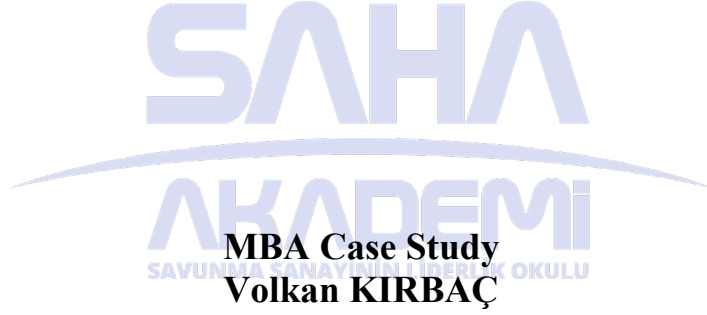


**T.C**  
**SAHA İSTANBUL & TÜBİTAK TÜSSİDE**  
**SAHA AKADEMİ MBA YÖNETİCİ GELİŞTİRME PROGRAMI**

**Türk Savunma Sanayisinde 3D Yazıcı ile  
Katmanlı Üretim Teknolojilerinin Kullanımı**



**Danışman**  
**Dr. Uğur TARÇIN**  
**İstanbul- 2025**

1. SAHA İstanbul Yönetim Kurulu kararıyla, 2024-2025 eğitim döneminden itibaren SAHA AKADEMİ MBA katılımcılarına “Araştırma Projesi” hazırlama yükümlülüğü getirilmiştir. Bu uygulama; katılımcıların sektörel bilgi, stratejik düşünme ve akademik üretkenlik yetkinliklerini geliştirmeyi hedeflerken, savunma sanayii ekosistemine bilimsel katkıyı artırmayı amaçlamaktadır. Bu girişim, Türk savunma sanayii ekosisteminde bilimsel katkıyı artırmaya yönelik önemli bir adımdır.

2. SAHA İstanbul-SAHA AKADEMİ tarafından yayımlanan bu çalışma, ilgili yazar tarafından özgün biçimde hazırlanmış ve beyan edilmiştir. Çalışmada yer alan görüşler yazara ait olup, SAHA İstanbul’un kurumsal görüşünü yansıtmamaktadır. İçerikte sunulan bilgi, yorum ve sonuçların doğruluğu sorumlu yazara aittir. SAHA AKADEMİ; benzerlik oran tespiti yapmıştır.

3. Bu çalışma, [ Volkan KIRBAÇ ] tarafından hazırlanmıştır. Araştırma Projesi danışman tarafından değerlendirilmiş ve sunumu [ 11 Mayıs 2025 ] tarihinde yeterli görülerek kabul edilmiştir.

**Araştırma Projesi Sunum Jüri Üyeleri**

|               |                                                          |                    |
|---------------|----------------------------------------------------------|--------------------|
| <b>Başkan</b> | Dr. Uğur Tarçın (SAHA AKADEMİ Öğr.Görevlisi)             | <i>e-imzalıdır</i> |
| <b>Üye</b>    | Ayşe Çağın (SAHA AKADEMİ Yöneticisi)                     | <i>e-imzalıdır</i> |
| <b>Üye</b>    | Muzaffer Ünsaldı (Kurumsal İletişim ve Marka Yöneticisi) | <i>e-imzalıdır</i> |

(Formun aslı, imzalı olarak ilgili dosyada muhafaza edilmektedir.)

# İÇİNDEKİLER

|                                             | <u>Sayfa No</u> |
|---------------------------------------------|-----------------|
| 1. Vaka Özeti :                             | 3               |
| 2. Sorun Tanımı :                           | 3               |
| 3. Amaç :                                   | 3               |
| 4. Vaka Arka Planı :                        | 4               |
| 5. Analiz Yöntemi :                         | 4               |
| 6. Çözüm Önerileri :                        | 5               |
| 7. Gerçekleştirilen Aşamalar veya Eylemler: | 8               |
| 8. Bulgular :                               | 9               |
| 9. Değerlendirme :                          | 13              |
| 10. Sonuç ve Tavsiyeler :                   | 15              |
| 11. Kaynakça :                              | 16              |

# **TÜRK SAVUNMA SANAYİSİNDE 3D YAZICI İLE KATMANLI ÜRETİM TEKNOLOJİLERİNİN KULLANIMI**

## **(CASE(VAKA) STUDY)**

**Volkan KIRBAÇ**

Deniz Kuvvetleri Komutanlığı

volknkrbac@gmail.com

### **1. Vaka Özeti**

3D yazıcılar ve katmanlı üretim (Additive Manufacturing- AM) teknolojileri, üretim süreçlerine devrim niteliğinde bir yenilik getirmiştir. Geleneksel üretim yöntemlerinin aksine, katmanlı üretim, malzemeyi katmanlar halinde ekleyerek ürünleri şekillendirir. Bu teknolojiler, birçok endüstriyel alanda hızla benimsenmiş ve gelişmeye devam etmektedir. Özellikle savunma sanayi, otomotiv, havacılık, sağlık ve enerji gibi alanlarda 3D yazıcıların potansiyeli giderek daha fazla keşfedilmektedir.

Katmanlı üretim, yaygın bilinen adıyla 3D baskı, dijital bir modelden malzeme katmanlarını üst üste ekleyerek fiziksel bir nesne oluşturma teknolojisidir. Bu yöntem, geleneksel talaşlı imalat veya döküm gibi tekniklerle üretilmesi çok zor olan karmaşık geometrileri ve tek parça (yekpare) tasarımları kolaylıkla üretmeye imkân tanır. Özellikle titanyum gibi işlenmesi güç sıra dışı malzemelerin katmanlı üretimle biçimlendirilmesi mümkündür ve bu sayede savunma ve havacılık sanayinde tasarım ve üretim kabiliyetlerinde devrim niteliğinde gelişmeler sağlanabilir.

### **2. Sorun Tanımı**

Savunma sanayisi deniz, hava ve kara araçları sistemleri için parça üretimi geniş bir yelpazede rol oynar. Tedarik sürelerinin uzun ve malzeme verimliliğinin yeterli olmadığı durumlar mevcuttur. Özellikle değerli ve zor işlenen malzemelerin kullanıldığı havacılık ve savunma uygulamalarında bu yeni teknolojilere ihtiyaç duyulmaktadır.

### **3. Amaç**

Dünyada General Electric, Rolls-Royce, Airbus, Safran gibi şirketler metal 3D yazıcı kullanımına öncülük etmiş ve parçaların üretim maliyetlerini düşürüp üretim hızını artırmışlardır. Savunma sanayinde katmanlı imalat, tasarım kısıtlarını ortadan kaldırarak mühendislerin yenilikçi çözümleri

daha hızlı hayata geçirmesine olanak tanıyarak; bu sayede daha hafif, dayanıklı ve optimize bileşenler üretilmesi amaçlanmaktadır.

#### **4. Vaka Arka Planı**

3D yazıcılar ve katmanlı üretim (Additive Manufacturing) teknolojileri son yıllarda pek çok sektörde devrim etkisi yaratmıştır. Sağlık, otomotiv-havacılık, mimarlık-inşaat, eğitim ve tüketici ürünleri gibi alanlarda 3D baskının yokluğunun olası etkileri analiz edilmiştir. Ardından, endüstriyel tasarım süreçleri, hızlı üretim ve özelleştirmenin eksikliğinin sonuçları ile sürdürülebilirlik açısından durum ele alınmıştır.

#### **5. Analiz Yöntemi**

Türk savunma sanayii, 3D yazıcı ve katmanlı üretim teknolojilerine son yıllarda önemli yatırımlar yapmaktadır. Hem büyük savunma firmaları hem de KOBİ'ler ve start-up'lar bu alandaki fırsatları görüp kaynak ayırmaktadır. Örneğin, TUSAŞ'ın dev 3D yazıcı yatırımı ve ASELSAN-ROKETSAN-TUSAŞ ortak girişimiyle kurulan katmanlı imalat inisiyatifi, sektör genelinde bu teknolojiye stratejik düzeyde önem verildiğini ortaya koymaktadır. Sektörün çatı kuruluşu niteliğindeki SAHA İstanbul kümelenmesi bünyesinde “Malzeme Komitesi” altında katmanlı imalat çalışma grupları oluşturulmuş ve üyeler arası iş birliği teşvik edilmiştir. Bunun bir yansıması olarak, 2022 yılında TUSAŞ tesislerinde “Milli Teknolojiler ve Yeni Yatırımlar” programı kapsamında yeni mühendislik ve üretim tesisleri açılırken, Milli Muharip Uçağının (MMU) ilk üretilen parçaları da sergilenmiştir. Bu ilk parçalar arasında yer alan ana taşıyıcı omurgalar ve basınç duvarı gibi bileşenlerin üretiminde ileri imalat teknikleri kullanıldığı belirtilmiştir. Bu etkinlik, katmanlı üretimin milli projelere entegre edildiğini göstermesi bakımından önemlidir.

Özel sektör tarafında ise, yerli 3D yazıcı geliştirme hamleleri dikkat çekmektedir. Örneğin, bir Türk firması 500 mm çap üzerinde parça üretebilen büyük ölçekli bir SLM (Selective Laser Melting) metal yazıcı makine olan “GOLYAT 500” modelini geliştirmeye başlamıştır. Bu proje ile daha önce yurt dışından temininde lisans kısıtları bulunan büyük boyutlu lazer sinterleme cihazlarının yerli imkânlarla üretimi hedeflenmektedir. Firma yetkilileri, 5 metre uzunluk, 2 metre genişlik ve 4.5 metre yüksekliğe sahip, 11-ton ağırlığında dev bir 3D metal yazıcı prototipi üzerinde çalıştıklarını ve makinenin kritik modüllerini 16 ayda imal ettiklerini aktarmıştır. 1000W

gücünde lazerle başlayıp 4000W seviyesine çıkabilen bu sistem, titanyum, alüminyum, inconel gibi malzemelerle çalışabilecek ve yarım metre çapında, 1 metre yüksekliğinde parçaları tek seferde basabilecektir. Böyle bir yerli makinenin geliştirilmesi, Türkiye’yi bu alanda makine üreticisi konumuna da taşıyarak ithal bağımlılığı öngörülmüştür.

## 6. Çözüm Önerileri

### a. Katmanlı Üretimin Sağladığı Avantajlar

Savunma sanayisinde katmanlı imalatın kullanımının getirdiği başlıca avantajlar şöyle özetlenebilir:

- Maliyet Avantajı: 3D baskı, özellikle düşük-orta adetli üretimlerde ve pahalı malzemelerde ciddi maliyet tasarrufu sağlar. Kalıp veya özel takım gerektirmeden üretim yapılabilirdiği için, yılda 100 adetten az parça üretimi gereken durumlarda kalıp maliyetini tamamen ortadan kaldırır. Bu da birim maliyetleri düşürür. Örneğin, savunma sanayiinde kritik parçalar genellikle titanyum gibi pahalı malzemelerden yapılır ve geleneksel talaşlı imalatla ortaya çıkan yüksek orandaki talaş, israf anlamına gelir. Katmanlı imalatla ise yalnızca ihtiyaç kadar malzeme kullanılır; bir savunma firmasının yılda ürettiği 150 ton titanyum talaşının önemli bir kısmının 3D baskı ile ürün olarak değerlendirilebileceği hesaplanmıştır. Bu sayede hammadde kullanım verimliliği artar ve hurda maliyeti minimize edilir. Ayrıca yurt dışından tedariki masraflı olabilecek yedek parçalar yerli olarak basılabildiğinde, ithalat giderleri de azaltılmış olur.

- Hız ve Zaman Kazanımı: Katmanlı üretim, uzun süren imalat süreçlerini kısaltarak projelerin zaman takvimine büyük katkı yapar. Konvansiyonel yöntemlerle aylar süren imalatlar, 3D yazıcı ile günler veya saatler mertebesine inebilir. Örneğin gelenekselde 7-8 farklı prosten geçerek 3 ayda tamamlanan bir parça, uygun bir metal yazıcıyla 21 saatte basılıp yalnızca 1-2 ardıl işlemle bitirilebilmektedir. Bu, Ar-Ge döngüsünü hızlandırır ve ürünün pazara çıkış süresini kısaltır (time-to-market). Savunma projelerinde, tehditlere karşı hızlı çözüm üretmek kritik olduğundan, gerektiğinde sahada dahi parça basıp değiştirebilmek operasyonel hızı artırır. Örneğin, bir F-16 uçağının bakımında kırılan bir parçayı beklemek yerine üsse kurulu bir 3D yazıcıdan hemen basıp uçağı kısa sürede tekrar göreve döndürme imkanına sahip olmak ciddi bir zaman kazanımıdır.

- Performans ve Verimlilik: Katmanlı imalat, daha hafif ve entegre tasarımlar sayesinde savunma sistemlerinin performansını artırabilir. Parça bütünleştirme yoluyla vidalı bağlantılar veya kaynaklar ortadan kalktığına hem ağırlık azalır hem de bu noktalardaki arıza riskleri düşer. Hafifleyen parçalar, hava platformlarında daha fazla faydalı yük veya menzil demektir; kara araçlarında yakıt tasarrufu ve daha iyi hızlanma sağlar. Örneğin, 3D baskıyla yenilikçi bir iç yapı ile üretilen bir uçak parçasının ağırlığının %10 azaltılması uçağın tüm uçuş performansına olumlu yansıyabilir. BTech Innovation tarafından yapılan çalışmalarda, 15-20 bileşenli bir mekanizmanın tek bir parça olarak basılıp aynı görevi görmesiyle daha verimli, hafif ve az bakım gerektiren sonuçlar elde edilmiştir. Ayrıca katmanlı üretim, soğutma kanalları gibi normalde imkansız iç özellikleri parçalara dahil etme imkanı sunduğundan, örneğin füze motorlarında daha iyi termal performans veya elektronik sistemlerde daha iyi ısı dağılımı sağlayarak sistem performansını yükseltebilir. Kısacası, doğru uygulandığında bu teknolojiyle daha yüksek güçlü, verimli ve güvenilir savunma sistem bileşenleri tasarlamak mümkündür.

- Tasarım Özgürlüğü ve Esneklik: Katmanlı imalatın belki de en önemli katkılarından biri, mühendisler için benzersiz bir tasarım esnekliği sunmasıdır. Geleneksel imalatla düşünölemeyecek formlar, sörf üretilebilir olmadığı için tasarımdan çıkarılırken; 3D yazıcılar ile “imalat odaklı tasarım” kısıtı büyük ölçüde ortadan kalkar. Karmaşık yüzeyler, içi boş ya da örgü yapılar, organik formlar kolayca üretilebilir hale gelir. Savunma Sanayii araştırmacılarının deyimiyle, bu teknoloji sektörde adeta bir “oyun değıştirci”dir; özel imalat gerektiren birçok parçada kalıp ihtiyacını ortadan kaldırarak tasarımcılara yaratıcı özgürlük tanır. Örneğin, geleneksel imalatla mümkün olmadığı için düz yapılmak zorunda kalan bir radar parçası, 3D baskı sayesinde çok daha ideal aerodinamik formda üretilebilir. Bu özgürlük sayesinde savunma sanayiinde daha önce mümkün olmayan inovatif tasarımlar hayata geçmekte, iyileştirmelerin ürüne yansıma süresi kısalmaktadır. Ayrıca, tasarım değışiklikleri durumunda yeni bir kalıp yatırımı gerekmediğinden, ürün geliştirme süreçlerinde değışikliklere hızlı adaptasyon sağlanır. Kısaca katmanlı üretim, savunma sanayiinde tasarım odaklı düşünmenin önünü açarak mühendislik yaratıcılığını üst seviyelere taşımaktadır.

#### **b. Karşılaşılan Zorluklar ve Sınırlamalar**

Katmanlı üretim teknolojisinin yaygınlaşmasıyla birlikte, savunma sanayiinde tam potansiyeline ulaşmasının önünde bazı zorluklar ve kısıtlar da gündeme gelmiştir:

- Malzeme Sınırlamaları: Katmanlı imalatla kullanılabilecek malzemelerin çeşitliliği ve kalitesi, geleneksel imalata kıyasla hala sınırlıdır. Özellikle metal 3D baskıda, uygun toz malzeme temini kritik bir konudur ve her alaşımın toz haliyle istenen özelliklerde basılması mümkün olmayabilir. Bazı özel yüksek sıcaklık süperalaşımlar veya kompozit malzemeler için teknoloji geliştirme çalışmaları sürmektedir. Ayrıca baskı sürecinde malzemenin mikroyapısı, yönlenmesi (anisotropi) gibi konular parça performansını etkileyebilir. Dolayısıyla, geleneksel dövme veya döküm parçaların malzeme karakteristiğini yakalamak için proses optimizasyonuna ihtiyaç duyulur. Bu alanda “toz üretimi, proses parametreleri, ardıl ısıtma işlemleri” gibi birden fazla değişken üzerinde çalışmak gerekir ve teknoloji henüz tam olgunlaşma sürecindedir. Özetle, istenen her malzemeyi 3D yazıcıda basmak ve her seferinde aynı kaliteyi tutturmak, ciddi Ar-Ge gerektiren bir konu olmaya devam etmektedir.

- Sertifikasyon ve Standartlar: Savunma ve havacılıkta kullanılan herhangi bir kritik parçanın belirli sertifikasyon süreçlerinden geçmesi zorunludur. Yeni bir üretim yöntemi olan katmanlı imalatla üretilen parçaların güvenilirliği ve tekrarlanabilirliği konusunda otoriteleri ikna etmek için kapsamlı testler ve belgelendirmeler gerekmektedir. Örneğin, bir uçak motoru türbin parçasını 3D baskıyla üretmek teknik olarak mümkün olsa da, bu parçanın uçuşa elverişli olduğunun kanıtlanması (ömür testleri, yorulma analizleri, malzeme sertifikaları vb.) uzun zaman alabilir. Halihazırda uluslararası standart kuruluşları katmanlı imalatla kalite ve sertifika standartları üzerinde çalışmalar yürütmektedir; ancak süreç dinamik bir şekilde gelişiyor. Savunma Sanayii gibi risklerin yüksek olduğu bir alanda, basılan parçaların öngörülebilir güvenilirlik sunması kritik önem taşır. Bu nedenle her yeni parça için boyutsal hassasiyet, malzeme bütünlüğü (iç boşluklar, porozite) ve yapısal dayanım testlerinin titizlikle yapılması şarttır. Türkiye’de de bu alanda oluşturulacak standartlar ve test altyapıları üzerinde durulmakta, üniversiteler ve araştırma merkezleriyle iş birlikleri geliştirilmektedir. Kısacası, katmanlı üretim parçalarının askeri sertifikasyon süreçleri, geleneksel parçalar kadar kapsamlı ve bazen daha da yenilikçi bir yaklaşım gerektirmektedir.

- Üretim Hacmi ve Seri Üretim Kısıtları: Katmanlı imalat, karmaşık ve düşük adetli üretimlerde çok verimli olmakla birlikte, yüksek adetli seri üretimler söz konusu olduğunda halen geleneksel yöntemlerle rekabet etmekte zorlanır. Bir 3D yazıcının tek bir parçayı üretme süresi, CNC tezgahlarının bir parçayı işleme süresinden daha uzun olabilir; bu da binlerce adet parça

üretiminde sıkıntı yaratır. Örneğin, küçük bir bağlantı parçasını on binlerce adet üretmek gerekiyorsa, 3D yazıcı ile bunu yapmak ekonomik olmayabilir. Klasik imalatla bir kalıpla binlerce parçayı preslemek dakikalar alırken, katmanlı imalatla her birinin tek tek basılması saatler sürebilir. Bu nedenle, seri imalat gerektiren durumlarda katmanlı üretim genellikle tercih edilmez veya birden çok yazıcının paralel kullanımı gerekebilir. Savunma sanayiinde üretim adetleri genelde sivil sektöre göre düşük olsa da (örneğin yılda birkaç yüz parça), bazı mühimmat ve komponentler için yüksek adet gerekebilmektedir. Bu noktalarda, katmanlı imalatın üretim kapasitesi ölçeklendirilmelidir. Ayrıca katmanlı üretim ekipmanlarının ilk yatırım maliyetleri yüksektir; çok sayıda makine yatırımı yapmak bütçe kısıtı olabilir. Birim parça başına düşen üretim maliyeti, ancak belirli bir optimizasyonla ve yeterli üretim hacmiyle azalabilmektedir. Nitekim uzmanlar, katmanlı imalatı seri imalata kıyasla düşük adetli ve yüksek katma değerli işlerde avantajlı görmektedir. Bu denge göz önüne alındığında, savunma sanayii firmaları hangi parçaların 3D baskıya uygun, hangilerinin geleneksel yöntemlerle daha verimli olduğunu dikkatle analiz etmelidir.

• Teknoloji ve İş Gücü Öğrenme Eğrisi: Katmanlı imalat, “dögmeye basılınca çalışan bir makine” olmaktan öte, bütüncül bir yaklaşım gerektirir. Bu alanda deneyimli mühendis ve teknisyen ihtiyacı doğmaktadır. Tasarımdan üretime kadar eklemeli imalata özgü bir bilgi birikimi oluşturmak zaman alır. Makineyi satın almak tek başına çözüm değildir; doğru parça tasarımı (DfAM – Additive Manufacturing için tasarım), en uygun baskı parametrelerinin belirlenmesi, baskı sonrası ısıt işlemleri ve yüzey işlemleri gibi bir dizi konuda uzmanlık kazanmak gerekir. Türkiye’de bu alanda yetişmiş insan kaynağı gelişmekle birlikte, henüz sınırlı sayıda uzman mevcuttur. Şirketler bu nedenle üniversitelerle ortak projeler yapmakta, çalışanlarını yurt dışındaki eğitim programlarına göndermektedir. Ayrıca teknoloji hızla güncellendiği için, mevcut makinelerin yazılım ve donanım güncellemeleri ile hep en iyi uygulamaların takip edilmesi önemlidir. Bu noktada, savunma şirketlerinin bu öğrenme eğrisini hızla tırmanmaları ve dünyadaki gelişmeleri yakından izlemeleri stratejik bir gereklilik olarak ortaya çıkmaktadır.

## **7. Gerçekleştirilen Aşamalar veya Eylemler**

Katmanlı üretim teknolojisinin önümüzdeki yıllarda Türk savunma sanayisinde çok daha yaygın ve kritik bir rol oynaması beklenmektedir. Şirketlerin hâlihazırda yürüttüğü projeler olgunlaştıkça, 3D baskıyla yapılmış parçaların gerçek platformlarda hizmete girmesi gerçekleşecektir. Örneğin,

Milli Muharip Uçak (MMU) projesinde 3D yazıcıyla üretilecek ilk parçalar 2023-2024 itibarıyla ortaya çıkmaya başlamıştır ve uçağın titanyum parçalarının hatırı sayılır bir bölümü katmanlı imalatla karşılanacaktır. Bunun devamında, Özgün Helikopter, Hürjet ve insansız hava aracı projeleri gibi pek çok platformda tasarım süreçleriyle entegre katmanlı imalat kullanılacağı öngörülmektedir. Yani, gelecekte bir uçağın yapısal parçaları, motor komponentleri veya füze parçaları doğrudan dijital olarak tasarlanıp yazıcıdan çıkacak, prototipten seri üretime hızla geçilecektir.

Bu teknolojinin Türkiye açısından stratejik önemi son derece yüksektir. Katmanlı imalat, savunma sanayiinde dışa bağımlılığı azaltan bir etken olarak görülmektedir. İleri düzey bir yedek parça veya kritik bir komponent yurt dışından temin edilemiyorsa (ambargo, kısıtlama vb. sebeplerle), katmanlı imalat milli imkanlarla bu açığı kapatabilir. ASELSAN yetkilileri, 3 boyutlu yazıcıların geliştirilip üretilmesinin ülkeye önemli bir kabiliyet kazandıracığını belirtirken, SSB de 2021-2025 Stratejik Planı'nda uçak, helikopter, füze, İHA, uydu ve jet motoru gibi projelerin kritik ve maliyetli metal parçalarında katmanlı üretimin kullanılmasının performans, maliyet ve rekabet avantajı sağlayacağını vurgulamıştır. Bu da gösteriyor ki, önümüzdeki dönemde savunma projelerinde katmanlı imalat kullanımı kurumsal bir hedef haline gelmiştir.

Geleceğe dönük bir projeksiyon olarak, saha ortamında üretim konsepti gelişebilir. TSK envanterindeki gemilerde veya bakım üslerinde taşınabilir metal 3D yazıcı ünitelerinin bulunması, muharebe veya görev sırasında acil parça üretimine imkan tanıyabilir. Bu tür uygulamalar dünya ordularında test edilmeye başlanmıştır ve Türkiye de bu trende uyum sağlayacaktır. Diğer yandan, yerli teknoloji geliştirme açısından da katmanlı imalat kritik bir alan olacaktır. ASELSAN'ın elektron tabancası geliştirmesi gibi, Türkiye zamanla kendi endüstriyel metal yazıcılarını (toz yataklı lazer eritimi, elektron ışınli imalat vb. teknolojilerde) tasarlayıp üretebilir duruma gelmeyi hedeflemektedir. Bu sayede hem yurt içi ihtiyacı karşılamak hem de dost ülkelere bu sistemleri ihraç etmek mümkün olabilecektir.

## **8. Bulgular**

3D yazıcı teknolojileri, Türk savunma sanayiinin pek çok farklı dalında kullanım alanı bulmaktadır. İnsansız hava araçlarından roket motorlarına, zırhlı araçlardan deniz platformlarına kadar geniş bir yelpazede katmanlı üretimin sağladığı avantajlar değerlendirilmektedir. Aşağıda bu başlıca alanlar ve örnek uygulamalar ele alınmıştır.

#### **a. Havacılık ve İHA/SİHA Sistemleri;**

Havacılık sektörü, 3D yazıcıların en yoğun fayda sağladığı alanlardan biridir. Uçak ve insansız hava aracı (İHA) üreticileri, bu teknoloji sayesinde hem prototip geliştirme aşamalarını hızlandırmakta hem de uçan platformların kritik parçalarını optimize etmektedir. Türk Havacılık ve Uzay Sanayii (TUSAŞ), geliştirdiği MMU projesinde 3D baskıdan geniş ölçekte faydalanmak üzere dünyanın en büyük metal elektron ışını 3D yazıcı sistemini tedarik etmiştir. Sciaky firması üretimi bu dev makine, 6 metre uzunluğunda titanyum uçak yapısal parçalarını katmanlı olarak üretebilmektedir ve doğrudan MMU'nun parça imalatında kullanılacaktır. Nitekim MMU projesinde bol miktarda titanyum alaşım parça kullanılacağı, TUSAŞ'ın bu büyük parçaların bazılarını vakum altında 3D yazıcıyla imal edeceği belirtilmiştir. Bu sayede, Türkiye beşinci nesil bir savaş uçağının gövde parçalarını dahi kendi tesislerinde üretebilme kabiliyeti kazanmaktadır. İnsansız hava araçları konusunda da 3D yazıcılar önemli bir rol oynamaktadır. Örneğin, Türkiye'nin öncü SİHA (Silahlı İHA) üreticileri, platformlarının bazı parçalarını hızlı prototipleme ile geliştirip test etmektedir. İHA/SİHA'ların gövde bağlantı elemanları, motor parçaları veya faydalı yük aparatları, katmanlı üretimle geleneksel yöntemlere kıyasla çok daha kısa sürede üretilmektedir. Bu alandaki projelerde kritik ve maliyetli metal parçaların 3D yazıcıyla üretilmesi; platformlara ağırlık tasarrufu, performans artışı ve düşük maliyet gibi getiriler sağlamaktadır. Örneğin, Türk mühendisleri bir İHA motoru parçasını 3D baskı ile farklı bir tasarımda üretilen %5 hafifletirken, parçanın işlevini iyileştirerek motordan alınan gücü %10 artırmayı başarmıştır. Baykar gibi firmalar da yeni geliştirdikleri İHA sistemlerinin prototiplerini (örneğin insansız savaş uçağı Kızılelma'nın küçük ölçekli modellerini) 3D baskıyla üreterek tasarım doğrulama yapmaktadır. Havacılık alanında ASELSAN gibi şirketler de aviyonik cihazların özel muhafaza ve bileşenlerini katmanlı üretimle imal ederek hem hızlı prototip geliştirmekte hem de ürünlerin ağırlık ve boyut optimizasyonunu sağlamaktadır. Bu örnekler, 3D yazıcıların Türk havacılık ve İHA projelerinde tasarımdan üretime birçok aşamada fark yarattığını göstermektedir.

## **b. Füze ve Roket Sistemleri**

Alloya Teknoloji tarafından geliştirilen robotik metal 3D yazıcı ile büyük boyutlu bir roket motoru parçasının (lüle/nozul) katmanlı üretimi. Bu teknik, geleneksel imalatı zor olan roket bileşenlerini daha hızlı ve az malzeme israfıyla üretmeye imkan tanır.

Füze ve roket sistemleri, katmanlı üretim teknolojisinin sağladığı katma değerin belirgin hale geldiği bir diğer kritik alandır. Roket motorları ve füzelerin kompleks geometrili parçaları (yanma odaları, nozullar, kanatçık yapıları vb.), 3D yazıcılar sayesinde tek parça halinde ve istenen malzemeden üretilabilmektedir. Özellikle yüksek sıcaklığa dayanıklı, karmaşık iç kanallara sahip roket lüleleri (itki nozulları) bu yöntemle başarıyla imal edilmektedir. Örneğin, Alloya Teknoloji firması geliştirdiği büyük boyutlu metal 3D yazıcı ile müşterilerinin talep ettiği titanyum, nikel alaşımı gibi zorlu malzemelerden roket lülesi üretimi gerçekleştirmektedir. Roketin en altında yer alan ve sıcak gazların çıkışını sağlayan bu kritik parça, geleneksel yöntemlerle üretildiğinde hem ham madde temini hem de işlenmesi açısından oldukça zaman alıcı ve maliyetli olabilmektedir. Katmanlı imalat yöntemiyle ise süreç önemli ölçüde hızlanmakta ve malzeme israfı en aza indirilmektedir. Nitekim söz konusu firma, gelenekselde 3 ay süren ve birden fazla prosese ihtiyaç duyan bir roket parçasını 3D yazıcıyla 3 günde ürettiklerini, böylece yedi ayrı imalat aşamasını bir iki aşamada tamamladıklarını rapor etmiştir. Bu, füze sistemlerinde hızlı iterasyon ve üretim imkânı anlamına gelir.

Türkiye'nin önde gelen roket ve füze üreticisi ROKETSAN da 3D yazıcı teknolojisine yatırım yapan kuruluşlar arasındadır. ROKETSAN, ASELSAN ile birlikte savunma ve havacılık sektöründe metal katmanlı imalatın yaygınlaştırılması amacıyla bir teknoloji şirketi ile iş birliğine giderek bünyesine bu kabiliyeti dahil etme kararı almıştır. Firmanın, hem yeni nesil roket tasarımlarında hem de mevcut sistemlerin iyileştirilmesinde katmanlı üretimi kullandığı bilinmektedir. Özellikle roket motorlarında, iç yapıyı tek parça basarak sızdırmazlık ve dayanım avantajı elde etmek, soğutma kanallarını entegre şekilde üretmek gibi yenilikler bu teknoloji ile mümkün hale gelmektedir. TÜBİTAK SAGE gibi kuruluşlar da geliştirdikleri füze ve mühimmat sistemlerinin prototip parçalarını 3B baskı ile üreterek test etmektedir. Sonuç olarak, füze/roket alanında 3D yazıcılar imalat sürelerini kısaltmak, malzeme verimliliğini yükseltmek ve özgün tasarımları gerçeğe dönüştürmek için kritik bir araç haline gelmiştir.

### **c. Zırhlı Kara Araçları ve Silah Sistemleri**

Kara platformları (tanklar, zırhlı personel taşıyıcılar, topçu sistemleri vb.), geleneksel olarak sağlam ve ağır yapıdadır; ancak günümüzde bu araçlarda da ağırlık optimizasyonu ve modülerlik önem kazanmaktadır. 3D yazıcı teknolojileri, zırhlı araç üreticilerine hem hızlı tasarım değişikliği yapma hem de özel parçaları düşük adetlerde ekonomik olarak üretme imkanı sunar. Örneğin FNSS, BMC, Otocar gibi Türk zırhlı araç üreticileri, araçlarının prototip geliştirme safhasında 3D baskıdan faydalanarak yeni bir zırh parçasını veya iç mekanizmayı hızla üretebilir ve araca entegre ederek test edebilir. Bu sayede, klasik yöntemlerle haftalar alacak üretimler günler içinde tamamlanarak tasarım döngüsü hızlanır. Katmanlı üretim, yedek parça temininde de kara araçlarına avantaj sağlar: Bir zırhlı aracın arazi şartlarında kırılan bir parçanın yenisi, uygun bir seyyar 3D yazıcı ile sahada üretilebilir. Örneğin, paletli bir aracın dişlisi ya da bir taret mekanizmasının küçük bir parçası cephede basılarak arıza hızla giderilebilir (tıpkı bir silahta kırılan tetik parçasının yerinde basılması örneğinde olduğu gibi). Ayrıca, düşük adetli üretim gerektiren özel parçalar (özelleştirilmiş montaj aparatlar, kişiye özel ekipman tutucuları vb.) 3D yazıcılarla maliyet etkin şekilde karşılanabilir. Silah sistemleri tarafında da, ASELSAN gibi firmalar geliştirdikleri elektro-optik cihazların ve silah platformlarının gövde, kapak gibi bileşenlerini prototiplemede katmanlı üretime başvurmaktadır. MKE A.Ş. de hafif silah sistemleri için polimer ve metal parça prototiplerini 3D baskıyla deneyerek ürün geliştirme süreçlerini hızlandırmaktadır. Dolayısıyla, kara araçları ve silah sistemlerinde 3D yazıcı kullanımı henüz havacılık kadar görünür olmasa da, prototipleme, özelleştirme ve sahada bakım konularında önemli bir potansiyel sunmaktadır. Bu teknolojinin kara platformlarında yaygınlaşmasıyla, daha hafif ama aynı koruma seviyesine sahip zırh yapıları veya karmaşık şekilli parça tasarımları (örneğin ısı dağıtıcı petek yapılar) araca entegre edilebilecektir. Özetle, zırhlı araç sektöründe katmanlı üretim, gelecekte hem üretim verimliliğini hem de araçların performansını artıracak bir kabiliyet olarak değerlendirilmektedir.

### **d. Deniz ve Denizaltı Platformları**

Denizcilik alanında, özellikle denizaltı ve savaş gemisi platformlarında 3D baskı teknolojisinin kullanımı büyük fırsatlar sunmaktadır. Büyük ebatlı ve karmaşık geometriye sahip gemi parçalarının (örneğin pervaneler, pompa gövdeleri, vanalar) katmanlı üretimle imal edilebilmesi, bakım ve tedarik süreçlerinde çığır açabilir. Türkiye’de 2016 yılından itibaren savunma

firmalarının dikkatini çeken büyük ölçekli metal yazıcılar sayesinde, denizaltı pervaneleri gibi stratejik parçaların yerli üretilebileceği vurgulanmıştır. Gelenekselde döküm ve talaşlı imalatla yapılabilen bu tip pervane ve pervane milleri, 3D yazıcı ile daha kısa sürede ve malzeme israfı olmadan üretilir. Örneğin, yüksek dayanımlı bir denizaltı pervanesinin katmanlı üretimle prototipi yapılarak akustik ve performans testleri daha hızlı gerçekleştirilebilir.

Deniz platformlarında 3D yazıcıların getirisi sadece üretimle sınırlı değildir; lojistik açıdan da büyük avantaj sağlar. Bir savaş gemisine entegre edilecek 3D yazıcı ile geminin uzak görevlerde ihtiyaç duyacağı yedek parçalar, gemi üzerinde anında basılıp kullanılabilir. Bu durum, özellikle denizaltılar gibi aylarca limana uğramadan görev yapan platformlar için kritik önemdedir. Örneğin, bir denizaltının kritik bir valf parçasında arıza meydana geldiğinde, su üstüne çıkmadan kendi bünyesindeki 3D yazıcıyla o parçayı üreterek değiştirebilmesi, göreve devamlılık sağlar. ABD Donanması'nın Oak Ridge Ulusal Laboratuvarı ile iş birliği yaparak ilk 3D baskılı denizaltı gövdesini üretme denemeleri gerçekleştirmesi, bu teknolojinin denizcilik sektöründe de geleceğin standardı olabileceğine işaret etmektedir. Türk Deniz Kuvvetleri de benzer şekilde, ileride gemilerde eklenecek katmanlı üretim kabiliyetleriyle bakım ve onarım süreçlerinde dışa bağımlılığı azaltmayı hedefleyebilir. Milli denizaltı ve fırkateyn projelerinde, bazı özel bağlantı parçalarının veya kompleks boru sistemlerinin 3D baskı prototipleri yapılmakta ve uygun malzemeyle nihai üretime geçilmektedir. Sonuç olarak, deniz ve denizaltı platformlarında katmanlı üretim, hem devasa parçaların yerleştirilmesi hem de seyyar üretim yeteneği açısından stratejik bir teknoloji olarak konumlanmaktadır.

## 9. Değerlendirme

Türk savunma sanayiinde pek çok firma, 3D yazıcı ve katmanlı imalat teknolojilerini aktif şekilde kullanmaya veya bu alana yatırım yapmaya başlamıştır. Aşağıda bazı önemli şirketlerin bu teknolojiyi nasıl uyguladığına dair somut örnekler verilmiştir:

- TUSAŞ (Türk Havacılık ve Uzay Sanayii A.Ş.) – Milli Muharip Uçak (MMU) projesinde katmanlı imalatı yoğun olarak kullanmaktadır. TUSAŞ, Sciaky firmasından tedarik ettiği dünya çapında en büyük elektron ışınli metal 3D yazıcı ile MMU'nun 5×7 metre boyutlarındaki titanyum gövde parçalarını üretmeyi planlamaktadır. Ayrıca Hürjet eğitim uçağı, ANKA ve AKSUNGUR İHA gibi projelerde de prototip parçaların 3D baskı ile üretilmesi söz konusudur.

- Baykar Teknoloji – İnsansız hava aracı ve insansız savaş uçağı (MİUS) geliştiren Baykar, tasarım sürecinde hızlı prototipleme için 3D yazıcılardan yararlanıyor. Örneğin, Bayraktar TB2 ve Akıncı gibi İHA sistemlerinin gövde ve faydalı yük entegrasyonuna ait parçaları önce 3D baskıyla üretilip test edildi. Baykar’ın insansız savaş uçağı Kızılelma’nın ölçekli modellerinin 3D baskı ile hazırlanması, firmanın konsept doğrulama ve aerodinamik testler için katmanlı üretimi kullandığına bir örnektir. Seri üretimde de, düşük hacimli veya kompleks komponentlerin 3D baskı ile üretilmesi gündemdedir.

- ASELSAN – Türkiye’nin lider savunma elektroniğı şirketi ASELSAN, ürün geliştirme ve üretim hatlarında 3D yazıcıları entegre etme çalışmalarına başlamıştır. ASELSAN, TUSAŞ ve ROKETSAN ile birlikte metal 3D yazıcı teknolojisine yatırım yapma kararı alarak bu alanda bir girişim (BTech Innovation) ile iş birliğine gitmiştir. Şirket bünyesinde, cihaz muhafazaları, soğutucu bloklar ve anten parçaları gibi karmaşık biçimli komponentler 3D baskıyla denenmekte; böylece tasarım iterasyonları hızlıca gerçekleştirilmektedir. ASELSAN ayrıca, kendi ihtiyaç duyduğu bazı üretim aparatı ve fiktürleri de katmanlı imalatla üreterek iç süreçlerini hızlandırmaktadır.

- ROKETSAN – Roket ve füze üreticisi Roketsan, katmanlı üretimi özellikle roket motoru ve yapısal parçaların imalatında kullanmaya başlamıştır. Şirket, büyük boyutlu metal parçaların üretimi ve hızlı prototipleme için 3D yazıcı teknolojisine yatırım yapmış; ASELSAN ve TUSAŞ ile birlikte bu kabiliyetin yerleştirilmesi adına çalışmaktadır. Roketsan bünyesinde, örneğin orta menzilli bir füzenin egzoz parçası veya roket harp başlığı gövdesi gibi parçalar 3D baskıyla prototip lenip test edilmiştir. Ayrıca, geleneksel yöntemlerle üretimi çok zor olan bir roket lülesi parçası, katmanlı imalat ile başarıyla üretilip atışlı testlerde kullanılmıştır. Bu deneyimler sonucunda Roketsan, gelecekte daha fazla füze bileşenini bu yöntemle üretmeyi hedeflemektedir.

- Alloya Teknoloji – 2020 yılında kurulan bu yerli girişim, savunma ve havacılık sanayiine yönelik ticari parça üretim hizmeti veren özgün bir 3D metal yazıcı geliştirmiştir. Alloya’nın robotik kol tabanlı eklemeli imalat sistemi, 1×1×1.5 metre boyutlarına kadar metal parçaları basabilmektedir. Şirket, titanyum, nikel ve paslanmaz çelik alaşımlarında büyük boyutlu kritik parçalar üreterek savunma sanayiine tedarikte bulunmaktadır. Özellikle roket motoru parçaları, uçak yapısal elemanları gibi ürünleri müşterilerine sunan Alloya, bir parçanın üretim süresini

aylardan günlere indiren başarılı örnekler gerçekleştirmiştir. Bu firma, savunma sanayiinde katmanlı imalatın ticarileşmesine ve yaygınlaşmasına önemli katkı sağlamaktadır.

## **10. Sonuç ve Tavsiyeler**

Sonuç olarak, Türk savunma sanayiinde 3D yazıcı ve katmanlı üretim teknolojileri konusunda hızlı bir ilerleme ve yaygınlaşma söz konusudur. Hem mevcut projelere entegre edilen somut uygulamalar, hem de geleceğe dönük yatırımlar ülkemizin bu kritik imalat teknolojisinde dışa bağımlılığı azaltıp küresel ölçekte rekabet gücünü artıracaklarını göstermektedir. Katmanlı üretimin sunduğu esneklik, hız ve verimlilik avantajları sayesinde Türkiye, savunma sanayiinde daha yenilikçi, maliyet-etkin ve özgün ürünler geliştirme yolunda önemli bir enstrümana sahip olmuştur. Bu alandaki gelişmeler, önümüzdeki dönemde milli savunma projelerinin başarısında ve sektörün ihracat potansiyelinin artmasında anahtar rol oynamaya devam edecektir.



## 11. Kaynakça

1. Gibson, I., Rosen, D., & Stucker, B. (2015). Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing (2nd ed.). Springer.  
→ Katmanlı üretim teknolojilerinin genel tanımı ve sınıflandırması.
2. TÜBİTAK MAM Malzeme Enstitüsü – Katmanlı Üretim ve 3D Yazıcılar Teknik Raporları (2020). Türkiye’deki malzeme ve savunma sanayi uygulamaları hakkında teknik bilgiler.
3. ASELSAN 2022 Faaliyet Raporu  
→ Savunma sanayinde yenilikçi üretim teknolojilerinin (3D yazıcılar dahil) kullanımına dair kurumsal bilgiler. Erişim: [www.aselsan.com.tr](http://www.aselsan.com.tr)
4. Yılmaz, M., & Kurtuluş, M. (2021). “Katmanlı Üretim Teknolojilerinin Savunma Sanayisindeki Yeri ve Önemi”, Savunma Teknolojileri Dergisi (SAVTEK), 6(1), 45-58.  
→ Türkiye’de savunma sanayi firmalarının 3D yazıcı uygulamaları.
5. Küçük, M., & Güner, E. (2020). “Metal Katmanlı Üretim Yöntemlerinin Savunma Sanayinde Kullanımı”, Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi, 18(2), 34-42.
6. EOS GmbH – Additive Manufacturing for Aerospace and Defense (White Paper, 2021).  
→ DMLS ve SLM teknolojilerinin savunma sanayi özelindeki uygulama örnekleri.
7. ROKETSAN Teknoloji Vizyonu – 3D yazıcılarla füze sistemleri için parça üretimi hakkında teknik sunumlar (2023).
8. International Journal of Advanced Manufacturing Technology – Sayı: 112, 2021.  
→ “Additive Manufacturing Applications in Defense: Opportunities and Challenges” başlıklı makale.
9. Anadolu Ajansı. (2017, Temmuz 5). Savunmanın devlerinde ‘metal yazıcı’ devrimi. Erişim adresi: <https://www.aa.com.tr/tr/ekonomi/savunmanin-devlerinde-metal-yazici-devrimi/877279>
10. Anadolu Ajansı. (2015, Ocak 3). Geleceğin silahlarını tasarlıyorlar. Erişim adresi: <https://www.aa.com.tr/tr/bilim-teknoloji/gelecegin-silahlarini-tasarliyorlar/526988>
11. Anadolu Ajansı. (2019, Nisan 6). Milli teknoloji hamlesi için 342 firmalı dev iş birliği. Erişim adresi: <https://www.aa.com.tr/tr/ekonomi/milli-teknoloji-hamlesi-icin-342-firmali-dev-is-birligi/1371170>
12. Anadolu Ajansı. (2022, Şubat 20). Otomotiv devlerine üretim yapan Sivas’taki fabrika, medikal implant ihracatına da başladı. Erişim adresi: <https://www.aa.com.tr/tr/ekonomi/otomotiv-devlerine-uretim-yapan-sivastaki-fabrika-medikal-implant-ihracatina-da-basladi/2509646>
13. Anadolu Ajansı. (2016, Eylül 6). DowAksa’nın yatırımı 2023’e kadar 195 bin istihdam sağlayacak. Erişim adresi: <https://www.aa.com.tr/tr/isdunyasi/finans/dowaksanin-yatirimi-2023e-kadar-195-bin-istihdam-saglayacak/644451>