

Katmanlı İmalat Teknolojileri ve Havacılık Uygulamaları

Sektör Değerlendirme Raporu

Ağustos'16



thinktech
STM Future Technology Institute

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ	4
GİRİŞ	5
1. KATMANLI İMALAT TEKNOLOJİLERİ (ADDITIVE MANUFACTURING)	6
1.1. GELİŞİM	7
1.2. KATMANLI İMALAT YÖNTEMLERİ	8
1.2.1. TOZ YATAKLI LAZER ERİTMELİ SİSTEMLER (POWDER BED LASER MELTING/SINTERING)	9
1.2.2. TOZ BESLEMELİ LAZER ERİTMELİ SİSTEMLER (POWDER FED LASER MELTING)	10
1.2.3. YAPIŞTIRICI İLE KATMANLI İMALAT (BINDER JETTING)	11
1.2.4. ELEKTRON KAYNAĞI.....	11
1.2.5. ERİMİŞ MALZEME ŞEKİLLENDİRME (FUSED DEPOSITION MODELLING – FDM)	11
1.2.6. MALZEME JETİ (MATERIAL JETTING).....	12
1.2.7. STEREOLİTHOGRAFİ	12
1.3. TEZGÂHLAR.....	13
1.4. STANDARTLAŞMA ÇALIŞMALARI	13





1.5. PAZAR VE MALİYET ETKİNLİK	14
1.6. YÜRÜYEN PROJELER HAVACILIK UYGULAMALARI	17
2. HAVACILIK UYGULAMALARI	18
2.1. HAVACILIKTA UYGULANABİLİRLİĞİ	19
2.2. KATMANLI İMALATIN HAVACILIK ÖRNEKLERİ	20
2.2.1. GE SICAKLIK SENSÖR KORUMA ÜNİTESİ VE CFM YAKIT ENJEKTÖRÜ SİSTEMLER (POWDER BED LASER MELTING/SINTERING)	20
2.2.2. ROLLS-ROYCE "BEARING HOUSING" ...	21
2.2.3. BAE SYSTEMS AM PIPES	22
2.2.4. AIRBUS NACELLE HINGE BRACKETS ...	22
3. DEĞERLENDİRMELER	24
3.1. TÜRKİYE'DE KATMANLI İMALATIN UYGULANMASI	25
KAYNAKÇA.....	28
EK-1 KATMANLI İMALAT (ADDITIVE MANUFACTURING) ÜZERİNE ISO/ASTM STANDARTLARI.....	29

ÖNSÖZ

STM olarak rapor kapsamında, sektörde öncü kurum ve kuruluşlar ile görüşmeler gerçekleştirilmiş ve başarılı havacılık çözümleri gerçekçi bir yaklaşımla incelenmiştir.

Günümüzde, "3-Boyutlu Yazıcılar" ile ilgili başarı hikâyeleri sıklıkla karşımıza çıkmaktadır. Kamuoyunda "3-Boyutlu Yazıcı" olarak adlandırılan bu imalat teknolojisi literatürde "Katmanlı İmalat (Additive Manufacturing)" olarak da anılmaktadır. Mühendisler, imalat kaynaklı kısıtların ortadan kalkması sonucu; zihinlerindeki tüm tasarımları kısa sürede hayata geçirebilmekte, daha hafif ve belki de imal edilemez şekilleri gündemlerine alabilmektedirler.

STM olarak rapor kapsamında; sektörde öncü kurum ve kuruluşlar ile görüşmeler gerçekleştirilmiş, geniş bir kaynak havuzu taranarak maliyetler, tezgâh üreticileri, kullanılan malzemeler, yöntemler ve başarılı havacılık çözümleri gerçekçi bir yaklaşımla incelenmiştir. İlk değerlendirmelerimiz, oldukça yaygınlaşmaya başlayan polimer-plastik uygulamaların artık olgunlaştığı, ileri imalat ve malzeme teknolojilerine ve yüksek maliyetlere sahip olan havacılık sektörü için kritik öneme sahip metal parçaların katmanlı imalat ile üretilmesinin çığır açabilecek bir alan olduğudur. Dünyada; önde gelen motor ve platform üreticileri bu konuda ciddi araştırmalar ve yatırımlar yapmakta, patentler almakta, hatta birkaç örnek için uçuş emniyet onayları alarak seri üretim yapmaktadırlar. Benzer şekilde, metal katmanlı imalat teknolojisinin, ülkemizde, Milli Muharip Uçak (T-FX), Özgün Helikopter, motor/iniş takımları/roket geliştirme gibi Savunma Sanayii Müsteşarlığı (SSM tarafından yürütülen projelerde gündeme getirilebileceği düşünülmektedir. Tasarımların başlangıç aşamalarında bu kararı vermek, katmanlı imalatın avantajlarını da projelere yansıtacaktır.

Raporda yer alan bilgi ve değerlendirmelerin, kamuoyu ve konuya ilgi duyan kurum ve kuruluşlar için yararlı olmasını diliyorum.

Davut YILMAZ
Genel Müdür

GİRİŞ

Havacılık sektörü, az sayıda ancak yüksek maliyetlerde imalatlar gerektirdiğinden birçok teknolojide olduğu gibi katmanlı imalatta da öncelikli uygulama alanıdır.

Çalışma kapsamında, günümüzde çok popüler olan ve genel olarak "3-Boyutlu Yazıcılar" diye adlandırılan, katmanlı imalat (additive manufacturing) sektörü incelenmiş, Türkiye'deki öncü tezgâh tedarikçisi firmalar ile mülakatlar yapılmıştır. Polimer ve türevleri üzerine ofis tipi ve çoğunlukla "yazıcı" olarak adlandırılan pazardan daha çok nitelikli prototip ve seri imalatlar için geliştirilmiş çözümler incelenmiştir. Havacılık sektörü, az sayıda ancak yüksek maliyetlerde imalatlar gerektirdiğinden birçok teknolojide olduğu gibi katmanlı imalatta da öncelikli uygulama alanıdır.

Polimer ve türevleri için kullanılan teknolojilerin nispeten olgunlaştığı görülmektedir. Endüstrilerdeki birçok imalatı etkileyebilecek olan ve büyük potansiyel arz eden çözümler, metal katmanlı imalat teknolojileridir. Metal imalat teknolojilerinin zamanla pratik ve ucuz uygulamalara dönüşmesi durumunda, mühendislerin hayal ettiği tüm geometriler hızla üretilebilir hale gelebilecektir. Bu çalışmada, şu anda ne tür çözümlerin pazarda bulunduğu ve maliyet-etkinliği değerlendirilmiştir.

Sektörel bir dergisi de bulunan (Metal Additive Manufacturing Magazine) metal katmanlı imalat pazarı, çok farklı çözümler geliştirme potansiyeli ile giderek büyümektedir. Türkiye'de sınırlı sayıda tezgâh sağlayıcı, kuyumcu ve diş protez üreticisi haricinde, Savunma Sanayii Müsteşarlığının bir araştırma projesi kapsamında bir adet metal katmanlı imalat tezgâhı bulunmaktadır.

Raporun ilk bölümünde katmanlı imalat teknolojileri ve Türkiye'deki durumu incelenmiş, sonrasında havacılık alanında tipik örnekler ve değerlendirmelere yer verilmiştir.



KATMANLI İMALAT (ADDITIVE MANUFACTURING) TEKNOLOJİLERİ

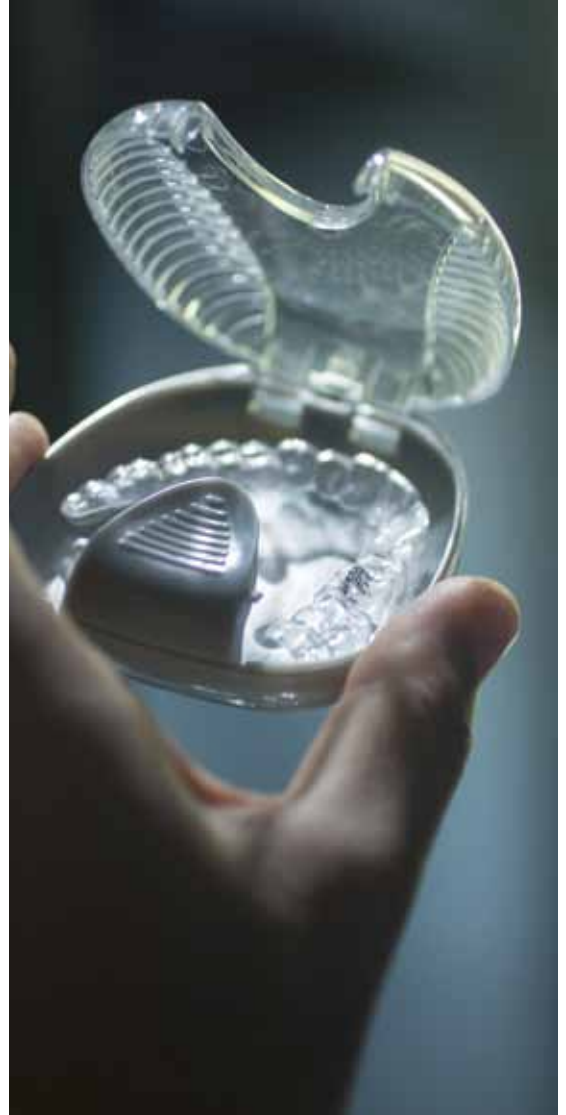
1. Katmanlı İmalat (Additive Manufacturing) Teknolojileri

1.1. Gelişim

Katmanlı imalat (Additive Manufacturing), tasarımlara imalat yöntemi kaynaklı sınır getirmemesi ve çok farklı malzeme kullanımı gibi büyük avantajlara sahiptir. Bilinen torna/freze türü aşındırılmalı imalat yöntemlerinin aksine, malzeme ekleyerek ve bütünleştirerek imalat yapılmaktadır. 1980'lerde ilk uygulama, büyük kolaylıklar sağlaması nedeniyle hızlı prototipleme (rapid prototyping) alanında olmuştur. 1987'de 3D Systems, Stereolithography (SL) tekniği olarak bilinen plastik işleme yöntemi ile ilk ticari çözümler sağlanmıştır. Bu yöntem ile mor ötesi ışığa duyarlı polimerler bir lazer yardımıyla katman katman dondurulmakta ve özellikle mühendis ve tasarımcılara etkili prototip/mokap çözümler oluşturulmaktadır.

1990'larda, polimer tabanlı katmanlı imalat teknolojileri özellikle Stratasys tarafından geliştirilen "fused deposition modeling (FDM)", Cubital firmasının "solid ground curing (SGC)", Helisys firmasının "Laminated Object Manufacturing (LOM)" metodlarının kullanımı ile ticarileşmiştir. DTM firmasının, toz maddelerin eritilmesi yöntemi "Selective Laser Sintering (SLS)" çözümü de bu dönemde tanıtılmıştır. 1994'de EOS firması, doğrudan metal tozu katılaştırma (direct metal laser sintering) tekniğini pazara tanıtmış, sonrasında EOSINT M160 ve M250 modeli tezgâhları geliştirmiştir; ancak elde edilen çözümler, bronz benzeri düşük sıcaklıklarda eriyen ve çelik gibi mukavim metallerin karışımı işlendiğinden, metal alaşımlardan çok kompozit malzemelerin özelliğini göstermektedir. 1990'ların sonlarında, Optomec ve Röders firmaları benzer lazer işlem teknolojileri ile çözümler geliştirmiştir. ExtrudeHone firması, MIT'nin geliştirdiği bir teknoloji ile toz içerisinde ham şekillerin lazer yardımıyla eritilerek oluşturulması yöntemini, alet tasarımına yönelik olarak "Prometal Rapid Tooling System RTS-300"ü geliştirmiştir. 2002

yılında ise Precision Optical Manufacturing firması da lazer ile metal kaplama (Direct Metal Deposition-DMD) teknolojisini tanıtmıştır. [1]



Şekil 1: Stereolithography Örneği

1.2. Katmanlı İmalat Yöntemleri

Katmanlı imalata yönelik birçok uygulama bulunmakla birlikte, bu uygulamalar, yöntemine ve malzemelerine göre sınıflandırılmaktadır. Şekil 2'de katmanlı imalatta kullanılan temel uygulama yöntemleri ve temel (fiziksel ve şekilsel) özellikleri gösterilmektedir. Bu temel yöntemler şunlardır:

- Lazer Eritmeli Sistemler (Laser Melting/Laser Sintering)
- Erimiş Malzeme Şekillendirme (Fused Deposition Modelling – FDM)
- Stereolithografi
- Malzeme Jeti (Material Jetting)
- Yapıştırıcı ile Katmanlı İmalat (Binder Jetting)
- Elektron Kaynağı (Electron Beam Melting)

Materials	Technologies		
	Parts built through polymerization	Parts built through bonding agent	Parts built through melting
Ceramic		BJ	LM
Metal			EBM
Sand			
Plastic	SL, PJ		FDML, S
Wax			MJ*
* MJ achieves smooth surface finish and high detail	Lower	Higher	
	Smoother	Rougher	
	Higher	Lower	
	Prototypes Indirect processes	Functional parts	

Şekil 2: Katmanlı İmalat Yöntemleri ve Temel Özellikleri [2]

Şekil 2 - Kısaltmalar:

Binder Jetting (BJ)

Electron Beam Melting (EBM)

Fused Deposition Modeling (FDM)

Laser Melting (LM)

Laser Sintering (LS)

Material Jetting (MJ)

Photopolymer Jetting (PJ)

Stereolithography (SL)

1.2.1. Toz Yataklı Lazer Eritmeli Sistemler (Powder Bed Laser Melting/Sintering)

Bu sistemlerde; toz içerisinde tasarımın bir kesiti lazer ile eritilir ve üzerine yeni bir katman toz ilave edilerek sıradaki katman eritilerek eklenir. Katmanların kalınlığı 20-100 µm kadardır. Yeni teknoloji uygulamalar birden çok ve farklı güçlerde lazerleri soy gaz ortamında kullanmaktadır. Lazer eritme yöntemi de denilen bu yöntemde, "Selective Laser Melting (SLM)", "Laser Curing" ve "Direct Metal Laser Sintering (DMLS)" gibi birçok farklı isimde ticari çözüm bulunmaktadır. Bununla birlikte, tümüyle vakum içinde uygulanan "Electron Beam Melting (EBM)" sistemi de kullanılan uygulamalardan biridir. Bu alanda bilinen tezgâhları, Avrupa'da Concept Laser, EOS, ReaLizer, Renishaw ve SLM Solutions, ABD'de ise 3D-Systems sunmaktadır. İsveçli Arcam AB firması da Japon Matsuura ile ortak geliştirdiği elektron ışını kullanan bir çözüm sunmaktadır.

Katmanlı imalat, çoğunlukla ana imalat yöntemi olup yüzey düzeltme/çapak alma gibi tesviye ve ısı işlemler, imalat sonrası uygulanabilmektedir.



Şekil 3: Toz Yataklı Lazer Eritme Sistemleri

1.2.2. Toz Beslemeli Lazer Eritmeli Sistemler (Powder Fed Laser Melting)

Bu sistemde, toz halindeki ham metalin istenilen noktalara lazer veya elektron ışını gibi enerji kaynakları ile ısıtılıp eritilerek püskürtme yapılır. Lazer Kaplama (laser cladding), Yönlendirilmiş Enerji Birikimi (Directed Energy Deposition), Lazer Metal Biriktirme (Laser Metal Deposition) gibi isimlendirmeler de kullanılır. Bu yöntem, kullanılan tezgâhın kabiliyetine göre 100 µm kadar ince yapıların oluşturulmasına yönelik oldukça hassas kontrol edilen bir yöntemdir. Toz Yataklı Lazer Eritmeli Sistemlerin aksine, bu yöntemde metal biriktirilen yüzey/yapı çok fazla ısıtılmaz. Bu tekniğin bir geliştirilmiş uygulamasında, Optomec firmasının "Laser Engineered Net Shaping" tekniği ile var olan bir yapıya zarar vermeden kaplaması ile tamiratlar yapılabilmektedir. Bu teknik, oksitlenmeyi engellemek amacıyla soygaz ortamını sağlayan tezgâhlarda ve birçok farklı metal alaşım kullanılmaktadır.

Metal tozu beslemeli sistemlerde, ABD'de Optomec firmasının yanı sıra Sciaky ve DMG Mori firmaları, Fransa'da BeAM, Almanya'da Trumpf firmaları çözümler sunmaktadır.

Metal tabanlı sistemlerde çok farklı metal tozları kullanılmaktadır. Bu metaller kullanıma uygun hale getirilmek için genellikle, gaz atomizasyonu denilen işlemle olabildiğince küçük çaplı ve eşit boyda kürecikler haline getirilir. Aşağıda verilen tabloda en çok kullanılan metal alaşımlar listelenmiştir:

Sınıflandırma	Malzeme
Alüminyum Alaşımlar	AlSi10Mg / AlSi7Mg / AlSi12
Kobalt Tabanlı Alaşımlar	ASTM F75 / CoCrWC
Alet Çeliği	AISI 420 / Marage 300 / H13 / AISI D2 - A2 - S7
Nikel Tabanlı Alaşımlar	Inconel 718 - 625 - 713 - 738 / Hastelloy X
Paslanmaz Çelik	SS 304 - 316L - 410 - 440 / 15-5 PH / 17-4 PH
Titanyum Alaşım	Titanyum Grade 2 / Ti6Al4V / Ti6Al4V ELI / TiAl6Nb7
Değerli Metaller	Altın türevleri / gümüş türevleri
Bakır Alaşım	CC 480 K

Tablo 1: En Çok Kullanılan Metaller [1]

1.2.3. Yapıştırıcı ile Katmanlı İmalat (Binder Jetting)

Genelde kalıp imalatı için kullanılan bu yöntemde, toz materyal üzerine, mürekkepli yazıcılar benzeri hareketli bir kafa ile yapıştırıcı uygulanır ve üzerine yeni materyal katmanı serilerek sertleştirilir. Yapıştırıcı ana tutucu olduğundan genel olarak daha kırılğan çözümler gerçekleştirilir. Bu uygulama metoduna yönelik en çok bilinen çözümü, döküm uygulamaları için kullanılabilir kum kalıp benzeri erkek/dişi kalıplar için tezgâhlar üreten ExOne firması gerçekleştirmiştir.

1.2.4. Elektron Kaynağı

Nispeten lazer eritme sistemlerine benzeyen bu yöntemde, ısı kaynağı olarak elektron tabancası kullanılmaktadır. Isıtılan odak merkezine eritilecek malzeme kablo şeklinde beslenmekte ve eriyip bir katman oluşturmaktadır. Mevcut uygulamalar, çok hassas olmayan, geniş ve daha büyük miktarda imalatlar içindir. Katman katman oluşturulan kaba şekil daha sonra geleneksel imalat yöntemleri ile işlenmektedir.

1.2.5. Erimiş Malzeme Şekillendirme (Fused Deposition Modelling – FDM)

“3-boyutlu yazıcı” olarak adlandırılan imalat yöntemidir. Genelde plastik ve polimer malzemelerin kullanıldığı bu yöntemde, malzemeler filamentler halinde eritilip uygulama yapan hareketli bir kafaya iletilir ve katmanlar halinde üst üste yapıştırılarak şekil oluşturulur ve ortam sıcaklığında sertleştirilir. Bu yöntem genellikle hızlı prototipleme ve az sayıda seri imalat durumlarında tercih edilmektedir.



Şekil 4: Erimiş Malzeme Şekillendirme (3 Boyutlu Yazıcı)

1.2.6. Malzeme Jeti (Material Jetting)

Bu yöntemde, sıvı veya eriyik balmumu türü malzemeler kontrollü olarak, mürekkepli yazıcı benzeri hareketli kafalar tarafından püskürtülerek ve küllenerek şekil oluşturulur. Bu yöntemin en büyük avantajı, hassas ve parlak yüzeylerin kolaylıkla elde edilebilmesidir; ancak nispeten kırılgan ve zaman alıcı bir imalat yöntemidir.



Şekil 5: Malzeme Jeti Yöntemi

1.2.7. Stereolithografi

Bu yöntemde ışık ile kür edilebilen polimer mayi yüzeyinde lazer ile katman katman şekil oluşturulur. Bu yöntem vasıtasıyla oldukça hassas şekil verilerek düzgün yüzeyler oluşturulabilir; ancak fotopolimer malzemeler çok kararlı değildir ve mekanik özellikleri değişkendir. Hızlı prototipleme ve bazı kalıp uygulamalarında tercih edilebilir.

1.3. Tezgâhlar

Katmanlı imalat tezgâhları konusunda ABD ve Almanya'nın bariz üstünlüğü bulunmaktadır. Tablo 2'de önde gelen üreticiler ve öncü modelleri belirtilmiştir. Bu çalışmada, sayısız çözüm bulunan ofis tipi "3D Yazıcılar" dikkate alınmamıştır. Türkiye'de özel üretimler de yapan ithalatçı firmalar bulunmaktadır. Çalışma kapsamında, belirli yurt dışı firmaların Türkiye'de temsilciliğini yürüten Infotron ve 3DMast firmaları ile mülakat yapılmıştır.

Firma	Ülke	Teknoloji	Öncü Modelleri ve Hacim
ExOne	ABD	"Binder Jetting" ile toz yatağı içerisinde kimyasal ile toz karışımı ısı ile kürlenerek kalıp veya ana parça üretimi	S-Max 1800x1000x700 mm S-Print 800x500x400 mm M-Flex 400x250x250 mm
EOS	Almanya	Toz yatağı içerisinde lazer ile metal ve plastik katmanlı imalat	EOS P 800 - Plastik 700x380x560 mm EOS M400 - Metal 400x400x400 mm
ConceptLaser	Almanya	Toz yatağında lazer eritme yöntemi (LaserCusing)	X line 2000R 800x400x500 mm
Renishaw	Almanya	Toz yatağında lazer eritme yöntemi	RenAM 500M
SLM Solutions		Toz yatağında lazer eritme yöntemi	SLM500HL 500x280x365 mm
Trumpf	Almanya	Toz yatağında lazer eritme yöntemi	TruPrint Series 1000 Ø100x100 mm
Matsuura	Japonya	Toz yatağında lazer eritme ve frezeleme ile kalıp imalatı	Lumex Avance 25 260x260x100 mm
Additive Industries	Hollanda	Toz yatağında lazer eritme yöntemi ve otomasyon	MetalFABI 420x420x400 mm
Arcam	İsveç	Toz yatağında lazer eritme yöntemi	Arcam Q20 Ø350x380 mm Arcam A2X 1850x900x2200 mm
Stratasys	ABD-İsrail	Polimer tabanlı ürünler	Fortus serisi 914x610x914 mm
3D Systems	ABD	Büro tipi ürünler Polimer tabanlı ürünler Stereolithografik ürünler Toz yatağında lazer eritme yöntemi	ProJet jerişi 508x381x229 mm ProX DMP serisi 275x275x420 mm
Realizer	Almanya	Toz yatağında lazer eritme yöntemi	SLM serisi 300x300x300 mm
Sciaky	ABD	Elektron kaynağı	EBAM 579x122x122 cm
RPM Innovations	ABD	Toz Beslemeli Lazer Kaynağı	RPMI 557 1,5 x 1,5 x 2,1 m RPMI 222 61x 61x 61 cm
OR-laser	Almanya	Toz Beslemeli Lazer Kaynağı	DIODELINE
Envisiontec	ABD	Polimer tabanlı ürünler	Xede3SP 46x46x10 cm
DMG MORI	Almanya	Toz Beslemeli Lazer Kaynağı	Lasertec 65 Ø600x400 mm

Tablo 2: Katmanlı İmalat Endüstriyel Tezgâh Üreticileri

1.4. Standartlaşma Çalışmaları

Katmanlı imalat üzerine standart geliştirme çalışmaları bulunmaktadır. SASAM (Support Action for Standardisation in Additive Manufacturing) projesi, Avrupa Birliği tarafından yürütülmekte ve katmanlı imalatın verimli ve sürdürülebilir kılınması için çalışmaktadır. [3]

ASTM (American Society of Testing and Material) tarafından bir komite (F42) oluşturularak katmanlı imalat konusunda standartlar geliştirilmiş ve ISO (International Organization for Standardization) bünyesinde kurulan bir çalışma grubu (TC261) ile iş birliğine gidilmiştir. Geliştirilmiş ISO/ASTM standartları Ek-1'de verilmiştir.

1.5. Pazar ve Maliyet Etkinlik

Katmanlı imalat yöntemleri, geleneksel yöntemler ile oldukça zor imal edilebilecek geometrileri işleme imkânı tanımaktadır. Bilgisayar ortamında modellenen hemen her türlü şekil, katmanlar halinde dökülerek/işlenerek üretilebilmektedir. Özellikle görülen yüzeylerin altında havalandırma/soğutma kanalları, destek yapıları gibi ancak özel döküm veya çok hassas metal kaldırma işlemleri gerektiren yapılar, katmanlar halinde dökülebilmektedir. Hatta yapı içerisinde hafifletmek amaçlı tümüyle kapalı boşluklar dahi modellenebilmektedir. Şekil 6'da örnek olarak üretilen bisikletin, ilk tasarımına göre katmanlı imalat tekniklerinin verdiği avantajlarla %33 daha hafif olarak üretildiği belirtilmektedir. [4]



Şekil 6: Titanyum Alaşım ile İmal Edilmiş Bir Bisiklet Gövdesi

Katmanlı imalat titanyum benzeri ileri düzey alaşımlarda, yüksek maliyetli geleneksel imalat yöntemlerine göre maliyet avantajı doğurabilmektedir. Medikal, özellikle ortopedi ve diş hekimliği alanlarında, vakaya özel çözümler geliştirilebilmektedir. Katmanlı imalatın şu an için en büyük dezavantajlarından birisi, mevcut ticari tezgâhların boyut kısıtlarıdır. Metal katmanlı imalat için şu andaki en büyük tezgâh 630 x 400 x 500 mm'dir.



Şekil 7: Medikal Uygulamalar

Katmanlı imalat pazarı son 5 yılda büyük genişleme göstermiştir. Özellikle havacılık, otomotiv ve sağlık sektöründe imalat ve hızlı prototip geliştirebilme avantajları, uygulamaları artırmıştır. 2015 yılında sektörün büyüklüğünün 4 milyar dolar olduğu göz önüne alındığında, 2021 yılı itibariyle katmanlı imalat sektörünün büyüklüğünün 10 milyar Doları geçeceği tahmin edilmektedir. [1, 5]

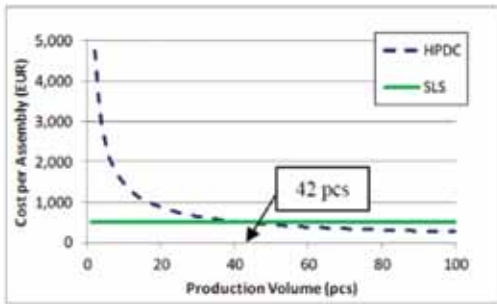
Yıl	Katmanlı İmalat Sektörünün Büyüklüğü
2015	4 milyar ABD Doları
2017	6 milyar ABD Doları
2021	10.8 milyar ABD Doları

Tablo 3: Sektör Büyüklüğü - Metal ve Tüm Diğer Malzemeler - Wohlers Report 2013 [5]

Katmanlı imalat sektörünün, çok büyük çözüm potansiyeli sunmasına rağmen, çok düşük maliyetlerle ve yaygın olarak kullanılan geleneksel imalat uygulamalarının yerini tümüyle alması beklenmemelidir. Birçok temel imalat yönteminin maliyet etkinliğine, teknolojik tezgâh gerekliliği ve özel ham madde gerekliliği nedenleriyle ulaşılması mümkün olmayabilir. [6]

Yapılan firma mülakatlarında polimer esaslı imalat tezgâhı maliyetlerinin büyüklüklerine göre 180-900 bin Dolar, metal imalat tezgâhlarının da 450-1.200 bin Euro arasında olduğu belirtilmiştir. Fizibilite analizi, üretilecek parçanın karmaşıklığına, geleneksel yöntem ile imalat maliyetine ve üretim miktarına göre değişiklik gösterebilir. Özellikle havacılık sektöründe, nispeten düşük sayılarda seri imalat, yüksek geliştirme ve sertifikasyon maliyetleri, diğer sektörlere göre oranla maliyetli parçaların varlığı, yüksek kurulum maliyeti gerektiren metal katmanlı imalatı bile maliyet etkin kılabilir. Kaynaklar, günümüzün en modern ticari uçaklarından birisi olan Boeing 787'de 30 parçanın, F-35 uçağında da 1000 kadar parçanın halen katmanlı imalat ile üretildiğini belirtmektedir. [7]

Örnek bir maliyet etkinlik analizi, belli ölçülerde havacılıkta katmanlı imalatın ne derece kullanılabilir olduğunu göstermektedir. Atzene/Salmi çalışmalarında, Piaggio P180 Avant II ana iniş takımı parçasının küçük ölçekli bir modelinin geleneksel ve katmanlı imalat yöntemleri ile üretilmiş ve karşılaştırılmasını yapmışlardır. Yüksek basınçlı kalıp dökümü ile imal edilen parça, bir de "Selective Laser Sintering (SLS)" yöntemi ile imal edilmiştir. Karşılaştırma maliyetleri orijinal üreticiden alınan teklif bedelidir. Parça katmanlı imalat yöntemi ile üretilirken, tasarımında yöntem gereği bazı değişiklikler yapılmış, daha az malzeme kullanılmış, geleneksel yöntemle çok zor olan geometrilerden faydalanılmış, daha az enerji tüketilmiş ve aynı mukavemet elde edilmiştir. [8]



Şekil 8: Piaggio Uçağı İniş Takımı Parçası, Başa Baş Analizi

Maliyet-etkinlik analizinde çarpıcı sonuçlar ortaya çıkmıştır. Teorik olarak katmanlı imalat yönteminde, kalıp tüketimi ve üretim adet artışından kaynaklı avantajlar bulunmadığı için birim maliyet üretim adetten bağımsızdır. Alışılmış döküm yönteminde artan miktar ile maliyetler azalmaktadır ve karşılaştırmada 40 adet civarında başa baş yakalanmaktadır. Üretim adetleri sektörden sektöre çok fark etmektedir ki otomotiv, beyaz eşya, elektronik ev eşyaları gibi sektörlerde üretim adetleri çok büyük boyutlara ulaşmaktadır; ancak havacılık gibi az sayıda pahalı ürünler üretilen bir sektörde, yakın vadelerde 40 kadar üretim makuldür ve maliyet-etkin bir çözüm olarak görülebilir.

Türkiye pazarının %70'ine sahip firma ile yapılan mülakatta öğrenilen yaklaşık tezgâh maliyetleri aşağıdadır:

İşleme Kapasitesi	Maliyet
355x305x305 mm – polimer	180 bin USD
406x355x406 mm – polimer	200 bin USD
914x610x914 mm – polimer	800-900 bin USD
125x125x75 mm – metal	450 bin Euro
280x280x350 mm – metal	800 bin Euro
500x280x325 mm – metal	1,2 milyon Euro

Tablo 4: Örnek Tezgâh Maliyetleri



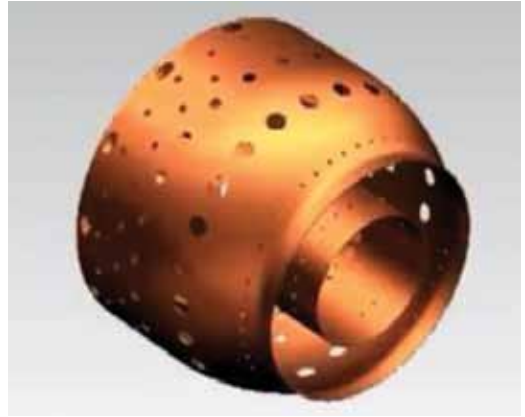
Şekil 9: Fortus 900MC ve SLM500 HL Tezgâhları

Kullanılan ham maddeler ile ilgili yapılan araştırmalarda; en çok kullanılan polimer malzemenin ULTEM olduğu ve maliyetinin 60-70 cent/cm³ civarında olduğu belirtilmiştir. Bununla birlikte metal toz ham maddenin fiyatının çok değişken olduğu ve tozlaştırma/filtreleme özelliklerine göre değiştiği ve bu işlemlerin, alışılmış malzeme tedariklerine göre maliyeti çok artırdığı belirtilmiştir.

Türkiye'de kullanılan tezgâhların, hemen hemen tamamının polimer esaslı ve 400 kadar olduğu, büyük boyutlu işleme kapasiteli olanların sayısının 10'dan az ve sayılı büyük kuruluşlarda bulunduğu belirtilmiştir. Tübitak Marmara Araştırma Merkezi (MAM) Malzeme Enstitüsü ile yapılan mülakatta da, Türkiye'de metal uygulamaların sınırlı sayıda olduğu teyit edilmiş, MAM'ın gelişim planlamalarında bulunduğu, özellikle toz metal ham maddenin üretiminin özellikli prosesler gerektirdiği bildirilmiştir.

1.6. Yürüyen Projeler

Savunma Sanayii Müsteşarlığı (SSM), katmanlı imalat teknolojilerinin havacılık sektörüne kazandırılması amacıyla TEI ile çalışmalar yürütmektedir. Bu kapsamda deneysel karmaşık şekilli bir yanma odasının, tek parça olarak toz metal lazer eritme yöntemi ile üretilmesi üzerine çalışılmakta, Koç Üniversitesi ile bilimsel iş birliği yapılarak tasarım parametrelerinin belirlenmesine yönelik bilgi birikimi oluşturulmaktadır. [9]



Şekil 10: TEI'de Kurulu Metal Katmanlı İmalat Tezgâhı ve Üretimi Üzerine Çalışılan Yanma Odası



HAVACILIK UYGULAMALARI

2. Havacılık Uygulamaları

2.1. Havacılıkta Uygulanabilirliği

Havacılık sektöründe katmanlı imalat teknolojisinin büyük bir potansiyele sahip olduğu görülmüştür. Boeing, Airbus, Lockheed Martin, Rolls-Royce ve GE gibi şirketler bu teknolojiyi oldukça sık kullanmaya başlamıştır. Yakın zamanda bir patent başvurusu tamamlayan Boeing, uçaklardaki parçaların birçoğunu katmanlı imalat ile ürettikleriyle yer değiştirmeyi planladığını belirtmiştir. Boeing yaptığı patent başvurusunda; farklı merkezlerde uçak parçalarını stoklamak, gereken lokasyonlara parçaları ulaştırmak ve muhtemel gecikmelerden kaçınmak adına uçağın birçok parçasını katmanlı imalat ile üretilebilir hale getirmeyi planlamaktadır. [10]

Günümüzde yaklaşık 20.000 plastik esaslı parça, Boeing uçakları için 3D yazıcılardan üretilmeye başlanmıştır. Son olarak Boeing

sözcüsü Nathan Hulings F/A-18 Super Hornet uçağında 150 farklı parçanın SLS 3D yazıcısından üretildiğini belirtmiştir. Boeing'in bu atağı ile aynı sektörde bulunan başta Airbus, Embraer gibi uçak üreticisi olan birçok firmanın benzer yaklaşımları benimseyecekleri tahmin edilmektedir. Boeing, 2015 yılında katmanlı üretim teknolojisi ile üretmiş olduğu metal olmayan yedek parça/sarf malzemeler için patent başvurusunda bulunmuştur. Boeing, 10 farklı uçağın üretim programında bulunan metal olmayan 300 farklı parça numarasından yaklaşık 20.000 adet malzemeyi katmanlı imalat teknolojisi ile üreterek müşterilerine göndermiştir. Bununla birlikte Boeing, F/A 18 Super Hornet'in gövdesinin ön kısmında bulunan yaklaşık 150 parçanın lazer eritme metodu ile üretildiğini açıklamıştır. [11]



Şekil 11: Stratasys Tarafından Katmanlı İmalat Örneği İHA [14]

Geleceğin en önemli üretim teknikleri arasında yer alan katmanlı imalat, sivil havacılık yanında askeri havacılık teknolojilerinde de ön plana çıkmaktadır. Bu alanda oldukça yoğun çalışmalar yapan BAE Systems, üç boyutlu yazıcıların doğrudan askeri uçaklar içerisine yerleştirilebileceğini ve operasyonlar sırasında ihtiyaca uygun insansız hava araçlarının üretilebileceğini öngörmektedir. [12]

Katmanlı imalat teknolojisinin hava araçlarında kullanılan parça ve malzemelerin üretiminde efektif olmasının en temel nedenleri hız, ağırlık ve dayanıklılık olarak göze çarpmaktadır. Örneğin, GE tarafından üretilen yakıt enjektörünün 5 kat dayanıklı ve %25 daha hafif olduğu belirtilmektedir. [13] Uçak/motor parçası üretiminde karşılaşılan zorluklardan biri olan sertifikasyon sürecinin, katmanlı imalat teknolojisi ile üretilen parçalarda daha da zorlaşabileceği düşünülmektedir; fakat gerek FAA (ABD Sivil Havacılık Otoritesi) gerekse EASA (Avrupa Sivil Havacılık Otoritesi) tarafından onay verilen bazı parçaların olması, sertifikasyon sürecinin kolaylıkla tamamlanabileceğine örnek olarak gösterilebilir. [15,16]

2.2. Katmanlı İmalatın Havacılık Örnekleri

2.2.1. GE Sıcaklık Sensör Koruma Ünitesi ve CFM Yakıt Enjektörü

FAA, 2015 yılının Şubat ayında GE90-94B motorları üzerinde kullanılan T25 motor sensörü koruma ünitesini sertifikalandırmıştır. Motor kontrol sistemleri için basınç ve sıcaklık ölçümlerini sağlayan ve T25 olarak da bilinen bu ünite halen hizmette olan 400'den fazla GE90-94B motoruna takılmıştır. T25 sensör koruma ünitesinin GE havacılıkta katmanlı imalat için sadece bir başlangıç olduğu belirtilmektedir. Hâlihazırda geliştirilmekte olan birkaç yeni nesil motor için de ileri üretim teknikleri kullanılmaktadır.

GE, ilk kez toz beslemeli katman imalat tezgâhlar kullanılarak üretilmiş, 19 yakıt enjektörü bulunan yeni nesil LEAP uçak motorunun test uçuşlarına 2015 yılı içerisinde başlamıştır. Boeing 737MAX ve Airbus A320neo gibi dar gövdeli uçaklarda kullanılacak olan yeni nesil LEAP uçak motorları GE Havacılık ve Fransız Safran (Snecma) arasında ortak bir girişim olarak kurulan CFM International tarafından üretilmektedir. [17]



Şekil 12: GE T25 Sensor Koruma Ünitesi



Şekil 13: CFM Yakıt Enjektörü

2.2.2. Rolls-Royce “Bearing Housing”

Rolls-Royce Trent XWB serisinin en güçlü motoru olan ve Airbus A350-1000 uçaklarında kullanılacak olan Trent XWB-97, 2015 yılının son çeyreğinde ilk kez havalanmış olup bu uçuş aynı zamanda katmanlı imalat yöntemiyle üretilen en büyük havacılık/motor parçasının ilk uçuşu olma özelliğini taşımaktadır. Rolls-Royce bu motor üzerinde bulunan ve 48 aerofoile sahip olan yaklaşık 1,5 m çapında ve 0,5 m kalınlığındaki ön rulman yatağını (front bearing housing) katmanlı imalat yöntemiyle üretmiştir.

Rolls-Royce katmanlı imalat teknolojisi kullanarak tasarım optimizasyonu, maliyet ve hız açısından ürün ve üretim işlevselliğini geliştirme potansiyeline sahip yeni bir teknolojiyi de deneme fırsatı bulmuştur. Öyle ki parçanın katmanlı üretim teknolojisi ile üretiminin yapılmasıyla, imalat süresi %30 azalmış ve tasarım sürecinde maliyet ve üretim hızı optimize edilmiştir. [18]

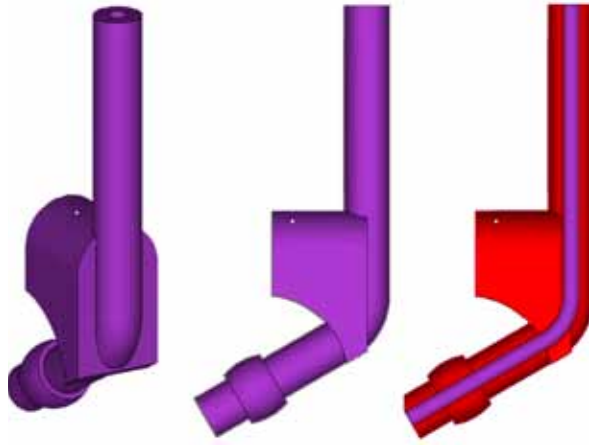


Şekil 14: Rolls Royce Trent XWB Motoru “Front Bearing Housing” Parçası

2.2.3. BAE Systems AM pipes

BAE Systems, 2014 yılının başlarında BAE 146 bölgesel uçaklarında, ilk kez katmanlı üretim teknolojisi kullanarak kabin pencerelerindeki buğulanmayı önlemek için kullanılan plastik pencere havalandırma borusunu üretmiş ve üretilen bu parça için EASA'dan onay almıştır.

BAE Systems, önceden üretilen plastik boruların enjeksiyon kalıp yöntemi ile üretilmekte olduğunu; fakat mevcut üretim hattının artık kullanılabilir olmadığını ve yeni bir üretim hattının kurulması için yüksek maliyet ve uzun süre gerektiğini belirtmiştir. Firma, tüm bunların yerine çok kısa bir sürede ve daha az maliyetle katmanlı imalat teknolojisi kullanarak parçanın üretimini gerçekleştirmiştir. [19]



Şekil 15: BAE Pencere Havalandırma Borusu

2.2.4. Airbus Nacelle Hinge Brackets

Airbus A320 uçakları için lazer eritme teknolojisi kullanarak "Nacelle hinge bracket" parçası üretilmiştir. Üretilen yeni malzemenin sağlamlığı ve performansı korunurken yaklaşık %35 hafiflik (10 kg) sağlanmıştır.

600'den fazla ticari hava aracına sahip bir filoda, her uçaktan sadece 1 kg azaltıldığında yılda yaklaşık 90.000 litre yakıt tasarrufu sağlandığı düşünüldüğünde, yapılan bu üretimin ticari havacılık işletmeleri için ne kadar önemli olduğu görülebilmektedir. Ayrıca, yapılan bu değişiklikle atmosfere salınan karbondioksitte yıllık 230 tonluk bir azalma sağlanacağı hesaplanmaktadır. [20]



Şekil 16: Airbus "Hinge Bracket" Parçası





DEĞERLENDİRMELER

3. Değerlendirmeler

Katmanlı imalat teknolojileri, klasik imalat yöntemlerine göre çok fazla kısıt içermemesi, özel master/kalıp benzeri gereçler gerektirmemesi, özellikle prototip uygulamalarda çok hızlı çözüm sağlama gibi birçok avantaja sahiptir; ancak tezgâhların maliyetleri ve küçük boyutları, ham madde olarak kullanılan metal tozlarının "gaz atomizasyonu" benzeri tekniklerle ve haliyle yüksek maliyette temini, bu yöntemlerin otomotiv, beyaz eşya gibi çok ağır rekabetin olduğu sektörlere girmesini engellemektedir. Havacılığın genel yüksek maliyeti bu yöntemi nispeten kullanılabilir kılmaktadır.

Fizibilite açısından, yukarıda da anlatılan CFM Leap motorunun yakıt enjektörleri örneği ele alınabilir. Bu motorların önümüzdeki dönemde üretim sayıları dikkate alındığında yakıt enjektörlerinden yılda 4000 kadar üretilecektir. Yapılan yatırımın 5 milyon dolar kadar olduğu ve muadillerinden benzerlikle birim satış fiyatının 2 bin dolar kadar olduğu tahminleri ile 10 yıllık makul bir amortizasyon planlandığı görülebilir. Bu basit fizibiliteden yola çıkılarak, "neden havacılığın tamamına metal katmanlı imalat hızla yaygınlaşmıyor?" sorusuna cevap aranabilir. CFM benzeri yüksek sayılarda seri üretim yapan modeller sınırlı sayıdadır. Boyut itibarıyla da bu derece özel havacılık parçaları, motor, iniş takımı ve bazı kontrol veya aviyonik ekipmanlarda bulunabilir. Özellikle, gövde yapıları boyut olarak bu tür imalata uygun görülmemektedir. Askeri projelerde ise seri üretim sayıları sivil sektöre oranla azdır; ancak operasyonel olmasının yanında maliyet çok ön planda tutulmayabilir ki az sayıda üretilen yedek parçalarda katmanlı imalat uygulamaları sektör yayınlarında tartışılmaktadır.

3.1. Türkiye'de Katmanlı İmalatın Uygulanması

Türkiye'de, öncü savunma ve havacılık firmalarının, özellikle prototip imalatlar için polimer tezgâhlara sahip olduğu bilinmekte ve 400 kadar çok çeşitli polimer endüstriyel tezgâh bulunmaktadır. Metal katmanlı imalat konusunda, yukarıda da anlatılan SSM'nin TEI ile birlikte yürüttüğü proje önemli bir girişimdir. TÜBİTAK Marmara Araştırma Merkezi ile yapılan görüşmeler çerçevesinde, ileride çalışma planlandığı belirtilmiştir.

Boeing, Airbus ve GE gibi dünya sivil havacılık platform üretimine yön veren büyük kuruluşların son teknolojilerinde katmanlı imalat yöntemlerini kullanması ve bu yöntemle ürettikleri parçalar için uluslararası otoritelerden onay alması, bu yöntemin gelecekte havacılığa yön vereceğini açıkça göstermektedir. Ülkemizde 2023 Vizyonunda sivil havacılık alanında milli bölgesel uçak, motor ve özgün helikopter üretiminde katmanlı imalat teknolojilerinin kullanılması belki de kaçınılmaz olacaktır. Tamamen yerli tasarım olacak olan Milli Bölgesel Uçağımız TRJ628'in kabin içindeki bardaklıktan iç pencere bölmesi ve plastik pencere bölmesine kadar birçok plastik parça katmanlı imalat yöntemi ile üretilebilir. Ayrıca uçaklara takılacak olan koltuklar üzerindeki birçok metal ve plastik parça da katmanlı imalat teknolojisi ile kolaylıkla üretilebilecektir.

Bununla birlikte havacılık bakım faaliyetlerinde katmanlı imalat teknolojilerinin kullanılması mümkün olabilecektir. Bakım kuruluşlarının zayıf noktası olan tamir süreçlerinde gerekli tamir malzemeleri katmanlı imalat yöntemi ile kolaylıkla tasarlanarak uçak üzerinde kullanılabilir. Böylelikle tamirlerde daha hızlı çözümler üretilirken kuruluş envanterinde yüksek miktarda tamir malzemesi tutulmayarak depolama maliyetleri minimize edilebilir.

SSM'nin Stratejik Planı'nda [21] belirtilen, "Savunma ve Güvenlik Teknolojilerinde Yetkinlik Kazanmak" amacı kapsamında belirtilen uçak, helikopter, füze, İHA, uydur, jet motoru yurt içi geliştirme projelerinde özellikle kritik ve maliyetli metal parçalarda katmanlı imalat teknolojilerini kullanmak, birçok performans, maliyet ve rekabet avantajı doğurabilir. Yukarıdaki örnekler ve katmanlı imalat sektörünün geneli değerlendirildiğinde:

- Jet motorlarındaki soğuk bölüm hareketsiz parçaları ve yanma odaları,
- İniş takımı taşıyıcı/sönümleyici yapıları,
- Özel görev ekipmanı entegrasyonu destek/adaptasyon parçaları,
- Prototip yapısal, ikincil yapısal parçalar veya tüm bir prototip İHA,

başlayan veya başlamak üzere olan projelerde, katmanlı imalat yöntemleri ve şu andaki teknolojik seviyelerle uygulanabilir.

TÜBİTAK Vizyon 2023 kapsamında Ulusal Bilim ve Teknoloji Politikaları 2003-2023 Strateji Belgesi'nde [22] odaklanılması gereken stratejik teknoloji alanlarında, "Üretim ve Süreç Teknolojileri-Metal Şekillendirme" açık bir şekilde belirtilmiştir. Bu imalat yöntemlerinin, nanoteknoloji, malzeme teknolojileri ve mekatronik gibi diğer stratejik teknoloji alanlarında da gelişmelere katkı sağlayacağı açıktır. TÜBİTAK Malzeme Enstitüsü'nün polimer uygulamalar konusunda çalıştığı, metal uygulama araştırmaları yapmak üzere planlamalar içinde olduğu öğrenilmiştir.

Özellikle ABD ve Almanya'da yüksek teknolojlü imalat sektörlerinin yoğunluğu nedeniyle ticari uygulamalar çok görülmektedir. Ülkemizde sürdürülen SSM projeleri ve TÜBİTAK Araştırmaları ile yakın gelecekte uygulamaların artacağı değerlendirilmektedir.



KAYNAKÇA

- [1] "What is AM?", metal-am.com
- [2] www.additively.com
- [3] SASAM (Support Action for Standardisation in Additive Manufacturing), www.sasam.eu
- [4] First metal 3D printed bicycle frame, www.renishaw.com
- [5] Wohler's Report 2016, 3D Printing and Additive Manufacturing State of the Industry
- [6] "Economic Analysis of Additive Manufacturing for Final Products: An Industrial Approach", White, Lynskey, April 2013, University of Pittsburg
- [7] "3D Printing-Ready for take-off", Aerospace, June 2015
- [8] "Cost Estimating Challenges in Additive Manufacturing", Bauer-Malone, ICEAA 2015
- [9] www.tei.com.tr
- [10] www.geekwire.com
- [11] Boeing files patent for 3D-printed aircraft parts – and yes, it's already using them, Mart 2015, www.geekwire.com
- [12] On-Board 3D Printing – www.baesystems.com
- [13] GE Aviation Signs Additive Manufacturing Cooperative Agreement with Sigma Labs – www.geaviation.com
- [14] World's First Jet-Powered, 3D Printed UAV Tops 150 MPH with Lightweight Stratasys Materials, November 2015, www.stratasys.com
- [15] "The FAA Cleared the First 3D Printed Part to Fly in a Commercial Jet Engine from GE90", www.gereports.com
- [16] "Bae Systems Produces And Certifies 3d Printed Part For Use On Bae 146 Jetliner", www.aviator.aero
- [17] "GE Aviation's First Additive Manufactured Part Takes Off", www.geaviation.com
- [18] "Rolls-Royce Trent XWB-97 completes first test flight," www.rolls-royce.com
- [19] "Bae Systems Produces And Certifies 3d Printed Part For Use On Bae 146 Jetliner", www.aviator.aero
- [20] "Aerospace: EADS and EOS - Study demonstrates savings potential for DMLS in the aerospace industry", www.eos.info
- [21] SSM Stratejik Planı 2012-2016
- [22] TÜBİTAK Vizyon 2023 Ulusal Bilim ve Teknoloji Politikaları 2003-2023 Strateji Belgesi

EK-1

Katmanlı İmalat (Additive Manufacturing) üzerine ISO/ASTM Standartları

- ISO / ASTM52900 - 15 Standard Terminology for Additive Manufacturing – General Principles – Terminology
- ISO / ASTM52921 - 13 Standard Terminology for Additive Manufacturing-Coordinate Systems and Test Methodologies
- ASTM F36-15 Standard Test Method for Compressibility and Recovery of Gasket Materials
- ASTM A694/A694M-14 Standard Specification for Carbon and Alloy Steel Forgings for Pipe Flanges, Fittings, Valves, and Parts for High-Pressure Transmission Service
- ASTM F3056-14e1 Standard Specification for Additive Manufacturing Nickel Alloy (UNS N06625) with Powder Bed Fusion
- ASTM F3122-14 Standard Guide for Evaluating Mechanical Properties of Metal Materials Made via Additive Manufacturing Processes
- ASTM F2924-14 Standard Specification for Additive Manufacturing Titanium-6 Aluminum-4 Vanadium with Powder Bed Fusion
- ASTM F3091/F3091M-14 Standard Specification for Powder Bed Fusion of Plastic Materials
- ASTM F3049-14 Standard Guide for Characterizing Properties of Metal Powders Used for Additive Manufacturing Processes
- ASTM F3055-14a Standard Specification for Additive Manufacturing Nickel Alloy (UNS N07718) with Powder Bed Fusion
- ASTM F2971-13 Standard Practice for Reporting Data for Test Specimens Prepared by Additive Manufacturing
- ASTM F3001-14 Standard Specification for Additive Manufacturing Titanium-6 Aluminum-4 Vanadium ELI (Extra Low Interstitial) with Powder Bed Fusion
- ISO 17296-2:2015 Additive manufacturing -- General principles -- Part 2: Overview of process categories and feedstock
- ISO 17296-3:2014 Additive manufacturing -- General principles -- Part 3: Main characteristics and corresponding test methods
- ISO 17296-4:2014 Additive manufacturing -- General principles -- Part 4: Overview of data processing
- ISO/ASTM DIS 52901 Additive manufacturing -- General principles -- Requirements for purchased AM parts
- ISO/ASTM NP 52902 Additive manufacturing -- General principles -- Standard test artifacts
- ISO/ASTM DIS 52903-1 Additive Manufacturing -- Standard Specification for Material Extrusion Based Additive Manufacturing of Plastic Materials -- Part 1: Feedstock materials
- ISO/ASTM AWI 52903-2 Additive manufacturing -- Standard specification for material extrusion based additive manufacturing of plastic materials -- Part 2: Process -- Equipment
- ISO/ASTM DIS 52910 Standard Practice -- Guide for Design for Additive Manufacturing
- ISO/ASTM 52915 Specification for Additive Manufacturing File Format (AMF) Version 1.2



thinktech
STM Future Technology Institute



www.stm.com.tr

[in](#) [t](#) [v](#) [u](#) [f](#) /STMDefence

