

## EKLEMELİ İMALAT VE TOPOLOJİ OPTİMİZASYONU KULLANILARAK ÜRETİLEN EKİPMAN BRAKETİ UZAY KALİFİYESİNİN İNCELENMESİ

H. Canberk ATAÇ<sup>1</sup>  
TUSAŞ Türk Havacılık ve Uzay Sanayii A.Ş.,  
ANKARA

Z. Özge GÖÇMEN<sup>2</sup>  
TUSAŞ Türk Havacılık ve Uzay Sanayii  
A.Ş., ANKARA

### ÖZET

*Yapısal alt sistem, Uzay Aracı (Uydu) ekipmanlarını ve birincil yapıyı bir arada tutarak Uydu'nun çevresel koşullar altında karşılaştığı tüm yüklerle dayanacak şekilde tasarlanan alt sistemdir.*

*Türk Havacılık ve Uzay Sanayii Uzay Sistemleri tarafından Elektronik Işın Ergitme (EIE) yöntemi ile Titanyum malzemeden Eklemeli İmalat Yöntemi (EİY) kullanarak uydu ikincil yapısal parçası olan braket üretilmiştir. İkincil yapı parçaları olarak, bağlantı elemanları ve ekipmanları tutan braketleri sayabiliriz.*

*Bu çalışmada Eklemeli İmalatlı yapıların tasarım ve üretim yöntemleri irdelenmektedir. EİY uygulamaları ve tasarım/analiz/üretim adımlarının nasıl gerçekleştirildiği anlatılmıştır. Talaşlı İmalat ile üretilen Tepki Teker (TT) braketinin kütle optimizasyonu, karşılaşılan zorluklar ve Ti6Al4V-5 tozu kullanılarak Elektronik Işın Ergitme üretim süreci tarafından tasarımdan üretime kadar gerçekleşen yapısal mühendislik çözümlerinin adımları sunulmaktadır. Ayrıca; bir sonraki Elektronik Işın Ergitme yapılarının tasarım, kütle, katılık ve üretim prosesini geliştirme ve optimize etmedeki ilk deneyimden gelecekteki geliştirme çalışmalarında nasıl faydalanılacağı açıklanmıştır.*

**Anahtar kelimeler:** Eklemeli İmalat, Katmanlı Üretim, Elektronik Işın Ergitme, 3 Boyutlu Baskı, Titanyum

### GİRİŞ

3 boyutlu baskı, hızlı prototip üretme ya da serbest formlu üretim adları da verilen Eklemeli İmalat (Eİ), “makineyle işleme gibi çıkarmalı üretim yöntemlerinin aksine, malzemelerin 3 boyutlu model verilerinden nesneler yapmak için genellikle üst üste katmanlar şeklinde birleştirilmesi sürecidir” [J. Zhang, Y. Jung, 2018].

ASTM standardı F2792-10'a göre Eİ, “geleneksel makineyle işleme gibi çıkarmalı üretim metodolojilerinin aksine, malzemelerin 3 boyutlu model verilerinden nesneler yapmak için genellikle üst üste katmanlar şeklinde birleştirilmesi sürecidir” [J. Zhang, Y. Jung, 2018].

Eİ metal tozları ile birlikte kullanılması ile yeni ve hızla büyümekte olan bir endüstri sektörüdür ve bu alanda önde gelen şirketlerin çoğu Avrupa'da bulunmaktadır. Bu yöntem, daha önce olduğu gibi sadece prototipler değil, metalden bitmiş şekilli karmaşık parçalar üretmek için de uygun bir yöntemdir ve otomotiv, havacılık, uzay ve medikal alanlarında katma değeri yüksek parçaların üretiminde hızla kullanımı artmaktadır.

Eklemeli üretim artık havacılık-uzay, enerji, otomotiv, tıp, aletler ve tüketici ürünleri gibi hafifletme ve enerji tasarrufu sağlayan ve katma değeri yüksek çeşitli endüstriyel sektörlerde tasarım ve endüstriyel devrime dönüşebilecek nitelikte görünmektedir.

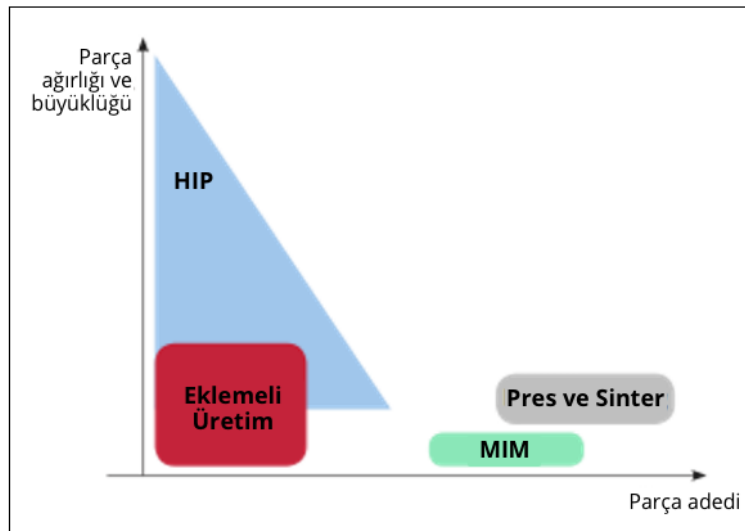
Eİ, diğer toz metalürjisi (TM) teknolojilerini tamamlayıcı niteliktedir. Sıcak İzostatik Presleme (SİP) gibi, Eİ de küçük ve orta büyüklükte parça serilerinin üretimi için daha uygundur. SİP

<sup>1</sup> Yapısal Tasarım Mühendisi, E-posta: halilcanberk.atac@tai.com.tr

<sup>2</sup> Şef, Yapısal Tasarım, E-posta: ogocmen@tai.com.tr

prosesi genellikle birkaç yüz kilogramlık büyük bitmiş ürüne yakın şekilli parçaların üretimi için kullanılırken, Eİ prosesi birkaç kilogramlık daha küçük parçalar için daha uygundur ve daha yüksek tasarım serbestisi sayesinde karmaşık metal parçaların üretilmesi için uygun bir kabiliyet sağlamaktadır. Eİ yöntemi ile gerekli geometrik hassasiyetler 30cm den büyüklere göre, küçük parçalarda daha iyi sağlanabilmektedir. Mevcut teknolojik duruma bakıldığında; 60-80cm ölçülerinde parçalar Eİ ile üretilse de geometrik hassasiyetler düşmektedir. Burada Eİ yöntemine uygun ve montaj ve entegrasyonu kolay tasarımların önemi ortaya çıkmaktadır. Ayrıca istenilen hassasiyette üretilen parçaların birleştirme ve bağlantı yöntem tasarımları çalışılması gerekmektedir. Toplamda Eİ yöntemi için tasarım (EİYT) konusunun önemli olduğu ayrıca bu konudaki duyarlılık ve bilginin edinilmesi, seviyesinin yükseltilmesi eğitimlerin verilmesini de gerektirmektedir.

Metal Enjeksiyon Kalıplama (MEM) ile pres ve sinterleme teknolojileri de bitmiş şekilli parçalar üretme olanağı sunmaktadır, ancak bunlar büyük hacimli küçük parça serileri için önerilmektedir.



Şekil 1 Farklı Toz Metalurjisi teknolojilerinin parça büyüklüğü ve ağırlığının üretim adedine göre karşılaştırması [Project Managers (PM), “Additive Manufacturing Tutorial” (Erişim 18 Ocak 2020)]

Metal eklemeli imalat teknolojileri birçok temel fayda sunmaktadır [B. Durakovic, 2018]

- Konvansiyonel döküm ve makineyle işlemeye karşı daha yüksek tasarım serbestliği
- Ya kafes yapıları tasarımının kullanılmasıyla ya da parçaların – başka kısıtlamalar olmadan – malzeme sadece olması gereken yerde olacak şekilde tasarlanmasıyla mümkün kılınan hafif yapılar
- Karmaşık iç kanallar ya da tek bir parça halinde üretilmiş birkaç parça gibi yeni fonksiyonlar
- Bitmiş şekil süreci, makineyle işlemeye karşı 25 kata kadar daha az ham madde tüketimi anlamına gelmektedir ve pahalı ya da işlenmesi zor alaşımlar söz konusu olduğunda önemlidir. Bitmiş şekil kabiliyeti, karmaşık parçaların tek bir adımda oluşturulmasına yardımcı olur, böylece kaynak ve sert lehimleme gibi birleştirme işlemlerinin sayısını azaltır.
- Kalıplar ya da metal şekillendirme ve çıkarma aletleri gerektiren diğer konvansiyonel metalürji proseslerinin aksine alet gerekli değildir.
- Kısa üretim döngüsü süresi: karmaşık parçalar, eklemeli makinelerde birkaç saatte katmanlar halinde üretilir. Son işlemler (post-processing) dahil toplam döngü süresi genellikle birkaç gün ya da hafta kadardır ve çoğu kez birkaç aylık üretim süreleri gerektiren konvansiyonel metalürji süreçlerinden genellikle çok daha kısadır.

- Daha az malzeme kaybı: Talaşlı İmalat işleme prosesi birçok malzeme kaybına sebebiyet vermektedir. Malzemelerin katı blok parçalardan işlenerek azaltılması söz konusudur. Bunun aksine; 3 boyutlu baskı sadece parçayı yaratmak için gerekli olan malzemeyi kullanır, böylelikle çok az malzeme kaybı meydana gelir.

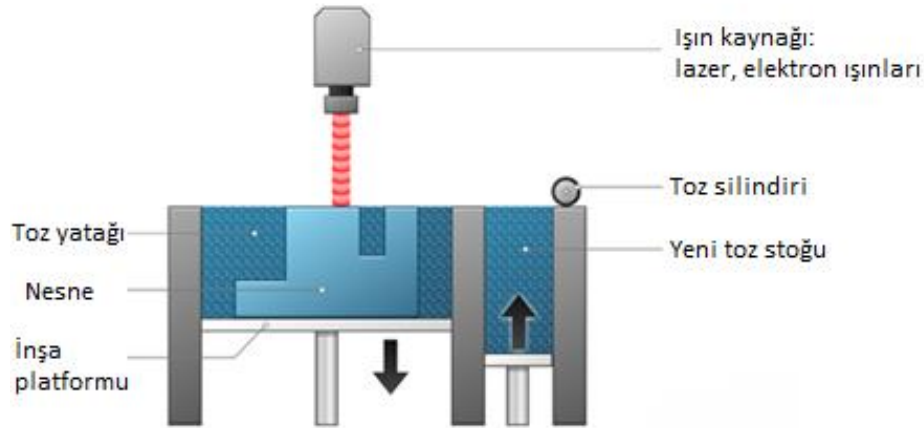
Proses, parçaların küçük seriler halinde üretimi için önerilmektedir.

Eİ teknolojilerinden tam olarak faydalanabilmek ve yöneme uygun tasarımlar oluşturabilmek için, aşağıda sıralanan kısıtların farkında olmak gereklidir [B. Durakovic, 2018]:

- Limitli parça büyüklüğü: Toz yatak teknolojisinde, parça boyutu, standart toz yatak sistemleri için 250x250x250 mm olan toz yatak boyutu ile sınırlıdır. Bununla birlikte, doğrudan enerji biriktirme (ya da lazer metal biriktirme) süreçleri ile parça boyutları daha büyük olabilir. Ancak toz katmanlarının düşük kalınlığı nedeniyle, yüksek parçaların ya da büyük parçaların yapılması çok yavaş ve maliyetli olabilir.
- Üretim serileri: Eİ prosesleri genellikle üniter ya da küçük seriler için uygundur ve toplu üretim için uygun değildir. Ancak makine üretkenliğini arttırma ve dolayısıyla daha büyük serilerin üretimine olanak verme yolunda ilerlemeler kaydedilmektedir. Küçük boyutlu parçalar için, yılda 25000 parçaya kadar seriler hâlihazırda mümkündür.
- Parça tasarımı: toz yatak teknolojisi ile ilgili olarak, çıkıntı (overhang) açısı 45°'nin altında olduğunda sökülebilir destek yapıları gereklidir.
- Malzeme seçimi: birçok alaşım mevcut olmakla birlikte, kaynaklanabilir olmayan metaller eklemeli imalat ile işlenemez ve kaynaklanması zor alaşımlar ise özel yaklaşımlar gerektirir.
- Malzeme özellikleri: eklemeli imalat ile üretilen parçalar, Z ekseninde (yapım yönü) anizotropi (eşyönlülük) gösterme eğilimindedir.
- Bunun yanında, %99,9'a kadar yoğunluklara ulaşılabilir olmakla birlikte, bazı artık iç poroziteler (gözeneklilik) olabilir. Mekanik özellikler döküm parçalara göre genellikle daha üstün nitelikli, ancak dövme parçalara göre genellikle daha düşük niteliklidir.

Bu çalışmada kullanılan Eİ yöntemi, Toz Yatak Füzyonu (Powder Bed Fusion) proseslerinden bir tanesidir. Toz Yatak Füzyonu (Şekil 2), erimiş metalin korunmasını sağlamak için inert atmosferde veya kısmi vakumda yapılır. Bir enerji kaynağı (Lazer veya elektron ışını), materyali seçici olarak eritecek şekilde, önceden yayılmış tozun her bir tabakasını taramak için kullanılır. Bir katman tarandığında, yapım platformu pistonu aşağıya doğru ve toz odası pistonu, tanımlanan tabaka kalınlığı kadar yukarı doğru gider.

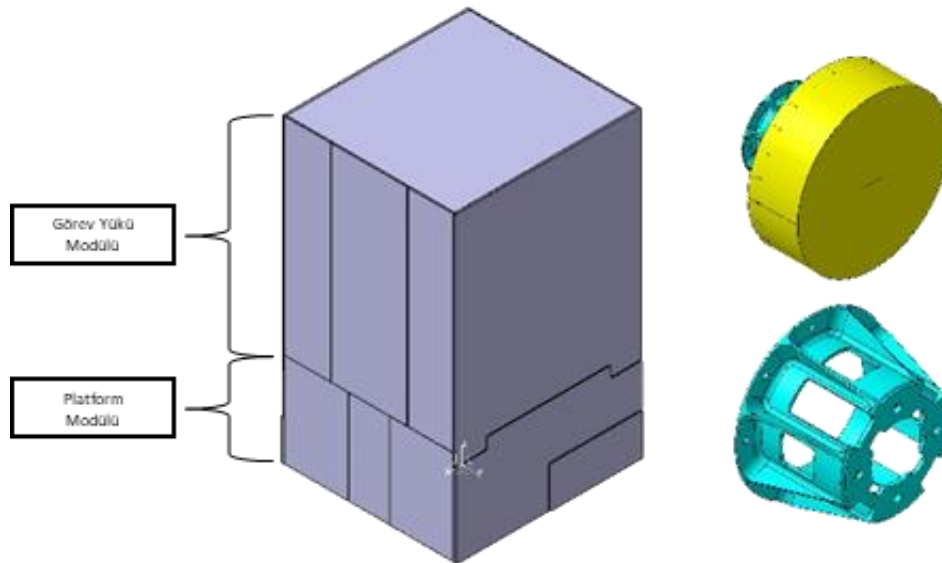
- Yapı platformu üzerinde genellikle 0.1 mm kalınlığında (İşleme, makineye vb. parametrelere göre değişiklik gösterir) bir toz tabakası yayılır.
- Bir lazer, modelin ilk tabakasını veya ilk kesitini eritir.
- Bir silindir kullanılarak bir önceki katmanın üzerine yeni bir toz tabakası yayılır.
- Daha sonraki tabakalar veya kesitler eritilir ve kaynaştırılır.
- Süreç, tüm model oluşturuluncaya kadar tekrarlanır. Gevşek, kaynaşmamış-erimemiş toz kalır ancak işlem sonrasında sırasında uzaklaştırılır.



Şekil 2 Toz Yatak Füzyonu Prosesi [Loughborough University (LU), “The 7 Categories of Additive Manufacturing: Powder Bed Fusion” (Erişim 10 Ocak 2020.)]

## YÖNTEM

Çalışma kapsamında Yörünge Yönelim ve Kontrol Alt Sistemi (YYBKS)’ne ait Tepki Tekerinin yapısal paneller ile arayüzünü/montajını sağlayacak ve temel gereksinimleri karşılayacak destek braketine ait kütle, katılık, topoloji optimizasyon ve üretim çalışmaları yapılmıştır.



Şekil 3 Tepki Teker ve Destek Braket Tasarımı

Şekil 3’te yer alan örnek bir haberleşme uydusu YYBKS bileşeni olan Tepki Tekeridir. Platform Modülü’nde yer alan bu alt sistemin temel hedefi mevcut yörüngedeki konum bilgisini ve yöneliminin belirlenmesidir. Tepki Teker, aynı zamanda moment kontrol jireskobu veya moment tekeri olarak da bilinen uydu oryantasyon/yönelim kontrol mekanizmasıdır. Tepki tekerleri nominal hızları üzerinde pozitif veya negatif yönde ivmelendirilerek dönme eksenleri yönünde tork üretirler ve uzay aracı için gerekli yönelim momentumları oluştururlar. Uydu oryantasyonunda küçük dereceli düzeltmeler için kullanılır. Temel prensip açısal momentumu korumaktır. Bunun için elektrik motorları ile çalıştırılan tekerlerin açısal hızları değiştirilir. Genellikle özdeş olan moment tekerleri normal koşullarda eşit ve zıt yönlü tork oluşturmak için eşit hızlanma ile zıt yönlerde dönerler. Yönelimi sağlamak gerektiğinde moment tekerlerinin hız değişimleri arasında birbirlerine göre fark oluşturulur. Böylece toplamda sıfır olan tork vektörü bir yönde sıfırdan farklı bir değer kazanır. Bu da moment tekerinin bağlı olduğu düzlemin hareket etmesini sağlar

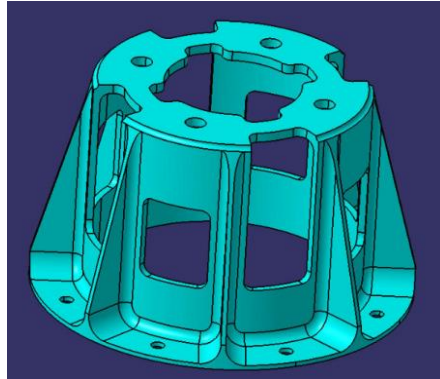
[Kenney, 2005].

TT destek braketine ait tasarım/analiz/üretim aşamalarında hem ekipman seviyesi hem de uydu-sistemi seviyesi bazında dikkat edilecek ana gereksinimler aşağıdaki şekilde verilebilir:

- Gerekli mekanik performanslar
  - Rijit arayüzlerde ilk doğal frekansın minimum 140Hz olması
  - Uydu üzerinde ilk doğal frekansın minimum 80Hz olması
  - 349 gramdan az bir kütle
  - Sanki-statik yükleme (3-eksen 20g) altında pozitif güvenlik marjı [ECSS, 2008]
- Tanımlanmış olan hacimde geometrik gereksinimler
  - TT'yi  $\pm 0.2^\circ$  pozisyonunda tutmak
  - TT yüzey düzlemselliği 0.1mm / 100mm
  - Uydu yapısı ile M5 cıvata bağlantısı
  - TT ile 4 adet M8 cıvata bağlantısı

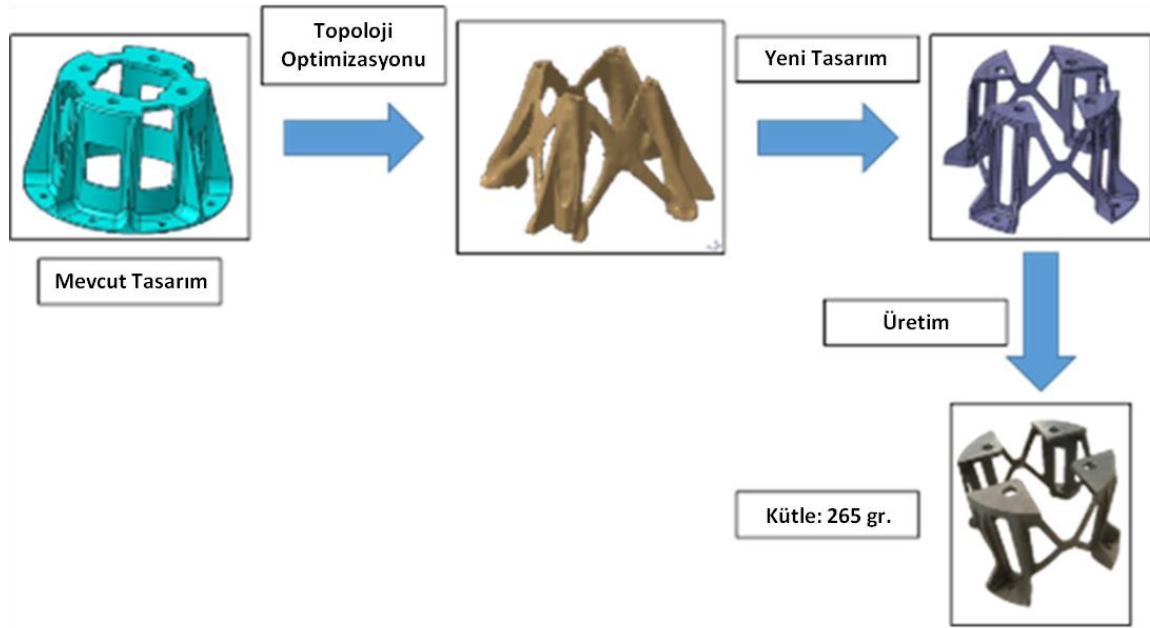
Bu çalışmada kütle ve topoloji optimizasyonu yapılan konvansiyonel destek braket tasarımına (Şekil 4) ait özellikler aşağıdaki gibidir:

- Malzeme : 7050-T7451 Alüminyum
- Kütle : 0.349 kg
- Maks. Gerilme : 87.25 MPa
- Deformasyon : 0.182 mm
- Doğal Frekans :
  - İlk : 165.6 Hz
  - İkinci : 166.0 Hz
  - Üçüncü : 450.1 Hz



Şekil 4 Tasarım ve Üretimi yapılan TT Destek Braketi

TT braketi üretiminden önce tasarım/analiz/optimizasyon döngüsü yapıp sonra iyileştirilmiş tasarım ile Eİ aşaması başlatılmaktadır. Ancak geleneksel tasarım ve doğrulama döngüsü, numune Bilgisayar Destekli Tasarım (Computer Aided Design) ile direkt olarak çizildi ve sistem seviyesi kontrol edildi ise, konsept aşamada mekanik analize ihtiyaç duyulmamaktadır. EİE numuneleri için, Şekil 5'te gösterilen topoloji optimizasyonu gibi bir adım ilave edildiğinde bu döngüye mekanik analizler de adapte edilebilir.

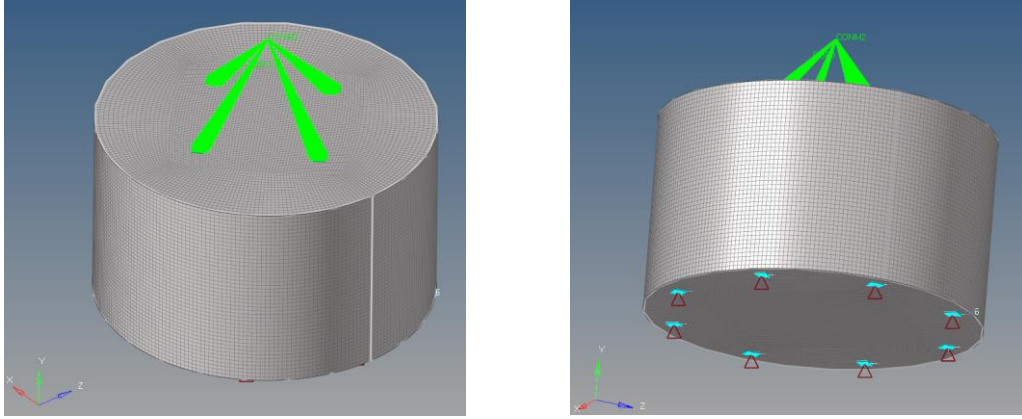


Şekil 5 EIE numunesi için Topoloji Optimizasyon tasarım adımları

Topoloji optimizasyonu için ilk önce braketin sığabileceği dolu hacmi verilmektedir. Bu hacim, analizleri gerçekleştirebilmek için kullanılacak olan ilk optimizasyon modelini oluşturur. Topoloji optimizasyonu tasarım modeli üzerine; sırası ile sonlu eleman modeli oluşturulması, sınır koşullarının ve yük durumlarının tanımlanması, optimizasyon sürecindeki objektif fonksiyonun tanımlanması, optimizasyon sürecinin kısıtlamalarının tanımlanması adımlarından oluşur. EIE yapısının El için tasarımı ancak bir optimizasyon yazılımının kullanılması ile hafifletme ve katılık artırımı gibi yönleriyle avantajlı hale gelir. Bu çalışmada topolojik optimizasyon Türk Havacılık ve Uzay Sanayii'nde Altair HyperWorks 2017 yazılımı altındaki HyperWorks optimizer: OPTISTRUCT kullanılarak yapılmıştır.

Topoloji optimizasyonuna başlayabilmek için sonlu elemanlar modeli oluşturulmalıdır. Bunun için konvansiyonel braket ve gereksinimleri dikkate alınarak tasarım alanı ve tasarım dışı alanlar belirlenir. Tasarım alanı, geometri üzerinde topoloji optimizasyonuna açık olan bölgeleri; tasarım dışı alan ise üzerinde herhangi bir optimizasyon ya da iteratif proses istenmeyen bölgeleri tanımlar. Kullanılan braketin kapalı hacim geometri modeli CATIA yazılımı ile oluşturulmuş ve HyperMesh programına aktarılmıştır (Şekil 6). Bu kapalı hacim konvansiyonel parçanın (Şekil 4) içine yerleşebilen minimum dış hacmini tanımlar. Şekil 6, destek braketinin bağlantı noktalarını ve sınır şartlarını göstermektedir.

Dolu dış hacim tasarlandıktan sonra, geometri üzerine mesh boyutu istenen minimum kalınlıktan küçük ya da eşit olacak şekilde sonlu elemanlar ağı (mesh) oluşturulmuştur. Optimizasyon çalışmasına başlayabilmek için malzeme olarak seçilen Ti6Al4V toz özellikleri de tanımlanmalıdır. Mesh tamamlandıktan sonra, TT kütle ve atalet değerleri temsil eden CONM2 eleman eklenir. CONM2 eleman ile TT'nin destek braketini ile olan bağlantı noktaları arasındaki bağlantı RBE3 eleman ile bağlanır. Böylelikle TT ile destek braketini arasındaki bağlantı Şekil 6'da gösterilen şekilde tanımlanmış olur. Daha sonra, sınır şartları tanımlanır. Şekil 6'daki kırmızı üçgenler, destek braketini ile Uydu panelleri arasındaki SPC olarak tanımlanan bağlantı noktalarını göstermektedir. Her SPC 6 yönde tutulmuştur.



Şekil 6 TT ve destek braket hacmi arasındaki bağlantı ile Sınır Şartlarının belirlenmesi

Sınır şartları uygulandıktan sonra, yük kolektör ve yük adımları Şekil 7'deki gibi tanımlanır. Modal durum, Lanczos metodu kullanılarak gerçekleştirilen modal analizi gösterirken; X\_20g, Y\_20g ve Z\_20g ise X, Y ve Z eksenlerindeki statik analizleri göstermektedir.

|                     |   |  |   |
|---------------------|---|--|---|
| Load Collectors (5) |   |  |   |
| Modal               | 1 |  | 0 |
| SPC                 | 2 |  | 0 |
| X_20g               | 3 |  | 0 |
| Y_20g               | 4 |  | 0 |
| Z_20g               | 5 |  | 0 |
| Load Steps (4)      |   |  |   |
| Modal               | 5 |  | 0 |
| X_20g               | 6 |  | 0 |
| Y_20g               | 7 |  | 0 |
| Z_20g               | 8 |  | 0 |

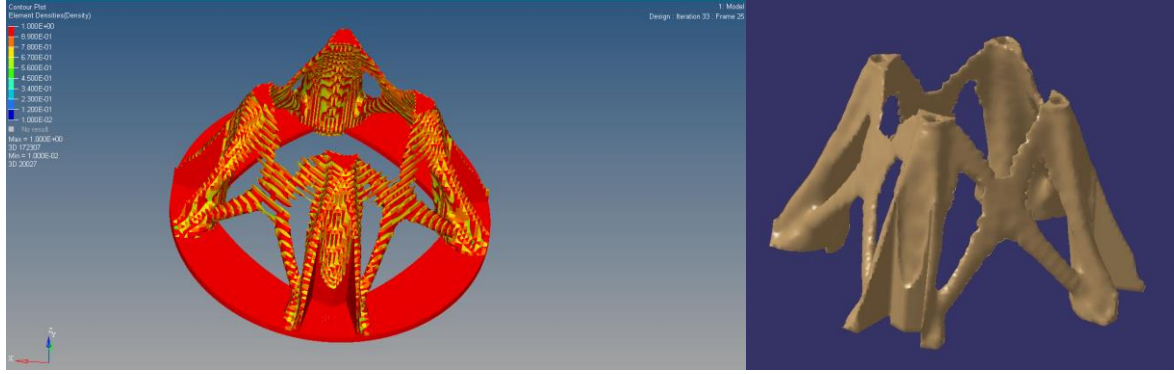
Şekil 7 Yük kolektör ve yük adımlarının tanımlanması

Yük kolektör ve yük adımları tanımlandıktan sonra, optimizasyon parametreleri belirlenir. Bu parametreler amaç fonksiyonu ve kısıtlamalardır. Optimizasyon sürecinde kullanılacak optimizasyon yanıtları, bu parametrelerin tanımlanması optimizasyonun girdileri olarak önemlidir. Bu yanıtlar hacim oranı ve uygunluk endeksi değerleridir. Hacim oranı, optimizasyon işlemi sırasında kullanılacak hacmi temsil eder (0 ile 1 arasında değerler alır. 0, hacmin% 0'ı, 1 hacmin% 100'ü anlamına gelir). Uygunluk endeksi, her bir yük adımı için 1 / sertlik değerini temsil eder. Bu yanıt türü için, farklı yük aşamaları için farklı önem katsayısı (ağırlık değeri) vermek mümkündür.

Yanıtlar tanımlandıktan sonra, optimizasyonun nesnel işlevi tanımlanır. Bu tür bir örnekteki gibi birçok durumda, uyumluluk endeksinin en aza indirilmesi objektif fonksiyon olarak tanımlanır. Ayrıca, işlemin bu adımı, hangi hacmin optimize edilmesi gerektiğini tanımlamak için tasarım değişkeni seçilir.

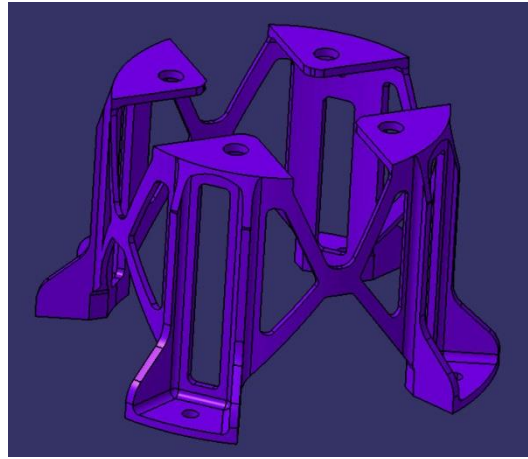
Kısıtlamalar, tanımlanmış optimizasyon yanıtlarına üst veya alt sınırlar vermek için kullanılır. Bu örnekte, optimum şekil hakkında bir fikir sahibi olmak için 0.1 değeri olan üst sınır kullanılır.

Optimizasyon, tanımlanmış objektif fonksiyon ve kısıtlamalar ile analiz yapıldıktan sonra tamamlanır. Daha sonra, son şekil aşağıdaki Şekil 8'e benzer. Eleman yoğunluk eşliğini değiştirerek, yapısal tasarım mühendisi için mantıklı olan optimum şekli bulmak mümkündür.



Şekil 8 HyperMesh 2017 tarafından oluşturulan .stl dosyası

.stl dosyası yaratıldıktan sonra, bu dosya CATIA yazılımına aktarılır ve Yapısal Tasarım Mühendisi benzer şekli elde ederek tasarımı gerçekleştirir. Şekil üretim kriterlerine göre elde edilir. Böylelikle, tekrar tasarlanan destek braketi Şekil 9'da gösterildiği gibi oluşturulur.



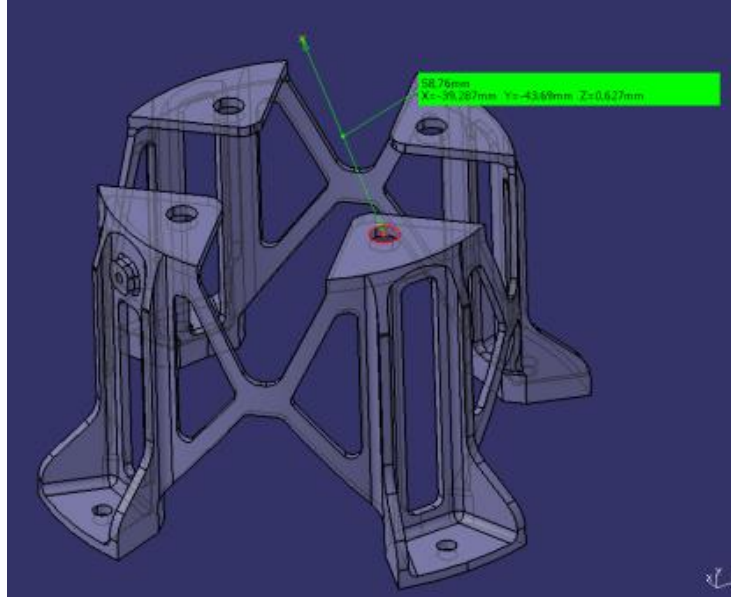
Şekil 9 Topoloji Optimizasyonu tabanlı tekrar tasarlanan destek braketi

Bu model, analizlerin gerçekleştirilmesi için HyperMesh 2017 yazılımına aktarılır. Braket için, modal ve sanki-statik analizler gerçekleştirilir. Benzer bağlantı şekilleri ve sınır şartları ile tasarlanmış olan braket için analizler yapılır. Analizler için braketin ait malzeme özellikleri aşağıdaki Çizelge 1'e göre tanımlanır.

Çizelge 1 EIE ile üretilen Ti6Al4V mekanik özellikleri

|                           |           |
|---------------------------|-----------|
| E (Elastic Modulus)       | 113.7 GPa |
| Yield Strength            | 794.0 MPa |
| Tensile Strength          | 812.9 MPa |
| v (Poisson's Ratio)       | 0.31      |
| $d = 4430 \text{ kg/m}^3$ |           |

Sanki-statik analiz için; ekipmana bağlı kuvveti temsil etmek adına, yüklerin aşağıdaki Şekil 10'da gösterilen noktadan uygulanır. Kuvvet uygulama noktasının kesin yeri Çizelge 2'de verilmiştir.



Şekil 10 Yük Uygulama Noktası

Çizelge 2 Yük uygulama noktasının tam konumu

|                 | Yükün Tam Konumu (Global Eksen Takımı) |        |        |
|-----------------|----------------------------------------|--------|--------|
|                 | X (mm)                                 | Y (mm) | Z (mm) |
| Ağırlık Merkezi | 247.4                                  | 975    | 821.5  |

20g ivme yükü Global koordinat eksene göre X, Y ve Z yönlerinde brakete etki ettirilir. Braketin eşdeğer Von-Mises gerilme ve deformasyon sonuçları senaryoya göre belirlenir. Normalde Von-Mises stresi kullanılır ve karmaşık bir yükleme durumuna tabi tutulduğunda izotropik ve sünek metalin kullanılabileceğinin belirlenmesini sağlar. Bu karşılaştırma, Von Mises gerilme değerini hesaplayıp malzemenin akma gerilim değeri ile karşılaştırılarak gerçekleştirilir.

Ön tasarım için, A-değerleri (malzeme değerlerinin nüfusunun en az %99'unun, %95 güvenle bu tolerans sınırına eşit veya bu sınırı aşması beklenmektedir) mevcut değildir, böylece Türk Havacılık ve Uzay Sanayii, tahmini minimum izin verilebilir (ön testlerde karşılaşılan minimum, yani standart akma için 794MPa) ve belirsizlikleri güvenlik faktörü GF değeri ile kapsar, bu değer de SF = 2.0 olarak alınır.

Güvenlik marjı hesaplama formülü Denklem 1 ile verilmektedir.

$$GM = \frac{\sigma_{izin verilen}}{\sigma_{uygulanan} * GF} - 1 \quad (1)$$

**GM** : Güvenlik marjı (-)  
 **$\sigma_{izin verilen}$**  : İzin verilen minimum gerilme = **794 MPa** (ön testler)  
 **$\sigma_{uygulanan}$**  : Uygulanan maksimum gerilme (Von-Mises) [MPa]  
**GF** : Güvenlik faktörü = 2

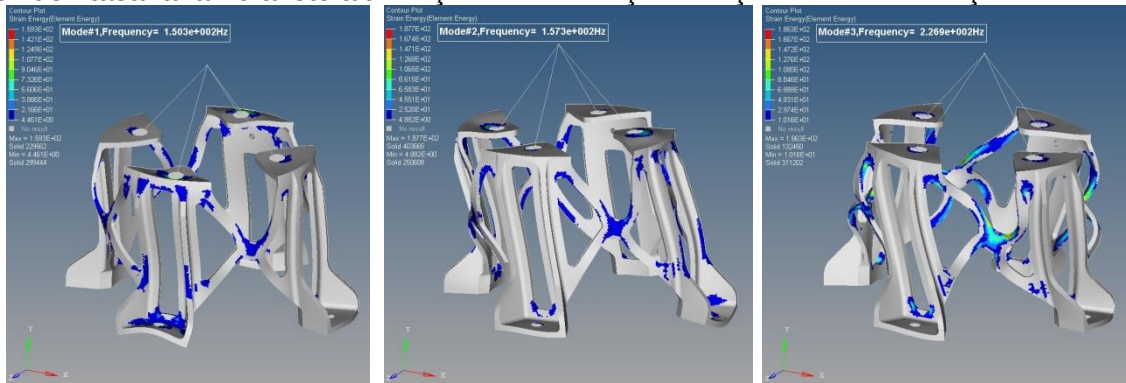
## UYGULAMALAR

HyperMesh 2017 yazılımı kullanılarak Sonlu Elemanlar Modeli üzerinden modal analizler gerçekleştirilmiştir. Sonuçları Çizelge 3 ve Çizelge 4'te verilmiştir.

Çizelge 3 Rijit bağlantıda Ti6Al4V malzemeli TT destek braketi modal analiz sonuçları

| Mod | Doğal Frekans (Hz) |
|-----|--------------------|
| 1   | 150.3              |
| 2   | 157.3              |
| 3   | 226.9              |
| 4   | 357.3              |
| 5   | 392.9              |
| 6   | 2284               |
| 7   | 2483               |
| 8   | 2518               |
| 9   | 2568               |
| 10  | 3012               |

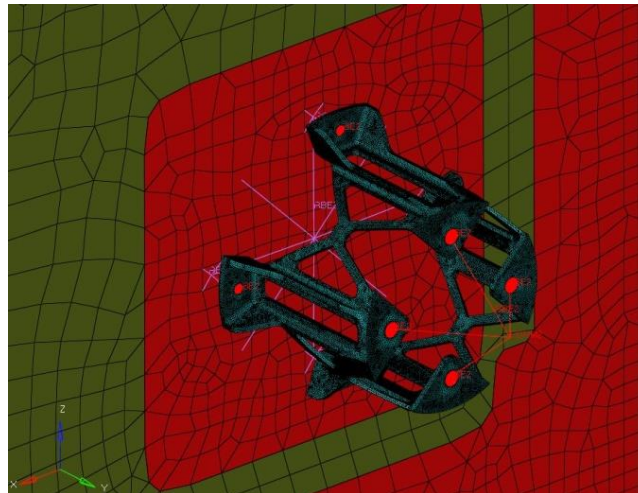
Yeniden tasarlanan braketten ait ilk üç mod ve mod şekilleri Şekil 11’de verilmiştir.



Şekil 11 Topoloji Optimizasyonu ile tasarlanan braketten ait ilk üç doğal frekans değerleri

İlk mod 150.3Hz’de elde edilmiştir, rijit gövdede >140Hz gereksinim kriteri sağlanmıştır. Bu mod birleştirilmiş bir XZ moduna (Z-öteleme ve X-rotasyonel) karşılık gelir. İkinci mod 157.3Hz’de, bir XZ moduna (X-öteleme ve Z-dönüşü) karşılık gelir.

Şekil 12’de gösterildiği gibi rijit gövdenin modellenmiş platform paneli ile değiştirilmesiyle başka bir analiz gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar Çizelge 4’te gösterildiği gibi frekansta önemli ölçüde farklıdır. İlk mod 94.6Hz’e düşmüştür, yine de Uydu’da > 80Hz gereksinimi ile uyumludur ve ikinci frekans 96.74Hz’e düşmüştür.

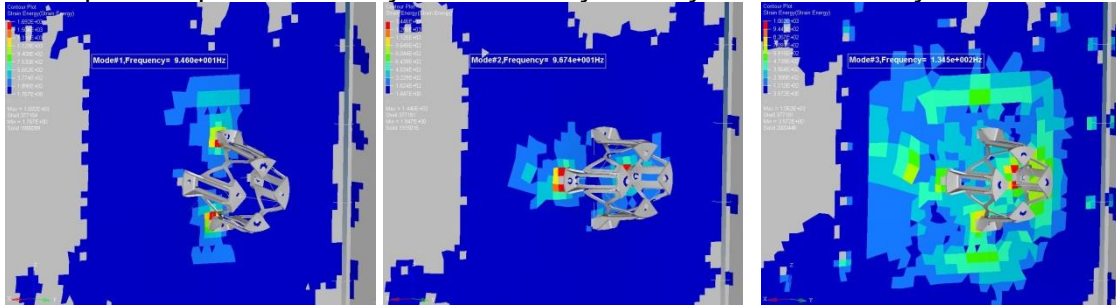


Şekil 12 Platform panel üzerinde TT destek braket analiz modeli

Çizelge 4 Uydu üzerinde Ti6Al4V malzemeli TT destek braketi modal analiz sonuçları

| Mod | Doğal Frekans (Hz) |
|-----|--------------------|
| 1   | 94.6               |
| 2   | 96.74              |
| 3   | 134.5              |
| 4   | 218.5              |
| 5   | 338.1              |
| 6   | 1708               |
| 7   | 2269               |
| 8   | 2600               |
| 9   | 3430               |
| 10  | 3914               |

Braketin platform paneldeki ilk üç mod ve mod şekilleri Şekil 13'te verilmiştir.



Şekil 13 Tasarlanan braketin platform paneldeki ilk üç doğal frekans değerleri

Çizelge 3 ve Çizelge 4'teki veriler incelendiğinde braketin doğal frekanslarının Uydu üzerindeki doğal frekanslara göre azalmasının sebebi ilk durumda sert zemin sınır koşulu ile analiz edilmiş olmalarıdır. Uydu üzerine bağlandıklarında sınır koşulu esnek olduğundan doğal frekanslar azalmıştır. Yalnızca son üç mod'daki mod şekilleri değiştiği için bu değerlerde artış olmuştur.

Üretim süreci sırasında braket tasarımına bazı destek yapıları eklenmiştir (bakınız Şekil 14). Bu yapıların amacı, malzeme ekleme sırasında parçadan ısıyı uzaklaştırmak ve bileşeni yapı plakasına doğru tutmaktır. Üretildikten sonra, destekler bina plakasından ve bileşeninden kesilir ve geri dönüştürülür veya başka şekilde atılır.



Şekil 14 İşleme operasyonundan sonra Geometrik Boyutlandırma Kontrolü

Ve ayrıca;

- 0.1mm / 100mm yüzey düzlemselliği
- Braket ve Uydu yapısal panelleri arasındaki M5 cıvata arayüzü gereksinimleri için ilave işleme operasyonu gerçekleştirilmiştir. Böylelikle, üretilen destek braketleri Şekil 15'teki son haline getirilmiştir.



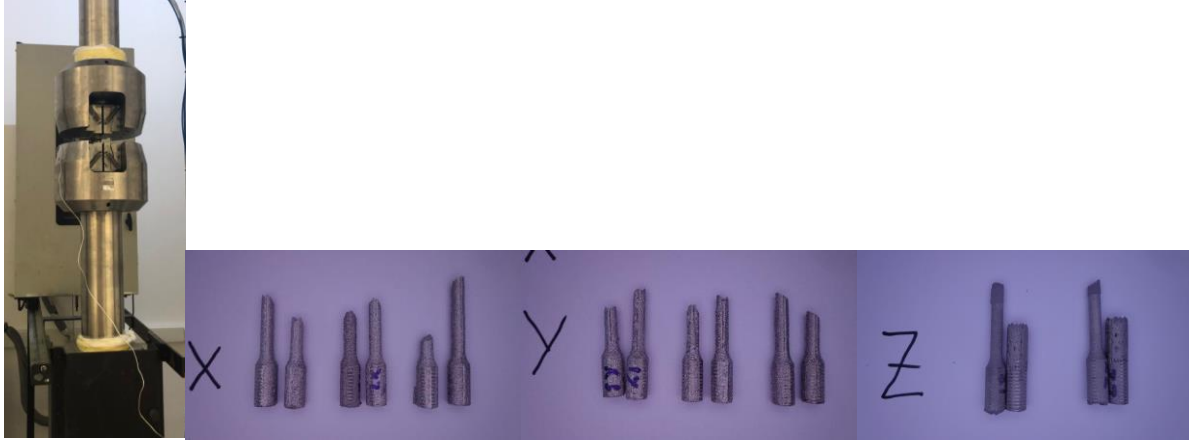
Şekil 15 EIE yöntemi tarafından Topoloji Optimizasyonu tabanlı üretilen destek braketleri

Son kütle ve şekli Şekil 16'da gösterilmiştir.



Şekil 16 Eİ ile üretilen destek braketinin son hali

Çekme testleri (Şekil 17) NF EN ISO 2002-1 standart test prosedürüne göre gerçekleştirilmiştir. Dinamik testlerin korelasyonu için elde edilen sonuçların minimum değerleri kullanılmıştır. Böylelikle;  $E = 113.7 \text{ GPa}$ , Akma Dayanımı =  $794 \text{ MPa}$  and Tensile Strength =  $812.9 \text{ MPa}$  olarak belirlenmiştir. Test sonuçları Şekil 18, Şekil 19 ve Şekil 20'de verilmiştir. Eİ ile üretilen numuneler izotropik olmadığı (malzemenin oluşturulma şekli, toz tanecik yapısı gibi değişkenlerden dolayı) için her yönde benzer sonuçlar çıkmamıştır. Üretim yönteminin doğası gereği üretim yönünde katmanlı bir yapıda olduğu için daha az mukavim bir mekanik davranış sergilemiştir.



Şekil 17 Çekme testi makinesi ve Eİ ile üretilen çekme testi numuneleri

|         | Specimen label | Diameter [mm] | Yield Strength [MPa] | Tensile Strength [MPa] | Modulus (Automatic Young's) [GPa] | Failure Mode | Comments |
|---------|----------------|---------------|----------------------|------------------------|-----------------------------------|--------------|----------|
| 1       | 1              | 5.960         | 892.75559            | 985.7                  | 113.7                             | Valid        |          |
| 2       | 2              | 5.980         | 905.86205            | 999.5                  | 114.0                             | Valid        |          |
| 3       | 3              | 6.020         | 935.67907            | 1029.9                 | 113.5                             | Valid        |          |
| Mean    |                | 5.987         | 911.43224            | 1005.0                 | 113.7                             |              |          |
| SD      |                | 0.0306        | 21.9972              | 22.6405                | 0.2465                            |              |          |
| Maximum |                | 6.020         | 935.67907            | 1029.9                 | 114.0                             |              |          |
| Minimum |                | 5.960         | 892.75559            | 985.7                  | 113.5                             |              |          |

Şekil 18 Elde edilen mekanik özellikler / X-yönü

|         | Specimen label | Diameter [mm] | Tensile Strength at Yield (Offset 0.2 %) [MPa] | Tensile Strength [MPa] | Modulus (Automatic Young's) [GPa] | Failure Mode | Comments |
|---------|----------------|---------------|------------------------------------------------|------------------------|-----------------------------------|--------------|----------|
| 1       | 1              | 6.000         | 924.23088                                      | 1015.1                 | 112.9                             | Valid        |          |
| 2       | 2              | 6.000         | 926.58311                                      | 1023.7                 | 114.0                             | Valid        |          |
| 3       | 3              | 5.980         | 936.58849                                      | 1032.7                 | 115.8                             | Valid        |          |
| Mean    |                | 5.993         | 929.13416                                      | 1023.8                 | 114.2                             |              |          |
| SD      |                | 0.0115        | 6.5619                                         | 8.7898                 | 1.4403                            |              |          |
| Maximum |                | 6.000         | 936.58849                                      | 1032.7                 | 115.8                             |              |          |
| Minimum |                | 5.980         | 924.23088                                      | 1015.1                 | 112.9                             |              |          |

Şekil 19 Elde edilen mekanik özellikler / Y-yönü

|         | Specimen label | Diameter [mm] | Yield Strength [MPa] | Tensile Strength [MPa] | Modulus (Automatic Young's) [GPa] | Failure Mode | Comments |
|---------|----------------|---------------|----------------------|------------------------|-----------------------------------|--------------|----------|
| 1       | 1              | 5.950         | 762.69763            | 766.3                  | 111.3                             | Valid        |          |
| 2       | 2              | 5.940         | 825.28420            | 859.4                  | 118.4                             | Valid        |          |
| Mean    |                | 5.945         | 793.99092            | 812.9                  | 114.8                             |              |          |
| SD      |                | 0.0071        | 44.2554              | 65.8377                | 5.0247                            |              |          |
| Maximum |                | 5.950         | 825.28420            | 859.4                  | 118.4                             |              |          |
| Minimum |                | 5.940         | 762.69763            | 766.3                  | 111.3                             |              |          |

Şekil 20 Elde edilen mekanik özellikler / Z-yönü

## SONUÇ

Çizelge 5'te gözüktüğü gibi EIE ile üretilen optimize edilmiş braket sayesinde, özellikle uydu ikincil yapısında bunun elde edilmesi, ciddi bir kütle azalması meydana gelmiştir. Buna ek olarak; maksimum gerilme ve deformasyonda artış gözükmemektedir. Ancak, topoloji optimizasyonundan sonra braket daha eşit yüklenir ve gözlenen maksimum gerilme değeri titanyumun akma dayanımından daha düşüktür.

Çizelge 5 İlk ve Optimize Braketin Karşılaştırması

|                | Kütle (kg)   | Maksimum Gerilme (MPa) | İlk Doğal Frekans (Hz) | Deformasyon (mm) |
|----------------|--------------|------------------------|------------------------|------------------|
| İlk Model      | 0.349        | 87.25                  | 165.6                  | 0.182            |
| Optimize Model | 0.265        | 206.5                  | 150.3                  | 0.202            |
| % Değişim      | %24.1 azalma | %236.7 artma           | %9.24 azalma           | %11 artma        |

Yapılan tasarım/analiz ve Eİ üretimi sonucunda, konvansiyonel tasarıma göre kütle, katılık ve doğal frekans gibi parametrelerde önemli ölçüde iyileşmenin olduğu tespit edilmiştir. X, Y ve Z yönlerinde uygulanan 20g ivme yükü ile elde edilen sanki-statik analizlerin sonucunda (Çizelge 6) her ekseninde minimum güvenlik faktörü pozitif gelmiştir ve gereksinimi karşılamıştır.

Çizelge 6 Sanki-statik analiz sonucu

| Sanki-Statik Yük | Maks. Gerilme (MPa) | Min. Güvenlik Marjı | Kriter | Deformasyon (mm) |
|------------------|---------------------|---------------------|--------|------------------|
| 20g $X_{uydu}$   | 206.5               | 0.922               | >0     | 0.202            |
| 20g $Y_{uydu}$   | 93.36               | 3.252               | >0     | 0.034            |
| 20g $Z_{uydu}$   | 205.9               | 0.928               | >0     | 0.201            |

Bu çalışma, TT ekipman destek braketini imal etmek için kullanılan geleneksel imalat yöntemlerinin yerine Eİ teknolojisini kullanılmasının mümkün olduğu potansiyelini göstermektedir.

En azından benzer çalışmalar için, Eİ'nin, yapısal analiz ve topoloji optimizasyonu için uygun metodolojiler ve yazılımlarla birleştğinde, hafif ve verimli üretim için büyük bir potansiyele sahip olduğu görülmüştür.

Çekme test verilerini daha iyi analiz edebilmek için X, Y ve özellikle Z yönünde en az 6 numune ile sonuçların değerlendirilmesi gerektiği görülmüştür.

Ayrıca, topoloji optimizasyon algoritmalarını Eİ ile birlikte kullanmak, tasarım paradigmasını özellik temelli fonksiyondan, fonksiyon temelli hale getirmek mantıklı olduğu değerlendirilmiştir.

Son olarak bu çalışmada; başlangıç aşamasında yalnızca tasarım alanı oluşturulan parçalarda, tasarım ve analiz iterasyonları ile birlikte üretim Eİ çalışması anlatılmıştır. Uydu yapısal tasarımın ilerleyen aşamalarında, üretilen yapısal parçalara ait kalifikasyon testlerinin icra edilmesi ve mekanik davranışlarının analiz sonuçları ile korelasyonunun yapılması gerekmektedir.

## Kaynaklar

Additive Manufacturing: Pursuing the Promise, advanced manufacturing Office, U.S. Department of Energy, DOE/EE-0776, Ağustos 2012

Aerospace series. Metallic materials. Test methods. Tensile testing at ambient temperature (2006). NF EN ISO 2002-1

Durakovic, B., 2018. "Design for Additive Manufacturing: Benefits, Trends and Challenges," Periodical of Engineering and Natural Sciences, Cilt.6, Sayı.2, s.179-191

European Cooperation for Space Standardization (2008). ECSS-E-ST-32C, Space Engineering – Structural general requirements

Gong, X., Anderson, T. ve Chou, K., 2012. Review on Powder-Based Electron Beam Additive Manufacturing Technology, Mechanical Engineering Department, The University of Alabama Tuscaloosa, Tuscaloosa, AL

Kenny, B., Jansen, R.H., Kascak, P.E., Dever, T.P., Santiago, W., 2005. "Integrated Power and Attitude Control with Two Flywheels", IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, Cilt.41, Sayı.4

LU, Loughborough University. "The 7 Categories of Additive Manufacturing: Powder Bed Fusion". Erişim 10 Ocak 2020.

<https://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/the7categoriesofadditivemanufacturing/powderbedfusion/>

PM, Project Managers. "Additive Manufacturing Tutorial". Erişim 18 Ocak 2020.

<https://projectmanagers.org/tutorials/additive-manufacturing-tutorial/>

Sigmund, O., Maute, K., 2013. Topology optimization approaches a comparative review

- Verbart, A., van Keulen, F., ve Langelaar, M., 2015. Topology Optimization with Stress Constraints. TU Delft
- Yoder, S., Morgan, S., Kinzy, C., Barnes, E., Kirka, M., 2017. Characterization of topology optimized Ti-6Al-4V components using electron beam powder bed fusion
- Zhang, J., Jung, Y., 2018. Additive Manufacturing: Materials, Processes, Quantifications and Applications