlı çözümlere yönelik talebin artması, savunma sanayii ürün portföyünün ticarileşme ölçeğini genişletmekte ve maliyetlerin düşürülmesini mümkün kılmaktadır.

Ticarileşme perspektifinin şekillenmesinde devlet politikaları ve uluslararası girişimler de önemli rol oynamaktadır. NATO'nun Ar-Ge yönlendirmeleri ve McKinsey gibi kuruluşların pazar analizleri, kuantum sensörlerin küresel teknoloji gündeminde öncelikli bir konuma taşındığını açıkça ortaya koymaktadır. Bu alanda erken hareket eden savunma firmaları, standartların, sertifikasyon süreçlerinin ve güvenlik protokollerinin oluşumunda söz sahibi olma avantajı elde edecek; böylece yalnızca yeni bir teknoloji geliştiricisi değil, aynı zamanda küresel pazar kurallarını belirleyen aktörlerden biri hâline gelebilecektir.

Sonuç olarak kuantum algılama, sadece teknik bir yenilik değil, ülkelerin savunma ve teknoloji alanındaki jeopolitik etkisini artırma potansiyeline sahip stratejik bir ekonomik alan niteliği kazanmıştır.

5. Sonuç ve Değerlendirme

Kuantum algılama, klasik sensörlerin erişebildiği hassasiyet sınırlarını aşmayı hedefleyen ve kuantum mekaniğinin temel ilkelerini doğrudan ölçüm süreçlerine uygulayan yeni bir ölçüm yaklaşımıdır. Süperpozisyon, dolanıklık, Heisenberg belirsizliği, kuantum tünelleme, kuantum gürültüsünün kontrolü ve uzun süre koheransını koruyabilen spin sistemleri gibi kuantum özellikleri sayesinde zaman, frekans, manyetik alan, yerçekimi ve elektromanyetik geri saçılma gibi fiziksel büyüklükler klasik yöntemlere kıyasla çok daha yüksek doğrulukla ölçülebilmektedir.

Savunma alanında bu yetenek, mevcut harekât konseptlerini doğrudan etkileyen önemli sonuçlar doğurmaktadır. Kuantum tabanlı sensörler; GNSS'e bağımlı olmayan seyrüsefer, düşük görünürlük özellikli hedeflerin tespiti, sessiz çalışan denizaltı platformlarının izlenmesi, yeraltı tesis ve tünellerinin ortaya çıkarılması, kritik altyapıların gözetimi ve elektronik harp ortamında güvenilir algılama gibi görevlerde belirgin üstünlük sağlayabilecek potansiyele sahiptir. Bu kazanımların tam olarak hayata geçirilebilmesi için kuantum sistemlerinin koherans sürelerinin artırılması, çevresel gürültüye karşı dayanıklı mimarilerin geliştirilmesi, sahada kullanılabilir kompakt donanımların tasarlanması ve bu donanımları destekleyen gelişmiş yazılım/algoritma altyapılarının oluşturulması gerekmektedir.

Savunma sanayii açısından kuantum algılama, hem mevcut askerî kabiliyetleri güçlendirecek hem de yüksek katma değerli ürün ihracatı için yeni bir fırsat penceresi oluşturacaktır. Radar, seyrüsefer, haberleşme ve komuta-kontrol alanlarındaki mevcut teknik birikim, kuantum sensörlerin sisteme entegrasyonu için güçlü bir temel sağlamaktadır. Üniversiteler, araştırma kurumları ve savunma şirketleri arasında kurulacak iş birliği mekanizmalarıyla, laboratuvar ölçeğindeki prototiplerin sahaya uyarlanmış, güvenilir ve maliyet etkin sistemlere dönüşmesi mümkündür.

Her ne kadar kuantum algılama teknolojileri hızlı bir ilerleme sürecinde olsa da, kısa vadede klasik sensörlerin tamamen yerini alması beklenmemektedir. Bunun yerine ilk etapta hibrit sistemlerin ortaya çıkması ve belirli görevlerde kuantum destekli performans artışlarının gözlenmesi daha olasıdır. Orta ve uzun vadede ise bu teknolojinin, askerî kapasite, caydırıcılık, istihbarat ve savaş alanı farkındalığı gibi kritik parametrelerde belirleyici bir unsur hâline gelmesi öngörülmektedir. Bu nedenle kuantum algılamaya yönelik çalışmaların ulusal güvenlik stratejileri ve teknoloji politikalarıyla uyumlu biçimde yürütülmesi, sürdürülebilir rekabet avantajı elde edilmesi açısından büyük önem taşımaktadır.



İNSANSI **ROBOTLAR**

Genel amaçlı insansı robot teknolojileri, robotik, yapay zekâ, sensör teknolojileri ve mekatronik alanlarındaki hızlı gelişmeler sayesinde hem sivil hem de askerî uygulamalarda stratejik bir konuma yükselmiştir. Bu makale, insansı robotların özellikle temel seviyede bileşenleri ve çalışma prensiplerini, insansı robotik alanında yıllara sari ilerleme, zorluklar ve gelecekteki yönelimlere dair bir genel bakış sunmayı amaçlamaktadır. İnsansı robotların tarihsel dönüm noktalarına değinilerek bu alanda yapılan çalışmaları, endüstriyel gelişimi, pazarda oluşan büyüklükleri ve insansı robot teknolojisinden gelecekteki beklenti ve yeniliklere dair yaklaşımları sunmaktadır. Araştırma, insansı robot kavramını, tarihsel ve teknolojik gelişimini, operasyonel ve harekât yeteneklerine olası etkilerini ve savunma sanayiinde ticarileşme potansiyelini incelemektedir. Özellikle ASELSAN bağlamında savunma sanayiine yönelik potansiyel kullanım alanları, riskler ve fırsatlar tartışılmakta; teknoloji transferi, sınırlı tedarik ve konsept geliştirme gibi uygulanabilir adımlara ilişkin öneriler sunulmaktadır.

Emre KURTOĞLU

İnsansı Robot (HUMANOİD) Nedir?

İnsansı robotlar (humanoid), insan formuna ve insan benzeri hareket kabiliyetlerine sahip olmaları sayesinde, hem fiziksel görevlerde hem de insan–makine etkileşimi gerektiren alanlarda önemli bir potansiyel taşımaktadır. Savunma sanayii açısından bakıldığında, insansız hava, kara ve deniz araçlarının yaygın kullanımının ardından, insansı robotların muharebe sahasına entegrasyonu bir sonraki dalga olarak değerlendirilmektedir. İnsan benzeri morfoloji; merdiven tırmanma, kapı açma, düzensiz arazide hareket etme ve insan için tasarlanmış altyapılarla uyum gibi çok sayıda avantaj sunmaktadır.

İnsansı robotlar ve yapay zeka adaptasyonu ve kabullenilmesi ile ilgili yapılan bir araştırmada, her geçen gün gündelik hayatımızda daha çok yer almaya başlayan yapay zekâ insansı robotların Türk toplumu tarafından nasıl algılandıkları ve Türk toplumunun, yapay zekâ insansı robotların gündelik hayatta kullanımına yönelik tutum ve davranışları incelenmiştir. Bu çerçevede katılımcılara; katılımcıların olgu ve bilgi durumlarını belirlemeye yönelik tam yapılandırılmış soruların yanında, yapay zekâ insansı robot algıları ve yapay zekâ insansı robotlara karşı tutum ve davranış biçimlerini ölçmeye yönelik ifadelerden oluşan beşli likert tipi ölçek uygulanmıştır. Araştırmanın son aşamasında ise katılımcılardan elde edilen veriler analiz edilmiş ve elde edilen sonuçlar rapor haline getirilmiştir.

Modern zamanlarda, askeri amaçlar için yapay zeka destekli robotikte mahlukatın özelliklerinin kopyalanmasına artan bir ilgi vardır. Manevra kabiliyeti, çeviklik ve aerodinamik gibi doğal sistemlerin temel mekaniklerinin yanı sıra koordinasyon, sürü halinde hareket etme, görev paylaşımı ve iş birliği gibi istihbarat faktörleri, askeri robotların geliştirilmesine ilham vermiştir. Hayatta kalma içgüdüsünün yanı sıra öz-organizasyon, öz-uyum ve öz-öğrenme gibi özelliklerle donatılmış bu robotlar, savaş alanının zorluklarıyla başa çıkmak ve içerdiği öngörülemezlik ve kaosa rağmen savaşa katılmak için oldukça uygundur. Askeri robotlar, doğanın varoluşsal avantajlarından yararlanarak, öngörülemeyen senaryolara daha kolay uyum sağlayabildikleri için biyomimikri yoluyla etkinliklerini artırabilirler. Bu artan uyum yeteneğinin, çevresel değişikliklere yanıt olarak öğrenme ve kendini geliştirmeme yetenekleri ile görev sonuçlarını önemli ölçüde iyileştirdiği bildirilmiştir.

Diğer bir araştırma ve incelemede, insansı robotlarda görme tabanlı sistemlerin uygulamalarını durum tahmini ve etkileşim açılarından incelemiştir. Durum tahmini için yapılan çalışma, bu sorunları azaltmak için kullanılan çeşitli yöntemleri sınıflandırarak iki kritik zorluğu (dinamik ortamlar ve hareket bulanıklığı) ele almakta ve doğruluk ve sağlamlığı artırmada çoklu sensör füzyonunun önemini vurgulamaktadır. Etkileşim açısından inceleme, uygulamaları üç senaryoya ayırmakta, navigasyon için arazi algısı, üst vücut görsel kontrolü ve insan-robot etkileşimi olarak ele almıştır. Her uygulama alanı, kullanılan yöntemlerin avantajları ve zorluklarına odaklanılarak incelenmektedir. Ayrıca çoklu sensör füzyonu, gelişmiş görsel ve semantik anlayış için hayati önem taşıyan üç temel araştırma alanını ele alarak insan-robot etkileşiminde daha gelişmiş niyet tanıma yeteneklerini geliştirmektedir. Bu araştırma alanlarının, insansı robotların karmaşık, gerçek dünya ortamlarında daha etkili performans göstermesini sağlayarak daha fazla yeniliğe öncülük etmesi beklendiği ifade edilmiştir.

Bu makalede ASELSAN perspektifinden insansı robot teknolojileri; kavramsal çerçeve, tarihsel ve güncel teknoloji düzeyi, 2025 Nisan–Aralık dönemindeki yeni gelişmeler, harekât yeteneklerine etkiler, savunma sanayiinde kullanım alanları ve ticarileşme potansiyeli boyutlarıyla ele alınmaktadır.

İnsansı Robot Kavramı

İnsansı robotlar, insan benzeri gövde, baş, kollar ve bacaklara sahip, çoğunlukla iki ayak üzerinde hareket edebilen ve insan davranışlarını taklit edecek biçimde tasarlanan robotik sistemlerdir. Robotik, yapay zekâ, sensör teknolojileri ve mekatroniğin bütünleşik kullanımıyla ortaya çıkarlar.

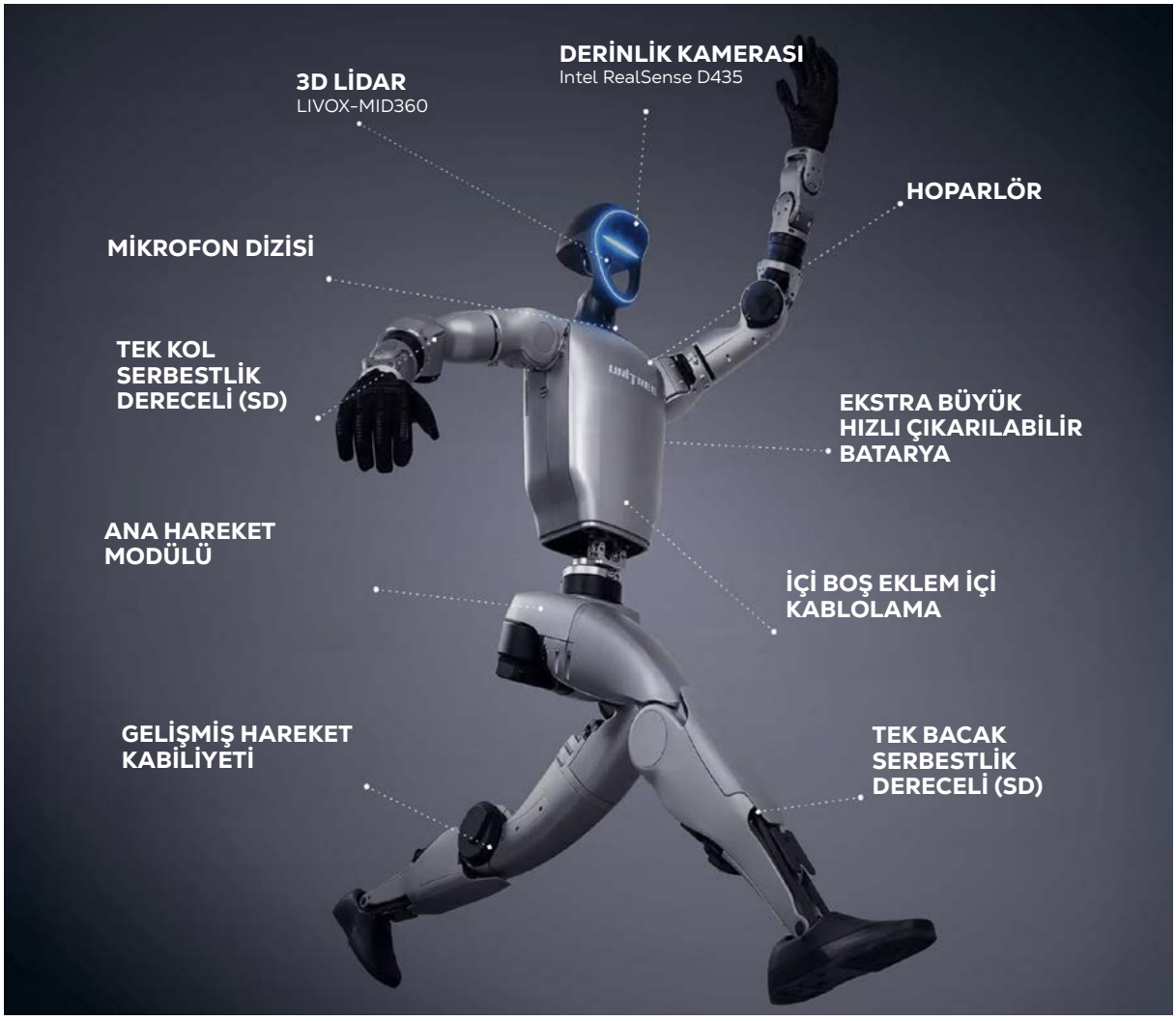
Bu sistemler; mekanik yapı, duyusal sistemler, kontrol ve yapay zekâ katmanı ile enerji ve haberleşme altyapısından oluşur. Mekanik yapı; iskelet, eklemler, uzuvlar ve aktüatörleri içerirken, duyusal sistemler görme, işitme, dokunma, kuvvet/konum geri bildirimi ve denge sensörlerini kapsar. Kontrol katmanında düşük seviye motor kontrolü, denge ve hareket planlama, görev planlama ve öğrenme modülleri yer alır.

İnsansı robotların yaygın pratik uygulamalara ulaşabilmeleri için, birkaç temel teknik zorluğun üstesinden gelmeleri gerekir:

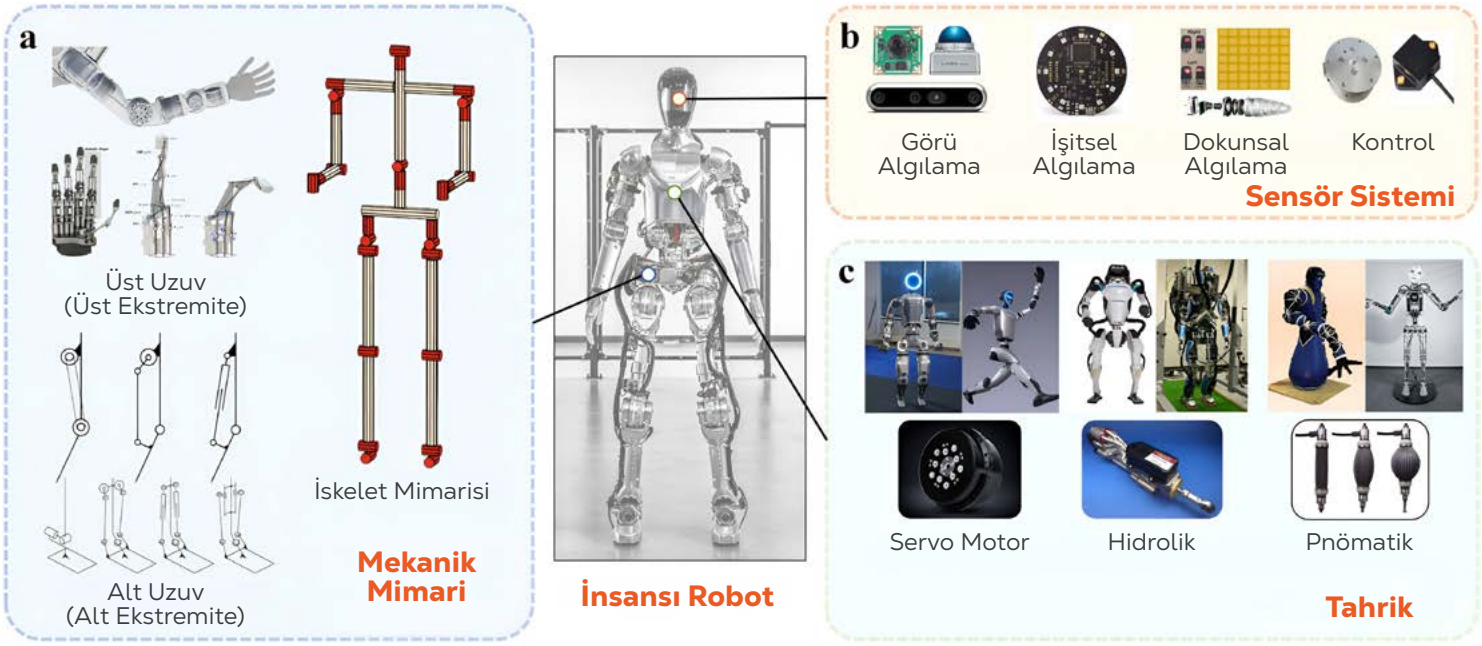
1- Dengeli Tüm Vücut Kontrolü: Vücudun dengesini koruyarak tüm vücudu koordineli bir şekilde hareket ettirebilen bir teknolojinin geliştirilmesini zorunlu kılar.

2- Zeka Geliştirme: Farklı ortamlara ve görevlere uyum sağlayabilen genel amaçlı bir zekaya sahip olmalıdır. Günümüzde bu yetenek yapay zeka ile sağlanmakta, anlamsal algı, çevre ve nesne algılama ve son derece genelleştirilmiş insan benzeri beceri öğrenimi alanlarında gelişmiş yetenekler gerektirmektedir.

3- İnsan-Robot Etkileşimi: İnsansı robotlar, duygusal ifade ve etkileşimde önemli zorluklarla karşılaşırlar. Etkili etkileşim için yalnızca gelişmiş algılama ve kontrol teknolojilerini değil, aynı zamanda gerçek, insan benzeri duygusal tepkiler sağlamak için çok işlevli sistemlerin kusursuz entegrasyonunu da gerektirir.



Şekil 1 - GENEL AMAÇLI BİR İNSANSI ROBOTUN TEMEL BİLEŞENLERİ VE DIŞ GÖRÜNÜMÜ



Şekil 2 - İNSANSI BİR ROBOTUN DONANIM MİMARİSİ. (A) MEKANİK YAPI TASARIMI. (B) SENSÖR SİSTEMİ. (C) GÜÇ SİSTEMİ

Sistem Entegrasyonu

Değişken şartlarda güvenilir ve sürdürülebilir bir çalışma için mobilite, esneklik, güvenilirlik, yük kapasitesi ve pil ömründe iyileştirmeler gereklidir. Bu talepler, bileşen performansı, boyutu ve ağırlığı konusunda yüksek beklentiler oluştururken, yüzlerce parçanın entegrasyonunu ve kusursuz donanım-yazılım füzyonunu gerekli kılmaktadır. Bu talepleri karşılamak için kompakt, hafif ve son derece entegre tasarım çözümlerine ihtiyaç duyulmaktadır.

İnsan-robot etkileşiminin gerçekleşebilmesi için, işletim değerlendirme merkezleri birden çok algı ve sensörün konsolide edilmesiyle ortaya çıkan karar verme mekanizmaları şeklinde yansımaktadır. Robotlar, algılama ve harekete geçme fonksiyonlarını yerine getirirken görüntü, sensör, yapay zeka, makine öğrenmesi gibi donanım ve yazılım yetenekleriyle yaklaşık 7 milyar parametreyi aynı anda değerlendirir. Değerlendirme sürecinde ise yaklaşık 80 milyon parametre ile verileri işleyerek değerlendirme, herekete geçmek için ulaşma, kavrama ve yanıtlama gibi tepkilerle ortaya koyar.

İnsansı robotların tasarımında, mekanik yapı robotun çok yönlülüğünü ve insan benzeri hareketleri kopyalamadaki verimliliğini belirlemede hayati bir rol oynar. Serbestlik derecesi, robotun hareket aralığını ve karmaşık görevleri yerine getirme yeteneğini tanımlamada önemli bir ölçüttür. Çok yönlülüğe ulaşmak için araştırmacılar, insan iskelet sisteminden ilham alan ve genellikle insan hareketlerini kopyalamak için 20-40 serbestlik derecesi sağlayan insansı robotların mekanik yapısını tasarladılar.

Şekil 2'de gösterildiği gibi , bir insansı robotun donanım mimarisi mekanik yapı, sensör ve güç sistemini içerir. Mevcut aktüatör teknolojisinin, malzeme özelliklerinin ve kontrol yöntemlerinin sınırlamaları nedeniyle, bu karmaşık elektromekanik sistem, insan anatomisinin doğrudan bir kopyası olmaktan ziyade kütle dağılımı ve mekanik rezonans bastırma açısından optimizasyon gerektirir. Bu optimizasyon süreci, öncelikle ağırlığı en aza indirmek için aktüatör sayısını mümkün olduğunca azaltmayı ve uzuvların ataletini azaltmak için kütleyi gövde etrafında (genellikle bel çevresinde) yoğunlaştırmayı içerir. İkinci olarak, kontrol hassasiyetini koruyarak dengeli ve güvenilir hareket sağlamak için eklem ve bağlantı noktalarında esnekliği kısıtlamayı içerir.

Tarihsel Gelişim ve Güncel Teknoloji Seviyesi

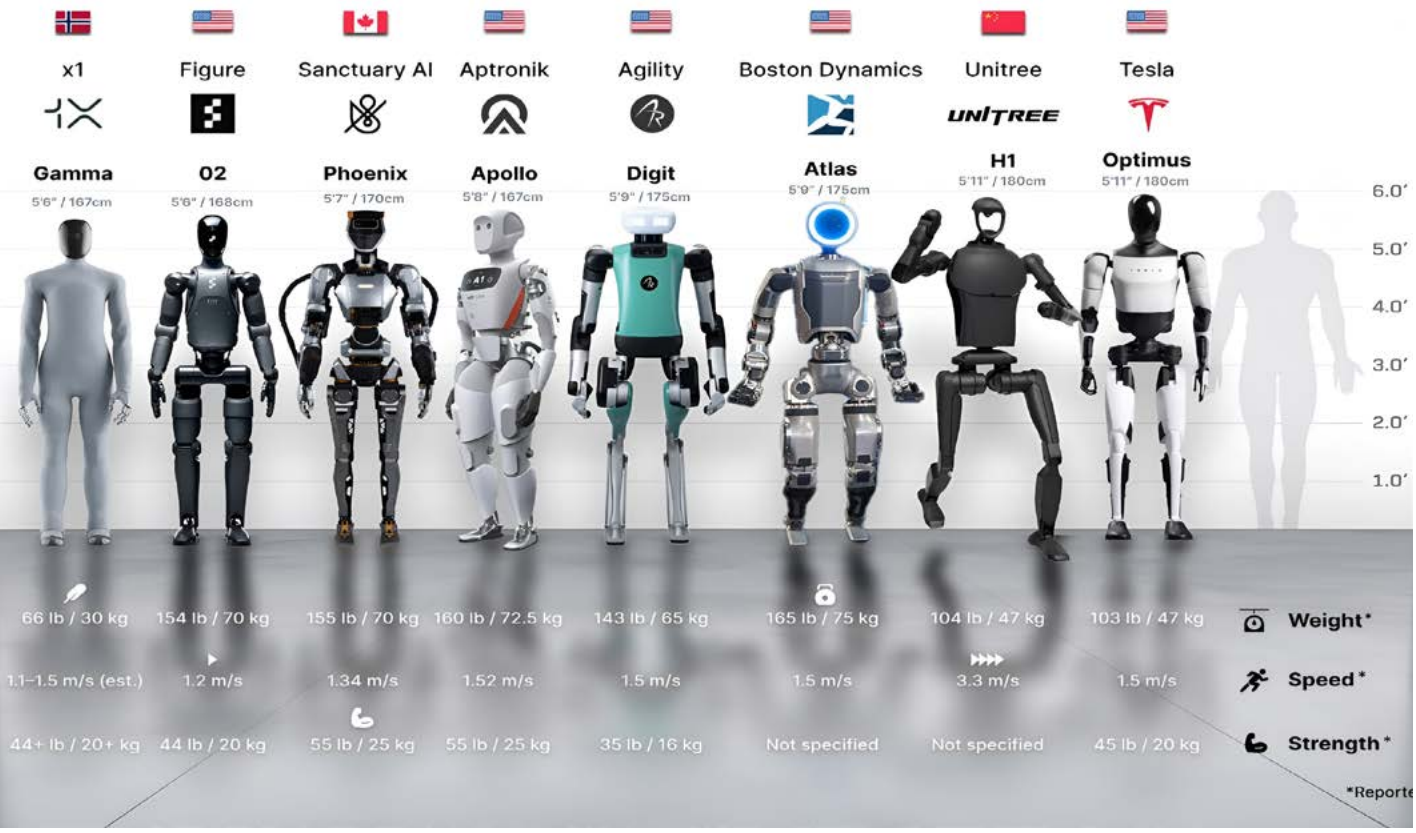
İnsansı robot fikri, 20. yüzyılın ilk yarısında ortaya çıkan "mekanik insan" kavramlarından günümüze uzanan süreçte önemli evrelerden geçmiştir. 1930'larda Elektro, 1970'lerde WABOT-1 ve 1980'ler sonrası Honda'nın insansı robot programı ile ASIMO örnekleri, günümüz teknolojisinin öncülleri olarak değerlendirilmektedir.

Boston Dynamics'in iki ayaklı yürüme teorisi üzerine çalışmaları, moloz dolu arazide dengeli bir şekilde yürüyebilme yeteneğiyle afet kurtarma ve özel operasyonlar için tasarlanmış insansı robot Atlas'ı 2013 yılında piyasaya sürdü. Sonraki on yılda şirket, Atlas'ın dinamik hareket yeteneklerini geliştirdi ve parkur, üç adım atlama, tüm vücut koordineli danslar, basamaklara koşma, zıplama ve denge aletinde yürüme gibi karmaşık hareketleri gerçekleştirmesini sağladı. Nisan 2024'te Boston Dynamics, yerden yükselebilen ve 360° dönebilen eklemlere sahip tamamen elektrikli bir Atlas versiyonunu tanıttı.

Tesla, yaklaşık 173 cm boyunda ve yaklaşık 56 kg ağırlığındaki insansı robotu Optimus prototipini 2022'de tanıttı. Robot, yürüme, bitki sulama ve metal çubukları hareket ettirme gibi temel görevleri yerine getirdi. İki denemeden sonra, 2023'te Optimus Gen2, fabrika ortamlarında dengeli yürüme, nesneleri tutarken sabit durma, haritalama yoluyla insan hareketlerini öğrenme ve çevresel algılama ve akıllı navigasyon için otonom sürüş teknolojisini kullanma becerisine ulaştı. Gelecek planları arasında Optimus'un endüstriyel, hizmet ve ev uygulamalarında geniş ölçekte konuşlandırılması yer alıyor.

ABD merkezli figure.ai şirketi, Robot, kahve yapma ve malzemeleri çöp kutularına taşıma gibi yetenekler sergileyene Figure.ai ürünü sonrası 1 Mart 2024'te, Figure 01'e çok modlu büyük modeller entegre etmek için OpenAI ile bir iş birliği yaptığını duyurdu.

Çin'in 1990'larda insansı robotlar üzerine başladığı araştırmalar, Ulusal Savunma Teknolojileri Üniversitesi, Harbin Teknoloji Enstitüsü, Tsinghua Üniversitesi, Pekin Teknoloji Enstitüsü ve Zhejiang Üniversitesi gibi çeşitli kurumlarda önemli başarılarla sonuçlandı.



Şekil 3 - SON 10 YIL İÇERİSİNDE BAZI ÖNE ÇIKAN İNSANSI ROBOTLAR VE FİZİKSEL ÖZELLİKLERİ

Çin'deki üniversite araştırmalarında, Pekin Teknoloji Enstitüsü 2000 yılında insansı robot araştırmalarına başladı ve 2001 yılında harici kablolar olmadan bağımsız yürüyebilen BHR-1'i piyasaya sürdü ve geliştirerek yeni yetenekler kazandırdı. 2008-2011 yılları arasında Zhejiang Üniversitesi, uluslararası düzeyde kuruluşlarda yer alan, insanlarla veya başka bir robotla yüzlerce tur masa tenisi oynayabilen "Wukong I"i geliştirdi. İnsansı robot Wukong I Ulusal Bilim Vakfı tarafından ABD Başkanı'na sunulan bir özet rapora dahil edildi. Bu insansı robotun yetenekleri çok artırılarak "Wukong IV'e" kadar ilerletildi.

Kurumsal tarafta, UBTECH Robotics, 2012 yılında insansı robot ürünlerini Walker serisi insansı robotları piyasaya sürdü. Unitree, 2023 yılında genel amaçlı bir insansı robot olan H1'i piyasaya sürdü. Unitree, 2024 yılında ikinci insansı robotu G1'i piyasaya sürdü. Bu robot, üç parmakla kuvvetle kontrol edilen hünerli bir eli entegre edebiliyor ve kalkma ve zıplama gibi esnek tam vücut hareket yetenekleri sergileyebiliyordu. Aynı yıllarda Xiaomi, Agibot, Fourier, Dreame ve Xpeng gibi şirketler de insansı robot prototiplerini veya ürünlerini tanıttı.

Bu platformların ortak eğilimi, sadece gösteri amaçlı prototip olmaktan çıkarak; fabrika otomasyonu, depo lojistiği, hizmet sektörü ve sağlık gibi alanlarda gerçek görevler üstlenmeye başlamalarıdır.

2025 Nisan-Aralık Dönemindeki Gelişmeler

2025 yılı Nisan–Aralık döneminde, insansı robot alanında hem büyük teknoloji şirketleri hem de uzmanlaşmış girişimler tarafından önemli duyurular yapılmıştır. Bu bölümde, açık kaynaklara yansıyan seçili gelişmeler özetlenmektedir.

Tesla, 2025 yılı boyunca Optimus insansı robotunun ilk "lejyonunu" üretmeyi ve birkaç bin adetlik bir başlangıç serisini devreye almayı planladığını açıklamıştır. Açıklamalarda, Optimus'un fabrika içi lojistik, montaj ve genel amaçlı iş gücü olarak kullanılacağı ve orta vadede üretimin yüz binler seviyesine çıkarılmasının hedeflendiği ifade edilmektedir.

Figure AI, BMW ile fabrika içi pilot uygulamalarını sürdürürken Figure 03 adlı, ev içi kullanıma dönük yeni nesil bir humanoid üzerinde çalıştığını duyurmuştur. Bu platformun daha gelişmiş el becerileri, sesli etkileşim, dokunsal parmak pedleri ve hafıza işlevleri ile önce endüstriyel, ardından da gündelik kullanım senaryolarını hedeflediği belirtilmektedir.

Apptronik, Apollo adlı insansı robotunun endüstriyel uygulamalardaki performansı sayesinde 2025 yılı içinde birden fazla prestijli tasarım ve yenilik ödülü aldığını ve aynı yıl içinde yeni bir Apollo versiyonunun tanıtılacağını açıklamıştır. Şirket, otomotiv, elektronik üretim ve lojistik sektörlerinde Apollo için yeni saha denemeleri yürütmektedir.

Norveç merkezli 1X Technologies, NEO adlı ev içi yardımcı humanoid robotu kamuoyuna tanıtmış ve özellikle ABD pazarında ön siparişe açmıştır. NEO'nun 2026'da teslim edilmesi planlansa da, 2025 yılı ikinci yarısındaki bu duyuru, tüketici pazarına dönük humanoid yarışının hızlandığını göstermektedir.

Endüstriyel bileşen tarafında ise Igus, Hannover Messe 2025'te ReBeL tabanlı mobil manipülasyon odaklı bir humanoid çözümü ve bu çözümü destekleyen yeni nesil düşük sürtünmeli hareket bileşenlerini tanıtmıştır. MyActuator firması da özellikle insansı robot eklemleri için tasarlanan entegre Planetary V4 seri tahrik modüllerini duyurarak, humanoid eklem teknolojisinde maliyet/performans dengesini iyileştirmeyi hedeflediğini açıklamıştır.

Figure AI ile Brookfield arasında imzalanan stratejik ortaklık, humanoid robotlar için geniş ölçekli gerçek dünya ön eğitim verisi toplanmasını ve büyük vizyon-dil-eylem modellerinin eğitilmesini amaçlamakta; böylece humanoidlerin fabrika, depo ve karmaşık insan merkezli ortamlarda daha güvenilir şekilde görev yapmasının önü açılmaktadır.

Çinli elektrikli araç üreticisi Xpeng, "2025 AI Day" etkinliğinde yeni nesil Iron insansı robotunu tanıtmıştır. İzleyicilerin karşısına kadın formunda çıkan Iron, podyum yürüyüşünü andıran akıcı ve doğal hareketleri ile robotun yumuşak ve dengeli adımlarının sırrı şirketin CEO'su tarafından "ayak parmaklarına eklenen pasif serbestlik dereceleri" olarak açıklanmıştır. Ürünün yeni versiyonu ilk versiyonu ile aynı boyutlarda tasarlanmış ancak yapısal olarak insansı bir omurgaya, biyomekanik kas sistemine, esnek yapay deriye, 22 serbestlik derecesine sahip bir ele ve baş kısmında 3D kavisli bir ekrana sahip olduğu görülmüştür. Şirketin kendi geliştirdiği üç adet "Turing AI çipi" sayesinde 2250 TOPS'a kadar işlem gücü sunuyor. Enerji kaynağı olarak kullanılan katı hal bataryalar, yeni bir teknoloji olarak yer almaktadır.

Harekat Yeteneklerine Etkisi

İnsansı robotların savaş alanına entegrasyonu, doğrudan muharip unsur olmalarının ötesinde, keşif, lojistik, arama–kurtarma, üs güvenliği ve karar desteği gibi alanlarda harekât yeteneklerini önemli ölçüde dönüştürme potansiyeli taşımaktadır. İnsan benzeri morfoloji, özellikle bina içi ve karmaşık kentsel arazide avantaj sağlamaktadır. Etkileri sırayla ele almak gerekirse;

Muharebe Desteği ve Savaş Alanı Operasyonları: Düşman hattına girmeden bilgi toplamak için keşif ve gözetleme faaliyetlerini içerir. Ağır silah, cephane veya ekipman taşıyarak askerlere destek çıkabilir. Lazer işaretleyicilerle hassas hedeflerin belirlenmesinde kritik görev yapabilirler. Henüz etik olarak tartışmalı olsa da, silahlı görevlerde kullanımı mümkün olabilir. Yapay zeka ve karar destek faaliyetlerini hızlı ve etkin bir şekilde yaparak, komutanlara tavsiye ve durum değerlendirmelerinde destek verebilir. Düşman tehditlerini algılamada ve şüpheli davranış analizlerinde değerlendirmeler yapabilir. Askerilerin eğitim ve tatbikatlarında gerçeğe yakın bir şekilde rakip/tehdit rolü oynayarak muhtemel zafiyetlerin belirlenmesinde önemli rol oynayabilir.

Arama-Kurtarma ve İlk Müdahale: İnsanlar için tehlikeli savaş alanlarından yaralıların çıkarılmasında tahliye rolü alabilir. Afet bölgelerinde enkaz altında arama ve kurtarma faaliyeti ile destek unsuru olabilir. İnsan sağlığı için riskli olabilecek kimyasal ve biyolojik tehlike oluşturabilecek bölgelere girip müdahale edip, analiz yapabilir.

Lojistik ve Teknik Destek: Sahada bozulmuş makine ve ekipmanların onarımında görev alabilir. Nöbetçi askerler, ilgili üslerde, sınır bölgelerinde güvenlik devriye görevleri yapabilir. Riskli alanlarda ve periyodik yapılan işlerde, malzeme nakillerinde görev alabilir, yorgunluk yaşamadan uzun süre görev yapabilirler.

İletişim ve Etkileşimli Arabirimler: Dost birimlerle, çok dilli tercüman olarak veya yerel halkla temas kurmak için kullanılabilirler. Özellikle uzun görevlerde askerlerle sosyal etkileşim kurarak psikolojik ve moral desteği sağlayabilir.

Savunma Sanayiinde Potansiyel Kullanım Alanları

Savunma sanayii açısından insansı robotlar; ileri keşif ve gözetleme, sıcak bölgelerde lojistik destek, muharebe sahasında yaralı tahliyesi, Kimyasal, biyolojik, radyolojik ve nükleer (KBRN) ortamlarında analiz ve numune toplama, askerî üs güvenliği, insansız hava/kara/deniz sistemleriyle koordineli ortak görevler ve yapay zekâ destekli taktik analiz gibi alanlarda kullanılma potansiyeline sahiptir.



Şekil 4 - KEŞİF FAALİYETLERİ
İLERİ KEŞİF VE GÖZETLEME GÖREVLERİNDE KULLANIMI: ASKERDEN ÖNCE KEŞİF, ÇEVRESEL ANALİZLER, TERMAL GÖRÜNTÜLEMELERDE GÖREV ALABİLİRLER.



Şekil 5 - DESTEK VE HİZMET FAALİYETİ

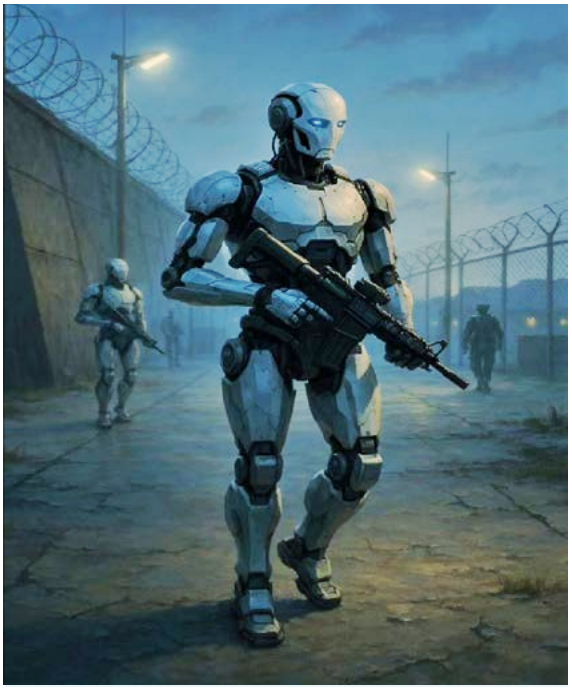
Muharebe sahasında yaralı asker tahliyesi: Ateş altındaki bölgelerden yaralı personeli taşıyabilen robotlar, zayiatı azaltarak kurtarma faaliyetlerini hızlandırabilir.



Şekil 6 - LOJİSTİK FAALİYETLERİ

Savaş alanında mühimmat ve malzeme lojistiği: Sıcak çatışma bölgelerinde cephane ve tıbbi malzeme taşınmasında görev alarak riskli görevleri üstlenebilir.

Keskin nişancıya karşı karşı-tepki sistemleri geliştirme: Gelişmiş sensörleriyle ses ve ısıya duyarlı humanoid robotlar, keskin nişancıların yerini tespit ederek anında karşılık verebilir.



Şekil 7 - DEVRİYE GÖREVİ

Kimyasal, biyolojik, radyolojik ve nükleer (KBRN) ortamlarda görev yapma: İnsanlar için ölümcül olabilecek KBRN ortamlarına girerek analiz yapabilir, numune toplayabilir ve riskleri değerlendirebilir.

Askeri üs güvenliği ve devriye faaliyetleri: Gece gündüz fark etmeksizin üs çevresinde devriye atan robotlar, hareket veya ısı algısıyla anında merkezle iletişime geçebilir.

Siber güvenlik ile entegre görevler: Fiziksel alan savunması ile dijital güvenlik sistemlerini birleştiren robotlar, siber saldırı tespiti sonrası otomatik güvenlik protokollerini başlatabilir.



Şekil 8 - SINIR NÖBETİ

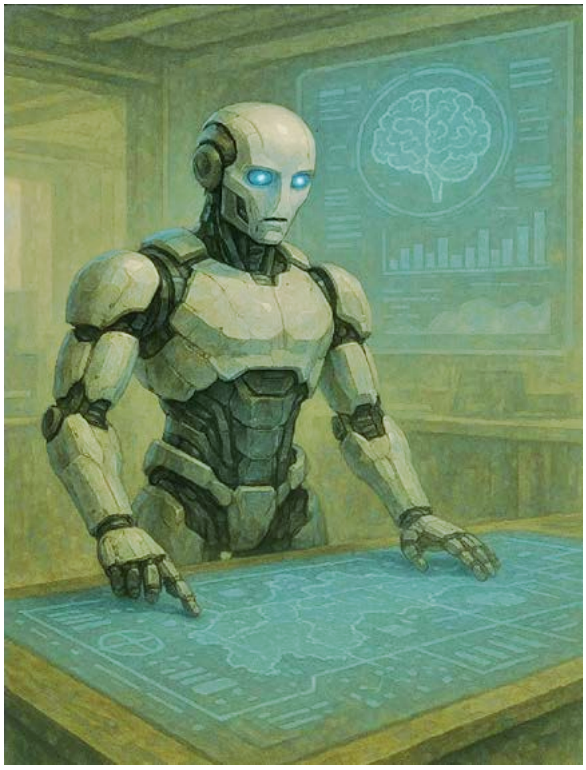
Savaş alanında psikolojik operasyonlara destek: İnsanlara benzer görüntü ve ses çıkarabilen robotlar, düşman moralini bozmak veya yanlış yönlendirme yapmak için kullanılabilir.



Şekil 9 - SOSYAL VE PSİKOLOJİK DESTEK UNSURU

İnsansız hava, kara ve deniz sistemleriyle koordineli görevler: Humanoid robotlar, dronlar ve otonom kara araçlarıyla koordineli operasyonlarda görev alarak çoklu platform destekli taktikler geliştirebilir.

Yapay zekâ destekli taktik analiz ve öneri üretimi: Savaş alanındaki verileri toplayan humanoid robot, komutana gerçek zamanlı olarak önerilerde bulunarak stratejik karar süreçlerine katkı sağlayabilir.



Şekil 10 - STRATEJİ VE TAKTİK ANALİZİ

ASELSAN'ın hâlihazırdaki komuta–kontrol, sensör sistemleri ve otonom platform yetkinlikleri dikkate alındığında, insansı robotlar ile birlikte; çok katmanlı istihbarat–gözetleme–keşif mimarileri, metaverse destekli durum farkındalığı arayüzleri ve sahaya yakın karar destek düğümleri tasarlamak mümkün görünmektedir.

Ticarileşme Potansiyeli ve Pazar Dinamikleri

Küresel ölçekte askeri robot pazarının 2024–2029 döneminde ciddi bir büyüme eğiliminde olduğu, insansı robotların da bu pazarın önemli bir alt bileşeni hâline gelmeye başladığı görülmektedir. Yüksek birim maliyetlerine rağmen; ölçeklendirme, seri üretim ve bileşen maliyetlerindeki düşüş eğilimi, humanoid platformların orta vadede birçok sektörde ekonomik olarak anlamlı hâle gelmesini sağlayabilir.

2025 yılında açıklanan planlar incelendiğinde, Tesla'nın birkaç bin Optimus üretme hedefi, Figure AI'nin yüz binler seviyesinde üretim planlarını gündeme taşımıştır. Apptronik firmasının aldığı yatırım teşvikleri ve ödüller ile 1X Technologies'in NEO'yu tüketici pazarına konumlandırması; humanoid robotların yalnızca laboratuvar ve pilot projelerden çıkıp, gerçek bir "ürün kategorisi" olarak konumlandığını göstermektedir.

2025 sonrası dönemde Tesla, Figure AI ve Apptronik gibi firmaların ölçeklenebilir humanoid platformların ticarileştirmesi, savunma odaklı aktörlerin bu sistemleri görece düşük ek entegrasyon maliyetiyle konsept gösterimlerinde ve sınırlı operasyonel senaryolarda test edebilmesine zemin hazırlamaktadır.

Riskler, Sınırlılıklar ve Etik Hususlar

İnsansı robotların yaygınlaşması; iş gücü piyasasında dönüşüm, veri güvenliği ve gizlilik, sistem güvenliği, hukuki sorumluluk ve etik kullanım gibi başlıklarda önemli tartışmaları beraberinde getirmektedir. Özellikle otonom ölümcül kuvvet kullanımı, uluslararası hukuk ve etik açısından oldukça hassas bir alandır.

Siber güvenlik açısından bakıldığında, humanoid robotların hem fiziksel eyleyici hem de sensör düğümü olması, ele geçirilmeleri durumunda ciddi fiziksel ve bilgi güvenliği riskleri doğurabilir. Bu nedenle güvenlik mimarisi, güncelleme mekanizmaları ve yetkilendirme/kimlik doğrulama süreçleri en baştan tasarımın ayrılmaz bir parçası olmalıdır.

İnsansı robotlar gelişmeye ve daha geniş uygulama alanlarına doğru ilerlemeye devam ettikçe, potansiyellerini tam olarak gerçekleştirebilmeleri için çözülmesi gereken bazı zorluklar olacaktır. İnsansı robot kafası için, görünüm tasarımından doğal duygusal etkileşime kadar çeşitli zorluklar söz konusudur. İnsansı robot gövdesi için, dinamik ortamlarda robotların güvenliğini ve sağlamlığını sağlamaktan, büyük ölçekli dağıtım için ekonomik ve teknik sınırlamaların üstesinden gelinmesi gereken zorluklar söz konusu olacaktır.

Bu zorlukların ele alınması, insansı robotların gerçek dünya senaryolarında güvenli, etkili ve verimli bir şekilde çalışmasını sağlamak için hayati önem taşımaktadır.

Bu zorluklara ek olarak, insansı robotikte, alanın geleceğini şekillendirmeyi vaat eden çeşitli yeni trendler ortaya çıkmaktadır. Bu trendler, insansı robotların yeteneklerini geliştirmeye, çok yönlülüklerini ve uyarlanabilirliklerini iyileştirmeye ve onları daha erişilebilir ve sürdürülebilir hale getirmeye odaklanmaktadır. Uygun maliyetli robot platformları, modülerleştirme, arayüz standardizasyonu ve bedenlenmiş zekânın geliştirilmesi gibi trendler, insansı robotların hem işlevselliğini hem de pratikliğini önemli ölçüde artırabilecekleri için araştırmacılar ve geliştiriciler tarafından önemli ölçüde ilgi görmektedir.

İnsansı robotlar için doğal duygusal ifadeleri etkinleştirmek hayati önem taşır. Özellikle göz, dudak ve kaş hareketlerinde doğal mikro ifadeler için yüksek serbestlik dereceleri gereklidir. Gelecekteki yenilikler, aktüatör özgürlüğünü artırmalı, minyatür mekanik tasarımlar içermeli ve gelişmiş ifade kontrolü için yumuşak ve esnek malzeme kullanımını gerektirmektedir.

Değerlendirme ve Öneriler

ASELSAN açısından insansı robot alanına doğrudan tasarım ve seri üretim odaklı girmek yerine; kısa ve orta vadede teknoloji izleme, konsept geliştirme, sınırlı tedarik ve tersine mühendislik ile teknoloji transferi gibi adımlara öncelik verilmesi rasyonel görünmektedir.

Bu kapsamda, 2025 sonrası dönemde, ticarileşen platformlardan sınırlı sayıda tedarik edilerek; ASELSAN'ın komuta–kontrol, sensör füzyonu ve karar destek altyapılarıyla entegrasyon denemeleri yapılması, gelecekte olası yerli humanoid projeleri için kritik bilgi birikimi sağlayabileceği değerlendirilmektedir. Bu sayede insansı robot teknolojisi ile mevcut savunma teknolojileri arasındaki uyum ve farklılıklar tespit edilerek gelecekteki entegre konularda hazır bulunuşluk sağlanmış olacaktır.

Ayrıca muharebe esnasında çalışan sistemlerin çözümlerinde, entegre lojistik destek faaliyetlerinde, risk ihtiva eden tüm sektör başkanlıklarında yardımcı/destek operatörü olarak denemeler yapılarak görevlendirileceği düşünülmektedir.

Sonuç

Genel amaçlı insansı robot teknolojileri, hem sivil sektörlerde hem de savunma sanayiinde oyun değiştirici bir potansiyele sahiptir. Kısa vadede insanı tamamen ikame etmekten ziyade, insan gücünü tamamlayıcı ve destekleyici bir rol üstlenmeleri olasıdır.

Yüksek araştırma ve üretim maliyetleri, insansı robotların tüketici pazarında yaygın olarak benimsenmesini sınırlamaktadır. Bu nedenle, robotların bakım ve işletme maliyetlerini düşürmenin yollarını bulmak, onları ticari uygulamalar için daha uygun hale getirmek adına hayati önem taşımaktadır. Maliyetleri düştükçe ticarileştirilecek ve büyük ölçekli üretime gireceklerdir. Fiyatlarının da düşmesi ve insanların günlük yaşamlarında daha geniş bir şekilde benimsenmesi beklenmektedir.

İnsansı robotlar daha fazla esneklik ve ölçeklenebilirlik için tasarlandıkça, modülerleştirme ve arayüz standardizasyonuna yönelik eğilim giderek önem kazanmaktadır. Üreticiler, standartlaştırılmış ve değiştirilebilir bileşenlere sahip robotlar geliştirerek, farklı görevler için bakımı, yükseltmesi ve özelleştirmesi daha kolay, daha uyarlanabilir sistemler oluşturabilirler.

Bu modüler yaklaşım, geliştirme süresini kısaltır, maliyetleri düşürür ve daha geniş bir konfigürasyon ve entegrasyon yelpazesi sunarak inovasyonu teşvik eder. Ayrıca, arayüzlerin standartlaştırılması, farklı robotik sistemler arasında uyumluluğu sağlayarak çoklu robot ortamlarında birlikte çalışabilirliği kolaylaştırır.

İnsansı robotların, nesneler, engeller, insan duyguları ve niyetleri de dahil olmak üzere çevrelerini doğru bir şekilde algılamaları gerekir. Bu gereklilikler, robotların kendi kendine öğrenme ve çeşitli ortamlara ve görevlere uyum sağlama yeteneğine sahip olmasını, insanlarla etkileşimleri sırasında güvenliği sağlamasını ve aynı zamanda etik ve sosyal etkileri de göz önünde bulundurmasını gerektirir. Aynı zamanda, daha yüksek serbestlik derecelerine ve elle kavrama operasyon stratejilerine sahip daha becerikli bir el yapısına dayanan insansı robotlar, doğal ellere daha yakın bir beceri ve çok yönlülük düzeyine ulaşacaktır. Bu zorlukların üstesinden gelerek, insansı robotlar daha yüksek düzeyde özerklik, esneklik ve insan-robot iş birliği sağlayarak bedensel zekâya doğru ilerleyebilir. Bu, insansı robotların evde bakım, sağlık ve hizmetler de dahil olmak üzere çeşitli alanlarda yaygın olarak uygulanmasını kolaylaştıracaktır.

Savunma Sanayii projelerinde ASELSAN için aşamalı bir strateji izleyerek, uluslararası gelişmeleri yakından takip etmek, seçili platformlarla saha denemeleri yapmak ve orta vadede yerli çözümlere zemin hazırlamak kritik önem arz eder. Bu doğrultuda, yapılacak araştırma ve çalışmalar, fizibiliteler, çalışmalara verilecek destekler büyük önem taşımaktadır.



HYPERLOOP: MANYETİK LEVİTASYON VE LINEER MOTOR

Hyperloop kavramı, 2013 yılında Elon Musk tarafından yayımlanan Hyperloop Alpha raporu ile kamuoyunda geniş yankı uyandırmış olsa da bu çalışmanın arkasında yatan temel fiziksel prensipler ve mühendislik bileşenleri çok daha eski araştırmalara dayanmaktadır. Hyperloop; düşük basınçlı tüpler, yüksek hızda kapsül hareketi, aerodinamik sürtünmenin minimize edilmesi, temassız levitasyon ve doğrusal itki gibi ileri mühendislik alanlarını bir araya getiren bütüncül bir sistemdir. Bu makalenin amacı, Hyperloop teknolojisini genel bir kavramsal çerçeve içerisinde ele almakla birlikte, özellikle manyetik levitasyon (maglev) tabanlı taşıma sistemleri ve lineer motorlu çekiş mekanizmalarına odaklanmaktır. Ayrıca bu teknolojilerin, yalnızca sivil ulaşım bağlamında değil, savunma sanayii uygulamaları açısından ne tür stratejik fırsatlar barındırdığı da tartışılacaktır.

Ece BİLGİN KOÇAK

Yüksek hızlı ulaşım sistemleri, yalnızca **sivil mobilite ihtiyacına yanıt** veren teknolojiler olarak değil, aynı zamanda ülkelerin endüstriyel kapasitesini, mühendislik yetkinliğini ve stratejik özerkliğini belirleyen kritik altyapılar olarak değerlendirilmektedir. Bu bağlamda **Hyperloop**, mevcut ulaşım teknolojilerinin fiziksel sınırlarını zorlayan, çok disiplinli ve henüz olgunlaşma sürecinde olan bir sistem yaklaşımı olarak öne çıkmaktadır.



Hyperloop Sisteminin Temel Çalışma Prensibi

Hyperloop, klasik demiryolu veya havayolu sistemlerinden farklı olarak, birden fazla fiziksel ve elektromekanik sistemin entegrasyonuna dayanır.

Temel olarak sistem, vakumlanmış bir tüp içerisinde hareket eden kapsüllerden (pod) oluşur. Tüp içi basıncın düşürülmesi, akışkan ortamın yoğunluğunu azaltarak aerodinamik sürüklenmeyi düşürür.

Pod, istasyonlardan tüpe hava kilitleri aracılığıyla alınır ve tüp içerisindeki düşük basınç ortamı korunur. Hareket esnasında pod ile altyapı arasında mekanik temas bulunmaz; bu temasın ortadan kaldırılması levitasyon sistemleri aracılığıyla sağlanır. Pod'un hızlandırılması, seyri ve frenlenmesi ise lineer motor tabanlı çekiş sistemleri ile gerçekleştirilir.

Bu yapı, Hyperloop'u yalnızca "çok hızlı tren" olmaktan çıkararak, aerodinamik, elektromanyetik, güç elektroniği, kontrol sistemleri ve yapısal mühendisliğin eş zamanlı olarak ele alınması gereken karmaşık bir sistem haline getirir.

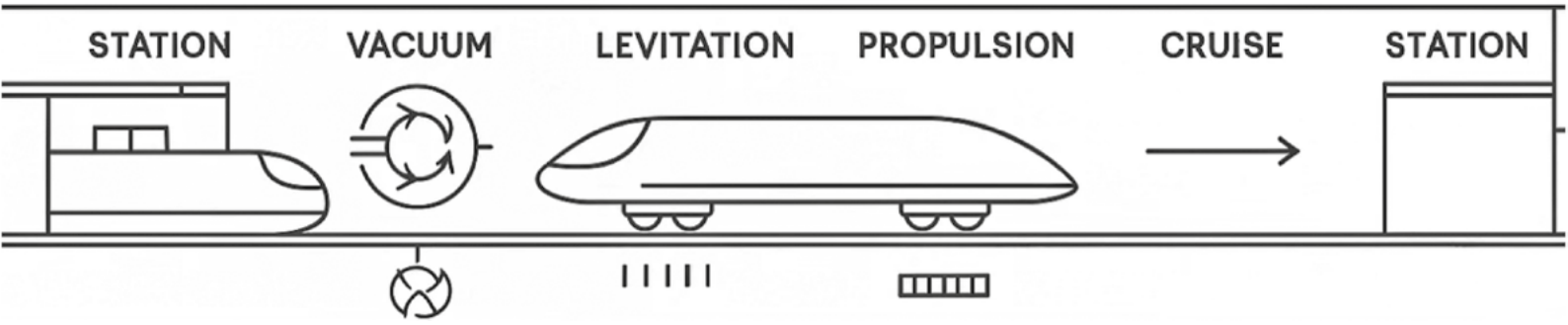
Aerodinamik Rejimler, Isentropic Akış ve Kantrowitz Limiti

Hyperloop sistemlerinin mühendislik tasarımında aerodinamik faktörler merkezi bir rol oynar. Düşük basınç ortamı, sürüklenmeyi azaltmakla birlikte, yüksek hızlarda ortaya çıkan sıkıştırılabilir akış etkilerini tamamen ortadan kaldırmaz. Bu nedenle Hyperloop analizlerinde Mach sayısı, isentropic akış varsayımları ve Kantrowitz limiti gibi kavramlar kritik öneme sahiptir.

Mach sayısı, bir cismin hızının, bulunduğu ortamda ses hızına oranı olarak tanımlanır. Hyperloop sistemleri genellikle Mach 0.7 ile Mach 1.0 arasında bir hız rejimini hedeflemektedir. Bu aralık, subsonic ile transonic akış rejimleri arasında yer almakta olup, supersonic rejimde ortaya çıkan güçlü şok dalgalarının ve ciddi enerji kayıplarının önüne geçmeyi amaçlamaktadır.

Isentropic akış, entropinin sabit kabul edildiği, yani ısı transferi ve sürtünmenin ihmal edildiği ideal bir akış modelidir. Hyperloop literatüründe bu model, pod etrafındaki basınç, sıcaklık ve yoğunluk dağılımlarının ilk mertebe analizinde yaygın biçimde kullanılmaktadır. Ancak transonic rejime yaklaşıldıkça şok dalgalarının ortaya çıkması, bu varsayımın geçerliliğini sınırlamaktadır.

Kantrowitz limiti ise, pod ile tüp arasındaki kesit oranına bağlı olarak akışın boğulma durumuna ulaşmasını tanımlar. Bu limit aşıldığında, pod önünde hava birikmesi meydana gelir ve hız artışı ciddi biçimde kısıtlanır. Bu nedenle Hyperloop tasarımında aerodinamik sürüklenmenin yalnızca düşük basınçla değil, aynı zamanda geometrik optimizasyon ve drag dependency analizleriyle kontrol altına alınması gerekmektedir.



Şekil 1 - HYPERLOOP TEMEL ÇALIŞMA PRENSİBİ
(GÖRSEL YAPAY ZEKÂ İLE OLUŞTURULMUŞTUR.)

Manyetik Levitasyon Sistemleri:

EMS ve EDS Yaklaşımlarının Ayrıntılı İncelenmesi

Hyperloop sistemlerinde levitasyon teknolojisi, yalnızca mekanik temasın ortadan kaldırılması açısından değil, aynı zamanda sistemin kararlılığı, enerji tüketimi, kontrol karmaşıklığı ve güvenlik mimarisi açısından da belirleyici bir rol oynamaktadır. Bu bağlamda manyetik levitasyon (maglev) sistemleri, Hyperloop Alpha raporunda önerilen hava yastığı tabanlı çözümlere kıyasla daha olgun ve ölçeklenebilir teknolojiler olarak öne çıkmaktadır. Maglev sistemleri, literatürde temelde elektromanyetik süspansiyon (EMS) ve elektrodinamik süspansiyon (EDS) olmak üzere iki ana başlık altında ele alınmaktadır.

Elektromanyetik Süspansiyon (EMS) Sistemleri

Elektromanyetik süspansiyon (EMS) sistemlerinde levitasyon, elektromıknatıslar tarafından oluşturulan çekme kuvveti sayesinde sağlanır. Bu sistemde pod veya araç üzerinde yer alan elektromıknatıslar, altyapıdaki ferromanyetik ray veya kılavuz yapıyı yukarı doğru çekerek aracı askıda tutar. EMS yaklaşımının en ayırt edici özelliği, çekici (attractive) manyetik kuvvet prensibiyle çalışmasıdır.

EMS sistemlerinin en önemli avantajlarından biri, durağan durumda dahi levitasyon sağlayabilmesidir. Bu özellik, sistemin ilk hareket anında veya düşük hızlarda ilave mekanik desteklere ihtiyaç duymamasını sağlar. Bu nedenle EMS, şehir içi veya orta hız maglev uygulamalarında uzun süredir tercih edilen bir teknoloji olmuştur. Almanya kökenli Transrapid sistemi ve Çin'de ticari olarak işletilen Shanghai Maglev hattı, EMS tabanlı levitasyon sistemlerinin en bilinen örnekleridir.

Bununla birlikte EMS sistemleri, doğası gereği kararsız bir denge noktasında çalışır. Manyetik çekme kuvveti, mesafe azaldıkça hızla artar; bu durum, küçük konum sapmalarının bile kontrol edilmemesi hâlinde pod'un rayla temas etmesine yol açabilir. Bu nedenle EMS sistemleri, yüksek hassasiyetli sensörler, hızlı geri besleme döngüleri ve sürekli aktif kontrol gerektirir. Levitasyon boşluğu genellikle milimetre mertebesinde olup, bu boşluğun sabit tutulması kontrol mühendisliği açısından ciddi bir zorluk teşkil etmektedir.

Enerji tüketimi açısından bakıldığında, EMS sistemlerinde elektromıknatıslara sürekli olarak enerji verilmesi gerekmektedir. Bu durum, özellikle uzun mesafeli ve yüksek hızlı sistemlerde işletme maliyetlerini artırıcı bir unsur olarak değerlendirilmektedir. Hyperloop bağlamında, EMS sistemlerinin düşük basınçlı tüp ortamında çalışabilirliği teorik olarak mümkündür; ancak yüksek hızlarda ortaya çıkan dinamik yükler, kontrol sistemlerinin daha da karmaşık hale gelmesine neden olmaktadır.

Bu nedenlerle EMS, Hyperloop için teknik olarak uygulanabilir bir seçenek olmakla birlikte, uzun menzilli ve çok yüksek hızlı ticari uygulamalarda kontrol karmaşıklığı ve enerji tüketimi nedeniyle dikkatli değerlendirilmesi gereken bir yaklaşımdır.

Elektrodinamik Süspansiyon (EDS) Sistemleri

Elektrodinamik süspansiyon (EDS) sistemleri, EMS yaklaşımından temel olarak itici (repulsive) manyetik kuvvet prensibiyle ayrılmaktadır. EDS sistemlerinde pod üzerinde bulunan güçlü kalıcı mıknatıslar veya süperiletken mıknatıslar, altyapıdaki iletken bobinlerde veya levhalarda indüksiyon akımları oluşturur. Bu indüklenen akımlar, Lenz kanunu gereği manyetik alan değişimine karşı koyar ve sonuç olarak pod'u yukarı doğru iten bir kuvvet meydana gelir.

EDS sistemlerinin en önemli karakteristik özelliği, hız arttıkça kaldırma kuvvetinin artmasıdır. Bu durum, yüksek hızlarda sistemin doğal olarak daha kararlı hale gelmesini sağlar. Ayrıca EDS sistemlerinde levitasyon boşluğu EMS sistemlerine kıyasla daha büyük olabilir; bu da altyapı toleranslarını ve mekanik hassasiyet gereksinimlerini bir miktar azaltır.

Japonya'da geliştirilen SCMaglev sistemi, EDS teknolojisinin en ileri uygulamalarından biridir. Bu sistemde süperiletken mıknatıslar kullanılarak 600 km/s üzeri test hızlarına ulaşılmış ve uzun süreli testlerde yüksek kararlılık gösterilmiştir. Bu başarı, EDS sistemlerinin çok yüksek hızlarda çalışmaya daha elverişli olduğunu göstermektedir.

Bununla birlikte EDS sistemlerinin de önemli zorlukları bulunmaktadır. En temel sorunlardan biri, düşük hızlarda veya durağan durumda levitasyon sağlayamamasıdır. Bu nedenle EDS tabanlı sistemlerde, belirli bir hıza ulaşılana kadar tekerlek veya yardımcı destek sistemleri kullanılması gerekmektedir. Ayrıca süperiletken mıknatısların kullanımı, kriyojenik soğutma sistemlerini zorunlu kılmakta ve bu durum hem maliyetleri hem de sistem karmaşıklığını artırmaktadır.

Hyperloop bağlamında değerlendirildiğinde, EDS sistemleri özellikle yüksek hız rejimleri için daha avantajlı görünmektedir. Düşük basınçlı ortamda hava direncinin azalmasıyla birlikte, EDS'nin hızla artan kaldırma kuvveti ve doğal kararlılığı, Hyperloop'un hedeflediği Mach 0.7–1.0 aralığıyla uyumlu bir teknik zemin sunmaktadır.

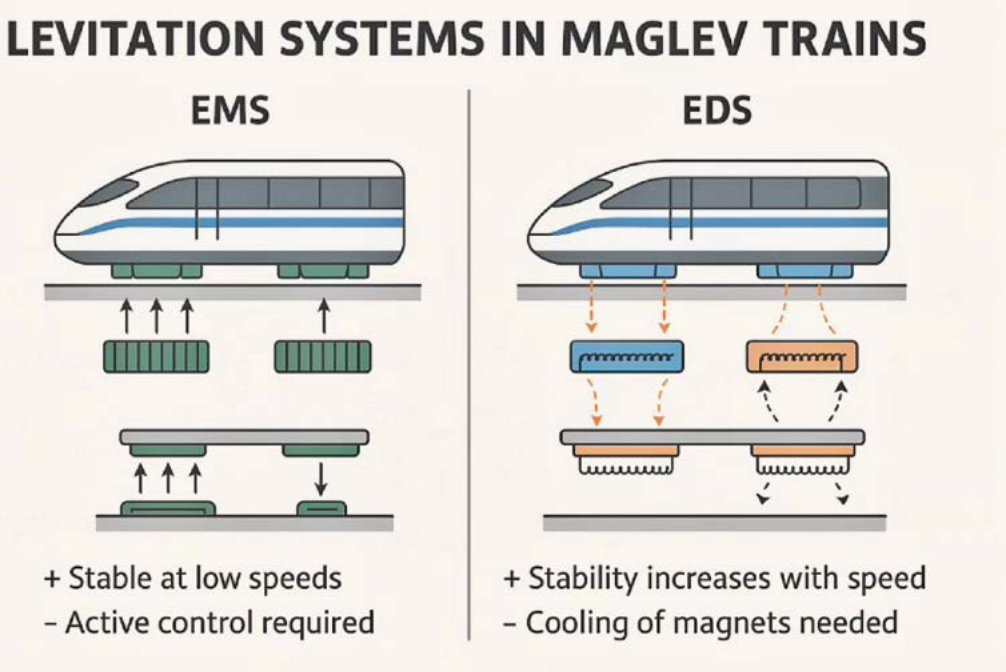
Hyperloop Açısından EMS ve EDS Karşılaştırması

Hyperloop sistemleri için EMS ve EDS yaklaşımları karşılaştırıldığında, iki sistemin de belirli avantaj ve sınırlamalar sunduğu görülmektedir. EMS sistemleri düşük hızlarda ve durağan koşullarda avantajlı olmakla birlikte, yüksek hızlarda kontrol karmaşıklığı ve enerji tüketimi dezavantaj oluşturmaktadır. EDS sistemleri ise yüksek hızlarda daha kararlı ve verimli olmakla birlikte, başlangıç koşullarında ilave mekanik destek ihtiyacı doğurmaktadır.

Bu kapsamda literatürde, Hyperloop için hibrit yaklaşımlar veya operasyonel fazlara göre farklı levitasyon stratejilerinin kullanılması da tartışılmaktadır. Örneğin düşük hızlarda tekerlek veya EMS benzeri destek sistemleri, yüksek hızlarda ise EDS tabanlı levitasyonun devreye girmesi değerlendirilmektedir.

Lineer Motor Tabanlı Çekiş Sistemleri

Hyperloop sistemlerinde itki ve frenleme, büyük ölçüde lineer motorlar aracılığıyla gerçekleştirilir. Lineer motorlar, klasik döner elektrik motorlarının doğrusal hâle getirilmiş versiyonları olarak tanımlanabilir. Döner hareket yerine doğrusal manyetik alan üretirler ve elektrik enerjisini doğrudan ileri yönde itkiye dönüştürürler.



Şekil 2 - EMS VE EDS SİSTEMLERİNİN KARŞILAŞTIRMASI
(GÖRSEL YAPAY ZEKA İLE OLUŞTURULMUŞTUR.)

Lineer indüksiyon motorları (LIM), stator tarafında oluşturulan değişken manyetik alanın, hareketli iletken parça üzerinde indüklediği akımlar aracılığıyla itki üretir. Lineer senkron motorlar (LSM) ise, stator ve hareketli parça arasındaki manyetik alanların senkronize edilmesiyle çalışır. Hyperloop literatüründe her iki yaklaşımın da farklı avantaj ve dezavantajları tartışılmaktadır.

Klasik tren sistemlerinde kullanılan döner motorlar, ürettikleri torku tekerlek–ray teması yoluyla doğrusal harekete dönüştürür. Bu yapı, mekanik aşınma, bakım ihtiyacı ve yüksek hızlarda sınırlayıcı faktörler doğurur. Lineer motorlar ise, mekanik temas gerektirmeden yüksek ivme ve hızlara ulaşma imkânı sundukları için Hyperloop ve maglev sistemlerinde doğal bir tercih haline gelmiştir.

Manyetik Levitasyon Teknolojilerinin Savunma Sanayiinde Potansiyel Kullanım Alanları

Manyetik levitasyon teknolojileri, sahip oldukları yüksek hassasiyet, elektromanyetik kontrol gereksinimleri ve emniyet-kritik doğaları nedeniyle, sivil ulaştırma uygulamalarının ötesinde savunma sanayii için de stratejik bir teknoloji alanı olarak değerlendirilmektedir. Hyperloop bağlamında ele alınan EMS ve EDS tabanlı levitasyon sistemleri, özellikle yüksek güç elektroniği, gerçek zamanlı kontrol, elektromanyetik tasarım ve sistem entegrasyonu gibi alanlarda ileri mühendislik yetkinlikleri gerektirmektedir. Bu yetkinlikler, ASELSAN gibi savunma sanayii odaklı teknoloji firmalarının mevcut kabiliyetleriyle doğrudan örtüşmektedir.

EMS Sistemleri ve ASELSAN Yetkinlik Alanları

Elektromanyetik süspansiyon (EMS) sistemleri, sürekli aktif kontrol gerektiren yapıları nedeniyle, savunma sanayiinde hâlihazırda kullanılan birçok alt teknolojiyi bünyesinde barındırmaktadır. EMS sistemlerinde levitasyon boşluğunun milimetre mertebesinde hassasiyetle korunması, yüksek hızlı sensörler, güvenilir geri besleme algoritmaları ve gecikmeye toleransı düşük kontrol mimarileri gerektirir.

ASELSAN'ın radar, elektro-optik ve hassas konumlama sistemlerinde edindiği deneyim, EMS sistemlerinde kullanılan yüksek çözünürlüklü mesafe ölçüm sensörleri, manyetik alan izleme ve durum kestirimi algoritmaları için doğrudan uygulanabilir niteliktedir. Özellikle gerçek zamanlı gömülü yazılımlar, hata toleranslı kontrol mimarileri ve emniyet-kritik sistem tasarımı konularında ASELSAN'ın savunma projelerinde kazandığı bilgi birikimi, EMS tabanlı levitasyon sistemlerinin güvenilir biçimde işletilmesi açısından önemli bir avantaj sunmaktadır.

Buna ek olarak EMS sistemlerinde elektromıknatısların sürekli enerjilendirilmesi gerekmekte olup, bu durum yüksek güçlü, hızlı tepki veren güç elektroniği sürücülerini zorunlu kılmaktadır. ASELSAN'ın güç elektroniği, inverter tasarımı ve askeri standartlara uygun güç dağıtım sistemleri konusundaki yetkinlikleri, EMS sistemlerinin enerji verimliliğinin artırılması ve elektromanyetik uyumluluk (EMC) gereksinimlerinin karşılanması açısından kritik bir rol oynayabilir.

Bu çerçevede EMS, ASELSAN açısından yalnızca bir ulaşım teknolojisi değil; ileri seviye elektromanyetik kontrol ve güç elektroniği demonstrasyonu olarak değerlendirilebilecek bir Ar-Ge alanı oluşturmaktadır.

EDS Sistemleri ve Yüksek Hızlı Savunma Uygulamaları

Elektrodinamik süspansiyon (EDS) sistemleri, özellikle yüksek hız rejimlerinde sundukları doğal kararlılık nedeniyle Hyperloop ve benzeri ileri ulaşım sistemleri için cazip bir seçenek olarak görülmektedir. EDS sistemlerinde levitasyon kuvvetinin hızla birlikte artması, bu yaklaşımı yüksek hızlı ve uzun menzilli uygulamalar için daha elverişli kılmaktadır.

Savunma sanayii perspektifinden bakıldığında EDS sistemleri, yüksek hızlı platformlar, kritik lojistik transferi ve zaman hassasiyeti yüksek görevler için potansiyel kullanım alanları sunmaktadır. Özellikle kapalı veya yarı kapalı altyapılarda çalışan, çevresel etkilerden izole edilmiş yüksek hızlı taşıma sistemleri, askeri üsler arası lojistik veya stratejik malzeme transferi açısından değerlendirilebilir.

EDS sistemlerinde kullanılan süperiletken mıknatıslar ve yüksek güçlü manyetik alanlar, ileri malzeme teknolojileri ve kriyojenik sistemlerle birlikte ele alınmaktadır. ASELSAN'ın doğrudan süperiletken sistemler konusunda sınırlı geçmişi olmakla birlikte, yüksek alanlı elektromanyetik tasarım, güçlü manyetik sistemlerin kontrolü ve emniyet-kritik altyapı entegrasyonu konularındaki tecrübesi, bu alanda yapılacak iş birlikleri ve teknoloji kazanımı açısından önemli bir zemin oluşturmaktadır.

Ayrıca EDS sistemlerinin doğası gereği gerektirdiği yüksek hızlı ölçüm, durum izleme ve arıza tespiti yetenekleri, ASELSAN'ın savunma projelerinde geliştirdiği yapay zekâ destekli kestirimci bakım ve sağlıkta izleme sistemleri çözümleriyle örtüşmektedir.

Sonuç olarak, ASELSAN, Hyperloop veya maglev ekosistemine; levitasyon kontrol sistemleri, güç elektroniği ve sürücü çözümleri, emniyet-kritik yazılım ve sinyalizasyon, sensör füzyonu ve sistem izleme gibi alt sistemler üzerinden dahil olabilir. Bu yaklaşım, ASELSAN'ın mevcut ürün ve teknoloji portföyünü doğrudan desteklerken, aynı zamanda sivil-askerî çift kullanımlı (dual-use) teknolojilerin geliştirilmesine de katkı sağlayacaktır.

Lineer Motor Teknolojilerinin Savunma Sanayiinde Potansiyel Kullanım Alanları

Hyperloop ve maglev tabanlı ulaşım sistemlerinde levitasyon kadar kritik bir diğer bileşen, aracın hızlandırılması, seyir hızının korunması ve frenlenmesinden sorumlu olan lineer motor tabanlı çekiş sistemleridir. Lineer motorlar, klasik döner elektrik motorlarının aksine, mekanik aktarma elemanlarına ihtiyaç duymaksızın doğrusal yönde itki üretmeleri nedeniyle, yüksek hızlı ve temassız taşıma sistemleri için temel bir teknoloji olarak kabul edilmektedir.

Lineer motorların çalışma prensibi, döner motorlarda olduğu gibi elektromanyetik alan etkileşimlerine dayanmakla birlikte, manyetik alanın doğrusal olarak "ilerlemesi" esasına dayanır. Bu sayede elektrik enerjisi doğrudan doğrusal harekete dönüştürülür ve tekerlek–ray temasına bağlı sınırlamalar ortadan kaldırılır. Hyperloop sistemlerinde bu yaklaşım, özellikle çok yüksek hızlarda mekanik aşınmanın ve bakım ihtiyacının minimize edilmesi açısından kritik avantajlar sunmaktadır.

ASELSAN açısından bakıldığında lineer indüksiyon motor sistemleri, özellikle yüksek güçlü inverterler, hızlı anahtarlama elemanları ve gelişmiş motor sürücü algoritmaları açısından önemli bir teknoloji alanı oluşturmaktadır. Savunma sanayiinde kullanılan radar sistemleri, yönlendirilmiş enerji sistemleri ve elektrik tahrikli platformlar için geliştirilen güç elektroniği çözümleri, LIM tabanlı çekiş sistemlerine doğrudan uyarlanabilecek niteliktedir.

Bununla birlikte LIM sistemlerinde karşılaşılan temel zorluklardan biri, manyetik kaçaklar ve eddy current (fuko akımları) nedeniyle oluşan verim kayıplarıdır. Bu kayıpların minimize edilmesi, elektromanyetik tasarım optimizasyonu ve gelişmiş kontrol algoritmaları gerektirmektedir. ASELSAN'ın elektromanyetik simülasyon, modelleme ve donanım-yazılım birlikte tasarım konularındaki tecrübesi, bu tür kayıpların azaltılmasına yönelik özgün çözümler geliştirilmesini mümkün kılmaktadır.

Lineer senkron motor sistemleri açısından bakıldığında ise en önemli gereksinimlerinden biri, yüksek doğrulukta konum ve hız bilgisi ile çalışan gelişmiş kontrol algoritmalarıdır. Bu durum, savunma sanayiinde sıkça karşılaşılan güdüm, stabilizasyon ve hassas tahrik problemleriyle doğrudan benzerlik göstermektedir. ASELSAN'ın füze güdüm sistemleri, elektro-optik stabilizasyon platformları ve hassas tahrik çözümlerinde edindiği kontrol mühendisliği deneyimi, LSM tabanlı çekiş sistemleri için kritik bir avantaj sağlamaktadır.

Ayrıca LSM sistemlerinde, özellikle uzun hatlarda stator segmentlerinin senkronizasyonu ve enerji yönetimi önemli bir mühendislik problemidir. Bu problem, dağıtık kontrol mimarileri, güvenli haberleşme altyapıları ve hata toleranslı sistem tasarımı gerektirir. ASELSAN'ın ağ tabanlı komuta-kontrol sistemleri ve emniyet-kritik haberleşme çözümleri konusundaki birikimi, bu tür dağıtık LSM altyapılarının geliştirilmesine katkı sunabilecek niteliktedir.

Lineer motor teknolojileri, yalnızca ulaşım sistemleriyle sınırlı olmayan, geniş bir savunma sanayii uygulama alanına sahiptir. Yüksek ivmeli fırlatma sistemleri, hızlı yük transfer mekanizmaları ve test altyapıları gibi alanlarda lineer motor prensiplerinden yararlanılmaktadır.

Hyperloop ve maglev bağlamında geliştirilecek lineer motor teknolojileri, ASELSAN açısından çift kullanımlı (dual-use) bir teknoloji portföyü oluşturma potansiyeli taşımaktadır. Sivil ulaştırma projelerinde geliştirilen yüksek güçlü, hassas kontrollü lineer motor sistemleri; askeri platformlarda ihtiyaç duyulan hızlı ve güvenilir elektromekanik tahrik çözümlerine doğrudan bilgi transferi sağlayabilir.

Bu çerçevede lineer motor teknolojileri, ASELSAN için yalnızca bir alt sistem değil, savunma sanayii ile sivil yüksek teknoloji uygulamaları arasında köprü kuran stratejik bir Ar-Ge alanı olarak değerlendirilmelidir.



Sonuç ve Değerlendirmeler

Hyperloop, manyetik levitasyon ve lineer motor tabanlı çekiş sistemleri uzun yıllardır literatürde tartışılan kavramlar olmakla birlikte, bu teknolojilerin günümüzde yeniden yoğun ilgi görmesinin temel nedeni yalnızca hız hedefleri değildir. Asıl belirleyici unsur, bu sistemleri mümkün kılan alt teknolojilerin eş zamanlı olarak belirli bir teknoloji hazırlık seviyesine ulaşmış olmasıdır. Bu durum, Hyperloop ve maglev benzeri sistemleri uygulanabilir bir mühendislik problemine dönüştürmektedir.

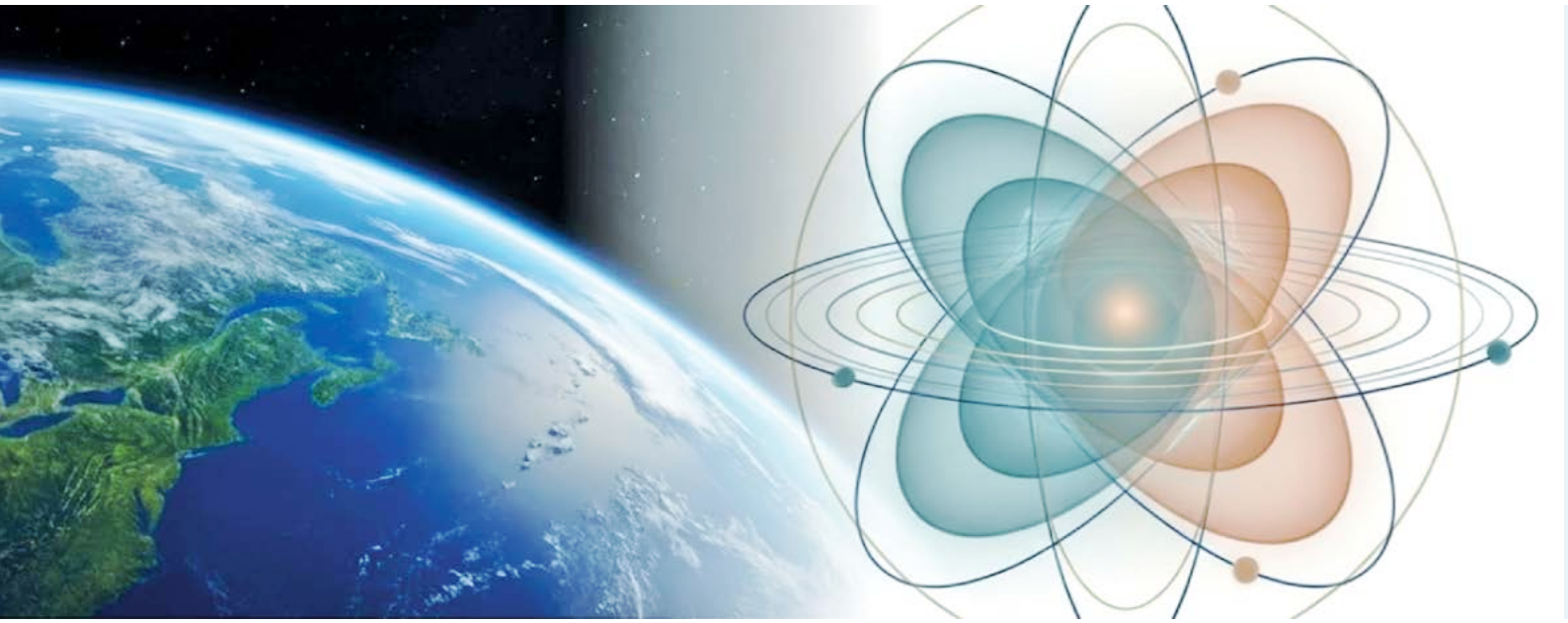
Öncelikle güç elektroniği alanındaki gelişmeler, bu teknolojik zamanlamanın temel taşlarından birini oluşturmaktadır. Yüksek anahtarlama frekanslarına sahip yarı iletkenler (SiC, GaN), daha kompakt, verimli ve hızlı tepki verebilen inverter ve motor sürücü tasarımlarını mümkün kılmıştır. Bu gelişme hem EMS hem de EDS tabanlı levitasyon sistemlerinde gerekli olan hassas manyetik alan kontrolünü ve lineer motorlarda ihtiyaç duyulan yüksek güçlü itkiyi ekonomik ve güvenilir biçimde sağlamayı mümkün hale getirmiştir.

Buna ek olarak EMS sistemlerinin gerektirdiği milimetre altı hassasiyette konum kontrolü ve LSM tabanlı çekiş sistemlerinin ihtiyaç duyduğu senkronizasyon, geçmişte yüksek maliyetli ve sınırlı hesaplama kapasitesi nedeniyle büyük bir engel teşkil etmekteydi. Günümüzde ise yüksek hızlı gömülü işlemciler, gerçek zamanlı işletim sistemleri ve model tabanlı kontrol yaklaşımları, bu sistemlerin kararlı ve emniyetli biçimde işletilmesini mümkün kılmaktadır.

Teknolojik zamanlamayı belirleyen bir diğer önemli unsur ise sistem mühendisliği ve entegrasyon kabiliyetlerindeki artıştır. Hyperloop ve maglev sistemleri, tekil alt sistemlerin değil; sensörler, aktüatörler, güç elektroniği, kontrol yazılımları ve haberleşme altyapılarının sıkı entegrasyonunu gerektirmektedir. Savunma sanayiinde geliştirilen ağ-merkezli sistemler, emniyet-kritik mimariler ve hata toleranslı tasarımlar, bu tür karmaşık sistemlerin yönetilmesi için gerekli metodolojik altyapıyı sağlamaktadır.

Bu bağlamda Hyperloop ve ilişkili maglev teknolojilerinin zamanlaması yalnızca ulaşım ihtiyacına değil, teknolojik eşzamanlılığa dayalı olarak yanıtlanmalıdır. Güç elektroniği, kontrol mühendisliği, elektromanyetik tasarım ve sistem entegrasyonu alanlarında ulaşılan mevcut seviye, bu teknolojileri savunma sanayii açısından da stratejik bir Ar-Ge platformu haline getirmiştir.

KUANTUM SENSÖRLERİ: KONUMLANDIRMA, SEYRÜSEFER VE ZAMANLAMA



Konumlandırma, Seyrüsefer ve Zamanlama (PNT) sistemleri, modern bilişim ve savunma teknolojisinin hayati unsurlarıdır. Günümüzde bu hizmetler büyük ölçüde GPS gibi Küresel Navigasyon Uydu Sistemlerine (GNSS) dayanmaktadır ancak mevcut GNSS, karıştırma (jamming), aldatma (spoofing), çokyolluluk (multipath), solar emisyon gibi sistemsel arızalar ve sinyal tıkanıklığına (signal blockage) karşı savunmasızdır. Kuantum Sensör Teknolojileri (KST), bu sınırlamaları aşarak GNSS'den bağımsız navigasyon yeteneği sunmaktadır. Bu makale, soğuk atom girişimölçeri, optik atomik saatler, kuantum manyetometreler ve gravimetreler olmak üzere temel kuantum sensör teknolojilerinin ilkelerini, mevcut performansını ve pratik uygulamalarını, savunma sanayii uygulamalarını ele almaktadır.

Eray YASAN

Günümüzde konumlandırma, seyrüsefer (navigasyon) ve zamanlama hizmetleri sivil havacılık, kritik altyapı, finans ve askeri operasyonlar dahil olmak üzere geniş uygulama alanlarında temel rol oynamaktadır. Bu hizmetlerin büyük çoğunluğu Küresel Navigasyon Uydu Sistemlerine, özellikle GPS'e bağımlıdır. Ancak GNSS sinyallerinin yer seviyesinde arka plan gürültüsünün altında iletilmesi, sistemin karıştırma ve aldatma saldırılarına karşı savunmasız olmasına yol açmaktadır. Durumun maddi boyutuna örnek olması açısından, İngiltere'de beş günlük bir GNSS kesintisinin 5,2 milyar sterlinlik ekonomik kayba neden olabileceği tahmin edilmektedir. Ek olarak, yeraltı, sualtı ve yoğun kentsel alanlarda GNSS sinyallerine erişimin kısıtlanması veya tamamen kesilmesi operasyonel yetenekleri önemli ölçüde sınırlamaktadır.

Kuantum Sensör Teknolojileri, atomların ve kuantum parçacıklarının temel fiziksel özelliklerinden yararlanarak bu zorlukların üstesinden gelmek için yeni imkanlar sunmaktadır. Bu teknolojiler, klasik sensörlerin ulaşamadığı hassasiyet, uzun vadeli kararlılık ve mutlak ölçüm yetenekleri sayesinde GNSS'e tamamlayıcı veya alternatif çözümler sağlamaktadır.

Kuantum Sensör Teknolojilerinin Fiziksel Temelleri

Kuantum PNT sistemleri, atomların kuantum durumlarını manipüle ederek çevresel etkileşimleri ölçen sensörlere dayanır.

Soğuk Atom Girişimölçeri (Cold Atom Interferometry)

Soğuk atom girişimölçeri (CAI), atomları mutlak sıfıra yakın sıcaklıklara (mikro-Kelvin seviyesi) soğutmak için lazer ışığı ve manyetik alanları kullanan Manyeto-Optik Tuzak (MOT) teknolojisini kullanır. Aşağıda bu işlemin fazları verilmektedir.

Lazer Soğutma Süreci: Atomlara, atomları uygun bir bölgede hapsetmeyi sağlayan lazer ışınları ve manyetik alan gradiyentleri uygulanır. Bu yöntem, atomik bulutun sıcaklığını nanokelvin seviyelere kadar düşürür.



ATALETSEL SAPMANIN ETKİSİ

Madde Dalgası Girişimi: Soğuk atomlar (örneğin rubidyum-87) bir vakum ortamında serbest düşüşe bırakılır. Üç lazer atımı (π/2, π, π/2) uygulanır:

- Birinci π/2 atımı: Atomları uyarılmış ve temel durumun eşit süperpozisyonuna yerleştirir.
- İkinci π atımı: Yörüngeleri tersine çevirir.
- Üçüncü π/2 atımı: Girişim oluşturarak iki iç durumdan hangisinde sonuçlanacağını belirler.

Oluşan girişim deseni, ki bu çıktı araç ivmesine doğrudan bağlıdır, ölçülerek aracın ivmesi veya dönüşü hesaplanır ve aşağıdaki denklemle ifade edilir:

$P = P_0 - A\cos(kT^2 a_m)$

Burada k atom dalgası vektörü, T lazer atımları arasındaki zaman aralığı, am araç ivmesidir.

Performans avantajları şu şekilde listelenebilir:

- Mekanik ivmeölçerlerin aksine sıfır sapma (bias-free) karakteristiği
- Optik jiroskoplardan 300-1000 kat daha yüksek doğruluk
- Uzun vadeli kararlılıkta 10-7 m/s² ivme ölçüm kararlılığı ve 4×10-7 rad/s rotasyon kararlılığı.

Kuantum Saatler (Optical Atomic Clocks)

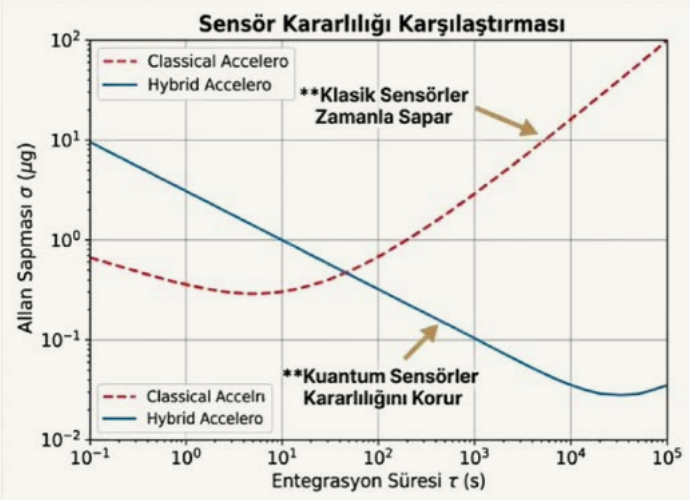
Klasik osilatörlerin yerini atomların aldığı bu saatler, atomun enerji seviyeleri arasındaki geçişlere kilitlenmiş lazer frekansı kullanır. Özellikle optik atomik saat teknolojisiyle mikrodalga saatlerden 100.000 kat daha yüksek frekansta çalışır.

Optik kafes saatleri (Optical Lattice Clocks) Strontium-87 , Ytterbium-171, Mercury-199 gibi atomları kullanır. Uzun entegrasyon sürelerinde 10-18 seviyeleri altında kesirli hata elde eder. İodine-tabanlı sistem deniz ortamlarında 300 pikosaniye/gün altında hata biriktirir.

GNSS kesintilerinde nanosaniye seviyesinde zamansal tutarlılık sağlayarak uzun süre hassas bir şekilde zamanı koruma (holdover) ve GNSS aldatmayı tespit etme yeteneği sağlar. Ayrıca uydu ağlarının senkronizasyonu ve iletişim ağlarının zamanlama koordinasyonu için hassasiyet ve kararlılık noktasından en ideal çözümdür.



ATOMLARIN DALGA ÖZELLİĞİNİ KULLANARAK İVME ÖLÇÜMÜ YAPAN GİRİŞİMÖLÇER PRENSİBİ



KUANTUM SAATLERİN UZUN VADELİ KARARLILIK PERFORMANSI

Kuantum Manyetometreler

Dünya'nın manyetik anomalileriyle (manyetik "parmak izleri") eşleştirme yaparak GNSS'ten bağımsız navigasyon sağlar. Manyetik anomalileri (MagNav) tespit eder. Pasif çalıştığı için tespit edilmesi zordur.

2023 yılında ABD Hava Kuvvetleri, C-17A Globemaster III uçağında gerçek zamanlı MagNav başarıyla göstermiştir.

Kuantum Gravimetreler ve Gradyometreler

İki dikey ofsetli atom girişimölçeri kullanan sistem, yerçekimi ivmesini ve gradyanını mutlak olarak ölçer. Yerçekimi haritalarını (GravNav) kullanarak su altı veya yeraltı gibi görsel referansın olmadığı yerlerde konum doğrulaması yapar.

2022 yılında Birmingham Üniversitesi tarafından geliştirilen kuantum yerçekimi gradyometresi, 0,5 metre uzaysal çözünürlükte 2 metre tüneli 8:1 sinyal-gürültü oranıyla tespit etmiştir. Cihaz, serbest ortamda 466±8 E/√Hz hassasiyet (1 E = 10-9 s^{-2}) ve 20 E istatistiksel belirsizlik göstermiştir.

Harekat Yeteneklerine Etkisi ve Potansiyel Savunma Sanayii Uygulamaları

Yüksek kararlılıklı ama düşük veri hızına sahip kuantum sensörlerin yanında hassas bir seyrüsefer için mekanik sensörlerin büyük bant genişliği ve yüksek dinamik aralığı ile kuantum sensörlerin sapmasız ve yüksek kararlılık özelliklerinin kombinasyonu gereklidir. Bu noktada fiber optik jiroskop gibi klasik sensörlerden rotasyon oranı ölçümü ve ayna oryantasyonunun gerçek zamanlı telafisi (piezoelektrik aşamalarla) uygulanır.



KUANTUM PNT ARAÇ SETİ

Bir simülasyon çalışmasında, manyetometre destekli ataletsel navigasyon, sadece ataletsel seyrüsefer kullanılan duruma kıyasla hata azalmasında 50 kat iyileştirme sağlamıştır. Aşağıdaki şekilde bahsedilen hibrit sistemin nasıl çalıştığı ve çıkan sonuç paylaşılmıştır.

Bu hibridizasyon neticesi klasik ivmeölçerden sapma çıkararak yüksek bant genişliği ve yaklaşık kararlılık sağlama, harita eşleme (map-matching) teknikleriyle ataletsel sürüklenme (drift) düzeltme, gerçek zamanlı titreşim ve dönüş telafisi mümkün olabilmektedir.

Kritik Platformlar İçin Kullanım Senaryoları

Denizaltılar: Nükleer denizaltılar gibi gizliliğin esas olduğu platformlarda, yüzeye çıkmadan veya harici sinyal almadan günlerce yüksek hassasiyetle seyrüsefer yapılmasını sağlar. Kuantum atalet sensörleri (özellikle jiroskoplar) bu ortamlar için idealdir. İngiltere'deki DSTL (Defence Science and Technology Laboratory), ultra soğuk atomlarla kuantum konumlama sistemi geliştirmiş ve doğrulukta 1000 kat artış bildirmiştir. İngiltere'nin ilk ticari kuantum ivmeölçeri, gemi ve denizaltı navigasyonu için geliştirilmektedir.

Güdümlü Mühimmatlar ve İHA'lar: Ataletsel navigasyon, güdümlü silahlar için temel sensör paketidir. Ataletsel navigasyon, güdümlü silahlar için temel sensör paketidir. Kuantum atalet sensörleri, daha düşük boyut, ağırlık, güç ve maliyetle (SWaP-C) askeri sınıf IMU performansını sağlama potansiyeline sahiptir.

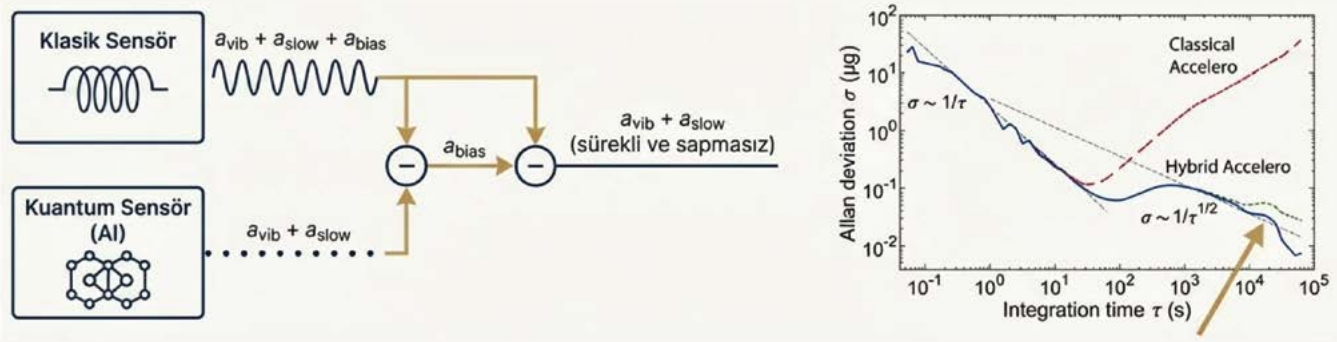
Infleqtion firması, Yapay Zeka destekli kuantum ivmeölçer geliştirmiş ve sensör hacmini klasik teknolojiye kıyasla 10.000 kattan fazla azaltmıştır. Sistem, geleneksel atom tabanlı sensörlere kıyasla 10-100 kat daha büyük titreşim direnci göstermiştir.

Radar ve İletişim: Düşük faz gürültülü kuantum osilatörler, radarların mikro-Doppler imzalarını ayırt etmesini (örneğin döner kanatlı vs. sabit kanatlı İHA ayrımı) kolaylaştırır.

Uzay Seyrüsefer: Avrupa Uzay Ajansı (ESA) HYPER Misyonu çerçevesinde iki atom girişimölçer kullanarak ivme ve dönüş ölçümünü hedeflemektedir. Misyon, Lense-Thirring etkisini test etme ve yerçekimi-elektromagnetizma ilişkisini araştırma amacındadır.

NASA Cold Atom Lab (ISS) 2024 yılında, uzay ortamında ilk uzun süreli atom girişimölçer operasyonunu başarıyla gerçekleştirmiş, maddenin dalga doğasında uzun zamanlı tutarlılık göstermiştir. Çin Uzay İstasyonu Atom Girişimölçeri (CSAI) 2025 yılında ilk operasyonel soğuk atom jiroskop yörüngeye yerleştirilmiş, 50 μrad/s rotasyon çözünürlüğü ve 1.0 μm/s² ivme çözünürlüğü göstermiştir.

GravNav ve MagNav: Görsel referansın olmadığı su ve yer altındaki platformlar için konum sabitleme sağlayan harita eşleme teknikleridir.



KLASİK SENSÖRLERİN HIZINI KUANTUM SENSÖRLERİN KARARLILIĞI İLE BİRLEŞTİREN HİBRİD YAPI VE PERFORMANSI



KUANTUM SENSÖRLER KULLANILARAK GERÇEKLEŞTİRİLEBİLECEK SEYRÜSEFER VE KONUMLAMA UYGULAMALARI

Teknolojik Zorluklar ve Çözüm Yolları

Kuantum sensörlerinin halen laboratuvar ölçekli cihazlar olduğu gerçeğinden hareketle SWaP-C azaltma konusundaki temel zorluklar; ultra yüksek vakum sistemlerinin taşınabilirliği ki soğuk atom girişimölçerleri 10-8 Torr basınçta çalışır, lazer sistemlerinin kompaktlaştırılması ki mevcut sistemler 10-50 W güç tüketir ve kriyojenik sistemlerinin minyatürizasyonu ki soğutma sistemi, sistem kütlesinin ve maliyetinin önemli bir bölümünü oluşturur, olarak göze çarpmaktadır.

Ortam gürültüsü ve sağlamlaştırma konusunda alan denemelerinde karşılaşılan güçlükler ise 10-4 m/s^2 seviyelerinde olan titreşim ve dönüş etkisinin ölçüm kalitesini düşürmesi, ±0,5°C sıcaklık dalgalanmasının optik saat performansını 10-15 seviyelerinde etkileyebilmesi ve 10 nT ve üzeri manyetik alan değişimlerinin gravimetre hassasiyetini sınırlaması olarak özetlenebilir.

Türkiye Perspektifi ve Güncel Çalışmalar (2024-2025)

Aralık 2024'de SSB tarafından başlatılan Kuantum Otağ çalışmaları savunma sanayii ve sivil kuruluşlar, araştırma laboratuvarları ve üniversitelerin katılımı ile çok paydaşlı şekilde yürütülmüş; Aralık 2025'deki kapanış toplantısı ile sonuçlanmıştır. Bu süre zarfında çalışmalar Kuantum Hesaplama, Kuantum Algılama ve Kuantum Haberleşme genel başlıkları altında devam etmiştir. Kuantum navigasyon ve konumlama ile ilgili teknolojiler kuantum sensörlere binaen kuantum algılama başlığı altında kapsanmıştır. Çalışılması planlanan ilgili teknolojiler kuantum manyetometre, kuantum navigasyon sistemleri, kuantum gravimetri, atomik saat olarak belirlenmiştir. Ayrıca kapanış toplantısının dünya genelinde durum tespiti kısmında bu makalede değinilen her konu örnek olarak verilmiştir.

ASELSAN bünyesinde Seyrüsefer ve konum hassasiyeti gerektiren her türlü uygulamada bu teknolojiler geliştirilebilir. Diğer bir ifade ile ataletsel ölçüm birimleri, ivmeölçerler, ataletsel navigasyon sistemlerinin kullanıldığı ve kullanılabileceği sualtı insansız otonom sistemler, insansız Deniz Araçları (İDA), Anti-Dron teknolojileri, Güdümlü Mühimmat, Gimballi elektro-optik sistemler hedef ürünler kümesidir.

TEKNOLOJİ	THS	DURUM
Mikrodalga Atomik Saatler	9	Ticari olarak uygun (24]
Optik Atomik Saatler	6-7	Deniz denemeleri başarılı [9]
Atom Girişimölçer (ivmeölçer)	5-6	Prototipler geliştiriliyor (25]
Kuantum Gravimetreler	5	Alan denemeleri devam (15]
Atomik Manyetometreler	8	Ticari ürünler mevcut [14]

TİCARİ GELİŞMELER VE THS (TRL) DURUMU

Ticarileşme Potansiyeli ve Pazar Dinamikleri

Kuantum sensörler konusunda araştırmalar halen devam etmekte ve Teknoloji Hazırlık Seviyeleri (THS) farklılık göstermektedir. Yukarıdaki tabloda bu durum yansıtılmıştır.

2024-2025 yıllarında dünyadaki önemli gelişmeler:

Optik saatler, deniz ortamında 20 gün boyunca 300 pikosaniye/gün altında hata biriktirecek şekilde çalıştırılmıştır. Kompakt atom girişimölçer, 700 ppm ölçekli faktör kararlılığı göstermiştir. Makine öğrenmesi destekli kuantum ivmeölçer sistemleri, gerçek zamanlı adaptif telafi sağlamaktadır. Çin, uzay ortamında operasyonel soğuk atom jiroskop başarıyla çalıştırmıştır.

Aşağıdaki tabloda dünyada kuantum navigasyon ve konumlama konusunda çalışan önde gelen firmaların ürün, proje ve çıktıları listelenmiştir.

Ürün / Proje / Firma	Teknik çıktılar	Uygulama Senaryoları
Quantum Photonic Imaging Device Government of the United States of America	Dolanık fotonları kullanarak sualtındaki nesneleri tespit etme and Kuzey Kutbu civarı denizlerde arazi haritalama	**Kuzey Kutbu sualtı navigasyon:** hassas ve görünmez navigasyon özellikleri
QuINS Lockheed Martin	Kuantum algılama teknolojisi kullanarak GPS olmayan ortamlarda çok hassas navigasyon ve konumlama	**GPS'siz ortmalarda askeri operasyonlar:** askerin kabiliyetlerini artırma
Quantum Dual Gravimeter OQ-CTRL (Australia)	Kuantum PNT için dünyanın yerçekimindeki çok küçük değişimlerin ölçümleri	**Deniz operasyonları:** özellikle GPS olmayan veya GPS'in güvenilmez olduğu ihtilaflı bölgelerde
Quantum Navigation Sensor Royal Navy	GPS'siz ortamlarda çok hassas ölçümlerin ultra soğuk atomlar kullanılarak yapılması neticesi hassas konumlama	GPS'li veya GPS olmayan ortamlarda donanma operasyonlarında navigasyon kabiliyetlerini artırmak için
Quantum-based PNT System UK Government	Geliştirilmiş navigasyon için kompact Tiqker optik atomik saat ve ultra-sağuk-atom-tabanlı kuantum sistemi	Ticari uçuşlarda GPS sahteciliğine karşı uçuş emniyetini ve güvenliğini sağlamak
Quantum-based APNT AQNAV	AONavis isimli Laree Ouantitative Models (LOMs)'i de kullanan tescilli navigasyon teknolojisi Dünya kabuğunun manyetik alanını ve anomalisini ölçerek çok hassas konumlama	Kesintisiz navigasyon için GPS'in olmadığı veya sahteciliğinin olduğu durumlarda sistemlerin sistemi yaklaşımı ile GPS'i takviye etmek

KUANTUM NAVİGASYON VE KONUMLAMA KONUSUNDA ÇALIŞAN FİRMALARIN ÜRÜN, PROJE VE ÇIKTILARI

Kuantum Konumlama ve Navigasyon için Geleceğe Dair Öngörüler

Bu konuda kısa, orta ve uzun vade öngörüleri ve trendleri aşağıdaki şekilde listelemek faydalı olabilir:

Kısa Vadeli Hedefler (2-3 Yıl)

- Taşınabilir optik saatler: Hacim 20 litreden az, güç tüketimi 100W altında tasarımlar
- Gemi ve denizaltı integrasyonu: Denizaltı navigasyonu için pilot sistemler
- GravNav ve MagNav harita veritabanları: Kıta ölçeğinde jeofizik harita oluşturma

Orta Vadeli Hedefler (3-5 Yıl)

- Entegre QPNT sistemleri: Çok sensörlü füzyon mimarileri
- Uydu ağları: Kuantum zamanlaması ile senkronize takım uyduları
- Hassas gemi sınıfı navigasyon: 1000 NM aralık içinde 100 metre doğruluk

Uzun Vadeli Vizyon (5-10 Yıl)

- Yonga seviyesi kuantum sensörleri: Tüketici uygulamalarına uygun boyut ve maliyet
- GNSS-Serbest Navigasyon: Askeri ve kritik altyapı uygulamaları için operasyonel sistemler
- Kuantum sensörleri ağları: Dağıtılmış sensörler ile geliştirilmiş manyetik ve yerçekimi haritaları

Sonuç ve Değerlendirme

Kuantum Sensör Teknolojileri, konumlandırma, seyrüsefer ve zamanlama alanında devrim potansiyeline sahiptir. Temel güçlü yönleri; atomların doğal özellikleri nedeniyle uzun vadeli kalibrasyon gereksinimi olmayan sensörler noktasından sapmasız ölçüm, harici sinyal bağımlılığı olmaksızın konum, hız ve yönelim ölçümüyle mutlak ölçüm yeteneği, klasik sensörler ile kombinasyon yapıldığında hata azalmasında 50-1000 kat iyileştirmeler, GNSS karıştırma ve aldatmaya tamamen bağışıklı pasif operasyon özellikleri ile dayanıklılık olarak sıralanabilir. Zorluklar ise SWaP-C azaltma, harita verilerinin oluşturulması ve güncellenmesi ve titreşim ortamlarında güvenilir operasyon yapabilme olarak göze çarpmaktadır.

Denizaltı, uzay, GPS olmayan ortamlar ve kritik altyapı koruması gibi uygulamalar için kuantum sensörleri oyun değiştirecektir. Gelecek beş yıl içinde, ilk askeri ve ticari QPNT sistemleri operasyonel hale gelmesi beklenmektedir.



PLATFORMLARDAN KARAR ÜSTÜNLÜĞÜNE: GELECEĞİN HAREKAT ORTAMINI YENİDEN DÜŞÜNMEK



Gelecek Aslında Çoktan Başladı

Son yıllarda yaşanan çatışmalar, savaş alanında hangi silah sisteminin daha etkili olduğundan çok, askeri üstünlüğün hangi unsurlar tarafından belirlendiğini yeniden tartışmaya açmıştır. Dağlık Karabağ Savaşı, Rusya-Ukrayna çatışması, Kızıldeniz'de deniz ticaretine yönelik saldırılar ve İsrail ile İran arasında yaşanan karşılıklı operasyonlar, farklı coğrafyalarda ve farklı koşullarda gerçekleşmiş olsa da ortak bir dönüşüme işaret etmektedir. Bu dönüşüm, yalnızca yeni silahların ortaya çıkmasını değil, harekatın planlanma ve icra edilme biçiminin köklü şekilde değişmesini ifade etmektedir.

Geçmişte savaş alanındaki başarı büyük ölçüde ateş gücü, personel sayısı ve platform üstünlüğüyle açıklanıyordu. Günümüzde ise savaş alanı çok daha karmaşık bir yapıya kavuşmuştur. Uydu sistemleri, insansız hava araçları, radarlar, elektronik istihbarat, açık kaynak verileri ve gerçek zamanlı haberleşme ağları aynı harekatın ayrılmaz parçaları haline gelmiştir. Bu nedenle askeri başarı artık yalnızca güçlü silah sistemlerine sahip olmakla değil; doğru bilgiyi doğru zamanda elde etmek, bunu hızla analiz etmek ve rakibin karar sürecinden daha hızlı hareket edebilmekle ölçülmektedir. Başka bir ifadeyle askeri rekabet, ateş gücü merkezli anlayıştan karar üstünlüğü merkezli bir anlayışa doğru evrilmektedir.

Rusya-Ukrayna Çatışmasının Gösterdiği Dönüşüm

Rusya-Ukrayna çatışması, yüksek yoğunluklu konvansiyonel savaş ile dijital savaş alanının ilk kez bu ölçekte birleştiği örneklerden biri olarak değerlendirilebilir. Çatışmanın ilk döneminde ka-

Dr. Erman TATLIOĞLU | Konuk Yazar

muoyunun ilgisi tanklar, hava savunma sistemleri ve uzun menzilli mühimmatlar üzerinde yoğunlaşmış olsa da zaman içerisinde savaşın seyrini belirleyen unsurun bunlardan çok bilgi akışının yönetimi olduğu görülmüştür. Bugün cephede bir hedef; uydu görüntüleri, insansız hava araçları, elektronik istihbarat sistemleri ve keşif unsurlarından gelen verilerle tespit edilmekte, komuta kontrol merkezlerinde değerlendirildikten sonra dakikalar içerisinde ateş destek unsurlarına aktarılabilmektedir. Hedefin bulunması ile vurulması arasındaki sürenin giderek kısalması, karar alma hızını modern savaşın en kritik değişkenlerinden biri haline getirmiştir.

Çatışmanın ortaya koyduğu bir diğer önemli gerçek ise teknolojik uyum kapasitesidir. Taraflardan biri elektronik karıştırma faaliyetlerini artırdığında diğeri alternatif haberleşme yöntemleri geliştirmekte; uydu sinyallerinin baskılanması halinde farklı seyrüsefer çözümleri devreye alınmakta; klasik insansız sistemlerin etkinliği azaldığında ise fiber optik kontrollü platformlar gibi yeni çözümler sahaya sürülmektedir. Dolayısıyla geleceğin harekat ortamında üstünlük, tek bir teknolojiye sahip olmaktan değil, değişen tehditlere en hızlı uyum sağlayabilmekten geçmektedir. Elektronik spektrumun savaşın merkezine yerleşmesi de bu dönüşümün önemli göstergelerinden biridir. Haberleşmesini sürdürebilen, sensörlerini kesintisiz çalıştırabilen ve rakibin elektronik altyapısını baskılayabilen taraf yalnızca teknik avantaj değil, aynı zamanda operasyonel tempo üstünlüğü de elde etmektedir.

Farklı Coğrafyalar, Ortak Dersler

Rusya-Ukrayna çatışmasının ortaya koyduğu eğilimler, son yıllarda yaşanan diğer krizlerle birlikte değerlendirildiğinde daha net anlaşılmaktadır. Dağlık Karabağ'da sürekli keşif ve hassas taarruz kabiliyetleri birlikte kullanılmışken, Kızıldeniz'de yürütülen deniz güvenliği operasyonları uzay tabanlı gözetleme, hava savunma, elektronik harp ve deniz unsurlarının eş zamanlı koordinasyonunu zorunlu kılmıştır. İsrail ile İran arasında yaşanan karşılıklı saldırılar ise uzun menzilli taarruz kadar erken ihbar radarlarının, çok katmanlı hava savunma sistemlerinin ve gerçek zamanlı komuta kontrol altyapısının da belirleyici olduğunu göstermiştir. Bu örneklerin ortak noktası, belirli bir silah sisteminin üstünlüğünü kanıtlamaları değildir. Asıl dikkat çeken husus, savaş alanında farklı kabiliyetlerin birbirini tamamlayan bir yapı içerisinde kullanılmasının zorunlu hale gelmesidir. Başarı artık yalnızca daha fazla sistem üretmekle değil; eldeki imkanları aynı harekat anlayışı içerisinde en verimli şekilde kullanabilmekle ilişkilidir.

Bu durum savunma sanayiine bakışı da değiştirmektedir. Rekabet yalnızca daha gelişmiş ürünler geliştirmek üzerinden yürümüyor. Aynı zamanda sensörlerden haberleşmeye, elektronik harpten komuta kontrole kadar farklı teknolojileri ortak bir mimari içerisinde buluşturabilme kabiliyeti öne çıkıyor. Önümüzdeki dönemde stratejik üstünlüğü belirleyecek unsur da tam olarak bu olacaktır.





Çok Alanlı Harekatın Yeni Mantığı

Modern savaş alanı; kara, hava, deniz, uzay, siber alan ve elektromanyetik spektrumun aynı anda etkileşim içinde olduğu çok boyutlu bir yapıya dönüşmüştür. Çok alanlı harekat kavramı da bu nedenle yalnızca farklı kuvvetlerin eş zamanlı görev yapmasını ifade etmemektedir. Esas amaç, tüm alanlardan elde edilen verilerin tek bir karar mekanizmasında birleştirilmesi ve bunun operasyonel etkiye dönüştürülmesidir. Radarlar, elektro-optik sensörler, elektronik harp sistemleri, güvenli haberleşme altyapısı, komuta kontrol merkezleri ve yapay zeka destekli karar destek uygulamaları, geleceğin harekat ortamının birbirini tamamlayan bileşenleridir. Bu unsurlardan herhangi birindeki zafiyet, en gelişmiş silah sistemlerinin dahi etkinliğini sınırlandırabilmektedir. Dolayısıyla geleceğin savaşlarında belirleyici olan, en fazla bilgiye sahip olmak değil; bilgiyi en hızlı şekilde anlamlandırıp doğru kararı verebilmek olacaktır. Karar üstünlüğü de tam olarak bu yeteneği ifade etmektedir.

Türkiye Açısından Stratejik Öncelikler

Cumhurbaşkanı Recep Tayyip Erdoğan'ın farklı konuşmalarında vurguladığı "savunma sanayiinde tam bağımsız Türkiye" vizyonu, günümüz güvenlik ortamında yalnızca yerli silah sistemleri geliştirilmesini değil, milli sistem mimarisinin oluşturulmasını da gerekli kılmaktadır. Güncel çatışmalar, bağımsızlığın yalnızca yeni ürünler geliştirmekle değil; bahsi geçtiği üzere radar, elektronik harp, haberleşme, sensör füzyonu, komuta kontrol ve yapay zeka destekli karar sistemlerini ortak bir yapı içerisinde geliştirebilmekle mümkün olduğunu göstermektedir.

Türkiye'nin son yıllarda savunma sanayiinde ulaştığı seviye, bu dönüşüm açısından önemli bir avantaj sağlamaktadır. Önümüzdeki dönemde stratejik rekabet, tek tek sistemlerin sayısından çok bunların ortak bir harekat ekosistemi içerisinde ne kadar etkin kullanılabildiği üzerinden şekillenecektir. Bu nedenle milli teknolojilerin birlikte çalışabilirliğini artıracak, karar alma süreçlerini hızlandıracak ve farklı kuvvetleri aynı operasyonel resimde buluşturacak çözümler, Türkiye'nin gelecekteki savunma kapasitesinin temel belirleyicileri arasında yer alacaktır.

Yeni Dönemin Stratejik Gerçekliği

Son dönemde yaşanan çatışmalar, geleceğin savaşlarının hangi silahlarla yürütüleceğinden çok, hangi anlayışla yönetileceğini göstermektedir. Bilgi üstünlüğü, elektronik spektrumun etkin kullanımı, çok alanlı harekat yaklaşımı ve karar alma hızını artıran sistem mimarileri, askeri başarının temel belirleyicileri haline gelmiştir. Yakın gelecekte askeri rekabet; yalnızca daha gelişmiş platformlar üretme yarışından ibaret olmayacaktır. Asıl rekabet, farklı teknolojileri tek bir operasyonel akıl altında birleştirebilen, değişen tehditlere hızla uyum sağlayabilen ve karar üstünlüğünü sürdürülebilir hale getirebilen ülkeler arasında yaşanacaktır. Geleceğin harekat ortamını şekillendirecek unsur da tam olarak bu stratejik dönüşüm olacaktır.



DENİZDE

GÜVEN VEREN TEKNOLOJİ

Alanında en iyi ürünlerimiz ve oyun değiştirici teknolojilerimizle
tam bağımsızlık için varız!

aselsan



MİMARI SİZ.

TEMİNATI BİZ.



BAĞIŞ İÇİN OKUTUNUZ

TÜRK SİLAHLI KUVVETLERİNİ GÜÇLENDİRME VAKFI

aselsan | TÜRKHAVACILIK UZAYSANAYİİ | ROKETSAN | HAVELSAN | İSBİR | aspilsan

DÖVİZ İLE NAKİT BAĞIŞ HESAPLARI

TÜRKİYE İŞ BANKASI - SWIFT ISBKTRIS - USD
TR85 0006 4000 0024 2383 9100 00

T.C. ZİRAAT BANKASI - SWIFT TCZBTR2A - USD
TR44 0001 0017 4506 0317 4150 52

TÜRKİYE İŞ BANKASI - SWIFT ISBKTRIS - EURO
TR28 0006 4000 0024 2384 0800 00

T.C. ZİRAAT BANKASI - SWIFT TCZBTR2A - EURO
TR81 0001 0017 4506 0317 4150 65

TÜRK LİRASI İLE NAKİT BAĞIŞ HESAPLARI

GARANTİ BANKASI - TL
TR71 0006 2000 1140 0006 2970 83

TÜRKİYE İŞ BANKASI - TL
TR84 0006 4000 0014 2380 8100 00

VAKİF KATILIM BANKASI - TL
TR68 0021 0000 0001 9870 0000 01

HALK BANKASI - TL
TR37 0001 2009 4520 0016 0019 87

T.C. ZİRAAT BANKASI - TL
TR07 0001 0017 4506 0317 4150 39

ZİRAAT KATILIM BANKASI - TL
TR13 0020 9000 0005 7968 0000 01

www.tskgv.org.tr

tskgv_resmi | tskgv_resmi | tskgvresmi | @tsk_gv