

GAZİ

JOURNAL OF ENGINEERING SCIENCES

## Design for Additive Manufacturing: Easy Assembly

Oguz Can Doğan<sup>a,b</sup>, Hüseyin Rıza Börklü<sup>c</sup>

Submitted: 17.03.2024 Revised: 23.08.2024 Accepted: 07.09.2024 doi:10.30855/gmbd.0705AR01

### ABSTRACT

**Keywords:** Design for additive manufacturing, design for assembly, easy assembly

<sup>a,\*</sup> Gazi University,  
Graduate School of Natural and Applied  
Sciences,  
Dept. of Industrial Design Engineering  
06560 - Ankara, Türkiye  
Orcid: 0000-0003-3023-090X  
e mail: oguzcandogan@hotmail.com

<sup>b,\*</sup> Genstar Enerji,  
Dept. of Industrial Design Engineering  
06378 - Ankara, Türkiye  
e mail: oguzcandogan@hotmail.com

<sup>c</sup> Gazi University,  
Technology Faculty,  
Dept. of Industrial Design Engineering  
06560 - Ankara, Türkiye  
Orcid: 0000-0003-2107-6664

\*Corresponding author:  
oguzcandogan@hotmail.com

The production of personalized, complex-shaped parts that cannot be manufactured using traditional methods is only possible with Additive Manufacturing (AM) techniques. In recent years, AM methods have been increasingly utilized in various industries, particularly in aerospace and automotive sectors. However, these methods are still in the developmental and maturation stages. Alongside modern manufacturing technologies, the Design for Additive Manufacturing (DfAM) approach can significantly reduce production and assembly times for parts. On the other hand, the Design for Assembly (DfA) approach focuses on reducing costs by simplifying the number of parts and enhancing assembly ease. By combining these methods, both assembly time and costs can be reduced. This study aims to integrate DfA and DfAM approaches to optimize the production and assembly of complex parts. DfA seeks to reduce costs by minimizing the number of parts and simplifying assembly, while DfAM enables the production of complex parts through the design freedom offered by additive manufacturing. The integration of these two approaches can make the production and assembly processes more efficient. This paper examines how DfA and DfAM approaches can be used together and the potential advantages this integration can offer for manufacturing and assembly. By applying DfA's assembly ease and DfAM's design flexibility, example designs were created. The case studies conducted demonstrated that the new designs could be simpler, with fewer parts and more cost-effective. Consequently, both manufacturing and assembly times and costs can be reduced.

## Eklemeli İmalat için Tasarım: Kolay Montaj

### ÖZ

Kişisel, karmaşık formulu ve geleneksel yöntemleri ile imalatı mümkün olmayan parçaların üretimi, ancak AM yöntemleri ile mümkündür. Son yıllarda başta havacılık ve otomotiv olmak üzere birçok farklı sektörde kullanılan AM yöntemleri hala gelişme ve olgunlaşma evresindedir. Modern üretim teknolojilerine ek olarak DfAM yaklaşımı, parçaların imalat ve montaj sürelerini önemli ölçüde azaltabilir. Buna karşın DfA yaklaşımı maliyeti düşürerek parça sayısı ve montaj kolaylığına odaklanır. Bu yöntem ile hem montaj süresi hem de maliyet azalabilir. Bu çalışma, karmaşık parçaların üretim ve montajlarını optimize etmek için DfA ve DfAM yaklaşımlarını birleştirmeyi amaçlar. DfA, montajı kolaylaştırıp parça sayısını da azaltarak maliyeti düşürmeye çalışır. DfAM ise, eklemeli imalatın tasarım özgürlüğü ile karmaşık parça üretimlerini mümkün kılar. Bu iki yaklaşımı bütünleştirilme, üretim ve montaj süreçlerini daha etkin kılar. Bu makalede DfA ve DfAM yaklaşımları nasıl birlikte kullanılabilir ve bunun üretim ve montaj ne tür avantajlar sağlayabileceği konuları incelenmiştir. DfA'nın montaj kolaylığını artırması ile DfAM'ın tasarım esnekliği birlikte uygulanarak örnek tasarımlar yapılmıştır. Yapılan örnek çalışmalar da yeni tasarımların daha sade / basit, az parçalı ve ekonomik olabileceğini göstermiştir. Aynı kapsamda imalat ile montaj süresi ve maliyetleri de azalabilecektir.

**Anahtar Kelimeler:** Eklemeli imalat için tasarım, montaj için tasarım, kolay montaj

## 1. Giriş (Introduction)

Çetin rekabet koşulları altında müşteri beklentileri ve ürün çeşitleri sürekli değiştiği için piyasaya özgün, ekonomik ve kaliteli ürünler sürmek gerekir. Bu bağlamda ürün geliştirme yöntemleri de değişen koşullara uygun olmalıdır. Bir ürünün imalatı için gerekli olan tüm sınırlayıcı, özellik ve şartlar tasarım sürecinde belirlenir. Tasarım, belirli istekleri ve/veya bazı sosyal ihtiyaçları karşılamak amacı ile harcanan tüm çabalar olarak tanımlanabilir. Bu süreç; yaratıcı ve inovatif düşünme, fikir, çözüm ve konseptler geliştirme, bunları sürekli iyileştirme ve optimize etme, tasarım varyantları oluşturma, değerlendirme ve seçme, seçilen varyantları modelleme ve detaylı tasarımları yapma gibi işlemler içerebilir. Tasarım süreci makine veya elektronik gibi tek bir alan kapsayabilir ya da birçok alanın bir arada olduğu disiplinler arası bir çalışma da olabilir. Tasarım gibi imalat araştırmaları veya bu iki süreci birleştirme / bütünleştirme amaçlı çalışmalar da son 30-40 yılda oldukça yoğunlaşmıştır. Bu kapsamda; CAD / CAM (Bilgisayar Destekli Tasarım / Bilgisayar Destekli İmalat) entegrasyonu veya CIM (Bilgisayar Bütünleşik İmalat) gibi yaklaşımlar yanında eşzamanlı mühendislik, unsur tabanlı tasarım x için tasarım vb. yöntemler benimsenmiştir [1]. Böylece üretimde maliyeti düşürmek, kalite ve dayanımı artırmak ve süreci azaltmak amaçlı önemli çabalar harcanmıştır. Yapılan bu çalışmalar kapsamında; montaj için tasarım, üretim için tasarım, kalite için tasarım gibi birçok yeni konu veya uzmanlık alanı doğmuştur. Montaj için tasarım veya kolay monte edilecek tasarım, parça veya sistemleri kolay birleştirilebilecek şekilde tasarlamayı amaçlar. Yani bu kapsamda; parça sayısını azaltma, parçaları kolay takma, ayarlama ve sabitleme gibi hususlar dikkate alınır. Böylece üretim süreci kolaylaşacağı ve hızlanacağı gibi maliyet de düşecektir [1,2].

Pahalı ürünlerde maliyeti düşürmek için farklı kaynaklardan alınan unsurları aynı şekil ve koşullarda bir araya getirerek montaj işlemi tamamlanır. Ayrıca hem elle yapılacak hem de otomatik montaj maliyetini azaltmada kaliteli ürün tasarımı çok önemlidir. Bu nedenle bir makine, aparat veya cihaz tasarımı yapılırken montaja uygun tasarım olmasına dikkat edilmelidir [3]. Yani, parça sayısını azaltılma ve basitleştirmeye, parçaların kolay / çabuk takılması ve ayarlanmasına, ekonomik (ucuz) olmalarına ve sistemin kolay kullanılabilmesi vb. hususlara dikkat edilmelidir.

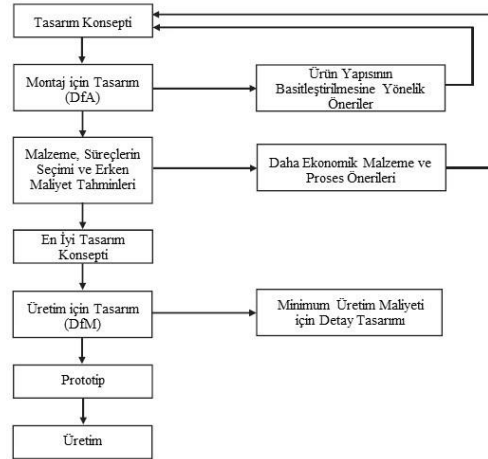
Eklemeli imalat teknolojileri, son 30 yılda oldukça popüler bir üretim yöntemi haline gelmiştir. Burada malzeme ekleyerek parçaları katman katman üretmek için 3B bilgisayar destekli tasarım modelleri kullanılır. Böylece, geleneksel yöntemler ile imali zor karmaşık geometri parçaların üretilmesi mümkün olur. Özelleştirilmiş tasarımların ve prototiplerin kolayca üretilmesine izin verir. Malzeme israfını önleme, üretim ve montaj zorluklarını aşmak için eklemeli imalat için tasarım veya kolay montaj için tasarım yaklaşımı kullanılabilir. Bu yaklaşım; tasarımı inceleme, gereksiz parça sayısı veya parça özelliklerini azaltma (tasarımı basitleştirme), montajın daha kolay yapılması ve maliyetini düşürmeyi amaçlar. Bu bağlamda tasarımcı, tasarıma başlamadan önce monte edilebilirlik durumunu değerlendirerek montaj verimliliğini artırmaya çalışmalıdır [3]. Son yıllarda DfAM alanında yapılan araştırmalardaki hızlı artış, teknolojinin gelişimi ve endüstriyel uygulamalardaki önemi açısından dikkat çekicidir. Geleneksel imalat tekniklerine göre sahip olduğu avantajlar nedeniyle dördüncü sanayi devrimini başlatan teknolojilerden biri olarak görülmektedir [4-5]. Literatürde DfAM ile ilgili birçok akademik çalışma bulunmaktadır. Doğan ve Kamer'in çalışmasında, endüstride yaygın olarak kullanılan dişli çarkların ağırlığını azaltmak amacıyla eklemeli imalat yöntemi ve topoloji optimizasyona dayalı yeni bir yaklaşım tanıtılmaktadır [6]. Alfaify ve diğerleri (vd.), son yıllarda AM teknolojisindeki gelişmeleri incelemişlerdir [7]. Kasar, ekonomik çift sırtlı horn anten tasarımı ve üretiminde AM yöntemi kullanımını incelemiştir [8]. Kaya vd., AM yöntemini kullanarak esnek mekanizma tasarım ve testini ele almışlardır. Böylece parça sayısını azaltma ve sürtünmeyi gidermeye çalışmışlardır [9]. Şanlıer vd., geleneksel ve yeni imalat yöntemlerini karşılaştırmak için dizüstü bilgisayar sehpa tasarımını ele almışlardır [10]. Top vd., eklemeli imalat ve topoloji optimizasyonu dayalı el freni mekanizma tasarımı yapmışlardır [11]. Artık havacılık sektöründe de DfAM yöntemi çok kullanılmaktadır. Bu kapsamda Aydın, eklemeli imalat yöntemiyle üretilen Ti6Al4V alaşımının havacılıktaki uygulamaları üzerine bir derleme sunmaktadır [12]. Bir diğer çalışma ise, Kayacan vd. havacılıktaki eklemeli imalat için uyarlanabilir topoloji optimizasyonu üzerine bir çalışma yapmışlardır [13].

Literatür incelemeleri eklemeli imalat teknolojisinin her geçen gün birçok sektörde daha fazla kullanıldığını göstermektedir. Otomotiv sektöründen havacılığa, tıptan savunma sanayisine kadar birçok alanda kullanılmaktadır. Bu araştırmalar eklemeli imalatın tasarım özgürlüğü, hızlı prototipleme, karmaşık geometrilerin üretimi ve tedarik zinciri yönetimi gibi avantajlarını ortaya koymaktadır. Ek olarak malzeme çeşitliliği, enerji verimliliği ve malzeme tasarrufu gibi ekonomik ve

çevresel faydalar da literatürde ön plana çıkmaktadır. Ancak bazı çalışmalar eklemeli imalatın yüzey kalitesi, malzeme dayanıklılığı ve üretim hızı gibi olumsuz yanlarına değinerek bunların iyileştirilmesi gerektiğini önermektedir. Ayrıca, eklemeli imalatın gelecek potansiyeli ve endüstri için önemi de sürekli belirtilmektedir. Ancak, DfAM ile kolay montaj amaçlı tasarımcı çalışmaları kapsamlı yeterli akademik çalışmaya literatürde rastlanmamıştır. Bu araştırma kapsamında ise, eklemeli imalat ile yapılacak parça / sistemlerin kolay montajı için yöntem, süreç ve ilkeleri incelenecektir. Eklemeli imalat için tasarım alanındaki mevcut çalışmalar gözden geçirdikten sonra bu tür parçaların kolay montajını gösteren örnek uygulamalar yapılacaktır.

## 2. Montaj için Tasarım Yaklaşımı (Design for Assembly Approach)

Bir sisteme ait çeşitli parçaları belirli bir sıra ve düzen içinde birleştirmeye montaj denir. DfA alanında birçok akademik ve ticari araştırmalar yapılmaktadır. Yapılan bu araştırmalar daha ekonomik, kaliteli ve hızlı imalat yapmayı hedefler. Bir ürüne ait üretim maliyetinin (imalat, montaj, test vb.) yaklaşık %70'i tasarım sürecinde belirlenir [1-3]. Bu bağlamda montajda kolaylık sağla için ilk akademik çalışmalar 1960'lı yıllarda yapılmıştır. Bu kapsamda sistemi oluşturan parça sayısını azaltmak ve daha basit geometrik biçimlere sahip olmaları fikri benimsenmiştir [2]. Ayrıca, parçaların daha kolay ve hızlı imal edilmeleri, montaj sırası veya planının daha çabuk anlaşılması (basit olması), parçaların takılması / ayarlanması / sabitlenmesi gibi işlemlerin daha basit olması ve gerektiğinde demontaj ve bakım işlemlerinin de kolayca yapılabilmesi düşünülmüştür. Bu amaçlı birçok akademik ve endüstriyel araştırmalar yapılmıştır [14,15]. 1970'li yıllara kadar bu tür tasarımlar için sayısal yöntemler geliştirilmemiştir. Bu konuda Hitachi firması "Montaj Değerlendirme Metodu (Assembly Evaluation Method - AEM)" adlı öncü bir çalışma yapmıştır. Burada "Bir Parça Bir Hareket" yaklaşımı esas alınmıştır. Yani, montaj işlemlerine ait her bir adımı ve parça hareketleri detaylı bir şekilde analiz edilmiştir. Daha sonra Geoffrey Boothroyd, parçaların montaj süre ve maliyetlerini ön görebilmek için "Montaj için Tasarım" metodolojisi geliştirmiştir. Burada tasarım sürecinde montaja daha fazla önem ve dikkat gösterilerek üretim esnasında zaman ve maliyette tasarruf sağlanmaya çalışılır [15]. Bu çalışmalar sonucu Amerikan Bilim Vakfı (U.S. NSF National Science Foundation) DfA ve imalat için tasarım (DfM) konulu araştırmalara destek vermiştir. Böylece tasarım ve üretim süreçlerini daha verimli yapılması amaçlanmıştır [2]. Boothroyd, DfA'a önem ve öncelik verilmesi ile ürünün sade ve basit yapılabileceğini belirtmiş ve süreci de Şekil 1'de gibi adımlara ayırmıştır [16].

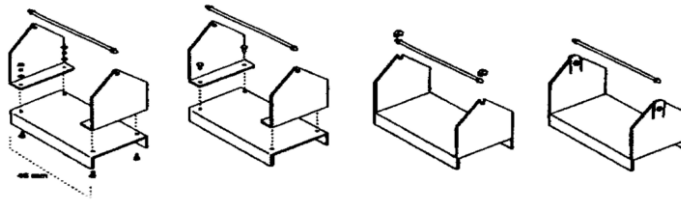


Şekil 1. Üretim ve Montaj için Tasarım (DfMA) işleminin aşamaları [17]  
(Typical stages in a DfMA procedure)

### 2.1. DfA prensipleri (DfA principles)

DfA yöntemine ait genel ve temel bazı ilkeleri vardır. Bu ilkeler, tasarımlarda parça sayısını azaltmak ve montaj işçilik sürelerini kısaltmaya çalışır. Ayrıca, parçaları tutma, taşıma, yönlendirme ve yerleştirme işlemlerini kolaylaştırmada montaj işçilik süresini de azaltacaktır. Tüm bu işlemlerin düzgün bir şekilde yapılması, montaj için tasarım ile sağlanacak maliyet tasarrufunu da artıracaktır. Bu yaklaşımı iyi şekilde uygulamak için dikkate alınması gereken ilkeler şunlardır [2]:

- Parça sayısının azaltılması
- Parça çeşitliliğinin azaltılması
- Birleştirici sayısının azaltılması
- Parçaların kolay yerleştirilmesi ve yönlendirilmesi
- Montaj yerinin tam görünür olması
- Parçaların kolay tutulabilir olması
- Yeniden yönlendirmenin önlenmesi
- Parçaların yanlış monte edilmeyecek şekilde tasarlanması
- Tam simetrik parçalar veya görsel asimetrinin sağlanması
- Parçaların modül olarak tasarlanması
- Şekil olarak benzer parçalarda farklı renk kullanımı
- Yerçekimine uygun montaj sıralaması



Şekil 2. Parça sayısının azaltılmasına ait örnek bir tasarım çalışması [2]  
(An example design study of reducing the number of parts)

Bu süreçte montajda bulunan parça adeti düşürerek üretimde ve montaj hattında kolaylık amaçlanır. Boothroyd, montajı ürün adetine bağlı olarak üçe ayırır. Bunlar; manuel (elle) montaj, yüksek hızlı otomatik montaj, robotla yapılan montaj şeklindedir. Bu yöntemlere göre daha iyi ürünler tasarlanmış ve monte edilecek parça sayıları azaltılmaya çalışılmıştır. Böylece hem montaj hattında kolaylık sağlamaya hem de maliyetleri düşürmeye çalışılmıştır [18]. DfA yöntemi uygulanırken oluşabilecek sorunları azaltmak, kaliteyi yükseltmek ve etkin üretim ekipmanları kullanımı ile maliyetler azaltılabilir. Genelde DfA, tasarım esnasında alt parçalarda ihtiyaç duyulan analiz durumunu erken tasarım aşamalarında göz önünde bulundurur. DfA yöntemi günümüzde birçok firma tarafından kullanılmaktadır. Örneğin, General Electric'e ait 1960 yılında yayınlanan "İmal Edilebilirlik" adlı kitapta bu firmanın DfA kurallarını ürün geliştirme sürecinde uyguladığı görülmektedir. 1970 sonrası ise bu konu ile ilgili başka bazı kitap ve makaleler yayınlamaya başlamıştır. Bunlardan en önemlisi Boothroyd'un montaj için tasarım ve endüstriyel uygulaması gösterilebilir. Ürün tasarım aşamasında; montaj yöntemi, parça toleransları, talaşlı imalat türleri gibi imalat maliyeti ve toplam maliyeti önemli ölçüde etkileyen kararlar alınır. DfA, montaj zorluklarını azaltma ve maliyeti düşürmeyi sağlayan bir iyileştirme yöntemidir. Bu teknikte, parça sayısının azaltılması ve bunların kolay birleştirilmesi ile maliyet önemli oranda azalacaktır [19]. DfA metodolojisinde uyulması gereken başlıca kriterler şunlardır [20]:

- Parça adeti olabildiğince az olan ürün tasarlanmalı
- Ayrı bağlantı elemanlarından kaçınılmalı
- Montaj yönleri azaltılmalı
- Parça uyumu artırılmalı, montajı kolaylaştıracak tasarım yapılmalı ve
- Parça üzerindeki işlem sayısı azaltılmalıdır.

Bu kriterlere bağlı olarak ürünün montaj maliyetinde önemi oranda azalma sağlanabilir.

1993'te Amerikan Douglas Ticari Hava Araçları maliyetlerinin fazla olduğu düşünülmüştür. Bu konuda yapılan araştırmalar sonucu DfMA uygulamaya karar verilmiş ve ilişkili çalışmalar yapılmıştır. Yapılan çalışmalar sonrası yaklaşık 300 yolcu kapasiteli uçak modeli MD-11'in klima sistemi hava giriş kanal tasarımında değişiklik yapılmıştır. Önceki tasarım yıllarca DC-10 uçağında kullanılmış olup toplam 2.172 adet parçadan oluşmuş ve bu parçaların montaj sonrası ayarlanması gerekmiştir. Bu hava kanalı tasarımındaki değişiklik uygulanan tekniklerle basitleştirilmesi iki hafta kadar sürmüştür. Çalışmalar sonucu yeni tasarım toplam 1.383 parça içermiştir. Ünite montajı önceden 4.038 işlem iken bu sayı 2.649'ye düşmüş ve toplam ağırlık da yaklaşık 40 kg kadar azalmıştır. Aşınması olası parça sayısı azalan yeni ünite daha güvenli ve kolay bakım yapılabilir olmuştur [21-22]. McDonnell Douglas MD-11 Amerikan yolcu uçağına ait resim Şekil 3'te gösterilmiştir.



Şekil 3. McDonnell Douglas MD-11 Amerikan yolcu uçağı [22]  
(McDonnell Douglas MD-11 American passenger plane)

### 3. Eklemeli İmalat (Additive Manufacturing)

CAD / CAM'ı birleştirme / bütünleştirme sağlayan AM alanında 1980'li yıllardan itibaren önemli araştırmalar yapılmış ve bunların bir kısmı da ticari ürünlere dönüşmüştür. Burada, talaş kaldırma şeklindeki diğer imalat yöntemlerinden farklı olarak, katman katman malzeme eklenmesi veya yığılması ile parçalar imal edilir. Malzeme yığma şekilleri ise plastik ergitme, toz yayma veya püskürtme, kâğıt gibi ince tabakalar yayma gibi olabilmektedir. Önce model şeklinde imal edilen parçalar zamanla metal malzemelerden gerçek işlevsel parçalar şekline de dönüşmüştür. AM yöntemi ile tasarımcı üretilebilirlik durumunu düşünmeden modelini istediği gibi geliştirebilir [23].

AM 3B bilgisayar verileri kullanılarak parçaların katman katman üretimini sağlayan yeni bir imalat tekniğidir. Bu yöntem ile imalat zaman alıcı olmakla birlikte zor parçalar kolayca üretilebilir. AM; CAD modelleri, tersine mühendislik uygulamaları, bilgisayarlı tomografi gibi farklı 3B katı model verileri kullanılabilir. 3B model ince katmanlara bölünür ve ardışık olarak bunlar imalat bitene kadar kullanılır. AM yöntemlerinin bazı avantajları bulunmaktadır. Örneğin geleneksel üretim yöntemlerinde, parça imalatı talaş kaldırmaya dayandığı için büyük miktarda malzeme israfı olabilir. Buna karşın AM yöntemleri sadece gerekli miktarda malzeme kullanarak tasarruf sağlar. Ayrıca, AM süreçlerinde geleneksel üretim yöntemlerinde kullanılan master, iş kalıbı ve soğutucu gibi yardımcı araçlara ihtiyaç duyulmaz. Böylece gereksiz birçok iş / işlem ortadan kalkar. AM yöntemleri karmaşık geometriye sahip parçaların üretimini de sağlar. Örneğin, parça bir ucu esnek özellikte iken diğer ucu rijit olacak şekilde üretilebilir [23].

#### 3.1. AM yöntemleri (AM methods)

Son 10 yılda eklemeli imalat dental implantlardan motor parçalarına kadar geniş bir alanda uygulanmaya başlanmıştır. Sadece prototipler değil fonksiyonel gerçek parçalar da üretilebilmektedir. Son yıllarda 3B yazıcı maliyetlerinin düşmesi ve büyük rağbet görmeleri nedeniyle bu cihazlar çok yaygınlaşmıştır. Bunların kullanımı, endüstri tesisleri ve araştırma enstitülerle sınırlı olmayıp ev ve ofislerde bireysel kullanıcılar tarafından da tercih edilir olmuşlardır. Masaüstü 3B yazıcılar, evler veya hobi atölyelerinde de artık çok kullanılmaktadır [24]. AM amaçlı birçok farklı yöntem bulunmakta olup bunların genel bir sınıflandırılması Tablo 1'de verilmiştir.

Bu yöntemler kullanım şekillerine göre sınıflandırılabilir. Örneğin FDM yöntemi, diğer yöntemlere göre daha ekonomik olan masaüstü yazıcılar için tercih edilmektedir. Plastik filament bir ekstrüder yardımıyla ısıtılmış bir nozuldan geçirilerek yarı eriyik halde katman katman yığılmasıyla model oluşturulur. SLS'de, metal tozu ve lazer ışığını kullanarak bir yapı elde edilir. Burada metal tozu sinterlenir ve böylece parça hazır hale gelir. Stereolitografi ise fotopolimer reçine, fotokimyasal ve lazer teknolojileri birlikte kullanarak parça üretir [26].



Tablo 1. Eklemeli imalat yöntemleri [5,25] (Additive manufacturing methods)

Teknoloji	Tip	Yöntem	Kategori	Malzeme	Güç Kaynağı
FDM	Sıvı	Malzeme Ekstrüzyonu	Eriyik	Termoplastik	Termal Enerji
SL (SLA)	Sıvı	Fotopolimerizasyon	Polimerize edilebilir	Fotopolimer, Seramik	UV Işını
DLP	Sıvı	Fotopolimerizasyon	Polimerize edilebilir	Fotopolimer, Seramik	Projeksiyon
PJ	Sıvı	Malzeme Püskürtme	Polimerize edilebilir	Fotopolimer, Wax	UV Işını
LOM	Katı	Sac Laminasyon	Yapışık Objeler	Fotopolimer, Wax	Lazer Işını
SLS	Toz	Toz Yataklı Eritme	Eritme	Poliamid, Polimer	Güçlü Lazer Işını
DMSL	Toz	Toz Yataklı Eritme	Eritme	Metal Tozu, Seramik Tozu	Güçlü Lazer Işını
SLM	Toz	Toz Yataklı Eritme	Eritme	Metal Tozu, Seramik Tozu	Güçlü Lazer Işını
EBM	Toz	Toz Yataklı Eritme	Eritme	Metal Tozu, Seramik Tozu	Elektron Işını
LENS	Toz	Direk Enerji Depolama	Eritme	Erimiş Metal Tozu	Lazer Işını
EBAM	Toz	Direk Enerji Depolama	Eritme	Erimiş Metal Tozu	Lazer Işını
BJ	Toz	Yapıştırıcı Püskürtme	Yapıştırma	Seramik Tozu, Metal Tozu, Kum	Termal Enerji

Seçmeli Lazer Sinterleme (SLS) ve Seçmeli Lazer Ergitme (SLE) en çok kullanılan AM yöntemleridir. Bu yöntemler genelde metal parçaların AM ile üretimi sırasında kullanılırlar. SLS ve SLE tekniklerinde, toz halinde bulunan hammadde ince bir tabaka şeklinde yayılarak istenen bölgeler lazer ışını yardımıyla taranır. Işın gelen yerlerde sıcaklıkla birlikte toz malzeme eriyerek veya sinterlenerek ortamda bulunan diğer toz tanelerle kaynaşır. Her işlem sonunda platform, z ekseninde bir katman kalınlığı alçalır. Her katman için bu işlemler tekrarlanır. Bu süreçte serbest halde bulunup destek görevi gören serbest tozlar, fırça veya vakumlu emici yardımıyla temizlenerek elde edilen parça alınır [27].

### 3.2. AM işlemi veri akışı (AM process data flow)

Üretimi istenen ve 3B çizimi tamamlanan model genelde doğrudan imalat makinelerine gönderilir. 3B katı model öncelikle STL adlı formata çevrilir. Hata durumu incelenir ve varsa giderilir. Tablaya uygun yerleşim yapıldıktan sonra inşa edilecek yön seçilip ihtiyaca göre destek parçaları ile ön hazırlık yapılır. Ön hazırlık sonrası 3B katı model 2B katman katman dilimleme işlemi yapılarak üretime hazır hal getirilir ve imalat makinesine gönderilir. Bu şekilde üretim yapılabileceği gibi STL formatına çevrilmeden dilimleme işlemi yapılarak da imalat makinesine gönderilebilir (Şekil 4). İmalat makinesi, dilimlenmiş 2B verileri alarak katman katman üretimi gerçekleştirir [25].



Şekil 4. Eklemeli imalat işlemi veri akışı [25]  
(Additive manufacturing process data flow)

### 3.3. Eklemeli imalat için tasarım (Design for additive manufacturing)

Son yıllarda AM gibi yeni teknolojiler bariz bir şekilde gelişmekte ve yaygınlaşmaktadır. Bu teknolojiler, çeşitli avantajların yanı sıra destek yapıları ve son işleme gereksinimleri gibi bazı kısıtlamalar da içerir. AM'den daha iyi faydalanabilmek için ürün tasarımı bu yöntemin özellik ve şartlara uygun olmalıdır. Ayrıca burada birden fazla malzeme kullanımı, tasarım özgürlüğü ve esnekliği de olabilir. Tüm bu özellikleri ile AM bir üretim tekniği olması ötesinde tasarım sürecine ait yeni yaklaşımları da gerekli kılmıştır. Bu bağlamda DfAM yaklaşımı geliştirilmiştir [28,29]. DfAM; AM ile yapılacak parçaların daha

kolay, hızlı ve ekonomik üretilmesi ve monte edilmesine katkı ve kolaylık sağlar [30].

DfAM, daha önceden mevcut ve genel imalatta montajı kolaylaştıran DfM yaklaşımına ve bu özel alana uyarlanmasına dayanır. DfAM, AM kapsamlı tasarım ve üretim önemli bir yöntemdir. AM'ye ait üretim kısıtlamaları, diğer üretim teknolojisine göre daha esnekliktir. Böylece burada daha karmaşık ve üretimi zor parçalar kolayca üretilebilir [31]. Bu yöntem; şekil, boyut, geometrik mezo-yapı, çoklu malzeme ve mikro yapı sentezinde üretimi mümkün kılar. Ayrıca, mevcut bileşenleri yeniden değerlendirme, geliştirme ve tekrar tasarlama fırsatları da sunar [32].

Genel olarak, AM yöntemlerinin avantaj ve dezavantajları şu şekilde özetlenebilir:

Tablo 2. AM yöntemlerinin avantaj ve dezavantajları [33] (Advantages and disadvantages of AM methods)

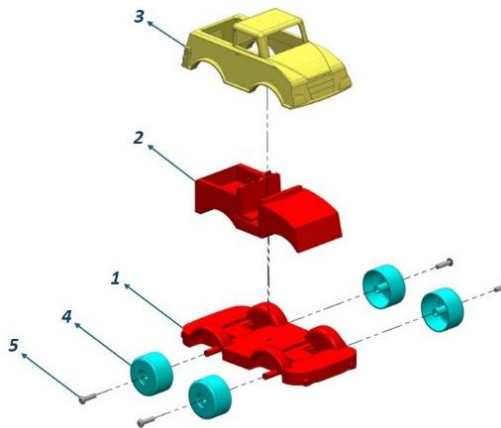
AVANTAJLARI	DEZAVANTAJLARI
AM teknolojileri üretim aşamasında özel master/kalıp benzeri aletler gerektirmediği için kalıp tasarımı ve üretim faaliyetlerinden işçilik ve maliyet tasarrufu sağlar.	AM için kullanılan malzeme maliyetleri yüksektir.
AM yöntemi ile karmaşık geometriye sahip kritik parçaların metal tozu malzeme ile üretilmesi mümkündür.	AM yöntemiyle üretilen parçaların mekanik özellikleri kullanılan malzemeden farklı olabilir.
Gözenekli hafif parçaların AM yöntemi dışında başka bir yöntemle üretilmesi zordur. Bu tür hafif gözenekli parçalar AM ile kolayca üretilebilir.	Yüksek tüketim (gaz, toz malzeme, yakıt vb.) giderleri vardır.
Tamir, bakım ve onarım faaliyetlerinde AM teknolojileri kullanılarak hızlı yedek parça imalatı yapılabilir.	AM makinaları yüksek yatırım bütçe ve maliyetleri gerektirir.
Biyomimetik (doğa taklidi) ile ortaya çıkan tasarım kolaylığı çok ileri teknolojiler için uygundur.	Bunlar yavaş işlem ve düşük yapı hacmi nedeniyle seri üretime uygun değildir.
AM ile ticari havacılık işletmelerinde atmosfere salınan karbondioksit miktarında azalma sağlanabilir.	CNC tezgahlara göre imalat maliyeti (hammadde, ekipman, gaz vb.) daha yüksektir.
AM teknolojileri artık malzeme miktarı ve malzeme israfına katkı sağlayabilir.	AM sürecinde mikro gözenekler ve kılcal çatlaklar oluşabilir.
Ayrıca hafif olması nedeniyle birçok sistemin yakıt tüketimi azalacaktır.	Üretilen parçalar üzerinde son işleme (ısıl işlem, polisaj vb.) gerekebilir.

#### 4. Materyal ve Method (Materials and Methods)

Bu kısımda daha önceden teorik olarak değinilen hususlar bazı somut örnekler üzerine ele alınacaktır. Bu kapsamda mevcut bazı örnek ürünler daha kolay imalat ve montaj açısından tekrar tasarlanacak ve parça sayıları azaltılarak daha basit hale getirilmeye çalışılacaktır. Böylece bu yeni tasarımların daha hızlı ve ekonomik üretimi mümkün olabilecektir.

##### 4.1. Oyuncak araba örneği (Toy car example)

Bir oyuncak arabaya ait eski bir tasarım (ayrıştırılmış halde) Şekil 5'te gösterilmiştir. Plastik enjeksiyon ile üretilen bu ürün 11 parçadan oluşmaktadır. DfA ve DfAM yöntem ve kurallarına göre yapılan yeni tasarım montaj ve üretimin daha kolay, hızlı ve güvenilir olmasını sağlar. Böylece üretim ve dolayısı ile ürün maliyeti de oldukça azalacaktır. Bu ürünün eski tasarımında kullanılan parça kod, isim, malzeme ve adet sayılarını gösteren değerlendirme listesi Tablo 3'te verilmiştir.

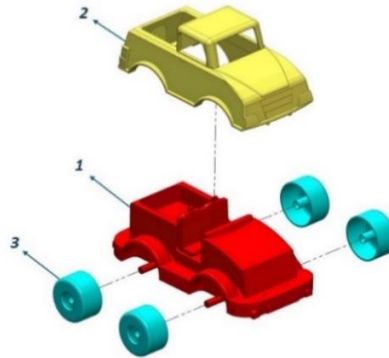


Şekil 5. Oyuncak arabaya ait eski tasarımın ayrıştırılmış gösterimi (Deconstructed representation of the old design of a toy car)

Tablo 3. Oyuncak araba eski tasarım için değerlendirme listesi (Evaluation list for the old design of a toy car)

No	Parça Kodu	Parça Adı	Malzeme	Adet
1	OA-E-0000-0001	Şasi	Plastik	1
2	OA-E-0000-0002	Araba iç kısmı	Plastik	1
3	OA-E-0000-0003	Kaporta	Plastik	1
4	OA-E-0000-0004	Teker	Plastik	4
5	ISO 7380	Bombe başlı imbus civata	Hazır	4

DfA ve DfAM ilkeleri uygulanan oyuncak araba montajı, 11 parçadan 6 parçaya düştüğü görülmektedir. Öncelikle ayrı parçalar olan araba iç kısmı parçası ile şasi parçası birleştirilmiştir. Bu parçanın üst şasi ile montajı gerçekleşmesi için iki tane ön ve arkaya tırnaklar eklenmiştir. Böylece önceden plastik kaynak ile montajı yapılmış ürün yeni tasarımla birlikte montajı daha kolay ve ekonomik bir yöntemle gerçekleştirilmiş olacaktır. Sonrasında 4 adet kullanılan bombe başlı imbus civata yerine, tekerlerin monte edilebileceği bir şasi tasarımı yapılmıştır. Daha sonra ise, montaj sürecinde zorluk olmaması için keskin tüm kenarlar kavisli ve yumuşak bir hale getirilmiştir. Oyuncak arabanın eski tasarımında ürün plastik enjeksiyon ile üretilmektedir. Plastik enjeksiyon ile imalat olumlu olduğu kadar mahzurlu yanlar da içerebilir. Üretimi gerçekleştirmek için malzeme hazırlığı, kalıp tasarımı, enjeksiyon, soğutma, açma ve ayırma, bazı durumlarda da ikincil işlemler (kesme, delme, montaj vb. işlemler) gibi hazırlık aşamalarından geçmektedir. Yeni tasarımda geleneksel üretim yöntemleri yerine daha kolay ve hızlı üretim yapılabilmesi için eklemeli imalat yöntemlerine uygun tasarım tercih edilmiştir. Eklemeli imalat yöntemlerinden hangisinin kullanılacağı ise, üretim miktarı, tasarım karmaşıklığı, bütçe ve süreç ihtiyaçlarına göre değişebilmektedir. Burada özellikle prototipler veya küçük seri üretimler için uygun olup günümüzde de çok yaygın olan eklemeli imalat yöntemlerinden FDM yöntemi tercih edilmiştir. Kolay montaj için yeniden tasarlanan ürün Şekil 6'da gösterilmiş, değerlendirme listesi ise Tablo 4'te verilmiştir.



Şekil 6. Oyuncak arabaya ait yeni tasarımın ayrıştırılmış gösterimi (Decomposed representation of the new design of a toy car)

Tablo 4. Oyuncak arabaya ait yeni tasarım için değerlendirme listesi (Evaluation list for the new design a toy car)

No	Parça Kodu	Parça Adı	Malzeme	Adet
1	OA-E-0000-0001	Şasi ve iç kısım	Plastik	1
2	OA-E-0000-0002	Kaporta	Plastik	1
3	OA-E-0000-0003	Teker	Plastik	4

İki tasarımı karşılaştırdığımızda, Tablo 5'te görüldüğü gibi oyuncak araba ürünü montajı 11 parçadan 6 parçaya düşmüştür. Eski tasarımda geleneksel üretim yöntemi olan plastik enjeksiyon yöntemiyle üretilirken, yeni tasarımda eklemeli imalat yöntemi olan FDM ile üretilmiştir. Ancak daha da önemlisi iki tasarım arasındaki toplam montaj zaman farkı, parçaların daha kolay montaj edilebildiğini göstermektedir. Burada DfAM, kişiselleştirme, karmaşık geometri, ekonomik prototipleme, malzeme verimliliği ve hızlı üretim gibi avantajlar sunar. Bu yaklaşım, yüksek özelleştirme ve fonksiyonel tasarımlar sağlar, atıkları azaltır ve pazara hızlı bir şekilde yeni ürünler sunma imkânı sunar. AM yöntemleri, karmaşık ve yenilikçi tasarımların hızlı ve ekonomik bir şekilde üretilmesini sağlar. Ayrıca, tasarıma ait estetik ve işlevsellik de kolayca artırılabilir. Bu amaçla karmaşık geometri ve özel (kişisel) unsurlar dikkate alınmaya ve birleştirilmeye çalışılmıştır. Ayrıca, geometrik biçim ve malzeme kullanımı optimize edilmeye ve üretim maliyeti de azaltılmaya gayret edilmiştir. Burada ele alınan oyuncak araba tasarımında (DfAM kuralları kullanılarak); kompakt (küçük), sade (basit) az parçalı ve kolay monte edilebilecek bir tasarım gerçekleştirilmeye çalışılmıştır.

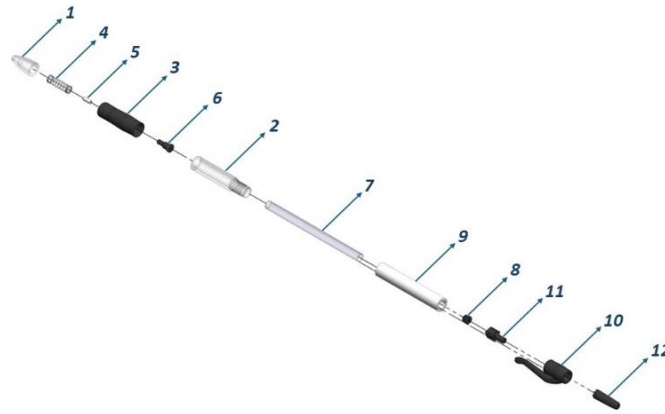


Tablo 5. Oyuncak araba ürünü montajı için eski ve yeni tasarımın karşılaştırılması  
(A comparison of old and new designs for toy car assembly)

	Parça Sayısı (ad.)	Toplam Montaj Süresi (dk.)	Üretim Yöntemi
Eski Tasarım	11	7-10	Plastik enjeksiyon
Yeni Tasarım	6	2-3	FDM

#### 4.2. Pilot kalem örneği (Pilot pen example)

Bir pilot kalem ürününün eski tasarımı Şekil 7’de gösterilmektedir. Plastik enjeksiyon yöntemiyle üretilen pilot kalem toplam 12 adet parçadan oluşmaktadır. Montaj sürecindeki zorlukları en aza indirmek, üretimi kolaylaştırmak ve maliyeti düşürmek amacıyla DfA ve DfAM yöntemleri kullanılarak yeni bir tasarım yapılmıştır. Pilot kaleme ait eski tasarımda kullanılan parçaların kod, isim, malzeme ve adet sayılarını gösteren değerlendirme listesi Tablo 6’da verilmiştir.

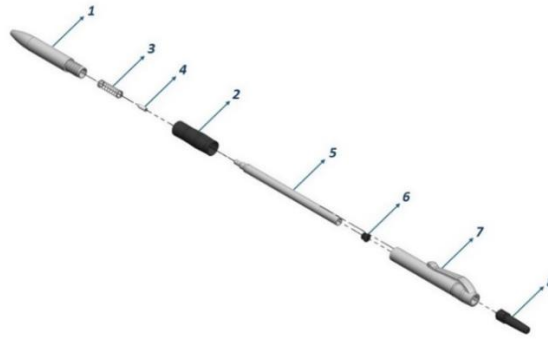


Şekil 7. Pilot kaleme ait eski tasarımın ayrıştırılmış gösterimi  
(Deconstructed representation of the old design of a pilot pen)

Tablo 6. Pilot kalem ürünü eski tasarım için değerlendirme listesi (Evaluation list for the old design of a pilot pen)

No	Parça Kodu	Parça Adı	Malzeme	Adet
1	PK-E-0000-0001	Uç başlık	Plastik	1
2	PK-E-0000-0002	Alt gövde	Plastik	1
3	PK-E-0000-0003	Tutma kısmı	Kauçuk	1
4	PK-E-0000-0004	Yay	Çelik	1
5	PK-E-0000-0005	Bilye	Çelik	1
6	PK-E-0000-0006	Bilye kapak	Plastik	1
7	PK-E-0000-0007	Mürekkep gövde	Plastik	1
8	PK-E-0000-0008	Üst kapak	Plastik	1
9	PK-E-0000-0009	Üst gövde	Plastik	1
10	PK-E-0000-0010	Başlık	Plastik	1
11	PK-E-0000-0011	Kastanyola	Plastik	1
12	PK-E-0000-0012	İtici kapak	Plastik	1

DfA ve DfAM ilkeleri uygulanan pilot kalem ürünü montajı, 12 parçadan 8 parçaya indirilmiştir. Bu sadeleştirme aşamasında, gereksiz parçalar yeniden tasarlanmış ve aynı işlevi yerine getirecek şekilde düzenlenmiştir. Diğer tüm parçalar, işlevsel parçaları doğru konumda tutmak için gereklidir. Şekil 8’de gösterildiği gibi kolay montaj açısından, uç başlık parçası ile alt gövde parçası birleşiminden, uç başlık gövde isminde yeni bir tasarım eklenmiştir. Sonrasında bilye kapak parçası ile mürekkep gövde parçası birleştirilerek yeni tasarımda gövde ismini almıştır. Daha sonrasında ise, üst gövde ile başlık parçaları birleştirilerek başlık gövde ismiyle yeni bir parça tasarlanmıştır. En son olarak da kastanyola ve itici kapak parçaları birleştirilerek yeni bir parça tasarımı yapılmıştır. Böylece tasarımdaki gereksiz parçalar azaltılmış montajda kolaylık sağlanmıştır. Pilot kalemin tutma aparatı kauçuk malzemesinden, yay ile bilye çelik malzemedir, geriye kalan diğer parçalar ise plastik enjeksiyon yöntemiyle üretilmektedir. Yeni tasarımda, geleneksel üretim yöntemleri yerine eklemeli imalat yöntemlerine uygun bir tasarım yapılmış ve bu sayede üretim sürecinin daha kolay ve hızlı olması amaçlanmıştır. Özellikle prototipler veya küçük seri üretimler için uygun olan ve günümüzde oldukça yaygın olarak kullanılan AM yöntemlerinden biri olan FDM yöntemi, tercih edilen üretim yöntemi olmuştur. Tasarımı tamamlanan yeni ürün Şekil 8’de gösterilmiş, değerlendirme listesi ise Tablo 7’de verilmiştir.



Şekil 8. Pilot kalem ürününe ait yeni tasarımın ayrıştırılmış gösterimi  
(Decomposed representation of the new design of a pilot pen)

Tablo 7. Pilot kalem ürünü yeni tasarım için değerlendirme listesi (Evaluation list for the new design of a pilot pen)

No	Parça Kodu	Parça Adı	Malzeme	Adet
1	PK-Y-0000-0001	Uç başlık gövdesi	Plastik	1
2	PK-Y-0000-0002	Tutma kısmı	Kauçuk	1
3	PK-Y-0000-0003	Yay	Çelik	1
4	PK-Y-0000-0004	Bilye	Çelik	1
5	PK-Y-0000-0005	Gövde	Plastik	1
6	PK-Y-0000-0006	Üst kapak	Plastik	1
7	PK-Y-0000-0007	Başlık kısmı	Plastik	1
8	PK-Y-0000-0008	İtici kapak	Plastik	1

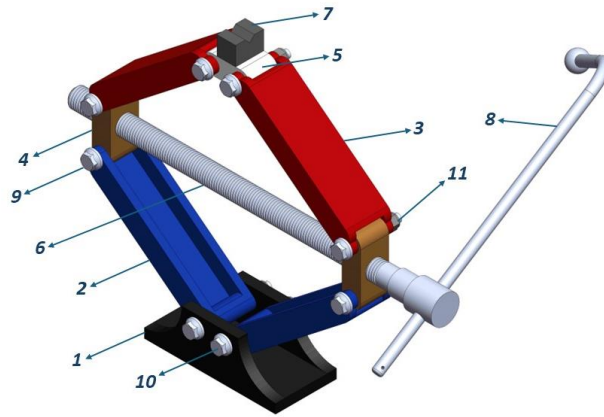
Başarılı bir tasarım sürecinde minimum parça sayısına odaklanarak sistemdeki parçaların besleme ve montaj açısından potansiyel sorunları göz önüne alınmalıdır. Özellikle manuel montaj durumunda, kavrama, manipülasyon ve benzeri işlemlerle ilgili sorular sıkça değerlendirilmelidir. Pilot kalem ürününe ait eski ve yeni tasarımlar mukayese edildiğinde, Tablo 8’de görüldüğü gibi eski tasarımda 12 parçadan oluşan ürün, yeni tasarımda 8 parçaya düşmüştür. Kolay montaj için tasarım ilkelerinin burada en önemli yönlerinden biri, minimum sayıda montaj edilebilecek parça kullanımı ilkesini uygulamaktır. Eski tasarımda parçalar plastik enjeksiyon yöntemiyle üretilirken, yeni tasarımda AM yöntemi FDM ile üretilmiştir. Böylece üretim süresi kısalmış olup zaman ve maliyet tasarrufu ile parçalar daha kolay monte edilebilmiştir. Burada DfAM özelleştirilmiş tasarımlar, ergonomik detaylar ve karmaşık geometrilere izin verir. Ayrıca, entegre fonksiyonel parçalar ve hafif ama dayanıklı yapılar da mümkün olabilir. Ek olarak ekonomik prototip oluşturma ve hızlı üretim de yapılabilir. Böylece kalemin performansı ve estetiği kolay ve çabuk bir şekilde iyileştirilebilir. Ayrıca, malzeme verimliliği ve atık azaltma sayesinde sürdürülebilir üretim elde edilir. Tüm bu husus ve avantajlar göstermektedir ki DfAM yaklaşımı ile daha iyi, ekonomik ve optimum sistemler tasarlanabilir ve üretilebilir.

Tablo 8. Pilot kalem ürünü montajı için eski ve yeni tasarımın karşılaştırılması  
(A comparison of old and new designs for pilot pen assembly)

	Parça Sayısı (ad.)	Toplam Montaj Süresi (dk.)	Üretim Yöntemi
<b>Eski Tasarım</b>	12	5-7	Plastik Enjeksiyon
<b>Yeni Tasarım</b>	8	3-5	FDM

#### 4.3. Kriko ürün örneği (Jack product example)

Şekil 9’da bir kriko montajına ait eski tasarımı gösterilmiştir. Sistematik bir yaklaşımın benimsendiği parça tasarımında, bazı bileşenlerin montaj sorunlarını önceden engellemek amacıyla tasarım değişiklikleri önermek, parçanın montaj ve demontaj işlem hatalarını minimuma indirme ve aynı zamanda maliyetleri azaltma fırsatları sunacaktır. Kriko toplam 27 parçadan oluşmaktadır. Montaj sürecindeki zorlukları en aza indirmek, üretimi kolaylaştırmak ve maliyeti düşürmek için DfA ve DfAM yöntemlerini kullanarak yeni bir tasarım oluşturulmuştur. Kriko ürünü montajının eski tasarımında kullanılan parça kod, isim, malzeme ve adet sayılarını gösteren değerlendirme listesi Tablo 9’da verilmiştir.

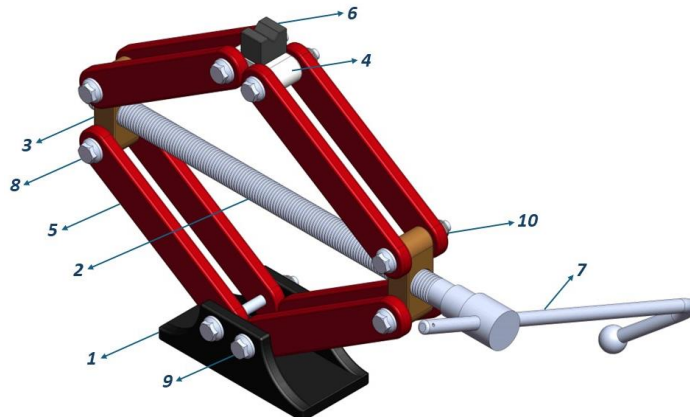


Şekil 9. Araç krikosuna ait eski tasarımın 3B modeli  
(3D model of the old design of a car jack)

Tablo 9. Kriko ürünü eski tasarım için değerlendirme listesi (Evaluation list for the old design of a car jack)

No	Parça Kodu	Parça Adı	Malzeme	Adet
1	K-E-0000-0001	Taban	ST37	1
2	K-E-0000-0002	Alt destek	ST37	2
3	K-E-0000-0003	Üst destek	ST37	2
4	K-E-0000-0004	Alt bağlama parçası	ST37	2
5	K-E-0000-0005	Üst bağlama parçası	ST37	1
6	K-E-0000-0006	Vida	Ç1050	1
7	K-E-0000-0007	Takoz	Sert kauçuk	1
8	K-E-0000-0008	Kol	Transmisyon	1
9	DIN6921	M8x60 Altıköşe flanşlı civata	Hazır	6
10	DIN6921	M8x80 Altıköşe flanşlı civata	Hazır	2
11	DIN985	M8 Fiberli somun	Hazır	8

Eski tasarımın montajı sırasında bazı zorluklar bulunmaktadır. Bu uygulamada kriko sistem montajındaki zorluklar saptanarak kolay monte edilebilir halde yeniden tasarlanmıştır. Şekil 10'daki yeni tasarım uygulamasının ardından kriko sistemi kolay montajını sağlamak amacıyla DfA ve DfAM prensipleri kullanılarak 31 parçadan oluştuğu gözlemlenmiştir. Eski tasarımda destek parçaları, destek alt ve destek üst parçaları olarak ayrılmışken, yeni tasarımda tek bir destek parçası tasarlanarak parça çeşitliliği azaltılmıştır. Destek parçalarındaki gereksiz malzeme ağırlığı, tasarımlarda değişikliğe gidilerek azaltılmış ve böylece maliyet de düşürülmüştür. Bu bağlamda, yeniden tasarım sürecinde tabana, destek parçalarına, takoza, alt ve üst bağlama parçalarına pah kırma, ayarlama, sabitleme ve gövde asimetrisini giderme gibi tasarım öğelerini dikkate alarak daha kolay montaj ve demontaj imkanları sağlanmıştır. Çoğu parçası döküm veya dövme gibi geleneksel metal işleme teknikleri ile üretilen kriko sistemi, yeni tasarımla birlikte özellikle destek parçaları lazer ile üretime uygun hale getirilmiştir. Sonuç olarak, maliyeti daha yüksek olan döküm veya dövme gibi üretim yöntemleri yerine daha uygun maliyetli bir yöntem olan lazer ile üretim tekniğine geçiş sağlanmıştır. Tasarımı tamamlanan yeni kriko Şekil 10'da gösterilmiş, değerlendirme listesi ise Tablo 10'da verilmiştir.



Şekil 10. Araç krikosuna ait yeni tasarımın 3B modeli  
(3D model of the new design of a car jack)

Tablo 10. Kriko ürünü yeni tasarım için değerlendirme listesi (Evaluation list for jack product new design)

No	Parça Kodu	Parça Adı	Malzeme	Adet
1	PK-Y-0000-0001	Taban	ST37	1
2	PK-Y-0000-0002	Destek	ST37	8
3	PK-Y-0000-0003	Alt bağlama parçası	ST37	2
4	PK-Y-0000-0004	Üst bağlama parçası	ST37	1
5	PK-Y-0000-0005	Vida	Ç1050	1
6	PK-Y-0000-0006	Takoz	Sert kauçuk	1
7	PK-Y-0000-0007	Kol	Transmisyon	1
8	DIN6921	M8x60 Altıköşe flanşlı civata	Hazır	6
9	DIN6921	M8x80 Altıköşe flanşlı civata	Hazır	2
10	DIN985	M8 Fiberli somun	Hazır	8

Eklenebilir imalat için tasarım prensipleri çerçevesinde gerçekleştirilen ağırlık azaltma işlemi, ürünün performansını ve verimliliğini artırmada önemli bir rol oynamıştır. İki tasarım mukayese edilirse, Tablo 11’de de görüldüğü gibi kriko ürünü montajı 27 parçadan 31 parçaya çıkarılmıştır. Bunun sebebi destek parçalarındaki gereksiz malzeme israfını önlemek ve gövde asimetrisi yok edilerek daha kolay üretilen bir tasarım elde etmektir. Keskin parça köşeleri kavisli hale getirilerek montajda kolaylık sağlanmıştır. Kriko sisteminin çoğu parçası geleneksel metal işleme teknikleri olan döküm veya dövme ile üretilirken, yeni tasarım ile özellikle destek parçaları lazer ile üretim için uygun hale getirilmiştir. Bu sayede daha yüksek maliyetli döküm veya dövme gibi üretim yöntemleri yerine daha ekonomik bir seçenek olan lazer ile üretim yöntemine geçiş sağlanmıştır. En önemlisi, eski ve yeni kriko tasarımlarının imalatı arasındaki toplam zaman farkı azaltılmış ve bu sayede zamandan ve maliyetten tasarruf edilmiştir. Bu durum üründeki parçaların daha kolay bir şekilde monte edilebileceği anlamına gelmektedir.

Tablo 11. Kriko ürünü montajı için eski ve yeni tasarımın karşılaştırılması (Comparison of old and new design for jack product assembly)

	Parça Sayısı (ad.)	Toplam Montaj Süresi (dk.)	Üretim Yöntemi
Eski Tasarım	27	20-25	Döküm veya dövme
Yeni Tasarım	31	15-20	Lazer kesim

Mevcut bazı örnek ürünler daha kolay imalat ve montaj açısından tekrar tasarlanıp ve parça sayıları azaltılarak daha basit hale getirilmeye çalışılmıştır. Böylece bu yeni tasarımların daha hızlı ve ekonomik üretimi mümkün olacaktır. Günümüzde AM; medikal, otomotiv, havacılık gibi çeşitli alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Üretimi zor olan karmaşık parçaların üretilmesi, maliyet tasarrufu, düşük yoğunluklu ve yüksek mukavemetli parça üretimi gibi avantajları vardır. Ancak, seri üretim ve büyük parça üretiminde bazı sınırlamalara sahiptir [34]. Geleneksel üretim yöntemlerine kıyasla eklenebilir imalat, maliyet düşürme avantajları sunarak uzay tabanlı faaliyetleri daha erişilebilir kılabilir. Son zamanlarda NASA, Alabama’daki Marshall Uzay Uçuş Merkezi’nde (MSFC), roket motoru bileşenleri için çeşitli AM tekniklerine yönelik yoğun Ar-Ge çalışmaları yapmıştır. Örneğin, AM tekniği kullanılarak üretilen koaksiyel girdaplı enjektör, küçük uydu fırlatma aracı programı için başarıyla test edilmiş ve NASA tarafından sıvı roket motoru uygulamalarında kullanılan birçok başarılı enjektör sıcak ateş testine tabi tutulmuştur [35]. Bunun yanı sıra, AM süreçlerindeki gelişmeler, medikal, dental ve endüstriyel uygulamaların artmasına da katkı sağlayabilir. Bazı süreçlerin gelecekte kullanılmaması veya yeni yöntemlerin piyasaya girmesi mümkündür [36]. Bu teknolojinin ilerlemesiyle birlikte AM süreçlerinin kapsamı, hızlı prototiplemeden başlayarak, havacılık, otomotiv, biyomedikal ve diğer uygulamalara ait takımların ve nihai ürün parçalarının hızlı üretimi yapılabilir. AM teknolojisi, geleneksel üretim yöntemlerine kıyasla bir dizi avantaj sunsa da halen birçok endüstri tarafından ihtiyatla karşılanmaktadır. Bu nedenle, tasarımlar, malzemeleri, yeni süreçleri, makineler, süreç modelleme ve kontrol açısından gelişmeye daha fazla ihtiyaç olduğu düşünülmektedir. Böylece bu tür endüstri, araştırma ve sektörler tarafından daha fazla kabul görebilir [37].

## 5. Sonuçlar ve Tartışma (Results and Discussion)

Bu çalışmanın amacı, bir ürünün montaj edilebilirliğini değerlendirmede önemli olan ilkeleri göstermek olmuştur. DfAM yöntemleri kullanılarak ürünün montaj tasarımı için çeşitli uygulamalar ve elde edilen sonuçlara göre bu yöntemlerin ne derece etkin ve geçerli olduğu gösterilmiştir. Montaj kolaylığı için ürünün tasarım aşamasında olası problemleri önleyecek zaman, malzeme, işçilik ve maliyetten tasarruf edilmesi prensibine dayalı bir çalışma yapılmıştır. AM, geleneksel üretim yöntemlerine kıyasla bir dizi avantajlar sunar. Bu yöntem, tasarım serbestliği sağlayarak karmaşık geometrilerin kolayca üretilmesine imkân sağlar. Hızlı prototip üretimi sayesinde tasarım

değişiklikleri daha hızlı uygulanabilir ve ürün geliştirme süreçleri kısalmıştır. Malzeme tasarrufu, sadece ihtiyaç duyulan bölgelere malzeme eklenerek maliyetleri azaltır. Kişileştirilmiş üretim, müşteri taleplerine daha hızlı cevap verme olanağı sağlar. AM, entegrasyonu kolaylaştırır ve montaj sürecini basitleştirir. Düşük üretim maliyetleri ve çevre dostu üretim uygulamaları da bu yöntemin avantajları arasında yer alır. Bu nedenlerle, AM birçok endüstride giderek daha popüler hale gelmiştir. Ancak, her yöntemin kendine özgü avantajları ve kullanım alanları da vardır. Gelecekteki endüstriyel üretimde, DfA yaklaşımı ve AM yöntemleri, ürün tasarımını optimize ederek montaj verimliliğini artıracak, hataları azaltacak ve üretim maliyetlerini düşürecek önemli evrimlere yol açacaktır. AM, karmaşık geometrilili parçaların üretimi ve kişileştirilmiş ürünlerin geliştirilmesinde öncü bir rol oynayacak, malzeme kullanımını minimize ederek sürdürülebilir üretimi destekleyecek ve ayrıca hızlı prototipleme ile zaman tasarrufu da sağlayacaktır. Bu değişim havacılık, tıbbi cihazlar, otomotiv ve savunma sanayi gibi sektörlerde, endüstri 4.0 ve dijital dönüşümü destekleyerek üretim süreçlerini daha esnek, verimli ve ekonomik hale getirecektir. Bu durum ürün özelleştirmesini teşvik, stok maliyetlerini düşürme ve çevresel sürdürülebilirliği artırma gibi avantajlar sağlayabilir. Genel olarak bu çalışmada DfAM yaklaşımının kullanılması montaj ve bakım süreçlerini düşürdüğü, ürün tasarım sürecini azalttığı ve üretim maliyetlerini minimize ettiği görülmüştür. Malzeme israfını önleme, üretim ve montaj zorluklarını aşmak için DfAM veya kolay montaj için tasarım yaklaşımı kullanılabilir. Böylece tasarımı inceleme, gereksiz parçaları veya özellikleri azaltma (yani tasarımı sadeleştirme), montaj etkinliğini iyileştirme, zaman tasarrufu ve maliyeti düşürme amaçlanır. Bu bağlamda, bir tasarıma başlamadan önce montaj verimliliğini artırmaya yönelik değerlendirme yapılması gerekir. Bu araştırma benzeri çalışmalarda, mühendislik tasarımı metodolojileri ve elemanlarına aşına olunarak, sadece iyi montaj tasarımları değil aynı zamanda daha iyi ve daha ekonomik ürünler geliştirilebilir. Bunları gerçekleştirme için ise DfAM yaklaşımı ve kolay montaj kapsamlı çalışmalar yapılmalıdır.

### Çıkar Çatışması Beyanı (Conflict of Interest Statement)

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması bildirilmemiştir.

### Kaynaklar (References)

- [1] H. R. Börklü, *Mühendislik Tasarımı: Sistematik Yaklaşım*, Hatiboğlu Yayınları, Türkiye, 2010.
- [2] M. Aydın, "Makine Üretiminde Montaj İçin Tasarım Uygulaması," Yüksek Lisans Tezi, Pamukkale Üniversitesi, Türkiye, 2020.
- [3] T. Bayyığıt, "Sistematik Yaklaşımla Kolay Montaj İçin Tasarım," Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Türkiye, 2013.
- [4] A. Ustundag, E. Cevikcan, O. F. Beyca, G. Hancerliogullari ve I. Yazici, *Industry 4.0: managing the digital transformation*, Springer, Türkiye, 2017, pp. 217-234.
- [5] H. K. Sezer, O. Eren, H. R. Börklü ve V. Özdemir, "Additive Manufacturing of Carbon Fiber Reinforced Plastic Composites by Fused Deposition Modelling: Effect of Fiber Content and Process Parameters On Mechanical Properties," *Journal of The Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, vol. 34, no. 2, pp. 664-674, 2019. doi:10.17341/gazimmfd.416523
- [6] O. Doğan ve M. S. Kamer, "Eklemeli İmalat Yöntemi ile Optimum Düz Dişli Çark Tasarımı ve Üretimi," *Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, vol. 10, no.3, pp. 1093-1103, 2021. doi:10.17798/bitlisfen.912566
- [7] A. Alfaify, M. Saleh, F. M. Abdullah ve A. M. Al-Ahmari, "Design for additive manufacturing: A systematic review," *Sustainability*, vol. 12, no. 19, pp. 7936, 2020. doi:10.3390/su12197936
- [8] Ö. Kasar, "3 Boyutlu Yazıcı ile Üretilen Düşük Maliyetli Çift Sırtlı Horn Anten Tasarımı ve Üretimi," *Artvin Çoruh Üniversitesi Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi*, vol.1, no. 2, pp. 82-88, 2023.
- [9] S. Kaya, T. Güngördü ve M. A. Özel, "Eklemeli İmalat ile Üretilen Esnek Flap Mekanizmasının Tasarımı ve Yorulma Testi," *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, vol. 23, no. 69, pp. 951-960, 2021. doi:10.21205/deufmd.2021236922
- [10] C. Şanlıer, H. R. Börklü ve C. Eldem, "Dizüstü Bilgisayar Sehpa Tasarımı: Geleneksel ve Yeni İmalat Yöntemleri İçin Yapılan Tasarımlar ve Karşılaştırılması," *International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry*, vol. 5, no. 1, pp. 65-75, 2021. doi:10.46519/ij3dptdi.836004
- [11] N. Top, H. Gökçe ve İ. Şahin, "Eklemeli İmalat için Topoloji Optimizasyonu: El Freni Mekanizması Uygulaması," *Selçuk-Teknik Dergisi*, vol. 18, no. 1, pp. 1-13, 2019.
- [12] D. S. Aydın, "Eklemeli İmalat Yöntemiyle Üretilen Ti6Al4V Alaşımının Havacılıktaki Uygulamaları Üzerine Bir Derleme," *Journal of Aerospace Science and Management*, vol. 1, no. 1, pp. 64-77, 2022.
- [13] M. Y. Kayacan ve M. Alshihabi, "Havacılık uygulamalarında eklemeli imalat için uyarlanabilir topoloji optimizasyonu,"



*Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, vol. 30, no. 2, pp. 1-9, 2023. doi:10.5505/pajes.2023.52578

[14] C. Sinanoglu ve H. R. Borklu, "An Assembly Sequence-Planning System For Mechanical Parts Using Neural Network," *Assembly Automation*, vol. 25, no. 1, pp. 38-52, 2005. doi:10.1108/01445150510578996

[15] G. Boothroyd, P. Dewhurst ve W. A. Knight, "Product Design for Manufacture and Assembly," *CRC Press*, 2010. doi: 10.1201/9781420089288

[16] S. Gao, R. Jin ve W. Lu, "Design for manufacture and assembly in construction: a review," *Building Research & Information*, vol. 48, no. 5, pp. 538-550, 2020. doi:10.1080/09613218.2019.1660608

[17] G. Boothroyd, "Assembly Automation and Product Design," *CRC Press*, 2005. doi:10.1201/9781420027358

[18] [Online]. Available: <http://www.dfma.com/> [Erişim: 21 Mayıs 2023].

[19] Ö. Karaçalı ve H. İ. Demirci, "Otomotiv Endüstrisinde Montaj İçin Tasarım Metodu," *5. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu (IATS'09), 13-15 Mayıs 2009, Karabük, Türkiye* [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/275580377>. [Erişim: 1 Eylül 2023].

[20] M. Akdağ, "Otomotiv Sanayi İçin Ürün Geliştirme ve Düşük Maliyetli Yeni Ürün Tasarımı," Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Türkiye, 2010.

[21] Z. Nihan, "McDonnell Douglas," Ekim 2010, [Online]. Available: <https://ucaklar.org/mcdonnell-douglas/> [Erişim: 15 Ağustos 2023].

[22] [Online]. Available: <https://docplayer.biz.tr/54965875-Imalat-ve-montaj-icin-tasarim-design-for-manufacturing-and-assembly-dfma.html> [Erişim: 20 Ağustos 2023].

[23] K. Özsoy ve B. Duman, "Eklemeli İmalat (3 Boyutlu Baskı) Teknolojilerinin Eğitimde Kullanılabilirliği," *International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry*, vol. 1, no. 1, pp. 36-48, 2017.

[24] S. Çaşka, G. Ö. K. Kadir, M. Aydın ve İ. Özdemir, "Finite element method based structural analysis of quadcopter UAV chassis produced with 3D printer," *Journal of Science and Technology of Dumlupınar University*, no. 044, pp. 24-32, 2020.

[25] H. K. Sürmen, "Eklemeli İmalat (3B Baskı): Teknolojiler ve Uygulamalar," *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, vol. 24, no. 2, pp. 373-392, 2019. doi:10.17482/uumfd.519147

[26] B. Aslan, "Yenilikçi Tasarım Yöntemleri Kullanarak Eklemeli İmalata Yönelik Optimum Ürün Geliştirilmesi," Yüksek Lisans Tezi, Bursa Teknik Üniversitesi, Türkiye, 2019.

[27] B. Duman ve M. C. Kayacan, "Seçmeli Lazer Sinterleme Tezgâhı için İmalat Yazılımı Geliştirilmesi," *Uluslararası Teknolojik Bilimler Dergisi*, vol. 8, no. 3, pp. 27-45, 2016.

[28] S. Dash, "Design of flexible lattice structures: a design for additive manufacturing perspective," Lisans Tezi, Lund Üniversitesi, İsveç, 2023.

[29] S. K. Mangla, Y. Kazancoglu, M. D. Sezer ve N. Top, İ. Şahin, "Optimizing fused deposition modelling parameters based on the design for additive manufacturing to enhance product sustainability," *Computers in Industry*, vol. 145, pp. 103833, 2023. doi: 10.1016/j.compind.2022.103833

[30] "Eklemeli İmalat Ürün ve Hizmetlerimiz," [Online]. Available: <https://digi-mode.com.tr/eklemeli-imalat/> [Erişim: 2 Eylül 2023].

[31] A. Wiberg, J. Persson ve J. Ölvander, "Design for additive manufacturing – a review of available design methods and software," *Rapid Prototyping Journal*, vol. 25, no. 6, pp. 1080-1094, 2019. doi:10.1108/RPJ-10-2018-0262

[32] M. Obi, "Investigating an approach for the dissemination of formalised Design for Additive Manufacturing knowledge," Doktora Tezi, Loughborough Üniversitesi, Birleşik Krallık, 2022. doi:10.26174/thesis.lboro.23633742.v1

[33] "Eklemeli İmalat Nedir?," [Online]. Available: [https://www.sfm yazilim.com/eklemeli\\_imalat\\_nedir.html](https://www.sfm yazilim.com/eklemeli_imalat_nedir.html) [Erişim: 20 Temmuz 2023].

[34] E. Karayel ve Y. Bozkurt, "Additive manufacturing method and different welding applications," *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 9, no. 5, pp. 11424-11438, 2020. doi:10.1016/j.jmrt.2020.08.039

[35] B. Blakey-Milner, P. Gradl, G. Snedden, M. Brooks, J. Pitot, E. Lopez, M. Leary, F. Berto ve A. Du Plessis, "Metal additive manufacturing in aerospace: A review," *Materials & Design*, vol. 209, 2021. doi:10.1016/j.matdes.2021.110008

[36] M. Salmi, "Additive manufacturing processes in medical applications," *Materials*, vol. 14, no. 1, pp. 191, 2021. doi: 10.3390/ma14010191

[37] Z. Özgüner, *Eklemeli İmalat Sistemlerinin Endüstri 4.0 Kapsamında Uygulamaları*, Efeakademi Yayınları, Türkiye, 2022.

This is an open access article under the CC-BY license

