

TUSAŞ'TA EKLEMELİ İMALAT EĞİTİMİ

Necmi KARA¹
TUSAŞ, Ankara

ÖZET

Eklemeli imalat teknolojisindeki son gelişmeler birçok sektör gibi havacılık sanayini de derinden etkilemektedir. Bu etkiyi kalıcı biçimde avantaja çevirmek için yeni mühendislik ve teknisyenlik becerileri geliştirmek gerekmektedir. Bu gelişimi sağlayarak eklemeli imalatın şirket proseslerine adaptasyonunu hızlandıran ve yaygınlaştıran faktörlerden birisi de teknolojiye gelişmeleri takip edip mevcut eğitim programlarına yansıtarak bu programları eklemeli imalata dönük kavramlarla desteklemek veya eklemeli imalatla ilgili tamamen yeni eğitimler oluşturmaktır. Özellikle sıkı kuralları bulunan havacılık sektöründe kullanılacak yeni yöntem ve teknolojilerin birçok kalite standardını ve spesifikasyonları sağlaması gerektiği düşünülürse, bu eğitimin önemi daha da iyi anlaşılacaktır. Tasarım ve üretimle ilgili mevcut eğitimler eklemeli imalat teknolojilerinin etkili biçimde uygulanması için gerekli bilgi ve beceriyi sistematik olarak sağlayamamaktadır. Bu bildiri, TUSAŞ Akademi'de verilen eklemeli imalat ile ilgili eğitimin amacını, içeriğini ve sonuçlarını açıklamaktadır.

Anahtar Sözcükler: Eklemeli imalat • 3D baskı • Eğitim • Yetkinlik

GİRİŞ

Teknoloji, bilimin toplum yararına uygulanması olarak tanımlanabilir [Groover, 2010]. Bunu mümkün kılan faktör ise, büyük oranda imalattır. Bilim yüzyıllar boyunca gelişirken, paralelinde imalat yöntemleri de gelişmiş; bu gelişme 18. Yüzyıldan itibaren 1. sanayi devrimine dönüşerek büyük bir ivme kazanmıştır. Daha sonra 2.sanayi (teknoloji) devrimi ve 3.sanayi (bilgi) devrimi olarak adlandırılan gelişmeler bunu takip etmiş olup, günümüzde ise, 4. Sanayi devriminden söz edilmektedir. Endüstri 4.0 olarak da bilinen ve nesnelerin interneti, otonom sistemler, büyük veri gibi birçok ayağı bulunan bu kavramın en önemli bileşenlerinden birisi de 'additive manufacturing' veya '3D printing' olarak bilinen ve dilimize eklemeli imalat, katmanlı imalat ya da 3 boyutlu baskı gibi isimlerle çevrilen imalat yöntemidir. Özellikle sağlık, savunma ve havacılıktaki gibi alanlardaki kullanımı gittikçe yaygınlaşan bu teknolojiye gelişmelerin hava aracı ve komponentlerinin imalatı, modernizasyonu ve sistem entegrasyonu alanında uygulanması ve geliştirilmesi şirketlerimizin pazar payını ve rekabet gücünü artıracaktır. Eklemeli imalat havacılık uygulamaları için oldukça uygundur; çünkü parçalar karmaşık, hafif ve yüksek performanslı olup, yüksek maliyetli, gelişmiş malzemelerden nispeten düşük miktarlarda üretilir [Despeisse,M, 2018].

EKLEMELİ İMALAT NEDİR

Standardizasyon çalışmaları için kurulan Uluslararası ASTM F42 Eklemeli İmalat Komitesinin, Haziran 2012 tarihinde F2792 numarasıyla yayınladığı ve daha sonra ISO TC 261 organizasyonu ile birlikte çalışarak ISO/ASTM 52900-15 standardı olarak değiştirdiği 'Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies' spesifikasyonu eklemeli imalatı, azaltmalı (subtractive) ve biçimlendirici (formative) yöntemlerin aksine, genellikle 3 boyutlu (3B) model verilerinden nesnelere yapmak için malzemeleri katman katman birleştirme olarak tanımlamaktadır. Aynı standarda göre 7 ana prosese ayrılmaktadır [ISO/ASTM 52900, 2015].

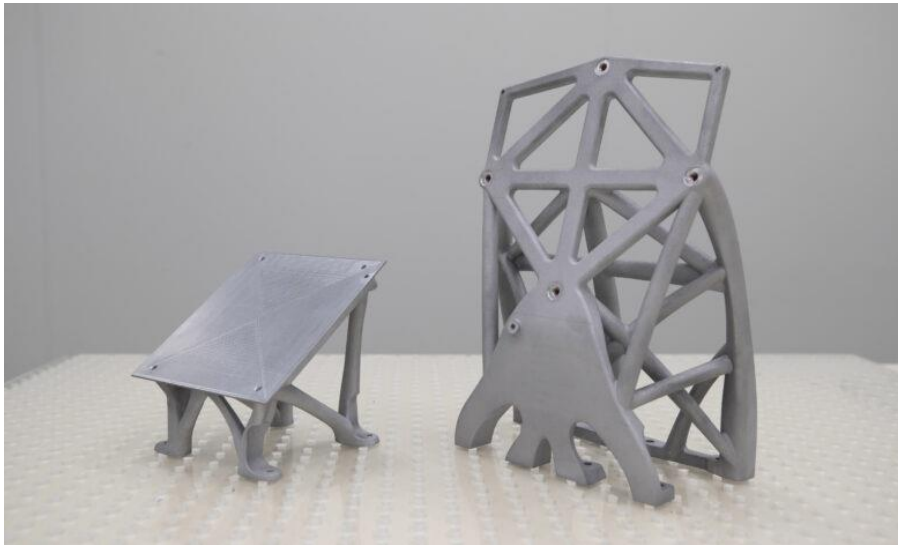
¹ Uçak Mühendisi, E-Posta: nkara@tai.com.tr



Şekil 1: Eklemeli İmalatın Proses Akışı [Campbell, 2015]

EKLEMELİ İMALAT UYGULAMALARI

Eklemeli imalat başta otomotiv (%16), havacılık (%15,9) ve sağlık (%13,9) sektörleri olmak üzere her alanda kullanılmaya başlanmıştır (Wohler's Report, 2021). Havacılık alanında kurumlar, üniversiteler ve firmalar yatırımlar ve araştırmalar yapmakta, bir araya gelerek ortak stratejiler ve yol haritaları belirlemektedir [SSB . Eklemeli İmalat Teknolojileri Yol Haritası Sonuç Raporu, 2020].



Şekil 2: Tusaş Tarafından İmal edilen Uydu Braketi [<https://www.savunmasanayist.com>]

TUSAŞ'TA EKLEMELİ İMALAT EĞİTİMİ

TUSAŞ Akademi'de mühendislik dersleri kapsamında 2015 yılında Eklemeli İmalat ve 3 Boyutlu Baskı Teknolojileri isimli dersle eklemeli imalat konusunda eğitim başlamıştır. Eklemeli imalatla ilgili eğitim programını hazırlamada bu teknolojinin benimsenerek kurum içerisinde yaygınlaşması amaç edinilmiş olup, bunun için öncelikle mevcut eğitim ve kurs programları incelenmiştir. Bu program ve kurslarda öğretilen temel konular aşağıdaki tablo 1'de gösterildiği şekilde belirlenmiştir.

Konu	Tipik Kurs ve Faaliyetlerin Tanımı
Ekleme İmalatın Temelleri	Ekleme İmalat teknolojileri , bunların özellikleri, geleneksel imalat yöntemleri ile karşılaştırılmaları (avantaj ve dezavantajları) konusuna değinen ders ve kurslar
Ekleme İmalatın Endüstriyel Uygulamaları	Değişik sektörlerdeki prototip, takım, son parça, amaca özel üretim gibi uygulamaları ile ilgili tipik örnekler veren kurslar
İleri Proses Mühendisliği	Malzeme karakteristiklerini, proses parametrelerini, malzemeyi, makinayı, yazılımları anlama, ekleme imalatın bilimsel, uygulamalı matematik ve ileri mühendislik yönünü açıklamaya yönelik kurslar. Proses optimizasyonu ve bu teknolojinin limitasyonları da anlatılmaktadır.
Tasarım ve Modelleme	Tersine mühendislik, 3D lazer tarama, CAD tasarımı , optimizasyon ve imalat için tasarım (DfAM) konularının anlatıldığı dersler.
Üretim Ekonomisi & İş Yönetimi	Üretkenliği artırma ve imalat maliyetlerini düşürme metotlarının, kaliteli ve gerekli zamanda ürün/servis sağlamanın ve envanter yönetimi gibi konuların anlatıldığı dersler.
Yönetim ve İletişim	Ekleme imalat alanında takım çalışması, problem çözme becerileri, kritik ve analitik yetkinlikler, iletişim ve yönetim becerilerinin anlatıldığı dersler.
Araştırma&Geliştirme	Ekleme imalatın laboratuvar esaslı ArGe çalışmaları,bilimsel yaklaşımlar, proses kontrolü, malzeme özellikleri, ekipman, simülasyon gibi konulardaki araştırmaları konu alan kurslar.

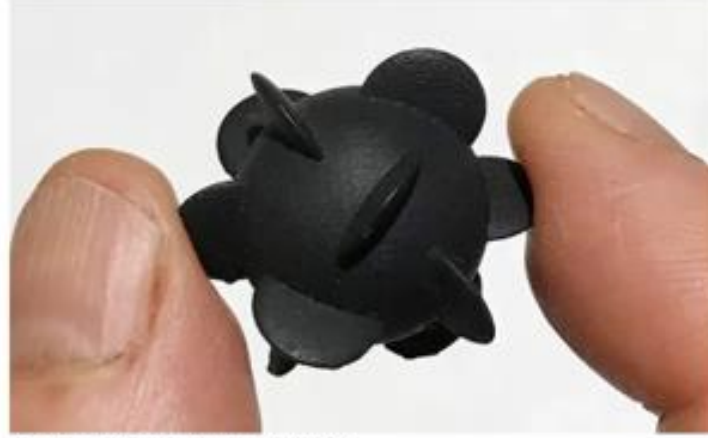
Tablo 1: Ekleme İmalat Kurs Konuları

Bu incelemelerden sonra, şirketin ihtiyacı da düşünülerek aşağıdaki konu başlıkları eğitime dahil edilmiştir:

- Ekleme İmalata Giriş
- Ekleme İmalat Malzemeleri
- Ekleme İmalat Prosesleri
- Savunma ve Havacılık Uygulamaları
- Ekleme İmalatın Geleceği

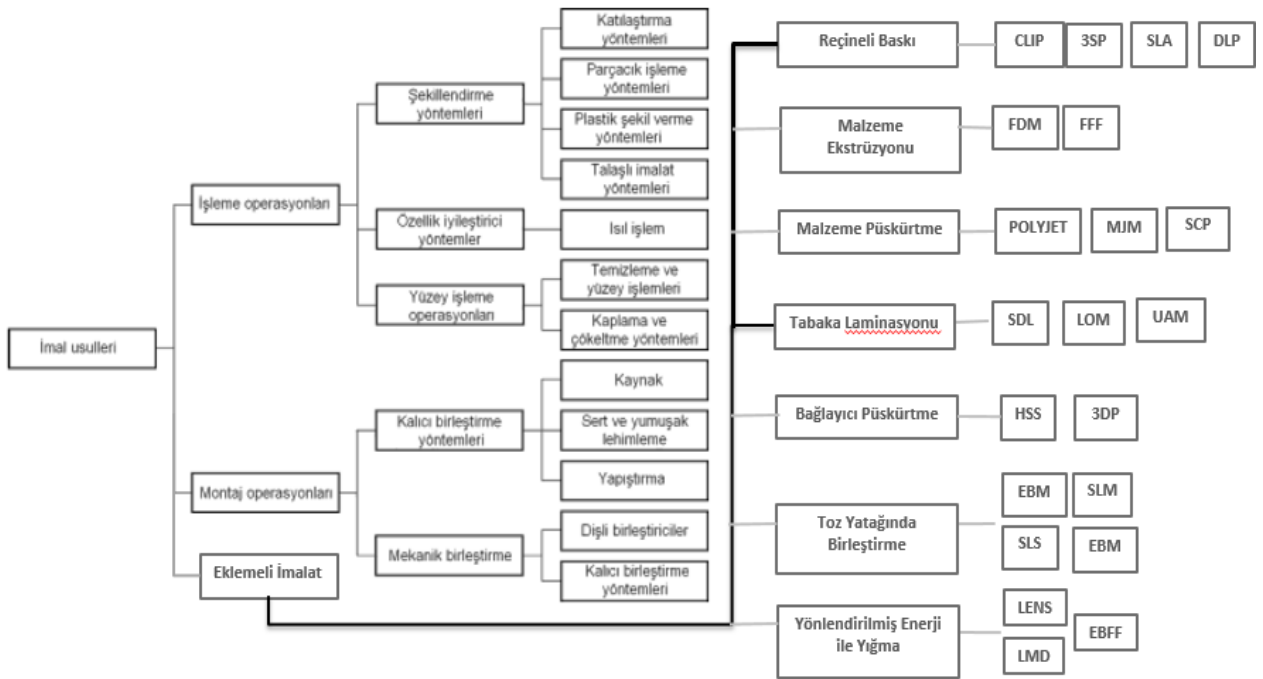
Giriş kısmında bu teknolojinin tanımı yapılmakta, kullanım alanlarından örnekler verilmekte, standartların öneminden ve bununla ilgili yapılan çalışmalardan söz edilmekte, ekleme imalat teknolojilerinin sınıflandırması yapılmaktadır (Şekil 3 ve 4).

Strange 3D-printed shapes test 150-year-old mathematical theory



A 3D-printed isotropic helicoid
G. Voth/Wesleyan University

Şekil 3: 3D Baskı İle Üretilmiş Parça ile Kelvin'in 150 Yıllık Varsayımının Yanlış Olduğu Gösterildi [Crane, 2021]

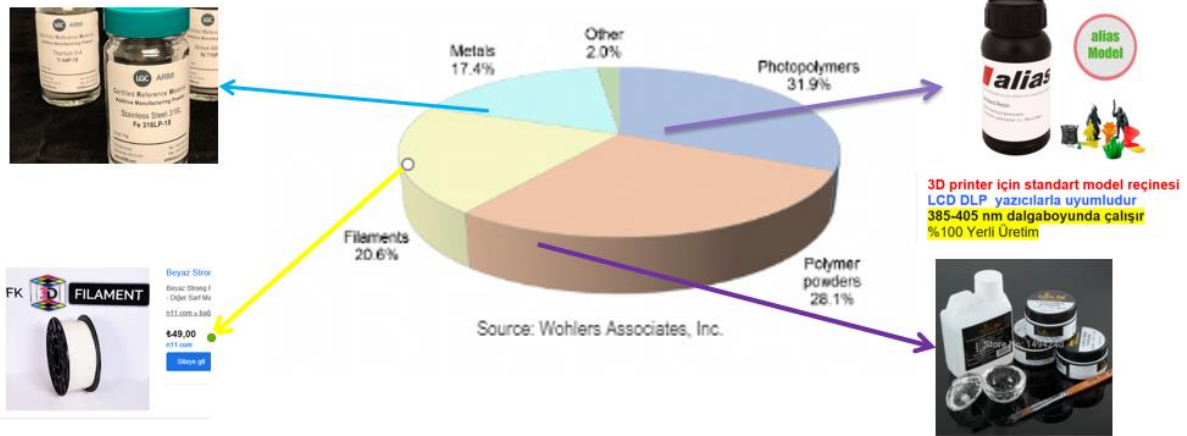


Şekil 4: Geleneksel ve Eklemeli İmalat Yöntemlerinin Birlikte Gösterimi

Eğitimde ayrıca eklemeli imalat malzemelerinden söz edilmekte, bu malzemelerin hangi eklemeli imalat proseslerinde kullanıldığı belirtilmekte, elde edilme yöntemleri incelenmekte ve kullanım oranları hakkında bilgi verilmektedir (Şekil 5 ve 6).

	Material extrusion	Material jetting	Binder jetting	Vat photopolymerization	Sheet lamination	Powder bed fusion	Directed energy deposition
Polymers, polymer blends	X	X	X	X	X ¹	X	
Composites ²	X	X	X	X		X	
Metals			X		X	X	X
Graded/hybrid metals ³					X		X
Ceramics			X	X		X	
Investment casting patterns		X	X	X		X	
Sand molds and cores	X		X			X	
Paper					X		

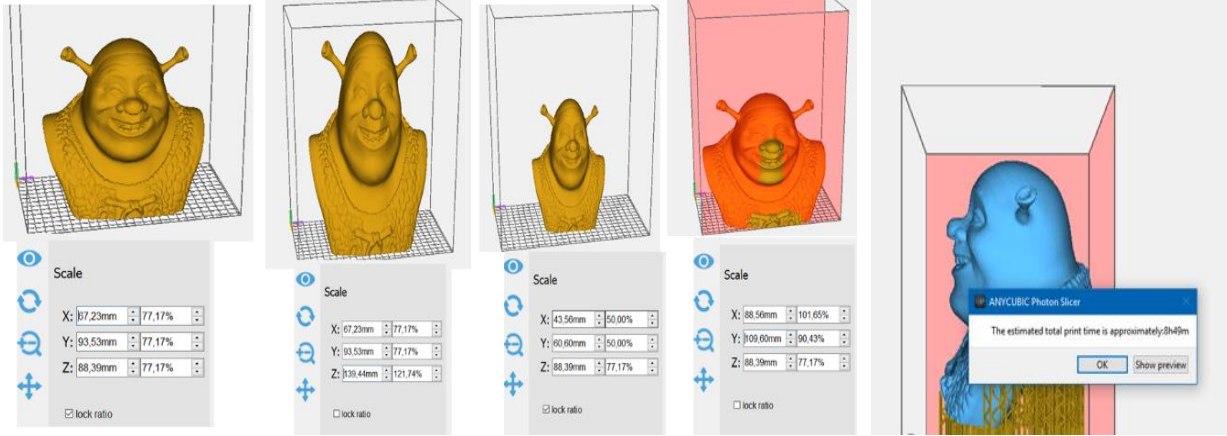
Şekil 5: Katmanlı İmalat Prosesleri ile Malzeme Grupları Arasındaki Kesişim [Wohlers Report, 2021]



Şekil 6: Eklemeli İmalat Malzemelerinin Kullanılma Oranları [Wohlers Report, 2021].

Eklemeli imalat prosesleri, bu proseslerin prensipleri, her bir prosesin avantajları ve dezavantajları da eğitimin kapsamına girmektedir. Aşağıda görüldüğü üzere 8 başlık altında anlatılan proseslerde kullanılan masa üstü ve endüstriyel tip makineler, yazılımlar, aksesuarlar ve dikkat edilmesi gereken hususlar örneklerle açıklanmaktadır (Şekil 7).

- Reçineli Baskı
- Malzeme Çekme
- Toz Yatağı Füzyonu
- Malzeme Jeti
- Bağlayıcı Püskürtme
- Doğrudan Enerji Yayılımı
- Tabaka Laminasyonu
- Melez (Hibrid) Prosesler



Şekil 7: (a) Cura Dilimleme Yazılımında Baskı Ayarları İle Modelde Yapılan Ölçü Değişiklikleri (b) Dilimlenen Modelin G Kodu ile Dışarıya Aktarılması

Eğitimin önemli bir kısmını, eklemeli imalatın savunma ve havacılık uygulamaları oluşturmaktadır. Bu uygulamalar da aşağıdaki başlıklar altında anlatılmakta ve şekillerde görüldüğü üzere örneklerle açıklanmaktadır.

- Prototip Uygulamaları (Rapid Prototyping)
- Takım(Kalıp/Fikstür) Uygulamaları (Rapid Tooling)
- Fonksiyonel Parça (End Item) İmalatı
- Havacılıkta Eklemeli İmalatın Avantajları
- Havacılıkta Eklemeli İmalatın Sınırlamaları/ Dezavantajları
- Havacılıkta Uygun Eklemeli İmalat Parçaları

Eklemeli imalatın havacılıkta hızlı prototipleme amacı ile kullanımı anlatılırken 1990'ların ortalarına kadar hızlı prototipleme için değerli bir metot olarak kullanıldığı ve prototipleme aracı olarak oldukça olgunlaştığı vurgulanmakta, halen eklemeli imalatın ikinci yaygın kullanımını fonksiyonel veya model amaçlı prototiplerin oluşturduğu belirtilmektedir(Şekil 8).

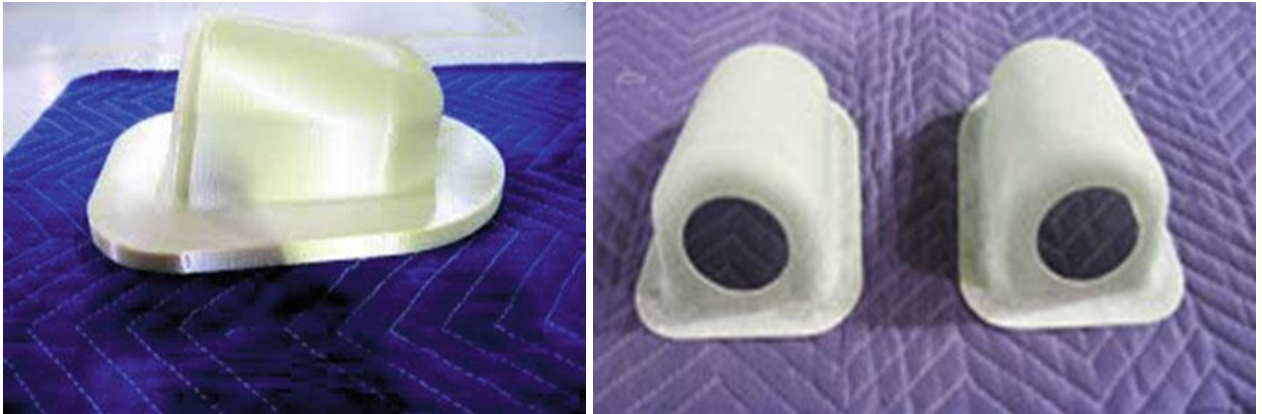
Şirketimizde özellikle test uçuşlarından gelen geri beslemelerle, hava aracı konfigürasyonunda deneme amaçlı olarak gerçekleştirilmek üzere oluşturulan ve tasarlanmış konfigürasyon üzerinde kalıcı olmayan geçici tasarım değişikliklerinin uygulanmasında eklemeli imalat yöntemi ile üretilen prototip parçaların sağladığı zaman ve işgücü kazancı örneklerle gösterilmektedir. Tüm hava araçlarına uygulanması gerekmeyen testler, resmî olarak uygulanmasına henüz karar verilmemiş, gözlem ve ölçümlere dayanarak tasarıma yansıtılıp yansıtılmayacağına veya ilgili tasarım çözümünde yapılacak modifikasyonlara karar verilebilecek konular için hava aracında yapılacak kalıcı olmayan değişiklikler bu sınıfa girmektedir.



Şekil 8: Aurora Firması'nın FDM yöntemi ile Ürettiği 1:11 Ölçekli Rüzgar Tüneli Test Modeli [Aurora Flight Sciences, 2022]

Hava aracı imalatında önemli bir yer tutan ve üretimi kolaylaştırıp güvenli ve hızlı çalışmaya olanak sağlayan yardımcı kalıp ve fikstürler, eklemeli imalat eğitiminde önem verdiğimiz konulardan birisidir. Eklemeli imalat teknolojilerinin takım ve kalıp konusundaki faydasını iki açıdan değerlendirilmekteyiz: Birincisi, ne kadar çok hava aracı parçası bu proseslerle imal edilirse kalıp ve fikstür ihtiyacında o kadar azalma olmaktadır; çünkü eklemeli imalatla kalıp ve fikstür ihtiyacı yok denecek kadar azdır. Bu da maliyeti ve imalata hazırlık süresini düşürmekte, takım hasarı, tamiri, bakımı veya kontrolü gibi sebeplerle üretim gecikmemekte, seri üretim avantajı tek parça ile yakalanmaktadır. Takımlar sadece maliyet değil, proje takvimi açısından da önemlidir. Ayrıca bunları depolamak bile sorun olmaktadır.

Takım imalatının kaçınılmaz olduğu durumlarda eklemeli imalat proseslerinin kullanılması ise, sertifikasyon sıkıntısı olmadan bu teknolojinin bütün avantajlarını sağlar; hafif, ergonomik kalıp ve fikstürler yapmak mümkün olur. Eğitimde şirketimizden ve başka firmalardan verilen örneklerle bu faydalar göz önüne serilmektedir. Örneğin Advanced Composite Structures (ACS) firması, talaşlı imalat yöntemi ile haftalarca süren ve 2000 \$ maliyeti olan kompozit kaplama kalıbını (Şekil 9) FDM yöntemi ile 1 gün sürede üreterek 400 \$'a mal etmiştir [Aerospace Manufacturing and Design, 2015].



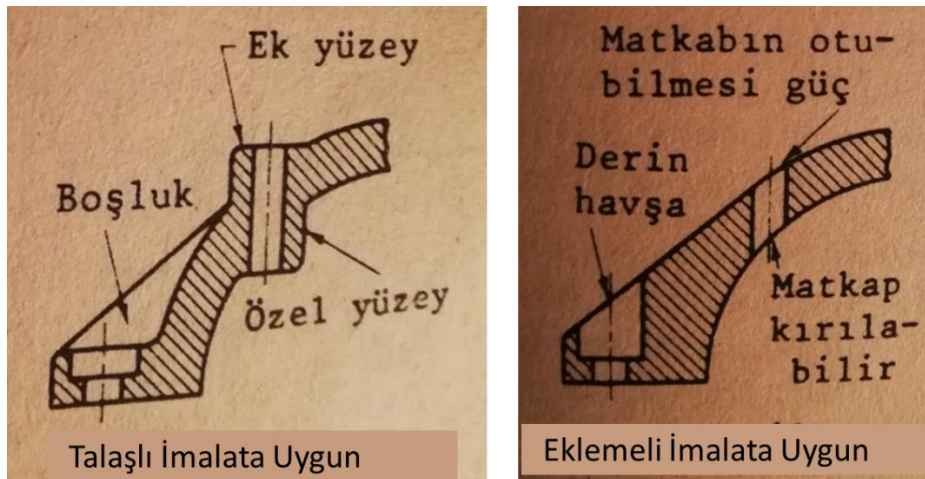
Şekil 9 FDM-Layup Takımı ve Bu Kalıp Kullanılarak Üretilen Uçak Kamera Kaplamaları [Aerospace Manufacturing and Design, 2015].

Eklemeli İmalat teknolojisinin gittikçe olgunlaşması ile birlikte bu proseslerin en hızlı büyüyen uygulaması son kullanım ürünü (nihai parça) imalatı olmuştur. Araştırmalar, katmanlı imalat teknolojisini kullanan işletmelerin her şeyden çok, fonksiyonel parçalar ürettiğini ortaya koymuştur. GE, Boeing, Airbus gibi sınırsız araştırma ve imalat kaynakları olan, sertifikasyon otoriteleri ile yakın ilişkideki şirketler eklemeli imalatın havacılık sektörüne başarılı biçimde uygulanmasında öncü olmaktadır. 2015 nisanında GE Aviation firması bir algılayıcı koruma ünitesini (sensor housing) FAA'den izin alarak ilk kez bir ticari uçakta kullanmış ve daha sonra bunu diğer şirketler izlemiştir (Şekil 10).



Şekil 10: Algılayıcı Koruma Ünitesi [GE Aviation, 2015]

Eğitimde, eklemeli imalat prosesleri ile son kullanım ürünü üretme faaliyetleri çeşitli yönleri ile irdelenmektedir. Tasarımda kısıtların az olması, malzeme sarfiyatının düşüklüğü, parça konsolidasyonu, kişiselleştirilmiş parça üretme imkanı ve daha bir çok avantajının yanında, eklemeli imalata uygun malzeme seçme ve tasarım yapma gerekliliği, imalat boyutlarının istenen büyüklükte olmaması, ardıl işlemlerin fazlalığı, kalite kontrol ve sertifikasyon zorlukları gibi sınırlayıcı unsurlar örneklerle anlatılmaktadır (Şekil 11). Örneğin, eklemeli imalata uygun tasarım yapılması ve proseste geleneksel imalat yöntemlerinden farklılaşma önemli bir paradigma değişimi gerektirmekte olup, eğitimde bu hususlara önem verilmektedir. [Gibson, 2015].



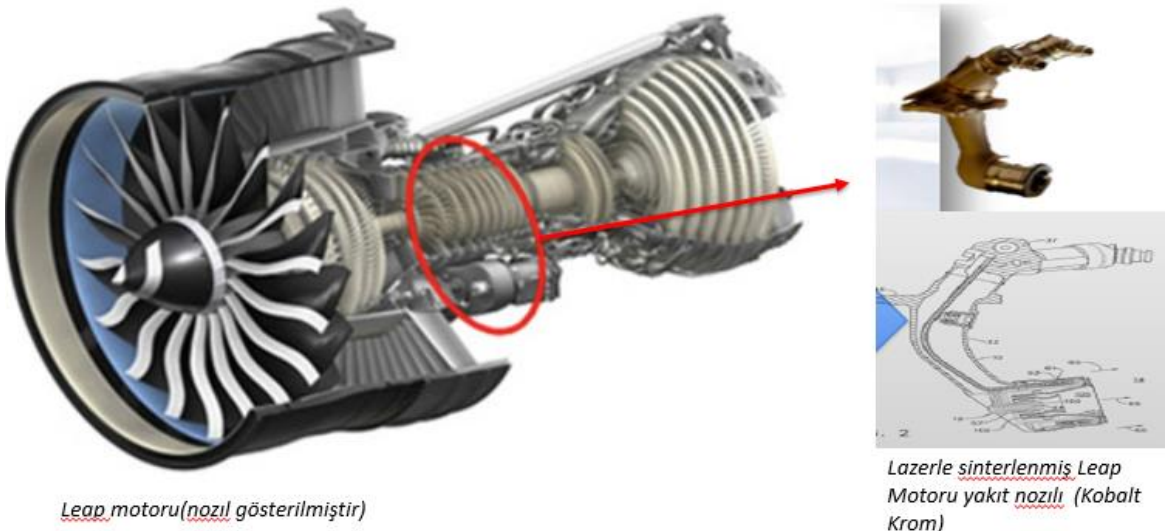
Şekil 11: Eklemeli İmalat ile Üretilmek istenen Eski Parçaları Yeniden Tasarlamak Gerekir

Eklemeli imalat ile üretilmesi uygun olan parçalar aşağıdaki şekilde sınıflandırılarak bunlarla ilgili örnek parçalar gösterilmektedir.

- Karmaşık geometrili, düşük üretim hacimli, değişik özellik veya karakterlerin özel kombinasyonuna sahip, şekil 12'deki gibi konformal soğutma kanallı parçalar (ISO/ASTM 52910, 2018),
- Parça sayısını azaltma, maliyeti düşürme ve verimliliği artırma gibi faydalar sağlayabilecek altmontajlar,
- Hava aracı kabin içi ve çevresel kontrol sistemi parçaları,
- Geometri optimizasyonu (En İyileştirme) potansiyeli taşıyan mühendislik değeri yüksek parçalar Şekil 13).
- Malzeme tasarrufu sağlayan parçalar,
- Yedek parçalar,



Şekil 12: Eklemeli İmalat ile Üretilmiş Heat Exchanger [Sinkora, 2021]



Leap motoru(nozul gösterilmiştir)

Lazerle sinterlenmiş Leap Motoru yakıt nozulu (Kobalt Krom)

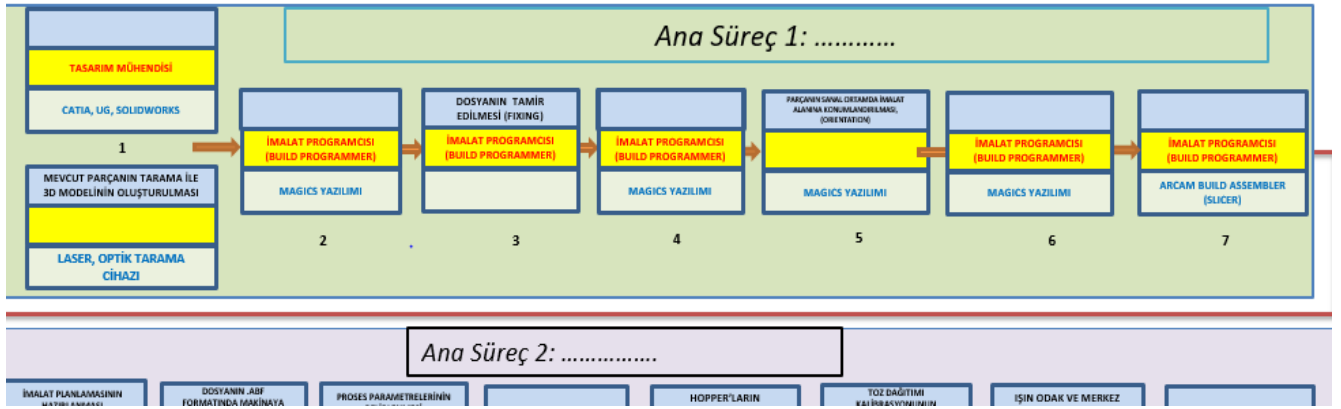
Şekil 13: Tasarımda Optimizasyon Yapılması Önemlidir [Wimpenny, 2018]

Eğitim'in fabrika ziyareti ve uygulamalarla desteklenmesinin 3nemi g3z 3n3nde bulundurularak, teorik temel bilgilerin doğrudan makine 3zerinde pratik uygulamasını g3stermek için başta Arcam Q20 Plus ve Fortus 900mc olmak 3zere makinaların buldukları alanlarda titanyum ve termoplastik baskı prosesleri izlenmekte, bu esnada sorulan sorulara cevap verilmektedir (şekil 14).

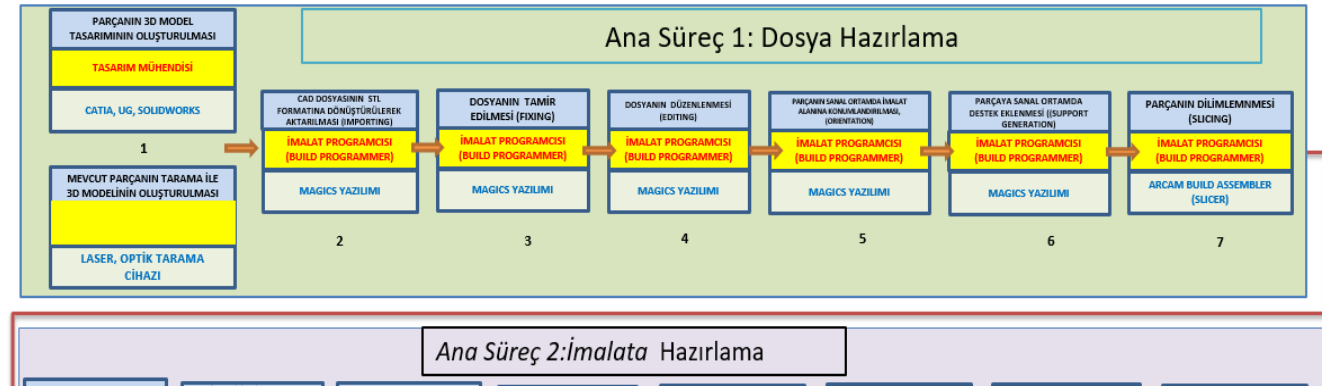


şekil 14: Arcam Q20 Plus

Ayrıca, değişik uygulamalarla proses ve s3reler hakkındaki farkındalığın artırılmasına çalışılmaktadır. 3rneğin şekil 15'de bir kısmı g3r3len uygulamada tasarım s3recinden, ardıl prosesler ve kalite kontrol dahil, 3r3n3n kullanıma hazır duruma geldiği aşamaya kadar gerçekleştirilen her bir faaliyet, bu faaliyeti yapan kişi ve faaliyetin gerçekleştirildiği ortam bir kutuda g3sterilmiş olup, boş bırakılan kısımların doldurulması istenmektedir. Bu suretle katılımcıların s3rece hakim olması ve edinilen bilgilerin daha kalıcı olması hedeflenmektedir.



a) Ana sürecin ve adımlarının boş kısımlarının tamamlanması istenmektedir



b) Ana sürecin ve adımlarının tamamlanmış durumu

Şekil 15: Süreç Uygulaması

Eğitimin başlıca amaçlarından birisi de, ilgili personeli eklemeli imalatın gelecekteki alacağı yola uygun olarak hazırlamaktır. O nedenle, eklemeli imalatın etrafında oluşacak eko sistem, muhtemel malzeme, yazılım ve tezgahların özellikleri, geleneksel imalat yöntemleri ile etkileşimleri, çalışacak personelin görev tanımları eğitimin son kısmını oluşturmaktadır.

SONUÇ

Eklemeli imalatın adaptasyonu ve yaygınlaşması yolunda bir çok engel olduğu gibi, fırsatlar ve avantajlar da bulunmaktadır [Despeisse, 2018]. Eğitim, bu engellerden bazılarını ortadan kaldırıp tasarım, proses, malzeme, makine, yazılım gibi eklemeli imalatın eko sistem bileşenlerine hakim olup yetkinlik kazanarak işgücü eksikliğini gidermek için önemli bir araçtır. Şirketimizde eklemeli imalatın daha iyi anlaşılması, sahip olduğu potansiyelin verimli bir şekilde kullanılması ve bu sayede rekabet avantajı kazanılması için başlatılmış olan eğitimin kapsamı daha da geliştirilerek eklemeli imalata yönelik tasarım, malzeme bilgisi, proses özellikleri ve kalite kontrol yöntemleri gibi konularda yetkinliğin artırılması, ayrıca savunma sanayiindeki diğer firmalara da katkı sağlanması hedeflenmektedir. Tüm ilgili kurumlarda eklemeli imalatla ilgili kurs ve eğitimlerin artırılması ülkemizde bu teknolojinin yaygınlaşmasında önemli bir katkı sağlayacaktır.

Kaynaklar

- 3D Printing: Manufacturing's Changing Landscape, 2015, Aerospace Manufacturing and Design Magazine, March 2015,
- Campbell, T., Williams, C., Ivanova, O., Garrett, B. 2011. "Strategic Foresight Report," Atlantic Council, p.3.
- Crane, L., 2021, Strange 3D-Printed Shapes Test 150-Year-Old Mathematical Theory, Newscientists Magazine, 24 July 2021, Issue 3344
- Despeisse, M., Minshall, T., 2017, Skills and Education for Additive Manufacturing, IFIP International Conference on Advances in Production Management Systems, Hamburg, Germany, September 3-7, 2017, p289-297
- Gibson, I., Rosen D., Stucker B., 2015, Additive Manufacturing Technologies, Springer, New York, p.467
- Groover, M.P., 2010, Fundamentals of Modern Manufacturing, John Wiley & Sons, Inc., p.1.
- <https://www.savunmasanayist.com/tusas-uydu-yapisal-uretimi/>, 26/02/2021 tarihinde girildi.
- <https://www.stratasys.com/en/stratasysdirect/resources/case-studies/fdm-nasa-n3-model-aurora-flight-sciences/>, sayfa 2022 yılında ziyaret edildi.
- <https://www.ge.com/news/reports/the-faa-cleared-the-first-3d-printed-part-to-fly-2>, sayfa 2022 yılında ziyaret edildi.
- ISO/ASTM 52900:2015(E) Standard Terminology for Additive Manufacturing – General Principles – Terminology, p. 1,2.
- ISO/ASTM 52910, 2018, Additive Manufacturing — Design — Requirements, guidelines and recommendations, Para 5.1,
- Savunma Sanayii Başkanlığı, 2020, Eklemeli İmalat Teknolojileri Yol Haritası Sonuç Raporu (Çeşitli Sayfalar)
- Sinkora, E, 2021, Where is Aerospace AM Flying to Next? Manufacturing Engineering Magazine, Society of Manufacturing Engineers, April 2021, p.49-54
- Wimpenny D., Pandey, P., Kumar, L. J., 2017, Advances in 3D Printing & Additive Manufacturing Technologies, Springer Science +Business Media Singapore 2017, p.41
- Wohlers Report 2021, Wohlers Associates, Inc., OakRidge Business Park, Colorado, USA, (Çeşitli Sayfalar)