

**Atf İçin:** Evrensel, I. R. ve Ertek, C. (2023). Eklemeli İmalatta Alüminyum ve Alüminyum Alaşımlarının Uygulamaları ve Topoloji Optimizasyonu. *İğdır Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 13(3): 2008-2025.

**To Cite:** Evrensel, I. R. & Ertek, C. (2023). Applications and Topology Optimization of Aluminum and Aluminum Alloys in Additive Manufacturing. *Journal of the Institute of Science and Technology*, 13(3): 2008-2025.

## Eklemeli İmalatta Alüminyum ve Alüminyum Alaşımlarının Uygulamaları ve Topoloji Optimizasyonu

Ramazan EVRENSEL, Cem ERTEK\*

### **Öne Çıkanlar:**

- Otomotiv, havacılık ve uzay sanayi
- Karmaşık geometri
- Ağırlık azaltma

### **Anahtar Kelimeler:**

- Eklemeli imalat
- Alüminyum alaşımları
- Topoloji optimizasyonu
- Seçici lazer ergitme
- Doğrudan metal sinterleme

### **ÖZET:**

Eklemeli imalat teknolojileri; plastik, seramik ve metal malzemeler kullanılarak nesnelerin üç boyutlu (3B) dijital model verilerine göre nihai geometri elde edilene kadar parçanın katman katman imal edilmesi prensibine dayalı bir yöntemleri içerir. Bu yöntemlerin günümüzde sanat, yapı sektörü, medikal, enerji, otomotiv, havacılık ve uzay endüstrilerinde çok karmaşık geometri mamulleri tek parça halinde ek işlemlere (kaynak, montaj gibi vb.) ihtiyaç duymadan imal edebilme, gözenekli ve boşluklu (topoloji optimizasyonu) yapılar oluşturarak ağırlık azaltma gibi avantajları sayesinde kullanımı gittikçe artmıştır. Eklemeli imalat sektöründe kullanılan toz malzemeler arasında alüminyum ve alüminyum alaşımları oldukça çok tercih edilmektedir. Bu çalışmada otomotiv, havacılık ve uzay endüstrilerinde kullanılan alüminyum alaşımlarının eklemeli imalat teknolojileri ve topoloji optimizasyonu yöntemlerinden yararlanarak imal edilmiş parçalar incelenmiştir.

## Applications and Topology Optimization of Aluminum and Aluminum Alloys in Additive Manufacturing

### **Highlights:**

- Automotive aeronautics and space industry
- Complex geometry
- Weight reduction

### **Keywords:**

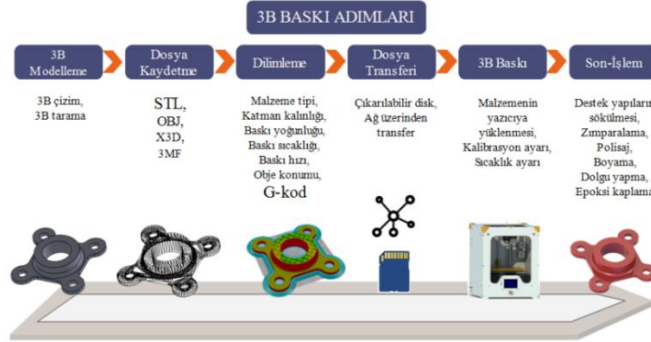
- Additive manufacturing
- Aluminum alloys
- Topology optimization
- Selective laser melting
- Direct metal laser sintering

### **ABSTRACT:**

Additive manufacturing technologies; It includes methods based on the principle of manufacturing the part layer by layer until the final geometry is obtained according to the three-dimensional (3D) digital model data of the objects using plastic, ceramic and metal materials. Today by using this method can be manufactured in the art, building sector, medical, energy, automotive aviation and space industries, without the need for additional (assembly, welding, etc.) processes of very complex geometry products. Its use has increased gradually thanks to its advantages such as weight reduction (topology optimization) by creating porous and cavitied structures. Aluminum and aluminum alloys are highly preferred among the powder materials used in the additive manufacturing sector. In this study, parts manufactured by using additive manufacturing technologies and topology optimization methods of aluminum alloys used in the automotive, aerospace and aerospace industries are examined.

## GİRİŞ

Eklemeli imalat (Eİ) ile bir parçanın imalatında temel mantık, bilgisayar destekli tasarımı yapılabildiği katmanlara ayrılmış modele ait parametrelere bağlı kalınarak, mamulün üst üste katmanlar halinde imal edilmesidir (Aktürk, 2021). Eİ uygulamalarının hepsinde benzer olarak uygulanan işlem adımları Şekil 1’de gösterilmiştir (Aktürk ve Korkmaz, 2021).



Şekil 1. Eklemeli imalat (3B baskı) işlem adımları (Sürmen, 2019)

Eklemeli imalat yöntemleri, geleneksel talaşlı imalat yöntemlerine kıyasla daha az ham madde sarf etmektedir. Üç boyutlu yazıcılar imalat basamaklarını basitleştirmeyi, imalat süreçlerini modernleştirmeyi ve stokları azaltmayı mümkün kılmaktadır (Aktürk, 2021).

Eklemeli imalat yöntemleri kullanılan enerji kaynakları ve malzemeler bakımından çeşitlilik göstermektedir. Gerek enerji kaynağı gerekse kullanılan malzeme farklılıklarını belirli standartlar altında gruplandırmak için Amerikan Test ve Malzemeler Kurumu (ASTM), 2010 yılında "ASTM F42 – Additive Manufacturing" ile eklemeli imalat teknolojilerini yedi başlıkta sınıflandırmıştır. Şekil 2’de verilen süreç şeması, yedi başlık altında çeşitli firmaların kendi geliştirdikleri teknolojiler ve aldıkları patentler sonucunda birbirinden farklılıkları olan ancak temelde aynı ilke ile çalışan yöntemleri (Örneğin; SLS, SLM, DMLS, EBM, SHS, MJF toz yatağı füzyonu başlığı altında) tek başlık altında toplamışlardır.

Eklemeli İmalat (Eİ) Süreçleri							
Süreç	Lazer Temelli Eİ Süreçleri			Termal Ekstrüzyon	Malzeme Püskürtme	Malzeme Yapıştırma	Elektron İyimi
Süreç Şeması	Lazer Ergitme	Lazer Polimerizasyon					
	Lazer kaynağı Toz Yatağı	Lazer kaynağı Toz besleme	Lazer kaynağı Sıvı reçine	Nozulda ergiyen malzeme	Malzeme püskürtme	Lazer kesim Sıkıştırıcı	Elektron iyimi Toz yatağı
Adı	SLS	DMD	SLA	FDM	3DP	LOM	EBM
	SLM	LENS	SGC	Robocasting	IJP	SFP	
	DMLS	SLC	LTP		MJM		
		LPD	BIS		BPM		
			HIS		Thermojet		
Malzeme Türü	Toz	Sıvı	Katı				

Şekil 2. Eklemeli imalat süreçlerinin genel sınıflandırılması (Bikas vd., 2015)

Eklemeli imalat yöntemlerinde mamul oluşturmak için katmanların inşa şekli, çalışma prensibi ve kullanılan malzemeler açısından farklılık gösterir. Bazı yöntemler, katmanları imal etmek için malzemeleri ergitir veya yumuşatır. Her yöntemin kendine özgü avantajları ve dezavantajları vardır. Bir yöntem seçerken dikkat edilmesi gereken başlıca hususlar genellikle hızı, imal edilecek parçanın maliyeti, malzeme maliyeti, çeşitliliği, mukavemeti ve rengi gibi unsurlardır (Bikas vd., 2015).

### Eklemeli İmalatın Avantajları

- Özelleştirilmiş mamullerin küçük partileri geleneksel seri imalat yöntemlerine göre daha ekonomiktir (Ford and Despeisse, 2016).
- CAD verilerinden hızlı bir şekilde teslim edilebilen mamuller ortaya çıkarmak mümkündür. Tasarımın yanlış yorumlanmasından kaynaklanan hataları azaltır ve tasarımların prototiplerine ulaşımında kolaylık sağlar.
- Döküm ve plastik kalıp uygulamaları için kullanımı idealdir.
- Büyük miktarda malzemenin çıkarılması gereken geleneksel imalat tekniklerinin aksine, mamulleri katman katman inşa ederek hammaddeleri verimli bir şekilde kullanır. Artık malzemeler genellikle minimum işlemle yeniden kullanılabilir.
- Geleneksel imalat süreçlerinde ana takım tezgâhına ek olarak jigler, fiktürler, kesici takımlar ve soğutma sıvıları gibi yardımcı kaynaklar gerekir. Eklemeli imalat bu ek kaynakları gerektirmez. Sonuç olarak, parçalar müşterilere yakın küçük imalatçılar tarafından yapılabilir. Bu, gelişmiş tedarik zinciri dinamikleri için de bir fırsat sunmaktadır.

- Takım kısıtlaması olmadığı için karmaşık geometrilere sahip geometriler yekpare şekilde imal edilebilir. Başka bir deyişle, imalat kolaylığı için parça işlevselliğinden ödün vermeye gerek yoktur (Prakash vd., 2018).

### Eklemeli İmalatın Dezavantajları

- Eklemeli imalatta büyük boyutlu mamullerin imal edilmesi mukavemet açısından genellikle tercih edilmez.
- Eklemeli imalat süreçleri kullanılarak imal edilen mamuller genellikle pürüzlü ve nervürlü bir yüzey kaplamasına sahiptir. İmalat sonrası her zaman ikincil işlemlere ihtiyaç duyulur.
- Eklemeli imalat ekipmanlarının ilk yatırım maliyeti yüksektir (Prakash vd., 2018).
- Destek yapısı malzemeleri geri dönüştürülemez, inşa platformunda parçanın konumlandırılması ile en aza indirilmesi gerekir (Ford and Despeisse, 2016).

Çizelge 1’ de eklemeli imalat yöntemlerinde kullanılan malzemeler, uygulama alanları, olumlu ve olumsuz yönleri verilmiştir (Mercado and Rojas, 2020).

**Çizelge 1.** Eklemeli imalat yöntemlerinde kullanılan malzemeler ve genel bilgiler

Yöntemler	Malzemeler	Uygulamalar	Olumlu Yönler	Olumsuz Yönler	Çözünürlük Aralığı (µm)
Ergiyik Yığılma Modelleme (FDM)	Termoplastik polimerlerin sürekli filamentleri ve sürekli elyaf takviyeli polimerler	Hızlı prototip oluşturma, oyuncaklar ve gelişmiş kompozit parçalar	Düşük maliyet, yüksek hız ve basitlik	Zayıf mekanik özellikler, sınırlı malzemeler (sadece termoplastikler), ve katman katman bitirme	50–200
Toz Yataklı Füzyon (SLS, SLM, 3DP)	Sıkıştırılmış ince tozlar, metaller, alaşımlar, sınırlı polimerler (SLS veya SLM), seramik ve polimerler (3DP)	Biyomedikal, elektronik, havacılık ve hafif yapılar (kafesler)	Hassas çözünürlük ve yüksek kalite	Bağlayıcı yönteminde (3DP) yavaş baskı, pahalı işlem, yüksek gözeneklilik	80–250
Mürekkep püskürtmeli	Bir sıvıdaki parçacıklar (mürekkep veya macun), seramik, beton ve toprak	Biyomedikal, büyük yapılar ve binalar	Büyük yapıları basabilme ve hızlı baskı yapabilme	İşlenebilirliği, kaba çözünürlüğü ve katmanlar arasında yapışma eksikliğinin varlığı	5–200
Stereolitografi	Fotoaktif monomerler ve hibrit polimer seramikler içeren bir reçine	Biyomedikal ve prototipleme	Hassas çözünürlük ve yüksek kalite	Çok sınırlı malzeme, yavaş ve pahalı baskı	10
Yönlendirilmiş Enerji Biriktirme (DED)	Toz veya tel formundaki metaller ve alaşımlar, seramikler ve polimerler	Havacılık, güçlendirme, onarım, giydirme ve biyomedikal	Azaltılmış imalat süresi ve maliyeti, mükemmel mekanik özellikler, kontrollü mikro yapı, doğru bileşim kontrolü, onarım ve yenileme için mükemmel	Düşük doğruluk, düşük yüzey kalitesi, yoğun bir destek yapısı ihtiyacı ve ince ayrıntılarla karmaşık şekillerin yazdırılmasında sınırlama	250
Lamine nesne imalatı	Polimer kompozitler, seramikler, kâğıt, metal dolgulu bantlar ve metal rulolar	Kâğıt üretimi, dökümhane endüstrileri, elektronik ve akıllı yapılar	Azaltılmış imalat süresi, geniş bir malzeme yelpazesi, düşük maliyet, büyük yapıların imalatı için mükemmel	Düşük yüzey kalitesi ve boyutsal doğruluk, karmaşık şekillerin imalatında sınırlama	Laminatların kalınlığına bağlıdır

Makalede, Eİ yöntemlerinin genel sınıflandırılması verilmiş, makale içeriği Alüminyum ve Alüminyum alaşımları olduğundan, sadece lazer ile sinterleme ve ergitme esaslı Eİ yöntemlerine kısa açıklamalarla değinilmiştir.

### Lazer Tabanlı Süreçler

Lazer tabanlı eklemeli imalat süreçleri, malzemeyi sinterlemek veya ergitmek için farklı güçlerde lazer kaynakları kullanır. Lazer tabanlı işlemler, lazer sinterleme, ergitme ve lazer polimerizasyonuna bağlı olarak alt kategorilere de ayrılabilir. Lazerle sinterleme ve ergitme işlemlerinde, malzeme toz halinde, bir toz yatağına veya nozullar aracılığıyla doğrudan işleme kafasına gönderilir, sinterlenir veya ergitilir. Lazer polimerizasyonu işleminde reçine, genellikle düşük güçteki lazer kaynağı ile UV ışınlarla maruz kalarak kürlenmektedir (Bikas vd., 2015).

### Lazerle sinterleme ve ergitme

Seçici Lazer Sinterleme (SLS), taneciklerin birbirine kaynaşmasına izin verecek şekilde lazer ışını ile ısıtılan ince bir toz kullanılır. Toz, lazer ışını tarafından sinterlenmeden önce termal bozulmayı en aza indirmek ve bir önceki katmanda füzyonu kolaylaştırmak için malzeme, ilgili katmanın gerektirdiği geometride ergitme noktasının hemen altındaki bir sıcaklığa kadar ısıtılır. Her katman inşa edildikten sonra, yapı platformu aşağı indirilir ve yeni bir toz tabakasını yapı platformuna serici ile homojen olarak yayılır ve sinterlenir. Sinterlenmiş toz ise yapıyı desteklemek için yerinde kalır ve yapı tamamlandıktan sonra yeniden kullanılabilir. SLS teknolojisi, yüksek doğruluk derecesi ve yüzey kalitesinden dolayı metal tozlar için yaygın olarak kullanılmaktadır (Bikas vd., 2015).

Doğrudan Metal Lazer Sinterleme (DMLS), yöntem olarak yüksek enerjili lazer ışınlarıyla metal toz karışımının ergitilmeden sinterlenmesidir (Aktürk, 2021). DMLS teknolojisi ile ince yapıli mamullerin imalatında ve mikron düzeyde kaynaştırma işlemi sırasında başarılı sonuçlar alınabilmektedir. DMLS teknolojisi 3 boyutlu yazıcılarla metal parça imalatı

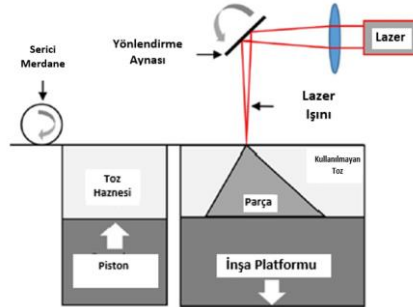
için kullanılan en etkili yöntemlerdendir. DMLS teknolojisi ile imal edilen mamullerin yüksek dayanımı, imalatının hızlı olması ve malzeme kullanımının az olması gibi temel avantajları vardır (Sürmen, 2019). Bir eklemeli imalat yöntemi olan DMLS işleminde, metal tozlar yapı platformuna katman katman serildikten sonra lazer ışınları ile sinterlenerek tozların birleştirilmesi ve geometrinin oluşması sağlanır. Bu yöntemde katman kalınlığı, lazer gücü, tarama hızı, tarama yönü, tarama uzaklığı, imalat şekli ve kullanılan malzemelerin farklı oluşu gibi etkenler imal edilecek mamulün yüzey kalitesinin, imalat maliyetinin, imalat hızının ve mekanik davranışlarının farklı olmasına neden olmaktadır (Aktürk ve Korkmaz, 2021).

Seçici Lazer Ergitme (SLM/SLE), SLS'ye benzer bir işlemdir. SLM yöntemi, geleneksel talaş kaldırma işlemleriyle karşılaştırıldığında mamulde oluşturulan kafes yapılarının varlığı ve kontrol edilebilir hacimsel bölümler olduğundan dolayı önemlidir (Aktürk, 2021). Teknik detaylarda farklı olarak SLM işleminde, bir geometrik şeklin oluşabilmesi için toz ergimesinin meydana gelmesi gerekir. SLM yöntemi medikal, uzay ve havacılık endüstrisinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Lazerle ergitme süreçleri, ince toz formunda tedarik edilen bir malzemeyi seçici olarak ergitmek için bir lazer kaynağı kullanır. Tarama optikleri lazer ışınını x ve y düzleminde yönlendirir ve yapı platformu z yönünde hareket eder (Bikas vd., 2015; Sürmen, 2019).

Lazer Mühendisliği Net Şekillendirme (LENS), metal tozunu ergitmek için yüksek güçlü bir lazer kullanır. Tozun dağıtımını sağlayan nozul, toz akışını lazer ışının odaklandığı noktalara enjekte eder. Lazer kafası ve toz nozulu ayrılmaz bir ünite olarak hareket eder. Metal tozları, yerçekimi yoluyla veya basınçlı bir taşıyıcı gaz kullanılarak hareketli kafanın çevresine verilir. Lazer ışını, alt katman veya önceden biriken katman üzerinde ergimiş havuz oluşturur. Tabla x ve y düzleminde nesnenin her katmanını oluşturmak için hareket eder. Her katman tamamlandıkça kafa dikey olarak yukarı doğru hareket ettirilir. SLM gibi toz yatakları kullanan proseslerle karşılaştırıldığında, bu teknolojiyle oluşturulan geometrilerin boyutları daha büyüktür.

Doğrudan Metal Biriktirme (DMD), toz haline getirilmiş malzemeyi (tipik olarak metal) sinterlemek veya ergitmek için güç kaynağı olarak bir lazer kullanan eklemeli imalat tekniğidir. Çalışma tekniği LENS'in imalat tekniğine benzer şekilde, doğrudan işleme kafasına bir dizi nozul tarafından beslenir.

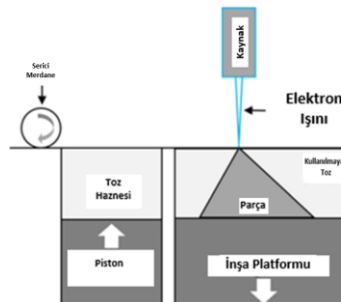
Seçici lazer kaplama (SLC), lazeri alt katman üzerinde birikecek metal tozunu ergitmek için bir ısıtma kaynağı olarak kullanan malzeme işleme tekniğidir. Bu teknik, hızlı bir imalat süreci olarak noktadan noktaya ve katman katman geometriyi oluşturmak için uygulanmaktadır. Net şekle yakın geometrilere sahip fonksiyonel metal parçalar oluşturmanın bir aracı olarak tanıtılmıştır (Bikas vd., 2015). Ergitme yönteminin Eİ şematik gösterimi Şekil 3'te verilmiştir.



Şekil 3. Lazer Ergitme Eİ Proses Şeması (Bikas vd., 2015)

### Elektron Işını

Elektron ışını işlemleri, lazer ergitme işlemleriyle aynıdır. Ancak bir lazer ışını yerine, malzemeyi ergitmek veya sinterlemek için bir enerji kaynağı olarak elektron ışını kullanılır. Elektron ışını ile ergitme (EBM), SLS'ye benzeyen ve nispeten yeni, ancak hızla büyüyen bir süreçtir. Yalnızca metalik parçaların imalatı için uygundur. Toz, tipik olarak 30-60 KV olan yüksek voltajla çalışan bir elektron ışını tarafından ertirilir. SLS ile karşılaştırıldığında, EBM çok daha yüksek verim ve daha düzgün termal alan dağılımı sunmaktadır. Elektron ışını Eİ şematik gösterimi Şekil 4'te verilmiştir (Bikas vd., 2015).



Şekil 4. Elektron Işını Eİ Proses Şeması (Bikas vd., 2015)

## EKLEMELİ İMALAT SONRASI İKİNCİL İŞLEMLER

Eklemeli imalatın büyük avantajlarına rağmen nispeten düşük yüzey kalitesine sahip bileşenler imal edilir. Bu nedenle ikincil işlemler kullanıma hazır mamuller elde etmek için kaçınılmazdır. Eklemeli imalat süreçleriyle imal edilen bileşenlere mekanik, kimyasal ve termal dahil olmak üzere çeşitli ikincil işlemler uygulanmaktadır.

### Kimyasal Parlatma / Polısaj

Metallerin yüzey özelliklerine göre kimyasal solüsyonlarla yüzey kalitesini arttırmak ve kısmen ergimiş toz parçacıklarının çıkarılması için parçaya belirli bir süre uygulanan son işlem yöntemidir. Kimyasal polisaj yöntemi öncesi ve sonrası işlemler genel olarak Şekil 5' te gösterilmiştir (Sunay ve ark., 2021).



Şekil 5. Kimyasal temizleme işleminin genel akış şeması (Sunay ve ark., 2021)

### Elektrokimyasal Parlatma (ECP)

Elektrokimyasal parlatma eklemeli imalat yöntemleri veya geleneksel yöntemlerle imal edilen elektrot (katot) ve iletken metal numunelerin (anot) bir elektrolitik hücrenin elektrokimyasal çözünme işlemidir. ECP işleminde, takım elektrotu ile numuneler arasında fiziksel temas olmadığı için mekanik olarak işlenmesi zor olan karmaşık şekillerin, kırılğan ve sertleştirilmiş malzemelerin parlatılması için uygundur (Sunay ve ark., 2021).

### Elektro Kaplama

Metalik veya metalik olmayan bir malzeme yüzeyinde elektrokimyasal yöntemlerle metalik bir film oluşturulmasıdır. Bu yöntem, son işleme yöntemi olarak eklemeli imalatta yaygın olarak kullanılmaktadır. Mamullerin mukavemetini ve iletkenliğini artırmak için genellikle polimerik malzemelerden yapılmış bileşenlere uygulanır. Bu yöntemde en sık kullanılan kaplama malzemeleri altın, bakır, gümüş, krom, nikel, çinko, pirinç vb. malzemelerdir (Sunay ve ark., 2021).

### Kimyasal Aşındırma / Dağlama (CHE)

Mamulün yüzey pürüzlülüğünü istenilen değerlere getirmek için kimyasal çözeltiler ile mamulün yüzeyi arasında kimyasal reaksiyonların gerçekleşmesini sağlayan işlemidir. Kimyasal dağlamada, seyreltilmiş ve konsantre sulu hidroklorik (HCl), sülfürik (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>), nitrik (HNO<sub>3</sub>) ve hidroflorik (HF) asit, oksalik asit C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>O<sub>4</sub> ve aqua regia (HCl + HNO<sub>3</sub>) gibi konsantre sulu çözeltiler (kimyasal solüsyonlar) kullanılmaktadır. Bu son işleme yönteminin, çoğunlukla tıp endüstrisinde kullanılan karmaşık alet ve ekipmanların pürüzlülüğünü gidermek için kullanıldığı bilinmektedir (Sunay ve ark., 2021).

### Buharla Düzeltme / Yumuşatma

Buharla yumuşatma, sıcak kimyasal buharın belirli bir sürede takım iş parçası teması olmadan numunelerin yüzeyini pürüzsüzleştirdiği bir son işlem tekniğidir. Diğer bir deyişle akrilonitril bütadien stiren (ABS) ve poli laktik asit (PLA) gibi termoplastik malzemelerin aseton, dikloroetilen, tetra hidroflorür, etil asetat vb. kimyasallarla belirli oranlarda parlatılmasıdır. Buhar düzeltme işlemi yapılan ABS numuneleri Şekil 6'da verilmiştir (Sunay ve ark., 2021).



Şekil 6. Aseton buharıyla parlatılmış ABS numunenin önce (sağ) ve sonraki (sol) görünümü (Sunay ve ark., 2021)

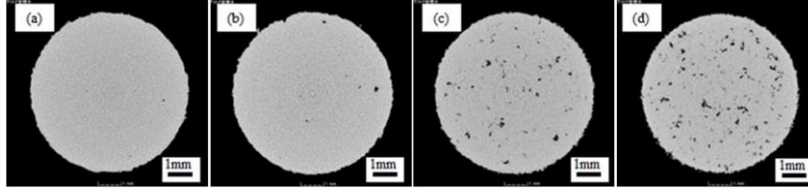
### Sıcak İzostatik Presleme (HIP)

Metal ve seramik malzemelerden imal edilmiş mamullerin içyapı özelliklerini (yoğunlaştırmak) iyileştirmek için kullanılan bir imalat sürecidir. Yüksek basınç ( $\leq 2000$  bar / 200 MPa) ve yüksek sıcaklık ( $\leq 1450$  °C) seviyelerinin olduğu inert bir atmosfer (genellikle argon gazı) ortamında, ağırlıklı olarak metal, seramik mamuller ve bileşenleri yoğunlaştırmak, mamullere mükemmel mukavemet özellikleri kazandırmak için uygulanır. Malzeme içyapısının yoğunlaşması sayesinde, malzemenin yorulma ömrü, korozyon direnci ve süneklik gibi mekanik özellikleri iyileştirilir.

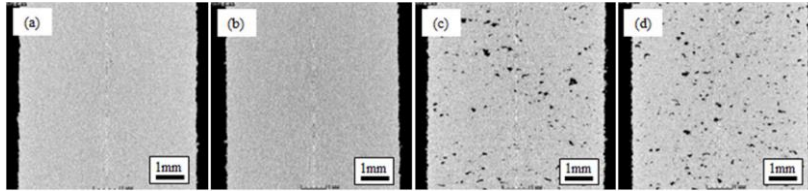
Sıcak izostatik presleme prosesi; krom-kobalt, nikel-kobalt, bakır, magnezyum, titanyum ve alüminyum bazlı alaşımlardan imal edilen mamullerin özelliklerini iyileştirmek için idealdir (Hiperbaric, 2022a).

Sıcak izostatik presleme yöntemi; toz metalürjik parçaların sinterlenmesi, döküm malzemelerin yoğunlaştırılması ve eklemeli imalat yöntemi ile imal edilen mamullerin iç kusurlarının (çatlaklar ve istenilmeyen gözenekler) giderilmesi dahil olmak üzere birçok kullanım alanına sahiptir. Havacılık, otomotiv, medikal, nükleer ve savunma sanayi gibi endüstrilerde kullanılan mamullerin iç yapılarını iyileştirmek için en etkili yöntemdir (Hiperbaric, 2022b).

AlSi10Mg alaşımından imal edilen numunelere 500°C'lik sabit sıcaklıkta, 2 saat süre ve 100 MPa basınç şartlarında HIP ısıtma işlemi uygulanmıştır. Şekil 7 ve 8' de, HIP ısıtma işleminden önce sırasıyla yatay ve dikey kesitler için (a), (b), (c) ve (d) örneklerinin X-ışını BT görüntülerini göstermektedir. Taramalardaki siyah alanlar iç gözeneklere karşılık gelmektedir (Hirata vd., 2019).

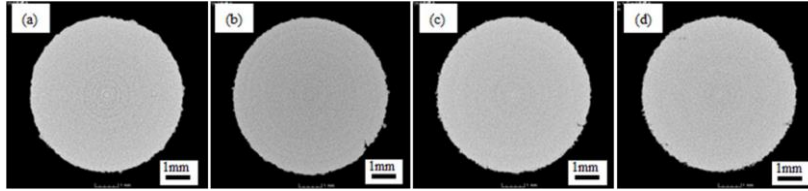


Şekil 7. HIP ısıtma işlem öncesi yatay kesitler için (a), (b), (c) ve (d) numunelerinin X-ışını BT görüntüleri (Hirata vd., 2019)

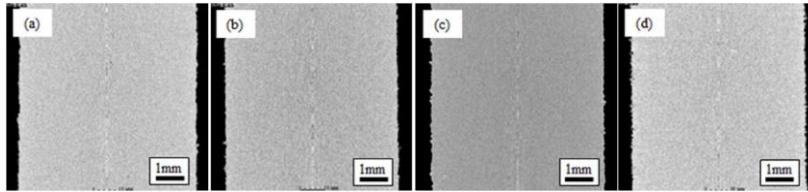


Şekil 8. HIP ısıtma işlem öncesi dikey kesitler için (a), (b), (c) ve (d) numunelerinin X-ışını BT görüntüleri (Hirata vd., 2019)

Şekil 9 ve 10'da, HIP ısıtma işlemi sonrası sırasıyla yatay ve dikey kesitler için numune (a), (b), (c) ve (d) numunelerinin X-ışını CT görüntülerini göstermektedir (Hirata vd., 2019).



Şekil 9. HIP ısıtma işlem sonrası yatay kesitler için (a), (b), (c) ve (d) numunelerinin X-ışını BT görüntüleri (Hirata vd., 2019)



Şekil 10. HIP ısıtma işlem sonrası dikey kesitler için (a), (b), (c) ve (d) numunelerinin X-ışını BT görüntüleri (Hirata vd., 2019)

### Lazerle Dövme

Lazer dövme, yüzeye dik şekilde gönderilen lazer ışınları ile malzemeyi plastik deformasyona uğratan yüzey işleme yöntemidir. Yakıt depolama tankları ve uçak yapıları olmak üzere kompresör kanatlarının ve jet motoru fanlarının yorulma ömrünü iyileştirmek için de yaygın olarak kullanılmaktadır. Lazerle dövme işlemlerinde kısa yoğun lazer darbesi, sınırlı geometride plazma üretir ve böylece yerel plastik deformasyonlara neden olan basınç darbelerini işlenecek yüzeye gönderir. Bu işleme bağlı olarak yüzey pürüzlülüğü azalır (Peng vd., 2021)

### Lazerle Parlatma

Eİ parçalarının yüzey pürüzlülüğünü iyileştirmek için potansiyel bir yöntem olarak kabul edilir. Lazer parlatma sırasında enerji kaynağı, malzeme yüzeyine ışınlandığında morfoloji tepesi noktalarını hızla ergime sıcaklığına ulaştırır. Yüzeyde oluşan ergimiş havuz, yerçekimi ve yüzey geriliminin etkisi nedeniyle aynı seviyeye yeniden dağılır. Lazer ışını yüzeyi taramayı durdurduğunda ısıdan etkilenen bölgenin sıcaklığı hızla düşer ve ergimiş havuz katılaşır. Bu işleme bağlı olarak yüzey pürüzlülüğü azalır (Peng vd., 2021).

### Makine ile İşleme ve Aşındırma

Makine ile işleme ve kumlama gibi yöntemler çeşitli endüstrilerdeki işlevsel parçaların şekil doğruluğunu ve yüzey kalitesini iyileştirmek için kullanılan geleneksel imalat teknikleridir. Yüksek nüfuz etme özellikleri nedeniyle Eİ parçaları için ortak son işleme yöntemleri olarak kullanılırlar (Peng vd., 2021).

### TOPOLOJİ OPTİMİZASYONU (TO)

Eklemeli imalat yönteminde, mamul tasarım aşamasında yürütülen topoloji optimizasyonu (TO) çalışmaları büyük öneme sahiptir. Bu çalışmalar sayesinde, parça geometrisinde yapılan değişiklikler ile imal edilecek parçanın yüke maruz kalan bölgelerinde ihtiyaç duyulan mukavemet değerleri korunurken, hem imalat için gereken malzeme miktarını dolayısıyla imalat maliyetini düşürmek hem de mamulün toplam ağırlığını azaltmak mümkündür.

Herhangi bir parçanın çok işlevli, ergonomik, hafif ancak gerekli mukavemet değerlerine sahip ve imalat maliyetlerinin düşük olması, imalatın en önemli hedefleridir. Topoloji optimizasyonu, imal edilecek parçanın tasarımına ya da var olan bir mamulün katı modeline sınır şartları getirerek, çeşitli kuvvetler uygulayarak ve geometrik değişiklikler yaparak bahsedilen imalat hedeflerine ulaşılmasını sağlar. TO çalışmaları sonucunda, geleneksel imalat yöntemleriyle elde edilemeyecek, imalatının sadece eklemeli imalat yöntemleri ile gerçekleştirilebileceği derecede karmaşık geometriye sahip tasarımlar ortaya çıkabilir. Bu durum, topoloji optimizasyonu ile eklemeli imalat yöntemlerini ayrılmaz ikili haline getirir. Şekil 11'de gösterilen A320 kabin menteşe braketini imal etmek için Eİ teknikleri kullanılmıştır. TO ile parçanın ağırlığı %64 azaltılmıştır (Blakey vd., 2021).



Şekil 11. Airbus A320 kabin menteşe braketinin topoloji optimizasyonu (solda) ve eklemeli imalatı (sağda) (Blakey vd. 2021)

### EKLEMELİ İMALATTA KULLANILAN MALZEMELER

Titanyum ve alaşımları, çelik alaşımları, alüminyum alaşımları, nikel alaşımları, kobalt esaslı bazı alaşımlar ve magnezyum alaşımları eklemeli imalat için optimize edilmiştir. Özellikle, titanyum ve alaşımları çeşitli endüstrilerde yaygın olarak kullanılan yüksek performanslı malzemelerdir. Ti ve Ti6Al4V şu anda havacılık ve biyomedikal alanlarda ticari uygulamalar için kullanılmaktadır.

Östenitik paslanmaz çelikler, maraging çelikleri, çökeltme ile sertleştirilmiş paslanmaz çelikler ve takım çelikleri gibi çelikler, eklemeli imalatta yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu alaşımlar kalıplama uygulamaları gibi yüksek mukavemet ve sertlik koşulları için kullanılabilir.

Nikel bazlı süper alaşımlar (Inconel 625 ve 718) yüksek sıcaklık uygulamaları için geliştirilirken, CoCr alaşımları biyomedikal ve dental uygulamalar için geliştirilmiştir. Mg alaşımları, Au ve Cu gibi diğer malzemeler biyomedikal yeniden soğurucu uygulamalar için değerlendirilmiştir.

Polimerler, çeşitlilikleri ve farklı eklemeli imalat süreçlerindeki kolaylığı nedeniyle 3B baskı endüstrisinde en yaygın olarak kullanılan malzemelerdir. Eklemeli imalat için polimerler, termoplastik filamentler ve reaktif monomerler reçine ve toz formunda bulunur. Polimerler ve kompozitler havacılık, mimari, oyuncak imalatı ve tıp alanları gibi birçok endüstriyel uygulamada kullanılmaktadır.

Seramikler, biyomalzemeler ve doku mühendisliği alanında kemikler ve dişler için önemli bir malzeme haline gelmiştir. Seramik malzeme kullanılarak, gözenek ve kafes yapılarının olduğu 3B baskılı gelişmiş hafif uygulamalar geliştirerek sayısız fayda sağlanmıştır. Doku mühendisliğinde kullanılan seramik yapı iskelelerinin eklemeli imalatı geleneksel döküm ve sinterleme yöntemlerine kıyasla daha kullanışlıdır.

Al ve alaşımları termal stresleri azaltan ve yüksek bir termal iletkenliğe sahip malzemedir. Şu anda en yaygın kullanılan alaşımlar AlSi10Mg ve AlSi12' dir (Ngo vd., 2018).

### Eklemeli İmalatta Kullanılan Alüminyum Alaşımları

Eklemeli imalat yöntemlerinden yararlanarak, alüminyum ve alüminyum alaşımı toz malzemelerle elde edilecek parçaların imalatında Seçici Lazer Ergitme (SLE / SLM) ve DMLS teknolojileri yaygın olarak kullanılmaktadır (Aktürk ve Korkmaz, 2021).

#### AlSi10Mg

Mamulün kalitesi büyük ölçüde malzeme özelliklerine bağlı olduğundan ve toz morfolojisi etkilendiğinden dolayı malzeme eklemeli imalatta önemli bir rol oynar. Eklemeli imalatla başarıyla kullanılmış malzemelerden biri de AlSi10Mg

(Çizelge 2) alaşımıdır. AlSi10Mg mükemmel döküm kabiliyeti, yüksek korozyon direnci, hafifliği, yüksek dinamik yük taşıma kapasitesi, iyi termal ve mekanik özellikleri ve daha yüksek sertlik (Çizelge 3) gibi farklı özellikleri nedeniyle otomotiv ve havacılık endüstrisinde oldukça tercih edilen bir malzemedir. Tipik olarak bu alaşım yüksek yüklere maruz kalan ince duvarlara ve karmaşık geometrilere sahip döküm parçaların imalatında kullanılır. Bu alaşımdan yapılan parçalar kaynak edilebilir, talaşlı ve tel erozyon ile işlenebilir, elektro erozyon ile parlatılabilir ve gerekirse kaplanabilir.

AlSi10Mg alaşımı hipoötektik alüminyum alaşımları grubuna girer. Al-Si alaşımındaki Si'nin yüzde ağırlığı %11 ile %13 arasında olduğunda alaşım ötektik alaşım, Si %11'den az olduğunda alaşım hipoötektik alaşım, %13'ten fazla olan alaşım hiperötektik alaşım olarak bilinir.

AlSi10Mg alaşımlarının SLM yöntemi ile işlenmesi yüksek mukavemetli alüminyum alaşımlarına kıyasla nispeten kolaydır. Ancak ergiyik havuzunda ve toz parçacık yüzeyinde oksitlerin varlığı, seçici olarak gözeneklilik gelişimi için bir çekirdeklenme bölgesi görevi görür. SLM'de yeni alaşımın geliştirilmesi için, yüksek mukavemetli alüminyum alaşımının davranışı, metalürjik açıdan derinlemesine bilgi edinmek için araştırılmıştır. 20 ila 63 µm parçacık boyutuna sahip, gaz atomizasyon işlemi ile imal edilen AlSi10Mg alaşım tozu, otomotiv ve havacılık endüstrilerinde çeşitli uygulamalar için eklemeli imalatta başarıyla kullanılmaktadır.

Bu alaşım, SLM'de katılma sırasında düşük çatlama eğilimi sergileyen çok küçük bir katılma ve sıvılaşma sıcaklığı farkına sahiptir. Bu alaşım kullanılarak imal edilen parçaların belirgin mikro yapısı ve çekme özellikleri ısıtma işlemi uygulanarak iyileştirilebilir. AlSi10Mg alaşımındaki ötektik Si'nin şekli ve boyutu, parçanın mekanik özelliklerini etkileyen önemli faktörlerdir. Al-Si alaşımındaki magnezyum, bileşenin mekanik özelliklerinde değişiklik olmaksızın mukavemet ve sünekliğin iyileştirilmesini sağlayan çökeltmedeki Mg<sub>2</sub>Si fazını mümkün kılmaktadır. AlSi10Mg alaşımını sertleştirmek için yapay yaşlandırma ile çözeltiye alma ısıtma işlemi kullanılmıştır. Si fazının çok ince yapısı ve dağılımı nedeniyle döküm AlSi10Mg alaşımına kıyasla, eklemeli olarak imal edilen AlSi10Mg alaşımında daha iyi mekanik özellikler gözlenmiştir (Gite ve Wakchaure, 2023). Çizelge 2 ve 3'te AlSi10Mg alaşımına ait kimyasal bileşim ve mekanik testler verilmiştir (Paolino vd., 2019).

**Çizelge 2.** AlSi10Mg tozu (% ağırlık) kimyasal bileşimi

Element	Si	Mg	Cu	Ni	Fe	Mn	Ti	Al
Ağırlık bileşimi (%)	10	0.4	0.25	0.05	0.25	0.1	0.15	Kalan

**Çizelge 3.** Çekme testleri ve Vickers sertlik ölçümlerinin sonuçları

	Gerilme Mukavemeti [MPa]	Uzama (%)	HV (Sertlik)
AlSi10Mg- dikey	419 ± 8	4.1 ± 0.1	146 ± 4
AlSi10Mg	451	4.8	127

### F357 (AlSi7Mg)

Lazer Toz Yatak Füzyonu (L-PBF), fonksiyonel ve yapısal uygulamalar için özelleştirilmiş veya karmaşık şekilli metal mamuller imal etmek için kullanılan bir toz yataklı eklemeli imalat teknolojisidir. Al-Si-Mg döküm sınıfı Al alaşımları, sıcak çatlama karşı dayanıklı ve düşük kalıntı gözenekliliğe sahip nesnelere oluşturmak için kolaylıkla işlenebilir olduklarından L-PBF için en çok tercih edilen alaşımlardır. Özellikle AlSi7Mg alaşımı (Çizelge 4) (A357 döküm kalitesi), iyi korozyon direnci ve mekanik performansı nedeniyle yaygın olarak kullanılmaktadır.

Son yıllarda, L-PBF ile imal edilen Al-Si-Mg alaşımlarının mikroyapısı ve mekanik özellikleri hakkında birçok bilimsel makale yayınlanmıştır. AlSi7Mg'nin L-PBF ile eklemeli imalatı üzerine yayınlanan araştırma çalışmaları, işlem parametrelerinin optimizasyonu, kafes yapılarının özellikleri, termal ve mekanik yorulma özellikleri, kırılma tokluğu ve alaşımın korozyon davranışına odaklanmaktadır. Birkaç çalışma, farklı ısıtma uygulamalarının A357 alaşımının mekanik özellikleri üzerindeki etkisini araştırmıştır. Casati vd. ve P. Van Cauwenbergh vd. doğrudan yaşlandırmanın (T5 tavlama), malzeme özellikleri üzerindeki etkisini incelemiştir (Çizelge 5). T5 tavlama, T6 tavlama (çözelti tavlama, ardından suda soğutma ve en yüksek sertliğe yapay yaşlanma) ile elde edilene göre daha yüksek malzeme sertliği ve mukavemeti elde edilmesini sağladığı gözlemlenmiştir. Çizelge 4 ve 5'te AlSi7Mg alaşımına ait kimyasal bileşim ve farklı koşullardaki mekanik test sonuçları verilmiştir (Lipiński and Szabracki, 2013; Casati vd., 2021; Van Cauwenbergh vd., 2018).

**Çizelge 4.** AlSi7Mg alaşımının kimyasal bileşimleri

Element	Si	Mg	Cu	Ni	Fe	Mn	Ti	Al
Ağırlık bileşimi (%)	7.11	0.34	0.1	0.006	0.42	0.32	0.1	Kalan

**Çizelge 5.** AlSi7Mg'nin farklı koşullarda mekanik özellikleri

Parametre	MÇD [MPa]	AD [MPa]	Uzama $\epsilon_R$ (%)	HV (Sertlik)
İlk hali/İşlem öncesi	398	257	7.6	102
Çözelti ısıtma işlemi	d.a	d.a	d.a	78
T5 tavlama	411	309	4.8	137
T6 tavlama	306	256	4.7	113

\*MÇD: Maksimum çekme dayanımı, \*AD: Akma dayanımı \*d.a: Değerlendirmeye alınmamış



**AlSi7Mg0,6/0,3**

AlSi7Mg0,6 alüminyum alaşımı (A357.0 dökme alüminyum alaşımına eşdeğer), iyi ağırlık/direnç oranı nedeniyle otomotiv ve havacılık endüstrilerinde yaygın olarak kullanılmaktadır ve daha yüksek dayanım elde etmek için ısıtılardan geçirilebilir, bu da onu destekler, muhafazalar, braketler, paneller, aktüatörler vb. çeşitli parçaların imalatı için ideal hale getirir.

AlSi7Mg0,6 parçalarının imalat akışı, geleneksel olarak çeşitli döküm yöntemleri, ardından ısıtıl işlem ve gerekirse son olarak talaşlı işleme şeklinde olmuştur. SLM bu imalat akışı için iyi bir alternatif ve uygulanabilir bir seçenek olabilir. AlSi7Mg0,6 alüminyum alaşımı SLM ile işlenebilir. Ancak toz parçacıklarındaki lazer radyasyonunun yüksek yansıtıcılığı ve düşük absorpsiyonunun yanı sıra alüminyum alaşımlarına özgü malzemenin yüksek termal iletkenliği nedeniyle bazı problemler ortaya çıkabilir. Diğer dezavantajlar, ergiyik havuzunda oksit oluşumu, ergiyik havuzunun dengesiz termodinamik davranışı ve dengesiz fazlarla ilgili problemlerdir. Bu nedenlerden dolayı, son yıllarda Al-Si-Mg alaşımlarındaki SLM işleme parametrelerinin etkisi artık gözenekliliği ve hataları azaltmak, boyutsal kararlılığı, kaliteyi ve yüzey kalitesini iyileştirmek amacıyla araştırılmıştır. Al-Si-Mg alaşımlarının geniş yelpazesinde, AlSi10Mg alaşımının eklemeli imalat yöntemi ile işlenebilirliği açısından bugüne kadar daha yüksek bir teknolojik gelişme düzeyi vardır ve ısıtıl işlem koşullarının mekanik özellikleri ve mikro yapısı üzerindeki etkisi araştırmacılar tarafından incelenmiştir (Pereira vd., 2020).

Şimdiye kadar, SLM yönteminde kullanılabilen alüminyum esaslı birkaç sünek malzeme araştırılmıştır. Gravite döküm için en yaygın alaşımlardan biri olan ISO-AlSi7Mg0,3 (ASTM-A356.0) alüminyum alaşımı iyi süneklığe, dayanıklılığa ve korozyon direncine sahiptir. Bu özellikleri nedeniyle otomotiv, havacılık ve makine endüstrilerinde yüksek güvenilirlik gerektiren birçok türde mekanik parçanın (Motor parçaları, hidrolik bileşenler, braketler, muhafaza kapakları) imalatı için AlSi7Mg0,3 tercih edilmektedir. SLM yöntemi ile AlSi7Mg0,3 alaşımından imal edilen mamuller iyi dengelenmiş mukavemet, süneklilik ve mükemmel mekanik özellikler sergiler (Kimura ve Nakamoto, 2016).

**Al 6XXX**

Geleneksel yüksek mukavemetli alüminyum alaşımları, havacılık, otomotiv, biyomedikal ve askeri uygulamalar için hafif kritik parçalar imal etmek için yaygın olarak kullanılır. Havacılık uygulamalarında en yaygın kullanılan geleneksel Al alaşımı, 6000 serisini temsil eden ve bir Al-Mg-Si çökmesi ile sertleştirilmiş alaşımı olan alüminyum 6061'dir (Çizelge 6). Son zamanlarda, Al6061 gibi yüksek performanslı Al alaşımlarının, lazer esaslı eklemeli imalatına yönelik kamu kurumlarının ve özel sektörün ilgisi, Eİ sayesinde yüksek mukavemetli (Çizelge 7), hafif yapıların elde edilebilme potansiyeli nedeniyle önemli ölçüde arttı. Bununla birlikte, bilindiği üzere alüminyumun lazer esaslı eklemeli imalatı, ötektige yakın Si içeriği nedeniyle ergiyik akışkanlığını artıran, büzülmeyi azaltan ve böylece lazerle işlenebilirliğini iyileştiren AlSi10Mg gibi kaynaklanabilir, dökülebilir sınıfları ile sınırlıdır. Buna karşılık, birçok yüksek performanslı alüminyum alaşımının, düşük Si içeriğinin neden olduğu daha geniş bir katılma aralığı, azaltılmış ergiyik akışkanlığı ve daha yüksek termal genişleme katsayısı sonucunda lazer toz yatağı füzyonu (LPBF) ile işlenmesi zordur. Bütün bu koşullar, lazer esaslı eklemeli imalat parçalarında gözenekliliğe, katılma çatlamasına, anizotropiye ve düşük mekanik özelliklere neden olabilir. Si ilavesi ile alaşımlamanın, katılma çatlağını azaltmaya yardımcı olabildiği alüminyum 7075'te görülmüştür. Ancak bugüne kadar Si ilavesinin LPBF Al6061 mikro yapıları ve mekanik özellikleri üzerindeki etkileri hakkında yayınlanmış bir makale bulunmamaktadır (Bradford vd., 2021). Çizelge 6 ve 7'de AA6061 alaşımına ait kimyasal bileşim ve mekanik testler verilmiştir (Reddy vd., 2006).

**Çizelge 6.** AA6061 alaşımının kimyasal bileşimleri

Element	Si	Mg	Cu	Zn	Fe	Mn	Cr	Al
Ağırlık bileşimi (%)	0.66	0.99	0.31	0.01	0.25	0.08	0.16	Kalan

**Çizelge 7.** AA6061- T6 alaşımının mekanik özellikleri

	%0.2 Akma Dayanımı (MPa)	Nihai Çekme Dayanımı (MPa)	Uzama (%)
AA6061 – T6	275	310	12

**Al 7XXX**

Alüminyum alaşımları yüksek özgül dayanımlarından dolayı otomotiv ve havacılık sanayinde en yaygın kullanılan yapı malzemeleridir. Bununla birlikte, AlSi10Mg, AlSi7Mg ve Al-Mg-Sc-Zr gibi LPBF için ticari olarak temin edilebilen yalnızca birkaç alaşım vardır. 450 MPa'lık maksimum çekme dayanımı değeri rapor edilmiş olmasına rağmen eklemeli olarak imal edilmiş AlSi10Mg'nin performansı, nispeten düşük içsel mekanik özellikleri nedeniyle sınırlıdır. Çökmeyle sertleşebilen Al-Cu ve Al-Zn-Cu-Mg alaşımları üstün mekanik özellikler gösterir; örneğin, ASTM standardı B209-14'e göre işlenmiş T6-AA7075 için çekme dayanımı ve uzama değeri sırasıyla 530 MPa ve %9'u aşar.

Bununla birlikte, potansiyellerine rağmen AA7075, düşük kaynak edilebilirliği ve katılma çatlamasına karşı yüksek hassasiyeti nedeniyle LPBF için zayıf işlenebilirlik sergiler. Eklemeli imalat ile çatlaksız AA7075 imalatı üzerine yapılan

birçok araştırma, alüminyum alaşımlarına bileşen eklemenin AA7075'teki katılaşma çatlaklarını ortadan kaldırmanın etkili yollarından biri olduğunu göstermiştir (Choe vd., 2023). Çizelge 8'de AA7075 alaşımına ait kimyasal bileşim verilmiştir (Yamada vd., 2014).

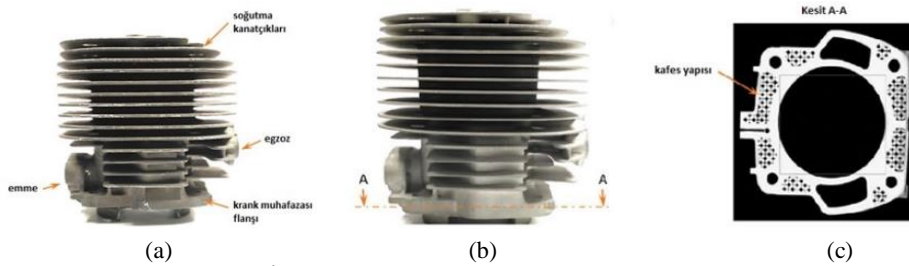
**Çizelge 8.** AA7075 alaşımının kimyasal bileşimleri

Element	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al
Ağırlık bileşimi max (%)	0.4	0.5	2	0.3	2.9	0.28	6.1	0.2	Kalan

### AlSi9Cu3

Son birkaç on yılda, otomotiv endüstrisinde alüminyum alaşımlarının kullanımı, ağırlığı ve dolayısıyla yakıt tüketimini azaltma böylece performansı artırma açısından büyük önem kazanmıştır. Kullanılan alaşımlar arasında Al-Si-Cu sistemine dayalı olanlar motor parçalarında, özellikle silindir kafaları gibi dinamik yüklemeye maruz kalan ince cidarlı parçalarda yaygın olarak kullanılmaları nedeniyle büyük ilgi görmüştür. Silisyumun varlığı, ergime sıcaklığının düşürülmesine ve ergiyik akışkanlığının artırılmasına yardımcı olarak dökümü kolaylaştırmaktadır. Öte yandan, bakır ve muhtemelen Mg gibi diğer alaşım elementleri, katı çözelti ve çökeltme sertleşmesi ile malzemenin mekanik tepkisini geliştirir. Bu sisteme ait alaşımlar arasında, AlSi9Cu3 (Çizelge 9) yaygın olarak kullanılan ve genellikle basınçlı döküm (PDC) veya yüksek basınçlı döküm (HPDC) ile işlenen bir alaşımdır. Bununla birlikte, bu imalat işlemlerinin, imal edilen parçaların olası uygulamalarını sınırlayan gözenekler, oksit tabakaları ve kabarcıklanmadan oluşan bir dizi kusuru muhtemelen tetiklediği bilinmektedir. Eklemeli imalat teknolojilerinin geniş ailesinin bir üyesi olan seçici lazer ergitme hem endüstriyel hem de araştırma alanlarında yaygın kullanılmaktadır. Bu bağlamda, AlSi9Cu3 kullanılarak imal edilecek parçalar için SLM'nin kullanılması, dökümden kaynaklanan bazı kusurları önleyebilir ve ek olarak daha fazla tasarım özgürlüğü, imalat esnekliği gibi çeşitli avantajlar sağlayabilir. Yine SLM, ortaya çıkan mamulün mekanik özelliklerini (Çizelge 10) olumlu yönde etkileyen son derece ince taneli yapı elde edilmesini sağlar (Fiocchi vd., 2020).

Şekil 12'de verilen döküm yoluyla imal edilen motorlu testere silindiri SLM yöntemiyle AlSi9Cu3 malzeme ile imal edilmiştir. Orijinal silindirin ağırlığı karter flanşlarının (kanatçıklar) iç kısmındaki kafes yapısı sayesinde 1037 gr'dan 754 gr'a düşürülmüştür (Posser ve Oliveira, 2019). Çizelge 9 ve 10'da AlSi9Cu3 alaşımına ait kimyasal bileşim ve mekanik testler verilmiştir (Vončina vd., 2017).



**Şekil 12.** Döküm motorlu testere silindiri (a), Eİ ile imal edilmiş motorlu testere silindiri karter flanşı (b) ve kesit görünümü (c) (Posser ve Oliveira, 2019)

**Çizelge 9.** AlSi9Cu3 alaşımının kimyasal bileşimleri

Element	Si	Mg	Cu	Zn	Fe	Mn	Cr	Pb	Sn	Ni	Ti	Diğer	Al
Ağırlık bileşimi max (%)	0.73	0.55	0.5	1.2	1.3	0.55	0.15	0.35	0.15	0.55	0.25	0.05	Kalan

**Çizelge 10.** AlSi9Cu3 alaşımının mekanik özellikleri

Çekme Mukavemeti (MPa)	Akma Mukavemeti (MPa)	Uzama (%)	Sertlik HB
240	140	1	80

### AlMgSc (Scalmalloy)

SLM teknolojisi kullanarak titanyum, alüminyum, nikel ve çelik gibi birçok metal ve alaşımlarıyla çok başarılı imalatlar yapılabildiği görülmüştür. Al alaşımlarının SLM yöntemi ile uygulamaları hakkında literatür son on yılda hızla artmaktadır. AlSi10Mg, Al-12Si, A357 ve A356 gibi yakın ötektik Al-Si alaşımları SLM süreçlerinde kullanılır ve aralarında en çok çalışma yapılan AlSi10Mg alaşımıdır. Bu alaşımın başarısı esas olarak ötektik bileşime yakın olan ve imalat sırasında çatlama önleyen Si içeriği ile ilgilidir. Son zamanlarda Airbus, yan kuruluşu APWorks aracılığıyla, SLM yöntemiyle işlenmek üzere özel olarak tasarlanmış ilk alüminyum tozu alaşımını geliştirdi. Malzeme Scalmalloy (Ağırlık cinsinden bileşim: %4 – %4,90 Mg, %0,60 – %0,80 Sc, %0,20 – %0,50 Zr, %0,30 – %0,80 Mn) olarak pazarlanmaktadır ve ana alaşım elementleri Mg ve Sc'dir (Çizelge 11). Mekanik özellikler makinelere ve imalat koşullarına göre değişiklik gösterse de imalatçı tavsiyesine göre 325 °C'de 4 saat ısıtılmış Scalmalloy, literatürde bildirilen alüminyum alaşımları arasında en yüksek akma dayanımı (AD), maksimum çekme dayanımı (MÇD) ve uzama gösterir (Cabrera vd., 2022). Çizelge 11'de Scalmalloy alaşımına ait kimyasal bileşim verilmiştir (Awd vd., 2017).

Çizelge 11. Scalmalloy alaşımlarının kimyasal bileşimleri

Element	Si	Mg	Cu	Zn	Fe	Mn	Zr	Sc	O	Ti	V	Al
Ağırlık bileşimi max (%)	0.4	4.9	0.1	0.25	0.4	0.8	0.5	0.8	0.05	0.15	0.05	Kalan

### Al 2139

Al2139, bir Al<sub>2</sub>Cu çökeltisi ile güçlendirilmiş alüminyum alaşımıdır (Çizelge 12). Mg ve Ag ilaveli Al-Cu alaşımlarındaki çökeltiye  $\Omega$  fazı denir ve  $\alpha$  yerleşik düzlemlerine paralel yüksek en-boy oranlı diskler oluşturur.  $\Omega$  fazı, diğer Al-Cu alaşımlarında {100} $\alpha$  düzlemlerine paralel oluşan  $\theta$  (Al<sub>2</sub>Cu) denge fazının farklı bir şeklidir.  $\Omega$  fazının  $\theta$  fazına göre daha güçlü bir kuvvetlendirici olduğu bilinmektedir. Mg ve Ag'nin {111} $\alpha$  düzlemlerinde kümelenmesi, arayüzey enerjisini azaltır ve  $\Omega$ 'nın bu düzlemlerde kolayca oluşmasını sağlar.  $\theta$  için çekirdeklenme bariyeri daha yüksektir ve Mg-Ag içermeyen alaşımlar, çökelti çekirdeklenmesine yardımcı olan dislokasyon bölgeleri oluşturmak için mekanik çalışma gerektirir. Bu, alaşım 2139'u Eİ işlemlerinde kullanım için diğer 2xxx serisi Al-Cu alaşımlarına göre ideal hale getirmektedir (Brice vd., 2018). Çizelge 12'de Al2139 alaşımına ait kimyasal bileşim verilmiştir (Brice vd., 2015).

Çizelge 12. Al2139 alaşımlarının kimyasal bileşimleri

Element	Si	Mg	Cu	Fe	Mn	Zr	Ti	Ag	Al
Ağırlık bileşimi (%)	0.008	0.52	4.7	0.062	0.36	<0.002	0.051	0.38	93.8

### AlSi12

AlSi12, yüksek mukavemet-ağırlık oranına ve iyi korozyon direnci sayesinde otomotiv ve havacılık endüstrilerinde kullanım potansiyeline sahiptir. Ayrıca, AlSi12'nin yüksek ısı iletkenlik, yüksek yansıtma özellikleri sergilemesi ve akıcılığının düşük olması nedeniyle geleneksel imalat teknolojileri kullanılarak işlenmesi zordur. AlSi12 alaşımlarının (Çizelge 13) SLM yönteminde kullanılması artan tasarım özgürlüğü sağlarken yüksek mukavemete ve düşük ağırlığa sahip parçaların imal edilmesinde benzersiz avantajlar sunmaktadır. Ancak, mekanik özelliklerden ödün vermeden, kusurları azaltacak şekilde AlSi12 parçaları imal etmek için SLM'nin nasıl etkili bir şekilde kullanılabileceği hakkında daha fazla bilgiye ihtiyaç vardır.

AlSi12 alaşımı, korozyona karşı direnç ve yüksek mukavemet-ağırlık oranı gibi mükemmel özellikleri nedeniyle ulaşım sektöründe SLM için çok şey vaat etmektedir. Bu avantajlar, araç parçalarının ağırlığını, dolayısıyla da toplam araç ağırlığını ve yakıt tüketimini azaltır. AlSi10Mg ve AlSi12, SLM'de yaygın olarak kullanılan iki Al-Si alaşımıdır (Kekana vd., 2022). Çizelge 13'te AlSi12 alaşımına ait kimyasal bileşim verilmiştir (Komarov vd., 2021).

Çizelge 13. AlSi12 alaşımlarının kimyasal bileşimleri

Element	Si	Mg	Cu	Fe	Mn	Zn	Ti	Al
Ağırlık bileşimi (%)	12.1	0.08	0.05-0.15	0.062	0.2 - 0.4	<0.004	<0.01	Kalan

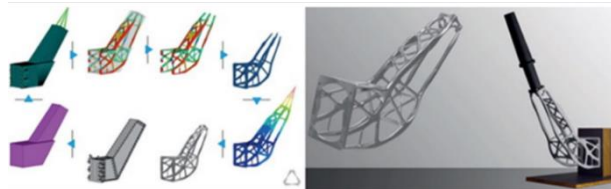
## EKLEMELİ İMALAT İLE İMAL EDİLMİŞ ALÜMİNYUM PARÇALAR

### Havacılık ve Uzay

Eklemeli imalat, havacılık ve uzay sanayiinde azaltılmış teslim süresi ve maliyet, karmaşık geometriler tasarlama, birden fazla bileşen yerine yekpare parçalar ve performansta iyileştirmeler gibi avantajlar sunmaktadır (Blakey vd. 2021).

### Sentinel uydu anten braketi

Sırasıyla 2014 ve 2016'da piyasaya sürülen Sentinel-1A ve Sentinel-1B uydularının braketi, RUAG şirketi ve Altair tarafından geliştirilen, geleneksel tasarımla karşılaştırılmak üzere Eİ teknikleri kullanılarak AlSi10Mg malzemedeki EOS 400 model makinede DMLS yöntemiyle imal edilmiştir. EOS ve Altair ile birlikte çalışan RUAG şirketinin, anten braketine topoloji optimizasyonu uygulaması sonucunda sertlik %30 oranında artmış, ağırlık %40 azalarak 1,6 kg'dan 940 gr'a düşmüştür. Braketin TO öncesi ve imalat sonrası hali Şekil 13'te görülmektedir (EOS, 2018).

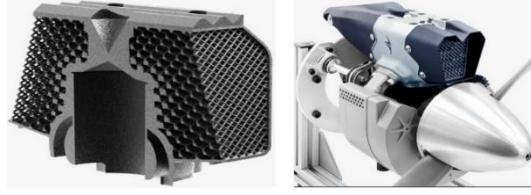


Şekil 13. Sentinel-1A ve Sentinel-1B için bir anten brakentinin süreci (Blakey vd. 2021)

### İHA motoru silindiri

Küçük bir İHA tasarımcısı ve imalatçısı olan Cobra Aero, kütleyi azaltmak ve ısı transfer özelliklerini optimize etmek amacıyla Eİ yöntemlerini kullanarak İHA motorunu iyileştirmeye çalışmıştır (Blakey vd. 2021). Parçaya topoloji optimizasyonu uygulayarak konformal kafes yapılarını (Şekil 14'teki kesit görünüm), minimum destek kullanılacak şekilde tek parça halinde bir motor silindiri geliştirmişlerdir. Mevcutta kullanılan hava soğutma silindiri altı parçadan oluşmakta ve ağırlığı 840 gr'dır. Cobra Aero, motor silindirini Eİ ile imal ederek parça sayısını bire, ağırlığını 420 gr'a düşürmüştür. Şekil

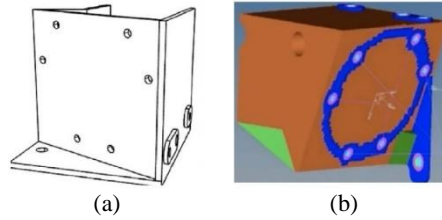
5'te görülen parça, Renishaw AM500 makinesinde DMLS yöntemiyle AlSi10Mg malzemeden ve %50 daha az malzemeyle imal edilmiştir (nTop, 2021).



Şekil 14. Cobra Aero, İHA motorlarının hava soğutmalı silindiri (nTop, 2021)

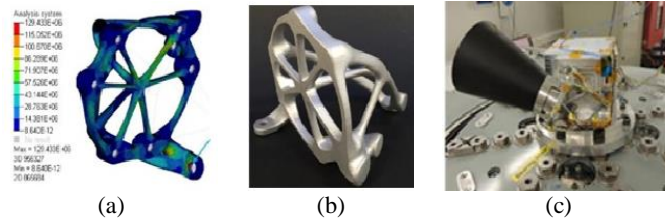
### Yıldız izleyici braket

Surrey Uydu Teknoloji Ltd. Şirketi'nde kullanılan yıldız izleyici kamera braket, havacılık alanında çalışan RUAG şirketi tarafından AlSi10Mg malzemeden DMLS yöntemi kullanılarak imal edilmiştir (Orme vd., 2017). Braket başlangıçta titanyum malzemeden geleneksel yöntemlerle işlenmiştir ve ağırlığı 425 gr'dır. Eklemeli imalat yöntemiyle imal edildiğinde ise topoloji optimizasyonu uygulanarak ağırlık 89 gr'a kadar düşürülmüştür. Şekil 15'te görülen bu çalışmada bağlantı noktaları hariç, tasarım alanlarının dış sınırları optimize edilmiştir (Orme vd., 2018).



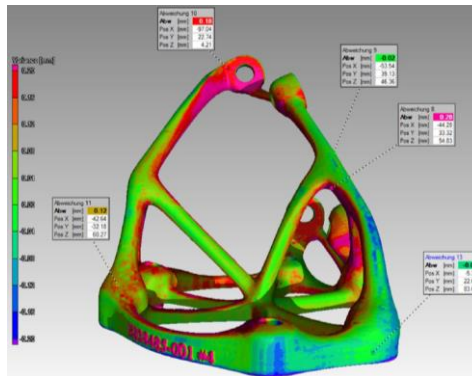
Şekil 15. Mevcut yıldız izleyici kamera braketinin (a) ve topoloji optimizasyonu (b) sonucu (Orme vd., 2017; Orme vd., 2018)

Şekil 16'da görülen yıldız izleyici kamera braketinin optimize edilmiş son tasarımının her bağlantı noktasına Altair Optistruct programı kullanılarak sonlu elemanlar analizi uygulanmıştır. Ok ile gösterilen bağlantı noktası dışında diğer bağlantı noktalarının Von Mises gerilimlerinin güvenlik faktörü ( $<110$  MPa) içinde olduğu bulunmuştur (Şekil 16a). Destek yapıları minimum olacak şekilde EOS M290 eklemeli imalat yapı platformunda konumlandırılarak parça imalatı gerçekleştirilmiştir (Orme vd., 2017; Orme vd., 2018).



Şekil 16. Yıldız izleyici kamera braketinin nihai parça FEM analizi sonucu (a) ve montaj görünümü (b, c) (Orme vd., 2017)

Ayrıca eklemeli olarak imal edilen mamulün bilgisayarlı tomografi (BT) tarama verileri ile mamulün CAD verileri programda üst üste bindirilerek aralarındaki en büyük sapma incelenmiştir. Şekil 17'de eklemeli olarak imal edilen mamulün tasarım toleransının (max 0,28 mm) gereken değerde olduğu gözlemlenmiştir. Yıldız izleyici kamera braketinin kurulan test düzeneğine montajı yapılmış ve testi başarılı şekilde tamamlamıştır (Orme vd., 2017).



Şekil 17. BT tarama verilerinden elde edilen fabrikasyon parça geometrisi ile nominal CAD geometrisinin üst üste bindirilmesi (Orme vd., 2017)

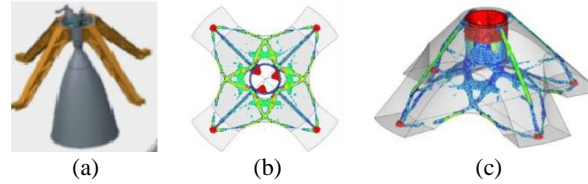
Yıldız izleyici kamera braketini imalat platformunda yatay ve dikey olarak inşa edilmiştir. Her iki numuneye çekme testi uygulanmış olup sonuçlar Çizelge 14’te verilmiştir (Orme vd., 2017).

**Çizelge 14.** Yıldız izleyici kamera braketinin çekme testleri

Yapı Oryantasyonu	Kopma Dayanımı (MPa)	Akma Dayanımı (MPa)	Uzama (%)
Yatay	392.98	244.93	6.6
Dikey	394.29	208.54	5.5

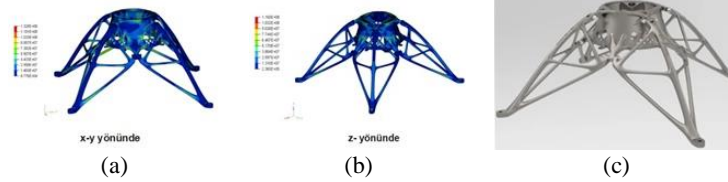
#### Dört ayaklı motor yatağı

Spacell firmasının ay aracı için itici bir yatak görevi gören prototip parçanın topolojik optimizasyon çalışması için tasarım alanı (gri gölgeli bölge) ve mukavemet, sertlik gereksinimlerini karşılayan ön optimizasyon sonucu, her bacağın nasıl oluştuğunu gösteren üst görünüm ve bacakların merkez göbeğine nasıl bağlandığını gösteren izometrik görüntüsü Şekil 18’de verilmiştir (Orme vd., 2018).



**Şekil 18.** Lunar lander motor yatağının ilk hali (a), yeni tasarımın üst (b) ve izometrik görünümü (c) (Altair, 2017; Orme vd., 2018)

Şekil 19’da görülen parçaya ESAFATIG V5.5.1 yazılımı ile yorulma analizi yapılmıştır. Yorulma hesaplamaları doğrusal hasar birikimi (Palmgren-Miner) kuralına dayanmaktadır. Bu parçada yorulma dayanımının parça ömrünün dört katı olması hedeflenmiştir. Yapı, X-Y ve Z yönünde yarı statik ve rastgele titreşim yüklerine maruz bırakılarak sonlu elemanlar analizi uygulanmıştır. Analiz sonucu yorulma dayanımının, parça ömrünün 10,4 katı olduğu bulunmuştur. Destek yapıları minimum ve kendi kendini destekleyen bileşenler olacak şekilde EOS M290 eklemeli imalat yapı platformunda konumlandırılarak parça imalatı gerçekleştirilmiştir. Braket başlangıçta AlSi10Mg malzemeden geleneksel yöntemlerle imal edildiğinde, ağırlığı 4 kg’dır. Aynı braket havacılık alanında çalışan RUAG şirketi tarafından yine AlSi10Mg malzemeden Eİ yöntemi ve topoloji optimizasyonu uygulanarak imal edildiğinde ise ağırlığı 2,95 kg’a kadar düşürülmüştür (Orme vd., 2017).



**Şekil 19.** Topoloji optimizasyonu sonrası braketin FEM analizleri (a, b) ve tasarımı (c) (Orme vd., 2017)

Lunar lander motor yatağı imalat platformunda yatay ve dikey olarak inşa edilmiştir. Her iki numuneye çekme testi uygulanmış olup sonuçlar Çizelge 15’te verilmiştir (Orme vd., 2018).

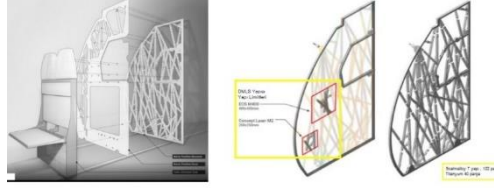
**Çizelge 15.** Lunar lander motor yatağının çekme testleri

Yapı Oryantasyonu	Kopma Dayanımı (MPa)	Akma Dayanımı (MPa)	Uzama (%)
Yatay	396.2	259.6	8.1
Dikey	434.1	244.9	5.8

#### Biyonik bölme duvarı (panel)

Autodesk Studio kuruluşu olan The Living, Airbus ve APWorks ile iş birliği içinde bir panelin yapısal verimliliğini en üst düzeye çıkarmak, uçağın ağırlığını azaltmak ve yakıt tasarrufu sağlamak için 3B baskıdan yararlanarak Biyonik Bölme Duvarı projesini geliştirmiştir (Jaimes, D. D., 2016). Biyonik bölme, oturma alanını mutfaktan ayıran duvardır ve projenin amacı bölme duvarın ağırlığını %50 oranında azaltmaktır. Bu sayede, havacılık endüstrisi için yakıt tüketimini, uçuş maliyetini ve karbon emisyonlarını azaltmak amaçlanmıştır. Bölme duvar nispeten basit bir bileşen gibi görünse de aslında iki karmaşık yapısal zorluğu bulunmaktadır. Birincisi, bölme duvar katlanan bir kabin görevlisi koltuğunu (CAS) desteklemelidir. CAS, bölme duvar gibi uçağın gövdesine veya zemine bağlı değildir. Bu nedenle iki uçuş görevlisinin ve koltuğun tüm ağırlığı bölme duvar yoluyla uçağın yapısına aktarılmalıdır. İkincisi, uçaklardaki yeni güvenlik düzenlemeleri nedeniyle bölme duvar hasta veya yaralı bir yolcu taşıma işleminde kullanılan sedyenin, oturma alanından mutfığa ve çıkışa taşınmasında kullanılabilmesi için çıkarılabilen sedye kanadı adı verilen bir panel içermelidir (Nagy vd., 2017).

Şekil 20’de görülen biyonik bölme duvarı, EOS M400 ve Concept Laser M2 model 3B yazıcı teknolojilerinde DMLS yöntemi ile AlMgSc (Scalmalloy) ve Titanium (Ti) malzemeden imal edilmiştir (Theliving).

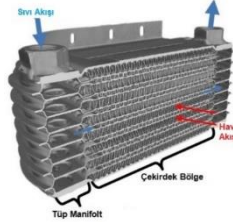


Şekil 20. Eklemeli imalat ile elde edilen uçakta oturma alanı ile mutfak arasındaki biyonomik bölme duvarı (Jaimes, D. D., 2016; Theliving)

### Uçak ısı eşanjörü (soğutucu)

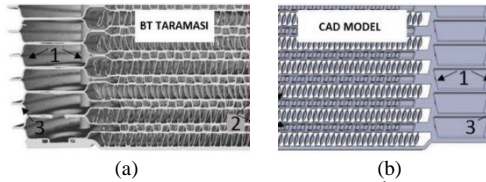
Saltzman ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada, Airflow Systems Inc şirketinin performans yarış uçaklarında motor yağı soğutması için kullanılan geleneksel döküm yöntemi ile imal edilmiş plaka kanatlı hava-sıvı çapraz akışlı ısı eşanjörü, eklemeli imalat yöntemi ile imal edilmiş ısı eşanjörüyle karşılaştırılmıştır (Saltzman vd., 2018).

Şekil 21’de geleneksel döküm yöntemi ile imal edilen ısı eşanjörünün kesit detayları verilmiştir.



Şekil 21. Geleneksel döküm yöntemi ile imal edilmiş sıvı ve hava akış yollarının gösterildiği yağ soğutucunun kesit görünümü (Saltzman vd., 2018)

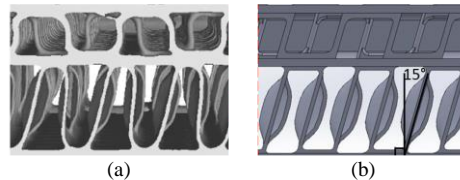
Geleneksel döküm yöntemi ile imal edilen ısı eşanjörü, Eİ yöntemi ile imal edilebilmesi için üç boyutlu bir X-ışını bilgisayarlı tomografi (BT) tekniği ile taranarak temel CAD modeli oluşturulmuştur. Hava girişi tarafında kanatçık yoğunluğu, kanatçık kalınlığı, panjur şekli, akış alanı ve sıvı girişi tarafında ise türbülatorlerin sayısı, şekli, kalınlığı ile boru yüksekliği ve duvar kalınlığı BT taramasına göre CAD modeline tam olarak kopyalanmıştır. Şekil 22’de verilen ısı eşanjörünün iç ve dış geometrisi Eİ yöntemlerinin sınır şartlarına uyum sağlamak için değiştirilmiştir. Sıvı manifoldu bölgesinin yanlarındaki kavisli duvarlarda desteklenmeyen yüzeyleri önlemek için düzeltilerek açılı hale getirilmiştir (Saltzman vd., 2018).



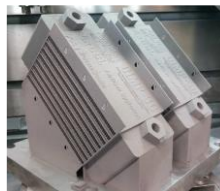
Şekil 22. Manifold duvarlarındaki değişiklikleri gösteren temel yağ soğutucusu (a) ile Eİ yapısı için kullanılan CAD modelinin (b) karşılaştırması (Saltzman vd., 2018)

Isı eşanjörü Eİ platformunda inşa edilirken desteğe ihtiyaç duymaması için hava ve sıvı tarafındaki kanallara Şekil 23’teki gibi 15°’lik sabit bir açı verilmiştir.

Şekil 24’te görülen eşanjör, bir EOS M280 kullanılarak DMLS yöntemiyle ve AlSi10Mg malzemeden imal edilmiştir. Isı eşanjörü imalat platformundan ayrılmadan önce, EOS tarafından tavsiye edildiği gibi argon ortamında 2 saat boyunca 300 °C’de termal gerilimleri azaltmak için ısıl işleme tabi tutulmuştur. Eklemeli imalat yöntemi ile imal edilen ısı eşanjörü geleneksel döküm yöntemi ile imal edilen ısı eşanjörüne kıyasla yaklaşık %34 daha ağırdır. Isı transferi konusunda yaklaşık %10 artış sağlanırken, hava akışı tarafında basınç düşüşü 2 katına çıkmıştır (Saltzman vd., 2018).

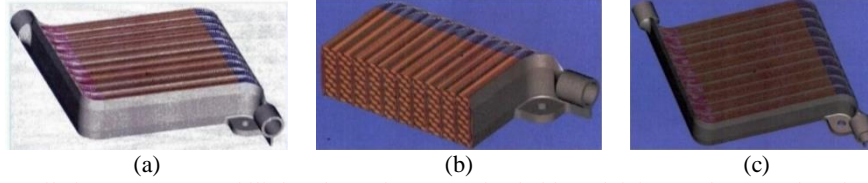


Şekil 23. Temel yağ soğutucusu (a) ile Eİ ısı eşanjörü oluşturmak için kullanılan CAD modeli (b) arasındaki sıvı tarafı türbülatorlerinin ve hava tarafı panjurlu kanatçıkların yakından görünümü (Saltzman vd., 2018)



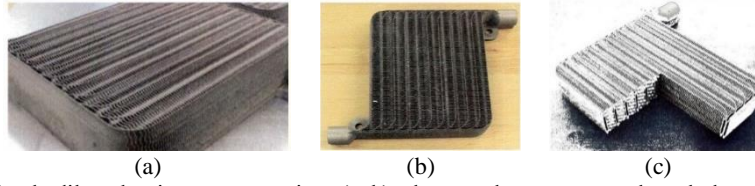
Şekil 24. Eİ yöntemi ile imal edilen ısı eşanjörü (Saltzman vd., 2018)

Bir başka çalışmada, Plunkett Associates şirketi ısı transferini iyileştirmek için eklemeli imalat tekniklerini kullanarak Şekil 25'te verilen çapraz akışlı bir sıvı-gaz ısı eşanjörü tasarımını yapmıştır. Isı eşanjörünün sıvı kanalları giriş ve çıkışı birbirine bağlayan 11 yoldan oluşmaktadır. Tasarımda ısı transferini iyileştirmek için kanatların uzunluğu ve derinliği boyunca dalgalı bir model (balıksırtı stiline benzeyen sinüzoidal şekil) oluşturulmuştur (Gobetz vd., 2016).



Şekil 25. Isı eşanjörünün nihai tasarımı (a), Dahili destek yapılarını ortadan kaldırmak için uzatılmış sıvı kanalını gösteren tasarım detayı (b), Arttırılmış yüzey alanı için dalgalı kanat yüzeyini gösteren tasarım detayı (c) (Gobetz vd., 2016)

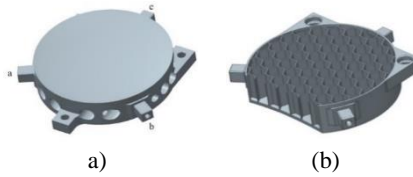
Şekil 26'da görülen ısı eşanjörü yekpare olarak AISi10Mg0,5 malzemeden EOS MINT 280M lazer tabanlı toz yatağı füzyon sistemi kullanılarak yapılmıştır.



Şekil 26. El yöntemi ile imal edilen alüminyum ısı eşanjörü (a, b), ek ayrıntılarını gösteren köşe bölümü çıkarılmış alüminyum ısı eşanjörü (c) (Gobetz vd., 2016)

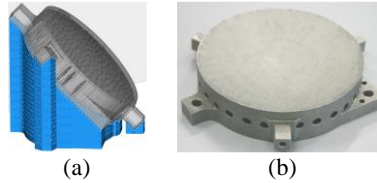
### Metal ayna

Metal aynalar, teleskoplar ve spektrometreler gibi uzay kaynaklı optik sistemler için kullanılmaktadır. Eklemeli imalat tekniklerinden yararlanılarak mamulün mekanik dengesi korunurken, ağırlığını azaltmak için topoloji optimizasyonu ile daha hafif yapılar elde edilmektedir. Şekil 27'de yeni bir tasarım olan petek aynanın iç kısmı, tüm yüzeyi kaplayacak şekilde her biri 4 mm çapında olan altıgen bir yapıdan oluşmaktadır (Hilpert vd., 2018; Hilpert vd., 2019).



Şekil 27. Aynanın CAD modeli (a) ve iç yapısı (b) (Hilpert vd., 2018)

Şekil 28'de yönlendirme ve eklenen destek yapısı "Materialise Magics" yazılımı kullanılarak gösterilmektedir. Yapı platformu, iç gerilimleri en aza indirmek için SLM işlemi sırasında 200°C'ye ısıtılmıştır. Metal ayna AISi40 ve AISi12 malzemeden Concept Laser M2 Cusing SLM kullanılarak imal edilmiştir (Hilpert vd., 2018; Hilpert vd., 2019).



Şekil 28. Destek yapısına sahip ayna modeli (a) ve ikincil işlem görmüş nihai metal ayna (b) (Hilpert vd., 2018; Hilpert vd., 2019)

### Otomotiv Sektörü

Otomotiv şirketleri eklemeli imalat teknolojileri kullanarak karmaşık geometrili mamulleri imal ederken; maliyetlerini, imalat sürelerini ve ağırlıklarını azaltabilmektedir. Eklemeli imalat uygulamalarının otomotiv endüstrisinde yaşadığı büyüme göz önünde bulundurulduğunda, 2028 yılına kadar finansal açıdan 12,4 milyar dolara ulaşması beklenmektedir (Carlota, 2022).

### Termostat kapağı

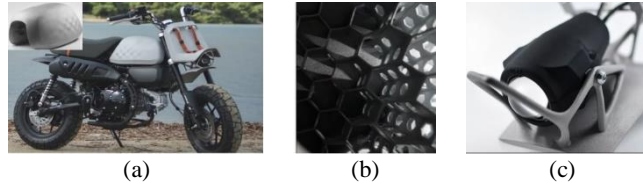
Mercedes-Benz Trucks, bir termostat kapağının ilk 3B baskılı yedek parçasını, eski model serilerinden kamyon ve Unimog modelleri için imal etmiştir. Mercedes, El yöntemiyle imal ettiği alüminyum parçaların çok yüksek mukavemet ve termal dirence sahip olduğunu, geleneksel döküm alüminyum parçalara kıyasla yoğunluğunun neredeyse eşit olduğunu belirtmiştir. Şekil 29'da görülen 3B baskılı termostat kapakları SLM yöntemi kullanılarak AISi10Mg malzemeden imal edilmiştir (Green Car Congress, 2017).



Şekil 29. 3B baskılı termostat kapakları (Green Car Congress, 2017)

### 3B baskılı yakıt deposu ve diğer aksesuarlar

VIBA, Honda Monkey'den esinlenen Jane mini bisikletini, yenilikçi iç petek tasarımına sahip bir yakıt deposu da dahil olmak üzere çok sayıda parçayı 3B baskı ve alüminyum malzeme kullanarak imal etmiştir. Tankın iç kısmındaki petek yapısı; frenleme, hızlanma ve dönüş sırasında yakıtın çalkalanmasını azaltmak için tasarlanmıştır. Çamur koruması ve far destek rafı, tek parça halinde tasarlanmıştır. Şekil 30'da görülen yakıt deposu ve diğer parçalar, SLM 280 makinesinde AlSi10Mg malzeme ile imal edilmiştir (Sleger, 2019).



Şekil 30. 3B baskılı yakıt deposu (a), iç hazne (b), çamur koruması ve far destek rafı (c) (Sleger, 2019)

## SONUÇ

Bu çalışmada, otomotiv, havacılık ve uzay endüstrilerinde ihtiyaç duyulan ve eklemeli imalat teknolojilerinden SLM, DMLS yöntemleri ile alüminyum ve alüminyum alaşımları kullanılarak imal edilen parçalara yer verilmiştir. Sonuç olarak;

- Otomotiv, havacılık ve uzay sektörlerinde oldukça yaygın kullanılan eklemeli imalat yöntemleri, gelecekte birçok parçanın imalatının günümüze kıyasla daha kolay yapılmasını mümkün kılacaktır.
- Sıcak izostatik presleme yönteminin, mamullerin imalat aşamasında oluşan iç gözenekleri büyük ölçüde giderdiği görülmektedir.
- Topoloji optimizasyonu sayesinde, parçalarda yüke maruz kalan bölgelerin mukavemet değerleri korunurken, toplam ağırlığı azaltmak mümkündür. Böylece seri imalat maliyetlerinde düşüş ve toplam ağırlığın azalması ile motorlu araçlarda yakıt tasarrufu sağlanmaktadır.
- Birden fazla bileşenli ve karmaşık geometriye sahip mamuller eklemeli imalat sayesinde, montaj ve kaynak gibi işlemlere gerek duymadan yekpare olarak imal edilebilir.
- Alüminyum alaşımlarının yapısındaki silisyum içeriğinin, ergiyik havuzunun akışkanlığını arttırdığı dolayısıyla katılma sırasında çatlak oluşumunu engellediği görülmektedir.
- Alüminyum alaşımlarının yapısındaki magnezyum içeriğinin, mamulün mekanik dayanımını arttırdığı görülmektedir.
- Eklemeli imalat yöntemiyle alüminyum ve alüminyum alaşımlarından imal edilen parçaların geleneksel imalat yoluyla imal edilenlere kıyasla genelde mukavemet değerlerinde artış olduğu gözlemlenmiştir.

Alüminyum alaşımları; ucuzluk, hafiflik, yüksek termal iletkenlik, yüksek kaynak edilebilirlik, yüksek mukavemet/ağırlık oranı gibi temel avantajları sayesinde diğer metallere göre daha geniş uygulama alanı bulmaktadır.

### Çıkar Çatışması

Makale yazarları aralarında herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan ederler.

### Yazar Katkısı

Yazarlar makaleye eşit oranda katkı sağlamış olduklarını beyan ederler.

## KAYNAKLAR

- Aktürk, M. (2021). *Eklemeli İmalat Yöntemi ile Üretilmiş Alsi10Mg Malzemesinin Malzeme Yapısal Parametrelerinin Belirlenmesi ve Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Doğrulanması* (Yüksek Lisans Tezi). Erişim adresi <http://acikerisim.karabuk.edu.tr:8080/xmlui/bitstream/handle/123456789/1123/10381778.pdf?sequence=1>
- Aktürk, M. ve Korkmaz, M. E. (2021). Eklemeli İmalat Yöntemi ile Üretilmiş Alüminyum Alaşımlarının Malzeme Yapısal Parametrelerinin Belirlenmesi Üzerine Bir Derleme. *İmalat Teknolojileri ve Uygulamaları*, 2 (1), 49-60.
- Altair. (2017). *Special Report: Generative Design and Topology Optimization by Altair*. Erişim adresi [https://cdn2.hubspot.net/hubfs/47251/Altair\\_Generative\\_Design\\_Report.pdf](https://cdn2.hubspot.net/hubfs/47251/Altair_Generative_Design_Report.pdf)
- Awd, M., Tenkamp, J., Hirtler, M., Siddique, S., Bambach, M., & Walther, F. (2017). Comparison of microstructure and mechanical properties of Scalmetalloy® produced by selective laser melting and laser metal deposition. *Materials*, 11(1), 17.



- Blakey-Milner, B., Gradl, P., Snedden, G., Brooks, M., Pitot, J., Lopez, E., ... & Du Plessis, A. (2021). Metal additive manufacturing in aerospace: A review. *Materials & Design*, 209, 110008.
- Bradford, R. L., Cao, L., Klosterman, D., Herman, F., Forman, L., & Browning, C. (2021). A metal-metal powder formulation approach for laser additive manufacturing of difficult-to-print high-strength aluminum alloys. *Materials Letters*, 300, 130113.
- Bikas, H., Stavropoulos, P., & Chryssolouris, G. (2016). Additive manufacturing methods and modelling approaches: a critical review. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 83, 389-405.
- Brice, C., Shenoy, R., Kral, M., & Buchannan, K. (2015). Precipitation behavior of aluminum alloy 2139 fabricated using additive manufacturing. *Materials Science and Engineering: A*, 648, 9-14.
- Brice, C. A., Tayon, W. A., Newman, J. A., Kral, M. V., Bishop, C., & Sokolova, A. (2018). Effect of compositional changes on microstructure in additively manufactured aluminum alloy 2139. *Materials Characterization*, 143, 50-58.
- Carlota, V. (2022, May 10). What Are the Most Innovative 3D Printing Applications in the Automotive Sector. Erişim adresi <https://www.3dnatives.com/en/3d-printing-applications-in-automotive-ranking-081020204/#!>
- Casati, R., Coduri, M., Checchia, S., & Vedani, M. (2021). Insight into the effect of different thermal treatment routes on the microstructure of AlSi7Mg produced by laser powder bed fusion. *Materials Characterization*, 172, 110881.
- Choe, J., Kim, K. T., Yu, J. H., Park, J. M., Yang, D. Y., ho Jung, S., ... & Kim, H. S. (2023). A novel route for predicting the cracking of inoculant-added AA7075 processed via laser powder bed fusion. *Additive Manufacturing*, 62, 103370.
- Cabrera-Correa, L., González-Rovira, L., de Dios López-Castro, J., & Botana, F. J. (2022). Pitting and intergranular corrosion of Scalmetalloy® aluminium alloy additively manufactured by Selective Laser Melting (SLM). *Corrosion Science*, 201, 110273.
- EOS. (2018). Success Story Aerospace. Certified for Universal Success: Additive Manufacturing of Satellite Components. Erişim adresi [https://www.eos.info/01\\_partsapplications/case\\_studies\\_applications\\_parts/\\_case\\_studies\\_pdf/en\\_cases/cs\\_m\\_aerospace\\_ruag\\_en.pdf](https://www.eos.info/01_partsapplications/case_studies_applications_parts/_case_studies_pdf/en_cases/cs_m_aerospace_ruag_en.pdf)
- Fiocchi, J., Biffi, C. A., & Tuissi, A. (2020). Selective laser melting of high-strength primary AlSi9Cu3 alloy: Processability, microstructure, and mechanical properties. *Materials & Design*, 191, 108581.
- Ford, S., & Despeisse, M. (2016). Additive manufacturing and sustainability: an exploratory study of the advantages and challenges. *Journal of cleaner Production*, 137, 1573-1587.
- Gite, R. E., & Wakchaure, V. D. (2023). A review on process parameters, microstructure and mechanical properties of additively manufactured AlSi10Mg alloy. *Materials Today: Proceedings*, 72, 966-986.
- Gobetz, Z., Rowen, A., Heilferty, S., Dickman, C., & Martukanitz, R. (2016). Utilization of Additive Manufacturing for Aerospace Heat Exchangers. Office of Naval Research: Arlington, VA, USA, 55.
- Green Car Congress, (2017). Mercedes-Benz Trucks introduces its first 3D-printed spare part made of metal. Erişim adresi <https://www.greencarcongress.com/2017/08/20170802-mbt.html>
- Jaimes, D. D. (2016, January 20). The Living's 3D Printed Airplane Partition is Designed to Mimic Bone Structure. [Archdaily] <https://www.archdaily.com/780661/the-livings-parametric-3d-printed-airplane-partition-is-designed-to-mimic-bone-structure>
- Hilpert, E., Hartung, J., Risse, S., Eberhardt, R., & Tünnermann, A. (2018). Precision manufacturing of a lightweight mirror body made by selective laser melting. *Precision Engineering*, 53, 310-317.
- Hilpert, E., Hartung, J., von Lukowicz, H., Herffurth, T., & Heidler, N. (2019). Design, additive manufacturing, processing, and characterization of metal mirror made of aluminum silicon alloy for space applications. *Optical Engineering*, 58(9), 092613-092613.
- Hiperbaric, 2022a. *Qué es la tecnología HIP*. Erişim adresi <https://www.hiperbaric.com/es/tecnologia-hip/que-es-la-tecnologia-hip/>
- Hiperbaric, 2022b. *Sectors of HIP Technology*. Erişim adresi <https://www.hiperbaric.com/en/hip-technology/hip-sectors/>
- Hirata, T., Kimura, T., & Nakamoto, T. (2020). Effects of hot isostatic pressing and internal porosity on the performance of selective laser melted AlSi10Mg alloys. *Materials Science and Engineering: A*, 772, 138713.
- Kekana, N., Shongwe, M. B., Mpfu, K., & Muvunzi, R. (2022). A review on factors influencing mechanical properties of AlSi12 alloy processed by selective laser melting. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 121(7-8), 4313-4323.
- Kimura, T., & Nakamoto, T. (2016). Microstructures and mechanical properties of A356 (AlSi7Mg0.3) aluminum alloy fabricated by selective laser melting. *Materials & design*, 89, 1294-1301.
- Komarov, A. I., Kyzioł, L., Orda, D. V., Iskandarova, D. O., Sosnovskiy, I. A., Kurilyonok, A. A., & Žuk, D. (2021). Creation of AlSi12 alloy coating by centrifugal induction surfacing with the addition of low-melting metals. *Materials*, 14(13), 3555.
- Lipiński, T., & Szabracki, P. (2013). Modification of the hypo-eutectic Al-Si alloys with an exothermic modifier. *Archives of metallurgy and materials*, 58(2), 453-458.
- Mercado Rivera, F. J., & Rojas Arciniegas, A. J. (2020). Additive manufacturing methods: techniques, materials, and closed-loop control applications. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 109, 17-31.
- Nagy, D., Zhao, D., & Benjamin, D. (2018). Nature-based hybrid computational geometry system for optimizing component structure. In *Humanizing Digital Reality: Design Modelling Symposium Paris 2017* (pp. 167-176). Springer Singapore.
- Ngo, T. D., Kashani, A., Imbalzano, G., Nguyen, K. T. Q., & Hui, D. (2018). Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges. *Composites Part B: Engineering*, 143, 172-196. LA 70148, USA
- nTop. *Cobra Aero Reimagines the Combustion Engine Cylinder using Multiphysics Simulation & Field Driven Design*. Erişim adresi <https://ntop.com/case-studies/cobra-aero-multiphysics-simulation-drone-engine/>
- Orme, M. E., Gschweilt, M., Ferrari, M., Vernon, R., Madera, I. J., Yancey, R., & Mouriaux, F. (2017). Additive manufacturing of lightweight, optimized, metallic components suitable for space flight. *Journal of Spacecraft and Rockets*, 54(5), 1050-1059.

- Orme, M., Madera, I., Gschweidl, M., & Ferrari, M. (2018). Topology optimization for additive manufacturing as an enabler for light weight flight hardware. *Designs*, 2(4), 51.
- Paolino, D. S., Tridello, A., Fiocchi, J., Biffi, C. A., Chiandussi, G., Rossetto, M., & Tuissi, A. (2019). VHCF response up to 109 cycles of SLM AlSi10Mg specimens built in a vertical direction. *Applied Sciences*, 9(15), 2954.
- Peng, X., Kong, L., Fuh, J. Y. H., & Wang, H. (2021). A review of post-processing technologies in additive manufacturing. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 5(2), 38.
- Pereira, J. C., Gil, E., Solaberrieta, L., San Sebastián, M., Bilbao, Y., & Rodríguez, P. P. (2020). Comparison of AlSi7Mg0.6 alloy obtained by selective laser melting and investment casting processes: Microstructure and mechanical properties in as-built/as-cast and heat-treated conditions. *Materials Science and Engineering: A*, 778, 139124.
- Posser, T., & Freitas de Oliveira, B. (2020). Design for additive manufacturing applied for mass reduction of a two-stroke engine cylinder for portable machine. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*, 14, 709-717.
- Prakash, K. S., Nancharaih, T., & Rao, V. S. (2018). Additive manufacturing techniques in manufacturing-an overview. *Materials Today: Proceedings*, 5(2), 3873-3882.
- Reddy, G. M., Mastanaiah, P., Murthy, C. V. S., Mohandas, T., & Viswanathan, N. (2006, December). Microstructure, residual stress distribution and mechanical properties of friction-stir AA 6061 aluminium alloy weldments. In *Indian Society for Non-Destructive Testing, Hyderabad Chapter, Proc. National Seminar on Non-Destructive Evaluation*.
- Saltzman, D., Bichnevicius, M., Lynch, S., Simpson, T. W., Reutzel, E. W., Dickman, C., & Martukanitz, R. (2018). Design and evaluation of an additively manufactured aircraft heat exchanger. *Applied Thermal Engineering*, 138, 254-263.
- SUNAY, N., Mert, K. A. Y. A., & KAYNAK, Y. (2020). Chemical post-processing methods for enhancing surface properties of parts fabricated by additive manufacturing: a review. *Sigma Journal of Engineering and Natural Sciences*, 38(4), 2027-2042.
- Sürmen, H. K. (2019). Eklemeli İmalat (3b Baskı): Teknolojiler ve Uygulamalar. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 24(2), 373-392.
- Sleger, G. (2019). *Minibike features ground-breaking 3D-printed fuel tank*. Erişim adresi <https://www.thefabricator.com/additivereport/article/additive/minibike-features-ground-breaking-3d-printed-fuel-tank>
- TheLiving. *Bionic Partition*. Erişim adresi <http://www.thelivingnewyork.com/>
- Van Cauwenbergh, P., Beckers, A., Thijs, L., Van Hooreweder, B., & Vanmeensel, K. (2018, October). Heat treatment optimization via thermo-physical characterization of AlSi7Mg and AlSi10Mg manufactured by laser powder bed fusion (LPBF). In *Euro PM2018 Congress Proceedings*. European Powder Metallurgy Association (EPMA).
- Vončina, M., Močnik, N., Nagode, A., Stoić, A., & Bizjak, M. (2017). Dependence of mechanical properties on Cu content in AlSi9Cu3 (Fe) alloy. *Tehnički vjesnik*, 24(Supplement 1), 229-231.
- Yamada, R., Ishizawa, S., Itoh, G., Kurumada, A., & Nakai, M. (2014). Effects of environment on fatigue crack growth behavior of 2000 and 7000 series aluminum alloys. In *Recent Advances in Structural Integrity Analysis: Proceedings of International Congress (APCF/SIF-2014) APCFS/SIF* (pp. 123-126).