

# Eklemeli İmalat Teknikleri ve Gemi İnşaatı Endüstrisindeki Potansiyeli

Ali Alıcıoğlu <sup>1</sup>, M. Erden Yıldızdağ <sup>2</sup>

<sup>1,2</sup> Gemi İnşaatı ve Deniz Bilimleri Fakültesi, İstanbul Teknik Üniversitesi,  
Ayazaga Kampüsü, Maslak-Sarıyer, İstanbul, Türkiye

<sup>1</sup> alialicioglu@hotmail.com, ORCID: 0000-0002-4237-1454

<sup>2</sup> (sorumlu yazar), yildizdag@itu.edu.tr, 0000-0003-3041-133X

## ÖZET

Eklemeli imalat teknikleri, geleneksel imalat yöntemlerinden olan aşındırılmalı ve şekil vermeli üretim yöntemlerinden farklı olarak yapı malzemesinin üst üste katmanlar şeklinde dizilmesiyle yapılan üretim şeklidir. Özellikle, son 20 yılda büyük gelişmeler yaşanan eklemeli imalat tipleri kendi içinde, International Organization for Standardization (ISO) ve American Society for Testing and Materials (ASTM) standartlarına göre, üretim şekli ve kullanılan malzemelere bağlı olarak yedi ana alt sınıfa ayrılmaktadır. Tüm bu yöntemlerin bilinen en karakteristik özelliği, kompleks geometriye sahip parçaların daha hızlı ve düşük maliyetlerle üretilebilmesidir. Üretime kattığı yenilikçi bakış açısına bağlı olarak, ürünlerin dizaynlarına uygulanacak topoloji optimizasyonu ile birlikte daha az bileşenli, daha karmaşık ve daha hafif parçaların aynı dayanımda üretilmesinin yolunu açmaktadır. Havacılık, sağlık ve otomotiv gibi sektörlerde yoğun şekilde kullanılan bu imalat yönteminden gemi inşaatı endüstrisinin de faydalanması kaçınılmazdır. Loydların ve tersanelerin işbirliği ile son 10 sen içerisinde yapılan önemli fizibilite çalışmaları bulunmakta, buna ek olarak çeşitli donanmalar ve araştırma kuruluşları tarafından aktif olarak kullanılmaktadır. Yapılan bu çalışmanın amacı eklemeli imalat tekniklerinin gemi inşaatı endüstrisindeki potansiyelini incelemektir. Bu inceleme yapılırken hem akademik hem de sanayi alanındaki potansiyeli; literatür araştırması, sanayi ve akademik alandan uzman görüşlerinin alınması ve akademik alan için yapılan fizibilite çalışmasıyla incelenmiştir. Akademik alanda araştırmalarda kullanılan pervaneler, gemi modelleri ve dümen yapılarının üretim potansiyeli incelenmiştir. Sanayi alanında kullanılan parçalar ise konstrüksiyon ve donatım parçaları olarak iki alt başlıkta incelenmiştir. Yapılan inceleme sonucunda akademik alanda kullanılacak ürünlerin satın alınması yerine yazıcılarla üretilmesiyle daha düşük maliyetli ürünler elde edilebileceği görülmüştür. Sanayi alanında ise donatım parçaları ve bazı konstrüksiyon ürünlerinde kullanılmasının hız ve maliyet açısından avantaj sağlayabileceği gösterilmiştir. Son olarak, eklemeli imalat yöntemlerinin en temel sorunlarından olan sertifikalandırma konusuyla ilgili olarak çeşitli klas kuruluşları ve standartlardan genel hatlarıyla bahsedilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Eklemeli imalat, 3 boyutlu baskı, gemi inşaatı, deniz araçları , dolgu yoğunluğu.

**Makale geçmişi:** Geliş 23/05/2022 – Kabul 16/06/2022

<https://doi.org/10.54926/gdt.1119936>

# Additive Manufacturing Techniques and Their Potential in the Shipbuilding Industry

Ali Aliciođlu<sup>1</sup>, M. Erden Yıldızdağ<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup> Istanbul Technical University Department of Naval Architecture and Marine Engineering,  
Ayazaga Campus, Maslak-Sariyer, Istanbul, Türkiye

<sup>1</sup>alialicioglu@hotmail.com, ORCID: 0000-0002-4237-1454

<sup>2</sup> (corresponding author), yildizdag@itu.edu.tr, 0000-0003-3041-133X

## ABSTRACT

Additive manufacturing (AM) techniques, unlike traditional manufacturing methods with abrasion and shaping, are the production methods made by stacking the building material in layers on top of each other. In particular, additive manufacturing types, which have experienced great developments in the last 20 years, are divided into 7 main subclasses according to the International Organization for Standardization (ISO) and American Society for Testing and Materials (ASTM) standards, according to the production method and the materials used. The most characteristic feature of all these techniques is that parts with complex geometries can be produced faster and at low cost. Additive manufacturing paves the way for the production of complex and lighter parts with the same strength, together with topology optimization. It is inevitable that the shipbuilding industry also benefit from additive manufacturing, which is used extensively in fields such as aviation, health and automotive. There are important feasibility studies carried out in the last 10 years with the cooperation of Loyds and shipyards as AM is actively used by various navies and research institutions. The central theme of this study is to examine the potential of additive manufacturing techniques in the shipbuilding industry. An in-depth literature review is presented including expert opinions from industry and academia, and a feasibility study is presented. From the academic point of view, fabrication of propellers, ship models and rudder structures used in academic research is examined. It has been seen that low-cost products can be fabricated by 3D printers instead of purchasing products to be used in the academic research. On the other hand, parts used in the industry are examined under two sub-categories: construction and equipment parts. In shipbuilding industry, it has been found that the usage of AM in equipment parts and some construction products will provide advantages in terms of speed and cost. Finally, various classification societies and standards are mentioned in general terms regarding the certification issue, which is one of the most fundamental problems of additive manufacturing techniques.

**Keywords:** Additive manufacturing, 3D printing, shipbuilding, marine structures.

**Article history:** Received 23/05/2022 – Accepted 16/06/2022

## 1. Giriş

Üretim teknolojileri ve malzeme bilimi alanındaki gelişmeler tarih boyunca önemli dönüm noktalarının doğmasına neden olmuştur. Günümüz dünyasında hızla gelişmeye devam eden bu teknolojiler sayesinde öncesinde imkansız olarak görülen birçok buluş gerçekleştirilmiş ve insan hayatı kolaylaşmıştır.

Üretim teknikleri kendi içerisinde iki ana başlık altında incelenebilir. Bunlardan ilki geleneksel yöntemler ve diğeri de yenilikçi yöntemlerdir. Geleneksel yöntemlerle üretim şekil verme ve aşındırma yöntemlerini kapsarken, yenilikçi üretim eklemeli imalat yöntemlerini kapsamaktadır. Şekil verme ile üretim yönteminde malzemeye bir baskı uygulanarak istenilen şekle getirilebilir veya eriyik malzemenin kalıplara dökülmesi ile ürün oluşturulabilir. Bu yöntemin genel örnekleri dövme, haddeleme, ekstrüzyon, kesme, bükme ve toz metalurjisi ile üretimdir. Aşındırma ile imalatta ise malzemenin istenilen şekle kavuşması için belirli alet ve makineler yardımıyla parçalar kopartılmaktadır. Bu işlemler torna, freze, delme ve EDM (Elektro Erozyon) gibi tezgahlarda gerçekleştirilmektedir. Eklemeli imalat teknikleri ise geleneksel yöntemlerin tersi şekilde işleyerek üretilen parçanın bilgisayar destekli tasarım programlarında dizayn edilip, malzemenin katman katman eklenip, en sonunda nihai parçanın oluşturulduğu üretim şeklidir. Günümüzde, özellikle tıbbi alanda sıkça kullanılan bu teknoloji; havacılık ve uzay, otomotiv ve mimari gibi alanlarda da sıkça kullanılmaya başlanmıştır.

Sağladığı çeşitli avantajlardan dolayı dünya üzerinde en çok malzeme türünün ve çeşitli boyutlarda parçaların kullanıldığı, en büyük ticaret, ulaşım ve eğlence unsurlarından olan gemi ve deniz araçlarının üretiminde bu yöntemlerden faydalanılması kaçınılmazdır. Bu çalışma kapsamında eklemeli imalat yöntemlerinin gemi inşaatı endüstrisinin hem akademik hem de sanayi alanındaki potansiyeli araştırılmıştır. Akademik alandaki potansiyeli incelenirken, kendi içerisinde eğitim alanındaki faydaları ve bilimsel araştırmalardaki kullanımı olmak üzere iki ana başlık altında incelenmiştir. Sanayi alanındaki potansiyeli ise konstrüksiyon ve donatım parçalarının üretimi olarak iki ana başlık altında detaylı örnekleriyle birlikte incelenmiştir. Araştırma yapılırken bu konuda yapılan çalışmalar ve hem akademik hem de sanayi alanında çalışan kişilerin yorumlarından faydalanılmıştır. Araştırmanın niteliğinin artması için akademik alanda yapılan çalışmaya bir maliyet çalışması da dahil edilmiştir. Son olarak üretilen parçaların kullanıma uygun olması adına çeşitli klas kuruluşları ve standartlaştırma organizasyonlarının bu konuda yaptığı çalışmalardan bahsedilmiştir.

## 2. Eklemeli İmalat Teknikleri

Eklemeli imalat teknolojileri American Society for Testing and Materials (ASTM) tarafından yayınlanan F2792 – 12a nolu standarda göre “aşındırmaya dayalı üretim yöntemlerinin aksine, malzemelerin üç boyutlu model verilerine göre, genellikle üst üste katmanlar şeklinde birleştirilmesi ile parça üretimi süreci” olarak tanımlanmaktadır (ASTM F2792-12a, 2012). Eklemeli imalat terimi dışında; katmanlı imalat, üç boyutlu (3D ya da 3B) baskı ve serbest biçimli imalat gibi çeşitli terimler de kullanılmaktadır (Güngör, 2020).

### 2.1. Tarihçesi

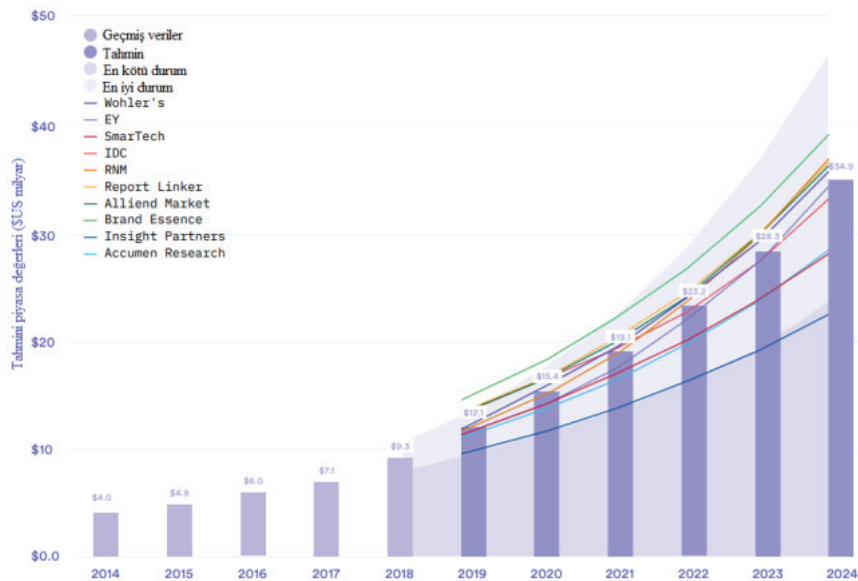
Modern eklemeli imalatın kökleri günümüzden 40 yıl öncesine dayansa da önceki topografik ve fotografik çalışmalar eklemeli imalata benzemekte ve neredeyse 150 yıl öncesine dayanmaktadır. Bu iki erken teknoloji katmanlı şekilde serbest biçimli bir yapı oluşturmaya yönelik “kes ve birleştir”

yaklaşımına dayanmaktadır (Bourella vd., 2009). Bir lazer ve fotopolimerler kullanılarak katı oluşturmaya yönelik ilk çalışma 1960'ların sonunda Battele Memorial Enstitüsü'nde gerçekleşmiştir. Sonrasında 1980'li yıllara kadar çeşitli kişiler ve şirketler tarafından bu alanda çalışmalar yapılmıştır ancak günümüzdeki kullanıma en yakın konsept (bilgisayarlar ve lazerler gibi) 1980'li yılların başında yakalanmıştır (Wholers ve Gornet, 2014; Gibson vd., 2015). 1984 yılında Charles Hull, Stereolitografi (SLA) yönteminin patentini almış ve sonrasında bunun üzerine bir şirket kurmuştur. Bu, Stereolitografi aparat makinasıyla, eklemeli imalat teknolojisini ticarileştiren ilk şirkettir (Gibson vd., 2015).

1984'ten günümüze devam eden süreç içerisinde farklı eklemeli imalat teknikleri ortaya çıkmış ve geliştirilmiştir. Günümüzde eklemeli imalat teknolojisi insan hayatının neredeyse her alanına nüfuz etmeyi başarmıştır. Jet motorlarının üretiminden medikal çalışmalara kadar oldukça geniş bir yelpazede kullanılan bu üretim tekniğinin kullanımının üretimde gittikçe daha fazla paya sahip olacağı öngörülmektedir.

## 2.2. Kullanım Yöntemleri ve Kullanılan Sektörler

Eklemeli imalat tekniklerinin, özellikle son 20 yıl içerisinde, kullanılabilen malzeme çeşitlerinin artması, yeni yöntemlerin ortaya çıkması ve sistemlerin veriminin ve güvenilirliğinin artması ile birlikte kullanımı yaygınlaşmıştır (Özer, 2020). On farklı piyasa analisti şirketi tarafından 2019 yılında yapılan araştırmaya göre, dünya genelinde önümüzdeki dört yıl boyunca eklemeli imalat pazarının büyük bir büyüme göstererek 2024 yılında yaklaşık 35 milyar doları bulacağı belirtilmiştir. Yapılan analizlerdeki en iyi ve en kötü durum arasındaki farkı oluşturan değişkenler; seri üretim için benimseme oranı, malzeme ve sistemlerdeki gelişmeler ve toplam maliyetlerdeki azalmadır. Ayrıca müşteri talepleri ve daha büyük ekonomik ortam gibi dış faktörleri de içermektedir (3D Hubs, 2020). Şekil 2'de verilen grafikte yapılan analizlere göre eklemeli imalatın geçmiş piyasa değerleri ve yakın gelecekteki tahmini piyasa değerleri gösterilmiştir.



Şekil 1. Eklemeli imalatın pazar payı (3D Hubs, 2020)

### 2.2.1. Kullanım yöntemleri

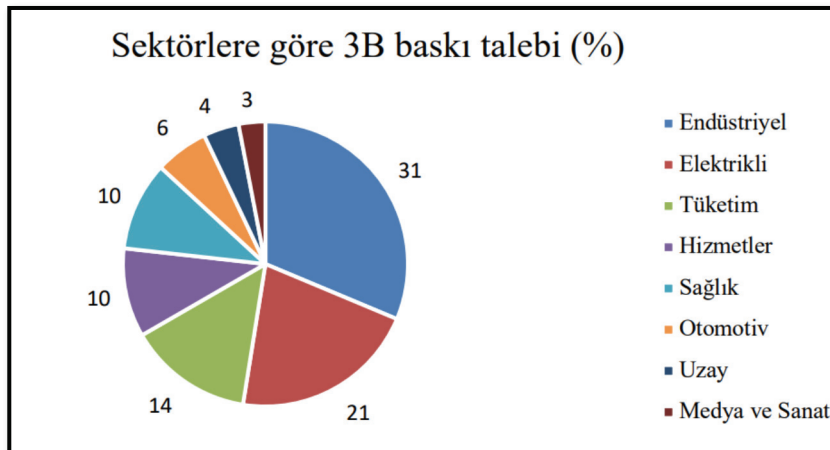
Eklemeli imalat teknolojileri, üç ana şekilde kullanılmaktadır: hızlı prototipleme (rapid prototyping), hızlı kalıp üretimi (rapid tooling) ve hızlı üretim (rapid production) (ISO, 2015). Hızlı prototipleme, dizayn edilen bir ürünün tasarım ve işlevsellik açısından test edilebilmesi için hızlı bir şekilde prototip üretmek için kullanılan eklemeli imalat yöntemidir (Güngör, 2020). Prototipler genellikle işlevselliği açısından sınırlı olduğundan ve bu nedenle dayanıklılık veya bitiş konusunda daha az talepte bulunduğundan, eklemeli imalatın ilk kullanım alanı olmuştur. Bu yöntem sayesinde ileride soruna neden olabilecek tasarım kusurları erken aşamalarda fark edilebilmektedir (Bergsma vd., 2016). Hızlı kalıp üretimi; seri üretilen nesnelerin üretiminde kullanılan, operasyonu veya süreci kolaylaştıran ürün veya araçların (kalıp gibi) hızlıca imal edilmesi için kullanılmaktadır (Güngör, 2020; Bergsma vd., 2016). En önemli fark, üretilen aletlerin genellikle 7 mutlak kalite taleplerinin olmamasıdır. Örneğin döküm işleminde kalıbın yeterli özellikleri göstermesi halinde ne şekilde üretildiği önemli değildir. Eklemeli imalatın yanı sıra, hızlı kalıp üretimi yöntemiyle alet üretimi aşındırma üretim tiplerine göre (CNC freze gibi) daha hızlı şekilde üretilebilir (ISO, 2015). Hızlı üretim yöntemi ise bilgisayar destekli tasarım ile oluşturulan parçaların üretimi anlamına gelmektedir. Bergsma vd. (2016), bahsedilen kullanım şekillerini üretilen ürünün önemine göre Tablo 1’de gösterilen şekilde genellemiştir.

**Tablo 1.** Eklemeli imalat kullanım şekilleri (Bergsma vd., 2016)

Kullanım \ Önem	Düşük: dizayn veya prototip için	Orta: güvenlik açısından kritik olmayan işlevsel parçalar	Yüksek: yüksek mühendislik ürünü güvenlik açısından kritik parçalar
Hızlı Prototipleme	X		
Hızlı Kalıp Üretimi	X	X	X
Hızlı Üretim		X	X

### 2.2.2. Kullanılan sektörler

Eklemeli imalat teknolojilerinin, yapılan çalışmalar ve artan malzeme çeşitliliği sayesinde dünya çapında medikal, otomotiv, uzay-havacılık, yapı sektörü ve gemi inşaatı gibi alanlarda kullanımı hızla artmaktadır. Çalışmanın bu kısmında gemi inşaatı sektörü haricindeki kullanım örnekleri gösterilecek ve gemi inşaatı endüstrisindeki uygulamaları sonraki bölümde paylaşılacaktır.



**Şekil 2.** Eklemeli imalatın pazar payı (3D Hubs, 2020)

Şekil 2’de verilen grafikte, profesyonel kullanıcıların temsili bir örneğine dayalı olarak çevrimiçi 3B baskı talebinin endüstriye göre dağılımını göstermektedir. Talebin %65’inden fazlası endüstriyel, elektrikli veya tüketim mallarının geliştirilmesinde çalışan profesyonel kullanıcılardan gelmektedir. Öte yandan havacılık, otomotiv ve sağlık endüstrilerindeki profesyoneller, geleneksel "çevrimdışı" tedarik zincirlerini kullanarak şirket içinde veya dış kaynak olarak parça üretmeyi tercih etmektedir (3D Hubs, 2020).

Yukarıda belirtilen sektörlerdeki kullanım örnekleri olarak; sağlık sektörü için yapay organ ve kemik üretimi, uzay ve havacılık sektörü için turbojet motor bileşenleri ve bazı yapısal parçaların üretimi verilebilir. Yakın bir örnek olarak TUSAŞ Motor Sanayii A.Ş. (TEI), üretimini yaptığı TEI-TJ300 Turbojet motorunun parçalarının üretiminde eklemeli imalat teknolojilerinden faydalandığını belirtmiştir (TEI, n.d.). Otomotiv sektörü için yapısal kompozit bileşenler, motor vanaları ve turboşarj türbinlerinin üretimi yanında Kor firmasının ürettiği Ecologic Urbee modelinde olduğu gibi direkt olarak araba gövdesi üretimi sayılabilir (Özer, 2020). Şekil 3’te TEI tarafından eklemeli imalat ile üretilmiş turbojet motoru parçası gösterilmiştir.



**Şekil 3.** TEI-TJ300 Turbojet motoru parçası (TEI, n.d.)

Eklemeli imalat teknikleri, ana parça üretimi dışında kalıp üretiminde de kullanılmaktadır. Düşük sayıda yapılacak üretimler veya özel parçaların üretimi için en büyük maliyetlerden biri kalıp maliyetidir. Eklemeli imalat teknolojisi kullanılarak düşük maliyetli, karmaşık yapı ve daha dayanıklı (kalıpla bütünlük soğutma kanallarının koyulmasıyla) kalıplar diğer üretim yöntemlerine göre daha hızlı şekilde üretilebilmektedir. Sahip olduğu bu avantajlar sayesinde son ürünün performansında artışa ve kalıpların daha uzun süreli kullanımına olanak sağlamaktadır.

### 2.3. Eklemeli İmalat Teknikleri

İlk ortaya çıktığı günden bugüne eklemeli imalat teknolojileri hızla gelişmiş ve birçok farklı yöntem ve birçok farklı malzeme kullanımı ortaya çıkmıştır. Bu çeşitlilik aynı zamanda bu yöntemlerin sınıflandırılmasını da zorlaştırmıştır. ASTM’nin 2012 yılında yayınladığı F2792-12a nolu standarda göre eklemeli imalat teknolojileri yedi ana başlığa ayrılmıştır. Tablo 2’de bu sınıflandırma gösterilmiş ve her yöntemin özelliklerinden kısaca bahsedilmiştir.

**Tablo 2.** Eklemeli imalat teknikleri ve özellikleri (Tofail vd., 2018)

ASTM Kategorisi	Temel Prensipleri	Avantajları	Dezavantajları
<b>Yapıştırıcı Püskürtme (Binder Jetting)</b>	Sıvı bağlayıcı ince toz katmanlarına püskürtülür.	<ul style="list-style-type: none"> <li>Destek yoktur.</li> <li>Özgün dizayn imkanı</li> <li>Büyük üretim hacmi</li> <li>Yüksek üretim hızı</li> <li>Nispeten düşük maliyet</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Sınırlı mekanik özellikler ve kırılma parçaları</li> <li>Ek işlem gerektirebilir.</li> </ul>
<b>Yönlendirilmiş Enerjiyle Biriktirme (Directed Energy Deposition)</b>	Odaklanmış termal enerji biriktirme sırasında malzemeleri eritir.	<ul style="list-style-type: none"> <li>Tane yapısında yüksek kontrol imkanı</li> <li>Yüksek kalite parçalar</li> <li>Tamirat uygulamalarında başarılıdır</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Düşük yüzey kalitesi ve hız ayarı ihtiyacı</li> <li>Sınırlı metal ve metal bazlı hibrit sayısı</li> </ul>
<b>Malzeme Ekstrüzyonu (Material Extrusion)</b>	Malzeme bir nozul veya ağızdan dışarı itilir.	<ul style="list-style-type: none"> <li>Geniş kullanım</li> <li>Düşük maliyet</li> <li>Değişken ölçek</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Dikey anizotropi</li> <li>Kat kat yüzey</li> </ul>
<b>Malzeme Jeti (Material Jetting)</b>	Yapı malzeme damlacıkları biriktirilir.	<ul style="list-style-type: none"> <li>Yüksek hassasiyet</li> <li>Düşük atık</li> <li>Çoklu malzemeli parçalar</li> <li>Çoklu renk</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Genelde destek malzemesi gerekir.</li> <li>Ana olarak fotopolimer ve termo reçineler kullanılabilir.</li> </ul>
<b>Toz Yataklı Ergitme (Powder Bed Fusion)</b>	Isı enerjisiyle toz yataktaki tozdan ufak bir nokta eritip birleştirilir.	<ul style="list-style-type: none"> <li>Nispeten ucuz</li> <li>Geniş malzeme çeşidi</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Nispeten yavaş üretim</li> <li>Yapısal bütünlük eksikliği</li> <li>Sınırlı boyutlar</li> <li>Yüksek güç ihtiyacı</li> </ul>
<b>Tabaka Birleştirme (Sheet Lamination)</b>	Malzeme tabakaları birleştirilir.	<ul style="list-style-type: none"> <li>Yüksek hız</li> <li>Düşük maliyet</li> <li>Kolay malzeme kullanımı</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Yapısal bütünlük ve dayanım kullanılan yapışkana bağlıdır.</li> <li>Sınırlı malzeme çeşidi</li> <li>Ek işlem gerektirebilir</li> </ul>
<b>VAT Fotopolimerizasyonu (VAT Photopolymerization)</b>	Haznedeki sıvı polimer ışıkla sertleşir.	<ul style="list-style-type: none"> <li>Büyük basım hacmi</li> <li>Yüksek hassasiyet</li> <li>Yüksek yüzey ve detay kalitesi</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Sadece fotopolimerler kullanılabilir.</li> <li>Düşük mekanik özellikler</li> <li>Düşük üretim hızı</li> </ul>

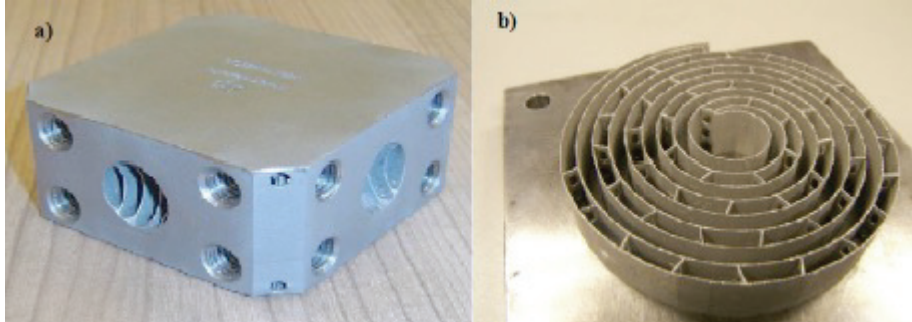
Tablo 2’de belirtilen yedi ana sınıf kendi içerisinde üretim teknolojisine bağlı olarak alt başlıklara ayrılabilir. Üretim boyutu tüm tiplerde değişiklik göstermekle birlikte en büyük üretim hacmini malzeme ekstrüzyonu yöntemi sağlamaktadır. Tüm bu yöntemlerde ortak olarak polimer

malzemeler kullanılmakta, buna ek olarak birçok yöntemde metal, seramik ve kompozit malzemeler de kullanılabilir.

#### 2.4. Avantajları ve Geleneksel Yöntemlerle Karşılaştırılması

Her ne kadar pazardaki payı sürekli artış gösterse de eklemeli imalat teknolojilerinin sağladığı birçok avantaja rağmen geleneksel üretim yöntemleri günümüzde hala yoğun şekilde tercih edilmektedir. Bunun nedeni geleneksel üretimin özellikle seri üretim söz konusu olduğunda eklemeli imalat tekniklerine göre daha ucuz ve hızlı hizmet sunabilmesidir.

Eklemeli imalat ve aşındırma yöntemleri karşılaştırıldığı zaman aralarındaki en temel fark kullanılan malzeme miktarıdır. Aşındırmaya dayalı üretim yöntemlerinde de üç boyutlu dizayna göre CNC makinalarında otomatik olarak üretim yapılabilir ama basılacak parçalar için ortaya çıkan atık miktarı yüksektir ve buna bağlı olarak da maliyet artmaktadır (Gibson vd., 2015). Ek olarak eklemeli imalat yöntemleri depolama maliyetlerinde büyük düşüş oluşturmaktadır. Bunun sayesinde tedarik zincirlerinde de değişiklikler meydana gelmektedir. Eklemeli imalatın bir diğer avantajı parçaların istenilen karmaşıklıkta kolaylıkla basılabilir olmasıdır. Böylece daha optimize, bütünleşmiş ve çoklu malzemeden oluşan ürünlerin elde edilebilmesinin önü açılmıştır (Güngör, 2020). Şekil 4'te eklemeli imalat teknolojileri kullanılarak üretilmiş karmaşık parçalar gösterilmiştir.

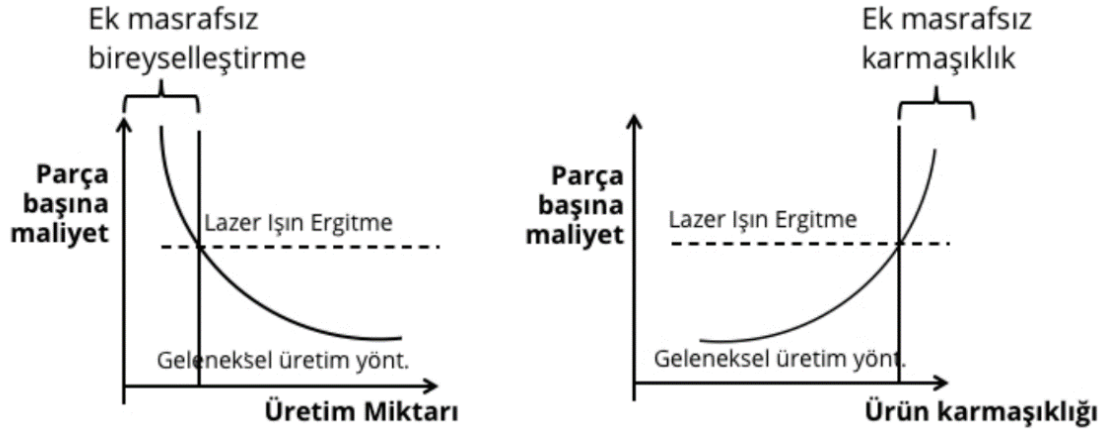


Şekil 4. (a) Karmaşık iç kanallara sahip hidrolik prototipi (b) Konvansiyonel prosesler ile üretilmesi imkansız ITER için 316L vakum permeatörü prototipi (EPMA, 2019; METALMECANICA, 2014)

Geleneksel yöntemlerle yapıldığında yüksek üretim maliyetlerine neden olan prototip ve kalıp üretimi eklemeli imalat teknikleri sayesinde daha ucuza üretilmektedir. Son olarak eklemeli imalat yöntemleri kullanılarak üretilen parçalar geleneksel yöntemlerle yapılan üretilere göre çok daha hafif olabilmektedir. Airbus şirketi, A320 uçakları için lazer eritme teknolojisi kullanarak ürettiği braket parçasında aynı sağlamlığı ve performansı korurken yaklaşık %35 hafiflik (10 kg) sağlamayı başarmıştır (STM, 2016).

Eklemeli imalat teknolojilerinin bu tarz üstünlükleri olmasının yanında sahip olduğu dezavantajlar bulunmaktadır. Eklemeli imalat yöntemlerinde üretim maliyeti her parça için aynı miktarda olduğundan düşük parça ihtiyacı olan durumlar için daha uygundur. Geleneksel üretim yöntemlerinin uzun vadeli seri üretim için, eklemeli imalatın kısa üretimler veya sipariş üzerine üretimi daha uygundur (Güngör, 2020). Şekil 5'te iki üretim yöntemi için de parça sayısı ve maliyet arasındaki ilişkinin grafiği gösterilmiştir.





Şekil 5. Lazer ışını ergitme yönteminin geleneksel imalatla karşılaştırması (EPMA, 2019)

Ekleme imalat teknolojileri için bir diğer kısıt ise yazıcıların baskı boyutlarıdır. Malzeme ekstrüzyon ve tel ark ekleme yöntemi için geliştirilen büyük makineler olmasına rağmen diğer yöntemler için ulaşılabilen parça boyutları sınırlıdır. Son olarak mukavemet ve standartlaştırma problemleri eklemeli imalat teknolojilerinin karşılaştığı en büyük problemlerdendir. Her parçanın birebir aynı şekilde basılamaması veya makineden makineye özelliklerin değişiklik göstermesi bunu zorlaştırmaktadır. Ancak bu konuda ANSYS gibi çeşitli şirketler yazılımlar geliştirmekte ve ISO/ASTM gibi standart kuruluşların yanında sektörlere özel standart kuruluşları da çalışmalar yapmaktadır.

Önümüzdeki yıllarda iki yöntem tipinden birinin kaybolması yerine iki üretimin birlikte çalıştığı hibrit sistemler düşünülebilir ve böylece ihtiyaca göre seçim yapılarak maksimum verim alınabilir (Linke, 2017).

### 3. Gemi İnşaatı Endüstrisindeki Potansiyeli

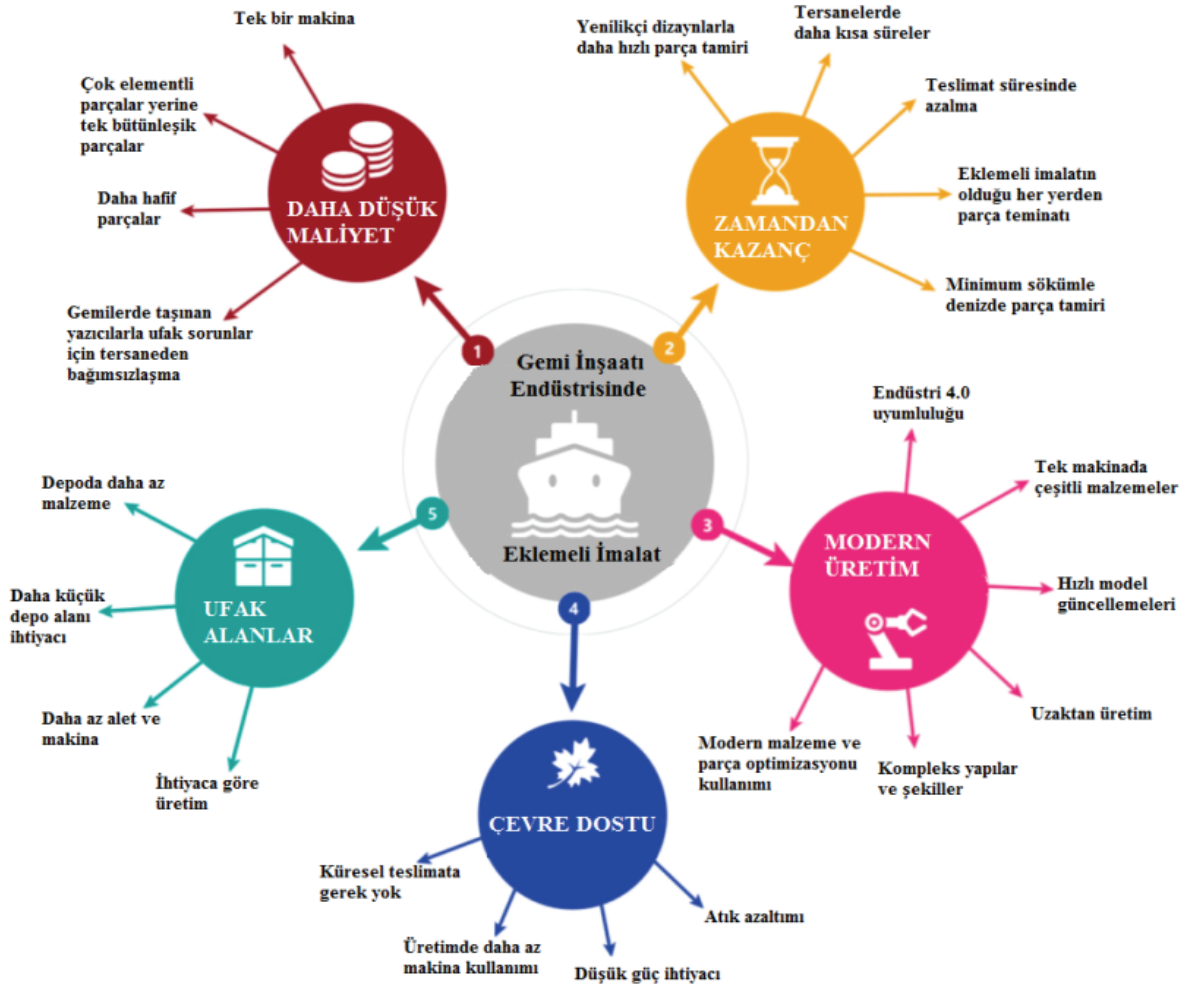
Ekleme imalat teknolojileri önceki bölümde örnekleriyle birlikte anlatıldığı üzere otomotiv, havacılık ve uzay endüstrileri gibi mühendisliğin ön planda olduğu sektörlerde günden güne artan bir kullanıma sahiptir. Gemi inşaatı endüstrisi günümüzde çeşitli alanlarda eklemeli imalat tekniklerinden faydalanmaktadır ancak bu kullanımlar genellikle maliyetinden dolayı henüz havacılık sektöründe olduğu kadar yaygın değildir. Ekleme imalatın gemi sevk sistemleri ve elemanlarında, sivil ve askeri gemi inşaatı, tasarımı ve malzeme tedariki açısından önemli etkileri olacağı öngörülmektedir. Ancak bunların sağlanabilmesi için teknik personelin eğitimi ve sertifikasyon konularında çalışmalar yapılması gerekmektedir (Güngör, 2020).

Ziółkowski ve Dyl (2020) tarafından yapılan çalışmada geleneksel yöntemlere kıyasla eklemeli imalat tekniklerinin gemi inşaatı endüstrisindeki avantajları; maliyet, zaman, depolama, üretim ve çevreye duyarlılık açısından beş ana başlıkta toplanmıştır. Maliyet açısından bakıldığında, tedarik zincirini kısaltması ve basitleştirmesi dolayısıyla birçok gider ortadan kalkacaktır. Buna ek olarak, eklemeli imalata uygun olarak dizayn edilen yeni parçalar sayesinde kullanılan elemanlar daha az hacim kaplayacak ve hafifletilebilecektir. Böylece, dizayn aşamasında alanlar daha verimli şekilde kullanılabilir. Son olarak, çok elemandan oluşan parçalar yekpare hale dönüştürülebilir ve böylece çeşitli işçilik giderleri aradan çıkartılacaktır.

Zaman açısından bakıldığında, tedarik zincirindeki kısaltmaya bağlı olarak daha kısa sürelerde gemilerin tamiri gerçekleştirilebilecektir. Bunun sayesinde gemi tersanede daha kısa süre duracak ve daha uzun süre seferde bulunabilecektir. Bir diğer ana başlık olan depolama ise her sektörde olduğu gibi gemi inşaatı sektörü için de önemli bir rol oynamaktadır. Daha küçük depo alanı ihtiyacı sayesinde hem

karada hem de gemilerde alanlar daha verimli kullanılabilir. Özellikle siparişe bağlı üretim sayesinde limanlarda yedek parçalar için ayrılan depo alanlarının azaltılması maliyet açısından da avantaj getirecektir.

Endüstri 4.0 kavramıyla üretimler artık uzaktan kontrol edilebilmekte ve gece gündüz fark etmeksizin yapılabilmektedir. Modern üretim anlayışının tıpkı otomotiv veya uzay-havacılık sektörlerinde olduğu gibi gemi inşaatı sektörü için kullanılması sayesinde artık modeller hızla güncellenebilecek, çeşitli üretimler aralıksız ve uzaktan yapılabilecek, parçaların optimizasyonu kolaylıkla sağlanabilecek ve kompleks yapılar kolaylıkla üretilebilecektir. Böylelikle daha verimli bir üretim yapılacaktır. Eklemeli imalat yöntemlerinde geleneksel metotlara göre daha az malzeme ihtiyacı olmasına rağmen parça başı daha fazla enerji ihtiyacı, özellikle yüksek sıcaklık gerektiren üretimlerde, vardır. Ancak, geleneksel üretimdeki parça başı enerji ihtiyacının büyük ölçüde üretim yapıldığı için düşük olduğunu göz önünde bulundurmak gerekmektedir. Tekil bir üretim için eklemeli imalat yöntemleri hem enerji açısından hem de atık miktarı açısından daha verimli bir konumdadır. Buna ek olarak, üretimde daha az yağlayıcı madde veya daha az soğutucu kimyasal kullanımı ile doğaya daha duyarlı bir üretim gerçekleştirilmiş olacaktır. Ziolkowski ve Dyl (2020) yaptıkları çalışmadaki eklemeli imalatın gemi inşaatı endüstrisindeki avantajları Şekil 6'da verilen diyagramda paylaşılmıştır.



**Şekil 6.** Eklemeli imalatın gemi inşaatı endüstrisindeki avantajları (Ziolkowski ve Dyl, 2020)

Gemi inşaatı endüstrisi denildiğinde her ne kadar ilk olarak akla tersaneler gelse de aslında arkasında yoğun akademik çalışmalar barındıran bir sektördür. Akademik alanda yapılan çalışmalarda çeşitli

boyutlarda ve tiplerde modeller bulunmaktadır. Bu modellerin daha uygun maliyete üretilmesi ve proje gizliliğinin korunması eklemeli imalat ile sağlanabilir. Dolayısıyla çalışmanın bu kısmında eklemeli imalat yöntemlerinin gemi inşaatı endüstrisine yönelik potansiyeli hem akademik hem de sanayi açısından incelenecektir.

### 3.1. Akademik Alandaki Potansiyeli

Günümüzde eklemeli imalat teknolojileri akademik alanda hem deneysel çalışmalarda hem de eğitim amaçlı materyallerin üretiminde kullanılabilen ve bunun yanında çeşitli üniversiteler (MIT, Georgia Institute of Technology vb.) mühendislik eğitimlerinde bu alanla ilgili dersler de vermektedir.

Mühendislik eğitimlerinde derslerde kullanılan modellerin öğrenmeye büyük bir katkısı vardır. Motyl ve Filippi (2021) tarafından yapılan çalışmada eklemeli imalat teknolojilerinin tanıtılmasının, hem kişisel hazırlık açısından hem de farklı becerileri öğrenme ve geliştirme açısından genç mühendislerin hazırlanmasında önemli bir faydası olduğu belirtilmiştir. Yapılan başka bir çalışmada (Minetola vd., 2015); makina mühendisliği öğrencilerinden oluşan gruplara, verilen proje kapsamında, başlangıç seviyesi üç boyutlu yazıcılar kullanarak küçük ölçekli bisiklet üretmeleri istenmiş ve sonrasında uygulanan bu çalışma hakkında öğrencilerin görüşleri alınmıştır. Alınan sonuçlara göre öğrenciler motivasyon, anlama, ilgi ve eğitim konularında yüksek oranda pozitif geri bildirimler yapmışlardır, sadece takım çalışması konusunda bazı negatif dönüşleri olmuştur. Gemi mühendisliği lisans eğitiminde verilen “Gemi Yapı Elemanları” ve “Gemi Mukavemeti” gibi derslerde yapısal dizayndaki değişimlerin etkisinin görülmesi ve öğrencinin zihninde üç boyutlu yapıları canlandırabilmesi açısından katkı sağlayacaktır. Ek olarak “Gemi Yardımcı Makinaları”, “Gemi Makinaları” ve “Gemi Hidrodinamiği” gibi derslerde görsellik amaçlı kullanılmak üzere çeşitli pompaların, motor parçalarının veya pervane modellerinin üretimi yapılabilir.

Öğrenime katkısının yanında bilimsel araştırmalar için, üniversitelerin gemi inşaatı ile ilgili fakültelerinde bulunan gemi model deney, kavitasyon tüneli ve gemi mukavemeti laboratuvarlarında dizayn edilen gemilerin veya parçaların çeşitli hesaplamaları gerçekleştirilmektedir. Bu hesaplamalar gerçekleştirilirken parçaların veya gemilerin ölçekli şekilde üç boyutlu modelleri üretilmekte ve bunlar üzerinde gerekli testler yapılmaktadır. Oluşturulan bu modellerin eklemeli imalat ile üretilmesinin özellikle zaman ve maliyet açısından katkı sağlayacağı düşünülmektedir. Dünya geneline bakıldığında mühendislik çalışmalarında eklemeli imalat teknolojileri deney laboratuvarlarında gittikçe artan bir kullanıma sahiptir. Gemi inşaatı açısından bakıldığında, çeşitli üniversiteler (Maine Üniversitesi vb.) ve araştırma kuruluşları (RAMLAB, CSIC) bu yöntemi kullanarak çeşitli alanlarda deneyler gerçekleştirmektedirler (Bergsma vd., 2016).

Üniversitelerin veya kuruluşların sahip olduğu deney havuzları ve kavitasyon tünellerinde açık su yapıları ile ilgili ölçümler ve analizler (sevk deneyleri, güç performans analizleri, denizcilik performans ölçümleri, pervane dizaynı vb.) yapılmaktadır. Yapılan bu çalışmalarda kullanılan modellerin üretilirken Uluslararası Çekme Tankları Konferansı (The International Towing Tank Conference, ITTC) tarafından belirtilen toleranslara göre üretilmesi gerekmektedir. İTÜ Gemi İnşaatı ve Deniz Bilimleri Fakültesi’nde gerçekleştirilen deneylerle ilgili yetkililerle görüşülmüş ve edinilen bilgilere göre deneylerde kullanılan modellerin sahip oldukları özellikler Tablo 3’te paylaşılmıştır.

**Tablo 3.** Deneylerde kullanılan modeller ve özellikleri

Model	Malzeme	Boyut
Gemi Modelleri	Ahşap	5 metre ve altı
Şaft – Braket Sistemleri	Plastik	90 cm ve altı
Dümen	Plastik	20 – 25 cm
Yalpa Finleri	Plastik	20 – 25 cm
Pervane	Metal	45 cm ve altı (çap)
Pod Geometrileri	Plastik	-
Kıç Kovanı	Plastik	-

Gemi modellerinin üretiminde fakültenin atölyesindeki 5 eksenli CNC tezgah kullanılmaktadır. Modeller üretilirken önce su hatlarına göre levhalar oluşturulmakta, sonrasında birbirlerine yapıştırılmakta ve böylece ham blok elde edilmektedir. Sonrasında bu katmanlar CNC frezeleme işlemine sokular ve çeşitli ek işlemlerle (zımpara, boya vb.) gemi modeli istenilen forma dönüştürülmektedir. Bu şekilde modeller 5 günde üretilebilmektedir (Danışman, 2016). Bu yöntem alternatif olarak fakülteye kurulabilecek bir malzeme ekstrüzyonu yöntemi yazıcı ile bu süre daha aşağılara çekilebilir.

Benzer bir çalışma olarak Maine Üniversitesi tarafından malzeme ekstrüzyonu yöntemi kullanılarak üretilen model bir tekne bulunmaktadır (3Dirigo, n.d.). Tekne üretimi model deneylerinden çok yatırım yapılan yazıcının yeteneklerini göstermek amacıyla olsa da önemli bir örnek teşkil etmektedir. Termoplastik malzemeden üretilen, 7.62 m boya ve 2.2 ton ağırlığa sahip olan tekne toplam 72 saat içerisinde üretilmiştir. Saatte 68 ile 227 kilogram arasında malzeme ekstrüde edebilen yazıcı, 30.5 m x 6.7 m x 3.0 m boyutlarında baskı kapasitesine ve ayrıca 5 eksenli CNC ile işleme yapabilme kapasitesine sahiptir (3Dirigo, n.d.). Ancak; yazıcının maliyetinin yüksek olmasından dolayı, geleneksel yöntemle üretimin maliyet açısından avantajı bulunmaktadır.

Tablo 3'te belirtilen modeller arasından pervane modelleri; pitch, çap, ağırlık, göbek ve çalıklık gibi özelliklerinden dolayı en karışık geometriye sahiptirler. Pervane modelleri fakülte tarafından dışarıda üretilmekte ve hazır olarak alınmaktadır. Yapılan fizibilite çalışmasında fakültede kullanılan örnek bir pervane modelinin dışarıdan alış fiyatı ve aynı modelin yazıcılarla üretilmesi arasındaki maliyet farklı incelenmiştir. Yazıcılarla birlikte üretim yapıldığındaki maliyetinin hesaplamasında 3Dörtgen ve Promakim firmalarından destek alınmıştır. Çalışmada tekniker maaşı ve sistem kurulum maliyeti hesaba katılmamıştır. Yapılan fizibilite çalışması Tablo 4'te paylaşılmıştır.

**Tablo 4.** Pervane özellikleri ve maliyetleri

Model	Malzeme	Boyut
Gemi Modelleri	Ahşap	5 metre ve altı
Şaft – Braket Sistemleri	Plastik	90 cm ve altı
Dümen	Plastik	20 – 25 cm
Yalpa Finleri	Plastik	20 – 25 cm
Pervane	Metal	45 cm ve altı (çap)
Pod Geometrileri	Plastik	-
Kıç Kovanı	Plastik	-

Sunulan model üretim maliyetlerinde yazıcı olarak malzeme ekstrüzyon yöntemine sahip yazıcılar kullanılmıştır. Kompozit malzeme kullanımında yazıcıların baskı kapasitesinin yeterli olmasından dolayı herhangi bir dizayn optimizasyonuna gerek duyulmamıştır. Ancak metal baskıda pervanenin ayrı parçalar halinde basılıp birleştirilmesi üzerine bir hesap yapılmıştır. Metal baskı ile ilgili verilen değer sadece basım maliyetini içermektedir, sinterleme maliyeti katılmamıştır. Onyx malzeme ile basılacak pervanelerde ekstra mukavemete ihtiyaç duyulursa karbonfiber veya fiberglass eklenebilmektedir.

Pervane modellerinin dışarıdan alınması durumunda 24.7 cm çapa sahip CiBrAl malzemedan pervane 6 bin € + KDV'ye mal olmaktadır. Firmalar tarafından paylaşılan verilere göre kompozit baskı kapasiteli cihazlar 5 bin \$ ile 69 bin \$ arasındayken, metal baskı yapabilen yazıcılar set olarak (sinterleme seti dahil) 169 bin \$ ile 220 bin \$ arasındadır.

Deneylede kullanılmak üzere pervane modeli üretimi ile ilgili çeşitli çalışmalar mevcuttur. Liu vd. (2015) yaptıkları çalışmada metal ve plastik malzemelerden üretilmiş farklı pervaneleri kullanarak performans karşılaştırması yapmış ve sonuç olarak seçmeli lazer sinterleme yöntemi kullanılarak üretilen poliamid (nylon 12 benzeri) malzemenin %40 daha düşük performans gösterdiği bulunmuştur. Bunun sebebi ise poliamid malzemenin test sırasında yaşadığı bükülmedir. ITTC bu çalışmadan yola çıkarak modellerde hızlı prototipleme yöntemi ile üretilen nylon gibi malzemelerin kullanılmayacağını belirtmiştir. Ancak fiberle güçlendirilmiş plastiklerin kullanımına izin vermektedir (ITTC, 2017).

Metal pervane modeli üretimi için ayrıca Cilia vd. (2019) tarafından toz yataklı ergitme yöntemlerinden biri olan seçmeli malzeme ergitme sistemiyle üretilmiş bir pervanede kavitasyon testi gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışmada doğruluğun kontrol edilebilmesi için aynı boyutlar ve özelliklerde bronz malzemedan yapılmış pervane ile edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Basılmış olan pervane kanatlarının her birinde, özellikle önder kenarı ve arka kenarında, orijinal geometriyle farklılıklar (ITTC toleranslarını aşan) olduğu ayrıca pervanenin her kanadının yakınında önemli bir ısı deformasyonu olduğu tespit edilmiştir. Deney sonuçlarındaysa basılmış her kanadın önemli ölçüde farklı davranışlar gösterdiği ve bu farkın bıçak geometrisinin yerel kusurları (yanlış eğrilikler ve çok yüksek kalınlık gibi) ve bu kusurların kavitasyona karşı yarattığı tutarlılık eksikliğinden kaynaklandığı belirtilmiştir (Cilia vd., 2019). Deneyde kullanılan iki pervane kanadı Şekil 7'de gösterilmiştir.



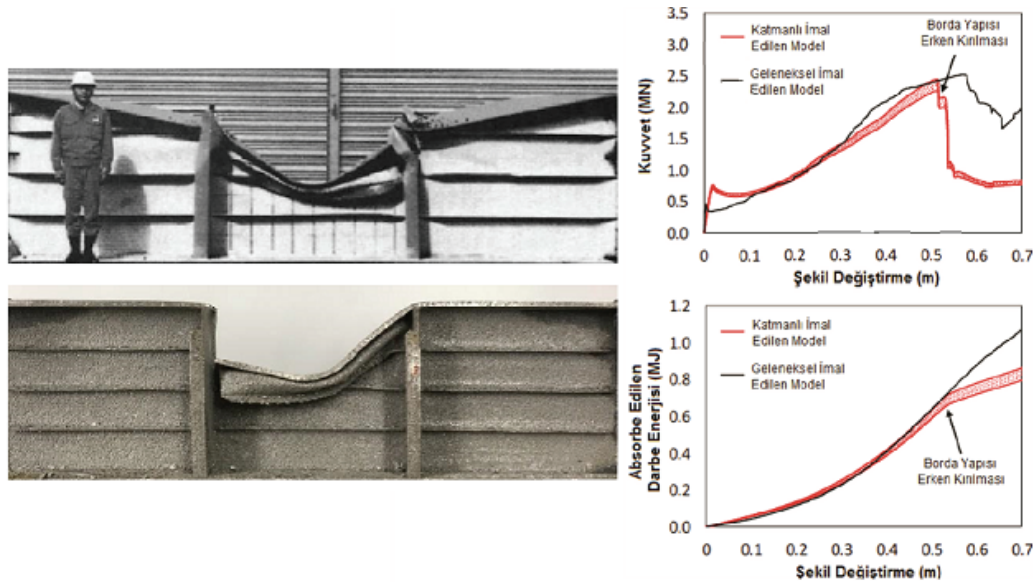
**Şekil 7.** Kavitasyon deneyinde kullanılan bronz kanat (sol) ve paslanmaz çelikten basılmış kanat (sağ) (Cilia vd., 2019)

Gemi modelleri ve pervaneler dışında kullanılan diğer deney modellerinin üretiminde plastik kullanıldığı ve dışarıdan alındığı belirtilmiştir. Dışarıdan alındığı zaman özellikle pod geometrileri gibi yapıların maliyetleri yüksek değerlere çıkabilmekte ve araştırma imkanlarını kısıtlamaktadır. ITTC

kurallarına göre takıntıların üretimi için belirlenen tolerans  $\pm 0.2$  mm olarak belirlenmiştir. Bu tolerans değeri malzeme ekstrüzyonu, toz yataklı ergitme sistemleri veya stereolitografi yazıcılarının baskı hassasiyetine uygun bir değerdir. Sonuç olarak, pervane ve gemi modelleri dışındaki ürünlerin yazıcı ile üretilmesinin hem zaman hem de maliyet açısından avantaj sağlayacağı görülmüştür. Pervanelerin sahip olduğu nispeten karmaşık geometrilerden dolayı üretiminde yaşanan sorunların çözümü üzerinde yapılacak çalışmalarla birlikte aşılabacağı düşünülmektedir.

Bunlara ek olarak, mukavemet analizleri ile ilgili deneylerde kullanılan modellerin üretimi için de eklemeli imalattan yararlanılabilir. Gemi mukavemeti laboratuvarlarında geminin yapısal elemanları tek tek veya birleştirilmiş olarak küçük ölçekli modeller halinde üretilerek, "Strain Gauge" ile gerilme ölçümleri, çekme-basma testleri ve üç noktalı eğilme testleri gerçekleştirilmektedir. Yapılan bu deneylerde araldit, çelik ve kompozit malzemeler kullanılmaktadır.

Örnek bir çalışma olarak Calle vd. (2019) mukavemet testini gerçekleştirmek üzere gemi bordası modelini iki farklı yöntemde üretmiştir. Büyük ölçekli üretilen model geleneksel yöntemler kullanılarak üretilirken, aynı yapının 1:40 ölçeğindeki modeli eklemeli imalat kullanılarak 316L paslanmaz çelikten üretilmiştir. Model ve gerçek boyutlu yapı arasında kırılma meydana gelmeden önceki yapısal tepkiler, özellikle toplam emilen enerji açısından iyi bir uyum gösterdiği belirtilmiştir (Güngör, 2020; Calle vd., 2019). Sonuç olarak gemi ve deniz yapılarının mukavemet analizinde kullanılacak modellerin üretimi için eklemeli imalatın avantajlı olduğu görülmüştür. Güngör (2020) yaptığı çalışmada mukavemet testlerinde kullanılmak üzere karmaşık ölçekli gemi modellerinin geleneksel yöntemlerle üretiminin masraflı ve zahmetli görüldüğünü belirtmiştir. Çalışmada kullanılan model ve elde edilen test sonuçları Şekil 8'de paylaşılmıştır.



### 3.1. Sanayi Alandaki Potansiyeli

Gemi inşaatı endüstrisi için, üretimi yapılan parçalar ve teçhizatlar, tersaneler veya tedarikçiler tarafından üretilmektedir. Üretimi yapılan bu ürünlerin birbirlerinden farklı üretim hacimleri ve üretim imkanları olduğu için konstrüksiyon ürünleri ve donatım ürünleri olarak iki ayrı başlık altında incelenecektir.

### 3.2.1. Konstrüksiyon elemanlarının üretimi

Gemi inşaatı için kullanılan konstrüksiyon elemanları genellikle büyük ölçekli ve seri olarak üretilen parçalardır. Yapılan geminin boyutuna bağlı olarak genellikle tersaneler tarafından siparişle alınmaktadır. Kompozit tekne üretiminde ise daha küçük tekneler inşa edildiği için kullanılan konstrüksiyon elemanları genellikle tersanenin kendi imkanları tarafından üretilmektedir. Kompozit tekne imalatında kullanılan kalıplarsa genellikle dışarıdan satın alınmaktadır.

Basit iç denizlerde kullanılan gemiler için metal işleme maliyeti 2,5 [€/kg] iken, toz yataklı ergitme sistemlerinin kg başına maliyeti yüzlerce € değerindedir (Bergsma vd., 2016). Ek olarak, metal eklemeli imalat ile üretilen parçaların boyutları da sınırlıdır. Dolayısıyla metal eklemeli imalat teknolojilerinin direkt olarak ticari gemilerin inşaatının yapımında kullanılan bu parçaları üretmesi şu an için kullanışlı görünmemektedir. Ancak bu üretim yönteminin sağladığı hafiflik, üretim hızı ve kendi imkanlarıyla üretebilme avantajları şimdilik küçük boyutlu tekne veya özel sualtı/suüstü araç üretiminde mümkün görülmektedir. Bu yenilikçi teknolojinin gelişmesi ile yakın gelecekte ticari gemilerin üretiminde de kullanılacağı öngörülebilir.

Askeri alanda ise ABD Donanması 20 yılı aşkın süredir bu teknolojinin üzerinde çalışmaktadır (Housel vd., 2015). Son olarak, ABD Donanması, büyük çelik dökümlerin teslim sürelerini azalttığı ve verimliliği arttırdığı için "MELD" katı hal eklemeli imalat sistemine 1,5 milyon \$ yatırım yapmıştır. Geliştirilen bu yeni teknoloji ile büyük parçaların her metal ile üretilebileceği belirtilmiştir.

Kompozit tekne konstrüksiyonlarında ise eklemeli imalat teknolojileri hem yapılan teknelerin kalıplarının üretimi hem de direkt olarak tekne yapısının üretiminde kullanılabilir. Sektörden çeşitli mühendislerle yapılan görüşmelerde ortak olarak, özellikle seri şekilde 24 metre altındaki tekne yapılarının ve maça üretimi için eklemeli imalat teknolojilerinin faydalı olacağı belirtilmiştir. Örnek olarak; yelkenli, gezinti tekneleri ve insansız deniz araçları gibi araçların üretimi yapılabilir. Kompozit tekne imalatında kullanılan kalıpların üretiminde de bu yenilikçi üretim yönteminden faydalanılabilir. Kompozit teknelerin imalatında çalışan mühendislerle yapılan görüşmelerde kalıp tedarik ettikleri firmaların bu teknolojiyi kullanmasıyla daha düşük maliyetlere kalıp imal edebilecekleri ve böylece dolaylı yoldan tersanelerin de bundan faydalanabileceği belirtilmiştir.

Eklemeli imalat teknolojileri kullanılarak üretilen kompozit teknelere örnek olarak dünyanın ilk üç boyutlu olarak basılmış fiberglas teknesi "MAMBO" verilebilir. Geleneksel üretim yöntemleriyle üretiminin imkansız olduğu belirtilen bot, 6,5 metre uzunluğa, yaklaşık 800 kilogram ağırlığa ve 26 knot sürat yapabilme yeteneğine sahiptir (MOI, n.d.).

Başka bir örnekte ABD Donanması deniz komandolarını taşımakta kullandığı yaklaşık 9,15 metre uzunluğundaki denizaltı yapısını eklemeli imalat teknolojisi kullanarak karbonfiber malzemeden üretmiştir. Geleneksel yöntemlerle üretim süresi 800 bin \$ olan ve üç ile beş ay arasında üretilen bu araç, eklemeli imalat teknolojileri ile 60 bin \$ maliyetle ve bir aydan kısa sürede üretilmiştir (Insider, 2017). Şekil 9'da üretilen denizaltı gösterilmiştir.



**Şekil 9.** ABD Donanması tarafında üretilen kompozit denizaltı (Insider, 2017)

### 3.2.2. Donatımların ve parçaların üretimi

Gemi donatımları çeşitli boyutlara, çeşitli özelliklere sahip ve çeşitli malzemelerden oluşan parçalardır. Pervane, dümen ve civadra gibi ana parçaların üretiminin dışında eklemeli imalatın gemi inşaatı endüstrisindeki potansiyeli incelenirken genellikle yedek parçaların üretimi alanında çalışmalar yapıldığı görülmüştür. Bu çalışmalar yazının bu bölümünde farklı parçalar halinde paylaşılacaktır.

Pervanelerin veya pervanelerin üretildiği kalıpların eklemeli imalat teknikleri kullanılarak üretimi, üzerinde en çok çalışma yapılan alandır. Pervanelerin her gemiye ait özel bir geometriyle üretilmesi ve karmaşık bir yapısının olması eklemeli imalatın yapısıyla büyük ölçüde uyumaktadır. Pervanelerin üretimi adına en büyük çalışmaların başında Damen Tersaneleri Grubu, Bureau Veritas, Autodesk ve RAMLAB gibi şirketlerin ortak çalışmalarıyla üretilen dünyanın ilk klas onaylı 3 boyutlu basılmış pervanesi "WAAMPeller" gelmektedir. Tel ark eklemeli imalat ile üretilen pervanede; alüminyum, nikel ve bronz alaşımı kullanılmıştır (RAMLAB, 2017). Şekil 10'da üretilen pervane gösterilmiştir.



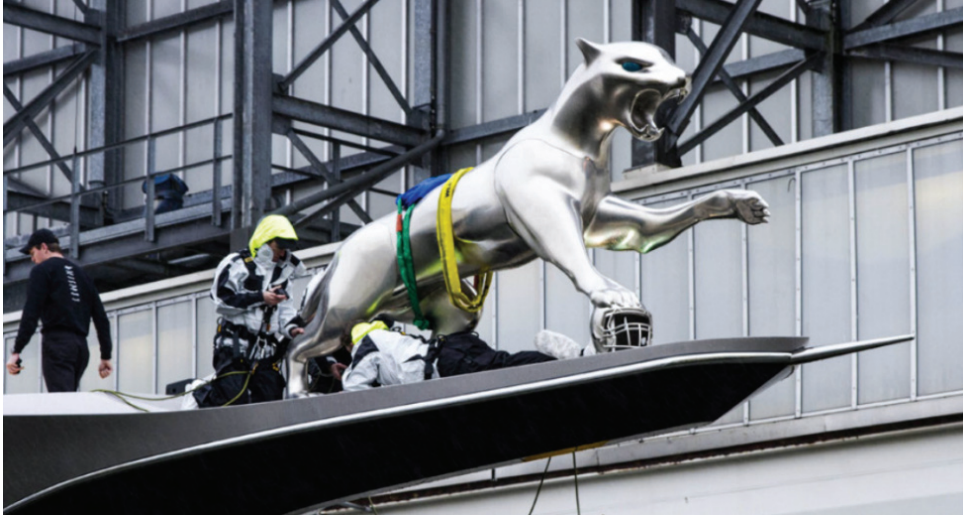
**Şekil 10.** WAAMPeller (RAMLAB, 2017)

Başka bir örnekte; Central Nantes ve Naval Group tarafından, tel ark eklemeli imalat kullanılarak dünyanın ilk boşluklu pervane kanadı üretilmiştir. Bu şekilde tüm pervanenin %40 oranında daha hafif olarak üretilebileceği belirtilmiştir (METAL AM, 2019). Duintjer vd. (2016) yaptıkları çalışmada DMG



Mori firmasının ürettiği yönlendirilmiş enerjiyle biriktirme sistemiyle çalışan yazıcıda örnek bir pervane üreterek geleneksel yöntemlerle karşılaştırmasını yapmışlardır. Üretilen pervane geleneksel yöntemlerle aynı maliyete sahip olmakla birlikte 4 haftada üretilmiştir. Ancak, çalışmada yapılacak güncellemelerle birlikte bu sürecin 1-2 haftaya düşebileceği de belirtilmiştir.








Pervanelerin dışında genellikle yat gibi görselliğin ön planda olduğu teknelerde civadraların veya çeşitli görsel heykellerin veya sembollerin üretimi için de eklemeli imalat teknolojileri kullanılmaktadır. Her yat için özel olarak üretilen ve genellikle karmaşık yapıya sahip olan bu ürünlerin eklemeli imalatla üretilmesi ile maliyet ve üretim hızı açısından fayda sağlanabilir. Örnek olarak, Lürssen firması tarafından eklemeli imalat kullanılarak 4,1 metre uzunluk ve 2 metre yüksekliğindeki jaguar görünümlü civadra sıvı polimer malzemenin lazerle sertleştirilmesiyle, tek parça olarak üretilmiştir (Megayatch News, 2015). Şekil 11’de bahsedilen civadra gösterilmiştir.



Şekil 11. Jaguar görünümlü civadra (Megayatch News, 2015)

Bu parçaların dışında gemilerde özellikle yedek parça olarak depolanan civata, flanş, menteşe ve diğer motor parçaları gibi ürünlerin üretimi hakkında farklı çalışmalar yapılmıştır. Gemilerde 3 boyutlu yazıcıların kullanımı uçlar, kelepçeler, aletler, tutamaklar ve benzeri basit ürünlerin dışında değiştirilmek üzere en yakın limana kadar dayanması gereken acil durum parçaları gibi parçaların üretilmesi dayanıklı malzemelerin (karbon fiber gibi) kullanılmasıyla sağlanabilir (Ziolkowski ve Dyl, 2020). 2019 yılında aralarında DNV-GL, Wartsila ve NAMIC gibi firmaların bulunduğu bir çalışmada Singapur limanlarında gemiler tarafından en çok sipariş edilen 100 parçanın eklemeli imalat teknikleri ile üretiminin kapsamlı bir çalışması yapılmıştır. Yapılan çalışma sonunda belirlenen parçalar kendi aralarında klas sertifikalı üretimi uygun, klas sertifikasız üretimi uygun ve üretimi uygun olmayan olarak üç ana başlık altında toplanmıştır. Yapılan sınıflandırmadaki “klas sertifikalı üretimi mümkün” olan parçalar gemideki güvenlik açısından kritik olan bileşenleri (motor parçaları gibi); “klas sertifikasız üretimi mümkün” olan parçalar gemide güvenliğin kritik olmadığı bileşenleri; “üretimi mümkün olmayan” parçalar ise şekil ve malzeme tipi gibi nedenlerden dolayı üretimi mümkün olmayan bileşenleri temsil etmektedir (MPA Singapore, 2019). Çalışma sonunda üretimi gerçekleştirilmiş örnek parçalara ait özellikle, üretim süresi ve maliyetteki fark Tablo 5’te paylaşılmıştır.

**Tablo 5. Üretilen parçalar ve özellikleri (MPA Singapore)**

Parça İsmi	Orijinal Malzeme	Kullanılan Malzeme	Ei Üretim Süresi	Parça başına Ortalama Kazanç	Parça Görseli
Valf volanı	Döküm	Poliamid/ Naylon	19 saat	5,89 \$	
Frenji Tıkacı	Pirinç ve Kauçuk	Poliamid/Naylon + Termoplastik poliüretan	17 saat*	4,50 \$	
U Civata	Galvanizli çelik	Dayanıklı Reçine	2 saat	11,26 \$	
Kılavuz Çubuk	Düşük alaşimli Mn-V Çelik	Çelik	8 saat	1965,00 \$	
Kanatlı Somun	Pirinç	Karbonfiber Naylon	5 saat*	2,95 \$	
Boru Kapakları / Toz Kapakları	Pirinç / Çelik	Poliamid/ Naylon	3 saat	3,96\$	
Civata kapakları	Akilonitril Bütadien Stiren (ABS)	Poliamid/ Naylon	19 saat*	10,44 \$	

\* En büyük parça için

Gemilerin seferdeyken yaşadıkları arızaları tersaneye gitmeden veya limana uğramadan kendi imkanlarıyla çözebilmesi maliyet açısından büyük bir kazanç olacaktır. Gemide bir 3B yazıcı uygulaması göz önüne alındığında, en makul olanı bir veya iki cihaz kullanmak, tercihen ucuz, olumsuz çevre koşullarına dayanıklı ve aynı zamanda çok yönlü olan malzeme ekstrüzyonu teknolojisiyle üretilecek fiberle güçlendirilmiş kompozit malzemelerle çalışmak gibi görünmektedir (Ziolkowski ve Dyl, 2020). Ancak bu yazıcıların, gemilerin çalışma koşulları ve stabil durumdayken bile sahip olduğu titreşimin baskıya etkisi incelenmeli ve mürettebata yazıcıların kullanımı hakkında detaylı bir eğitim verilmesi gereklidir.

Yapılan başka bir çalışmada ise gemi inşaatı endüstrisinde kullanılan yedek parçaların eklemeli imalat ile üretim potansiyeli hakkında 2015 yılında 26 Hollandalı denizcilik şirketi birleşerek ortak bir araştırma programı kurmuşlardır. Çalışmalarında pervane üretiminden civata üretimine kadar 30 farklı parça için değerlendirme yapıp 7 farklı parçanın detaylı analizini gerçekleştirmişlerdir (Duintjer vd., 2016). İncelenen parçalar şunlardır:

- Pervane
- Soğutmalı valf yuvası
- Ara halka
- Menteşe
- T-konnektör
- Mühür Jig
- Manifold

Çalışmada parçaların gerekli özelliklerine göre çeşitli eklemeli imalat yöntemleri kullanılmıştır. Çalışma sonucunda manifold haricindeki diğer tüm ürünlerin üretimi geleneksel yöntemlerle yapılan üretime göre aynı veya daha yüksek maliyetle üretilmiştir (Duintjer vd., 2016).

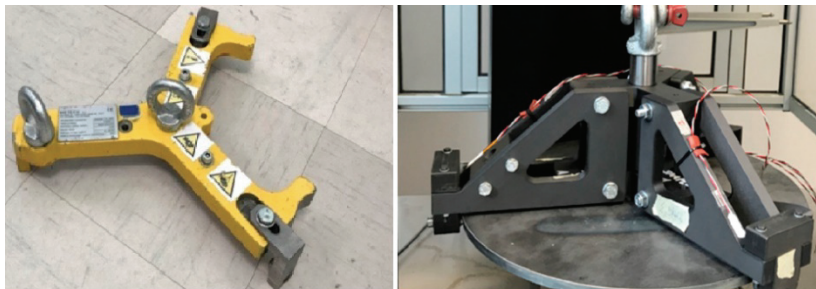
Amerika Birleşik Devletleri savunma sanayiinde dizel makina, gemi soğutma sistemlerinin hava giriş, egzoz ve turboşarjer muhafazası, alüminyum şase gibi ürünlerin üretiminde metal eklemeli imalat tekniklerinden faydalanmaktadır. 2019 yılında USS Harry S. Truman uçak gemisinin su tahliye sisteminde eklemeli imalat ile üretilmiş bir parça NAVSEA onayı alınarak kullanılmıştır. Böylece bu üretim yönteminin en büyük sorunlarından olan sertifikalandırma alanında önemli bir adım atılmıştır (Güngör, 2020). Şekil 12’de basımı yapılan parça gösterilmiştir.



**Şekil 12.** Gemide kullanımı NAVSEA tarafından onaylanan eklemeli imal edilmiş ilk parça (Güngör, 2020)

Eklemeli imalat teknolojileri gemilerdeki vinçlerde kullanılan kanca ve benzer parçaların üretiminde de kullanılmaktadır. Örnek olarak; Huisman Equipment için DNV-GL, Bureau Veritas ve ABS klaslarının işbirliği ile Tel Ark Eklemeli İmalat yöntemiyle üretilen kanca verilebilir. Aynı mukavemet değerlerine sahip ama daha hafif yapıp bir yapı oluşturmak için geleneksel yöntemlerle üretimi zor ve maliyetli olacak bir dizaynla kancanın içinde kanallar oluşturulmuştur (Ziolkowski ve Dyl, 2020).

Wärtsilä şirketi eklemeli imalatın uygulamaları ile yakından ilgilenmekte ve bu konuda çeşitli çalışmalar yapmaktadır. Şirketin hedefinde depolama maliyetini azaltmak için istek üzerine baskı yapacağı bir sistem kurmak vardır. Başka bir örnekte Wärtsilä şirketi 2019 yılında şu anda kullanımda olan aletin yerini alacak olan, silindir gömleği ile piston ve bağlantı mili taşıyabilen bir ürünün üretimini eklemeli imalat kullanarak gerçekleştirmiştir. Malzeme ekstrüzyonu yöntemiyle üretilen taşıyıcıda karbon fiber destekli malzeme kullanılmış ve böylece %75 oranında daha hafif bir taşıyıcı elde edilmiştir. Bureau Veritas ile birlikte yapılan dayanım testlerinden geçen taşıyıcı, eklemeli imalatla üretilmiş ve CE sertifikalı ilk taşıyıcı ürünü olmuştur (Ziolkowski ve Dyl, 2020). Şekil 13’te eskiden kullanılan ve yeni kullanılan parçalar birlikte gösterilmiştir.



**Şekil 13.** Eski kullanılan taşıyıcı (sol) ve yeni kullanılan taşıyıcı (sağ) (Ziolkowski ve Dyl, 2020)

#### 4. Sonuçlar

Endüstri 4.0 kavramıyla birlikte, günümüzde üretim yöntemleri sürekli olarak bir evrim geçirmekte ve insan faktörü azaltılmaya çalışılmaktadır. Eklemeli imalat teknikleri henüz tam olarak otomasyonlaşmamış olsa da geleneksel üretim yöntemleri ile üretimi uzun ve maliyetli olan kompleks parçaları daha uygun maliyete ve daha hızlı şekilde üretebilmektedir. Bu özellikleri sayesinde yeni dizaynların ortaya çıkışını kolaylaştırmakta ve tasarımcılara özgürlük sunmaktadır. Ancak; baskı boyutları, üretimin tekrarlanabilirliği, bu alanda yetkin kişilerin azlığı, endüstriyel standartların oluşturulması ve yazıcıların maliyetleri gibi sahip olduğu çeşitli dezavantajlar da bulunmaktadır.

Havacılık ve uzay, otomotiv ve özellikle medikal alanlarda büyük bir kullanım oranına sahip olan eklemeli imalat teknolojileri gemi inşaatı endüstrisinde de çeşitli alanlarda kullanılmaya başlanmıştır. Akademik alanda özellikle mühendislik alanı eğitiminde öğrencilerin eğitim kalitesinin artırılması ve bilimsel araştırmalarda kullanılan modellerin üretilmesi için uygun ve hızlı çözümler sunmasıyla büyük bir avantaj sağlamaktadır. Özellikle bilimsel araştırmalar için kullanılan modellerin kurumlar tarafından dışarıdan satın alınması ve kurumun sahip olacağı yazıcı ile üretimi gerçekleştirmesi arasındaki maliyet farkı bunun iyi bir örneğidir. Sanayi alanında ise özellikle yedek parça üretimi ve askeri amaçlı üretimler için çeşitli çalışmalar yapılmaktadır. Konstrüksiyon parçalarının üretiminde metal malzemeler için henüz geleneksel yöntemlere göre hala daha maliyetli olan eklemeli imalat, kompozit tekne ve deniz yapılarının üretiminde bu durumu tersine çevirmiş durumdadır. Özellikle 24 metre ve altındaki teknelerin seri üretimi için kullanılabilir bu yöntem ile daha hafif yapılar ve karmaşık geometriler kolaylıkla üretilmektedir. Donatım alanında ise cıvadra, pervane ve yedek parçalar için yapılan çalışmalara istinaden hem tersanelerin hem de seferdeki gemilerin dışa bağımlılığını azaltıp çeşitli kazançlar sağlayabileceği ve yan tedarikçilere de kalıp maliyeti gibi konularda aynı şekilde kazanç sağlayabileceği görülmüştür.

Klas kuruluşları ve çeşitli standartlaştırma organizasyonlarının da bu konuda yaptığı çalışmalarla, eklemeli imalat teknolojilerinin yakın gelecekte gemi inşaatı endüstrisinde önemli bir yere sahip olacağı görülmüştür.

#### Teşekkürler

Bu çalışmanın gerçekleşmesine tecrübe ve fikirleriyle katkıda bulunan Prof. Dr. Ömer Gören (İTÜ), Doç. Dr. Devrim Bülent Danışman (İTÜ), Prof. Dr. Mehmet Ali Baykal (Gedik Üniv.), Ahmet Emre Kurt (ARES), İlke Karamanop (Damen), Yavuz Kayıhan (STM), Şaban Karacaoğlan (3Dörtgen) ve Tolga Bolol'a (Promakin) teşekkür ederiz.

#### Referanslar

3D Hubs (2020). 3D printing trends 2020 Industry highlights and market trends. <https://www.hubs.com/blog/3d-printing-trends-2020/>

3Dirigo (n.d.). The World's Largest 3D Printed Boat. <https://composites.umaine.edu/3dirigo-the-worlds-largest-3d-printed-boat/> [Online] [Erişim 03.06.2021]

ASTM F2792-12a (2012). Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies. ASTM International, West Conshohocken, PA.

Bergsma, J., Zalm, M. and Pruyn, J. (2016). 3D-Printing and the Maritime Construction Sector. Paper presented at High-performance marine vehicles (HIPER), October 17-19, Cortona, Italy.

Bourella, D. L., Beaman Jr., J., Leub, M. C., and Ros, D. W. (2009). A Brief History of Additive Manufacturing and the 2009 Roadmap for Additive Manufacturing: Looking Back and Looking Ahead. US – TURKEY Workshop On Rapid Technologies, September 24, 2009.

Calle, M. A. G., Kujala, P., Salmi, M., and Mazzariol, L. M. (2019). ASIS web girder test: A miniature experiment. In Developments in the Collision and Grounding of Ships and Offshore Structures. CRC Press.

Cilia, T., Bertetta, D., Gualeni, P. and Tani, G. (2019). Additive Manufacturing Application to a Ship Propeller Model for Experimental Activity in the Cavitation Tunnel. Journal of Ship Production and Design, 35(04), 364-373.

Danışman, D.B., (2016). Ata Nutku Model Deney Tankı Çekme Deneyleri İçin Model İmalat Süreci, GiDB|DERGi, Sayı 7.

Duintjer, J., Schardijn, J. and Wegener, V. (2016). Final Report Pilot Project 3D Printing of Marine Spares. <https://www.portofrotterdam.com/sites/default/files/report-3d-printing-marine-spares.pdf> [Online] [Erişim 05.06.2021].

EPMA (2019). Introduction To Additive Manufacturing Technology. <https://www.epma.com/epma-free-publications/product/introduction-to-additive-manufacturing-brochure> [Online] [Erişim: 20.05.2022].

Gibson I., Rosen, D. and Stucker, B. (2015). Additive manufacturing technologies 3D printing, rapid prototyping, and direct digital manufacturing (2nd ed.). <http://10.1007/978-1-4939-2113-3>.

Güngör, A. (2020). Türkiye’de Katmanlı İmalat ve Gemi İnşaatı Üzerine Etkileri. GMO Journal of Ship and Marine Technology, 218, 36-53.

Housel, T. J., Mun, J., Ford, D. N. and Hom, S. (2015). Benchmarking Naval Shipbuilding with 3D Laser Scanning, Additive Manufacturing, and Collaborative Product Lifecycle Management. Acquisition Research Program Graduate School of Business & Public Policy Naval Postgraduate School.

Insider (2017). The Navy can now 3D-print submarines on the fly for SEALs <https://www.businessinsider.com/the-navy-can-now-3d-print-submarines-the-fly-seals-2017-7> [Online] [Erişim 05.06.2021].

ISO (2015). Standard Terminology for Additive Manufacturing—General Principles—Terminology. ISO/ASTM 52900-15; ISO/ASME International: Geneva, Switzerland.

ITTC (2017). Recommended Procedures and Guidelines. <https://www.ittc.info/media/7975/75-01-01-01.pdf>

Linke, R. (2017) Additive manufacturing, explained. <https://mitsloan.mit.edu/ideas-made-to-matter/additive-manufacturing-explained> [Online] [Erişim 20.05.2022]

Liu, P., Bose, N., Frost, R., Macfarlane, G., Lilienthal, T., and Penesis, I. (2015). Model testing and performance comparison of plastic and metal tidal turbine rotors. Applied Ocean Research, 53, 116–124.

Megayatch News (2015). Lürssen's Kismet: Coolest Bowsprit  
<https://megayachtnews.com/2015/02/kismet-coolest-bowsprit-ever/> [Online] [Erişim 05.06.2021]

METAL AM (2019). Metal Additive Manufacturing enables 'world's first' hollow propeller blade.  
<https://www.metal-am.com/metal-additive-manufacturing-enables-worlds-first-hollow-propeller-blade/> [Online] [Erişim 05.06.2021].

METALMECANICA (2014). Technologies and applications in additive manufacturing of metallic materials.  
<https://www.interempresas.net/MetalMecanica/Articulos/118715-Tecnologias-y-aplicaciones-en-fabricacion-aditiva-de-materiales-metalicos.html> [Online] [Erişim 31.05.2021]

Minetola P., Iuliano L., Bassoli E. and Gatto A., (2015). Impact of additive manufacturing on engineering education - evidence from Italy, *Rapid Prototyping Journal*, 21 (5), 535–555.

MOI (n.d.), World's first 3D printed fiberglass boat. <https://www.moi.am/projects/mambo> [Online] [Erişim 05.06.2021]

Motyl, B. and Filippi, S. (2021). Trends in engineering education for additive manufacturing in the industry 4.0 era: a systematic literature review. *Int J Interact Des Manuf*, 15, 103–106.

MPA Singapore (2019). Additive Manufacturing for Marine Parts a Market Feasibility Study with Singapore Perspective. [https://www.mpa.gov.sg/web/wcm/connect/www/99a3720f-abfc-4b079c9b-467220c1000a/Additive+Manufacturing+Market+Feasibility+Study\\_Public+Version.pdf?MOD=AJPERES&id=1572312102868](https://www.mpa.gov.sg/web/wcm/connect/www/99a3720f-abfc-4b079c9b-467220c1000a/Additive+Manufacturing+Market+Feasibility+Study_Public+Version.pdf?MOD=AJPERES&id=1572312102868) [Online] [Erişim 05.06.2021]

Özer, G. (2020). Eklemeli Üretim Teknolojileri Üzerine Bir Derleme . *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi* , 9 (1) , 606-621.

RAMLAB (2017) RAMLAB unveils world's first class approved 3d printed ship's propeller  
<https://www.ramlab.com/updates/ramlab-unveils-worlds-first-class-approved-3d-printed-ships-propeller/> [Online] [Erişim 05.06.2021]

STM (2016). Katmanlı İmalat Teknolojileri ve Havacılık Uygulamaları Sektör Değerlendirme Raporu.  
[https://thinktech.stm.com.tr/uploads/docs/1608890607\\_stm-sektor-raporu-katmanli-imalat-teknolojileri.pdf](https://thinktech.stm.com.tr/uploads/docs/1608890607_stm-sektor-raporu-katmanli-imalat-teknolojileri.pdf)

TEI (n.d.). Additive Manufacturing Technologies. <https://www.tei.com.tr/en/activity-areas/parts-and-module-manufacturing/additive-manufacturing> [Online] [Erişim 21.05.2021]

Tofail, S. A. M., Koumoulos, E. P., Bandyopadhyay, A., Bose, S., O'Donoghue, L., and Charitidis, C. (2018). Additive manufacturing: scientific and technological challenges, market uptake and opportunities. *Materials Today*, 21(1), 22–37.

Wholers, T. and Gornet, T. (2014). History of additive manufacturing. *Wohlers report*, 24, 118.

Ziółkowski, M., and Dyl, T., (2020). Possible Applications of Additive Manufacturing Technologies in Shipbuilding: A Review. *Machines*, 8(4), 84.

