



**ARAÇ FREN PEDALININ POLİMER KOMPOZİT  
MALZEMEDEN EKLEMELİ ÜRETİM YÖNTEMİNE  
UYGUN OPTİMUM TASARIMI VE SERİ PARÇA  
İKAMESİ OLARAK ÜRETİMİ**

**Serhat DİNÇEL**



T.C.  
BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ARAÇ FREN PEDALININ POLİMER KOMPOZİT MALZEMEDEN  
EKLEMELİ ÜRETİM YÖNTEMİNE UYGUN OPTİMUM TASARIMI VE SERİ  
PARÇA İKAMESİ OLARAK ÜRETİMİ**

Serhat DİNÇEL  
0000-0003-3292-7516

Prof. Dr. Murat YAZICI  
(Danışman)

YÜKSEK LİSANS TEZİ  
POLİMER MALZEMELER ANABİLİM DALI

BURSA – 2022  
Her Hakkı Saklıdır

## ÖZET

Yüksek Lisans

ARAÇ FREN PEDALININ POLİMER KOMPOZİT MALZEMEDEN EKLEMELİ  
ÜRETİM YÖNTEMİNE UYGUN OPTİMUM TASARIMI VE SERİ PARÇA  
İKAMESİ OLARAK ÜRETİMİ

**Serhat DİNÇEL**

Bursa Uludağ Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Polimer Malzemeler Anabilim Dalı

**Danışman:** Prof. Dr. Murat YAZICI

Polimer kompozit malzemedan parça üreten 3B yazıcı ve bant serme sistemleri (genel ismi ile eklemeli üretim sistemleri) hızla gelişmektedir. Ancak üretim hızları henüz düşüktür. Şu an için seri üretime dönük ancak düşük adetli parçalar için kullanımı verimli durmaktadır. Cihazın bu vasfından yararlanmak için seri üretimde kullanılan metal parçanın eklemeli üretime ve kompozit 3B yazıcının malzeme ve yazma sistemine uygun tasarlanması gerekmektedir. Bu çalışma halen üst segment binek ve ticari araçlarda bulunan el freni yerine kullanılan ayak fren pedalının, çelik yerine ikame olarak polimer kompozit parçadan eklemeli üretim yöntemi ile üretimi ve çelik parçadan istenen özelliklere uygunluğunun deneysel olarak incelenmesi üzerindedir. Tezin amacı polimer kompozit 3B yazıcıların parça yazdırma stratejilerine uygun parçanın istenen mekanik ve fiziksel özellikleri sağlayacak şekilde optimum tasarımının yapılması, yapılan tasarımın mekanik performansının uygunluğunun Sonlu Elemanlar Analizleri ile incelenmesi ve 3B yazıcı ile üretilerek nihai performansının, araç üreticisi tarafından gerçek parçadan beklenen isterlere uygunluğunun deneysel olarak incelenmesidir.

**Anahtar Kelimeler:** Eklemeli Üretim, 3B Yazıcı, Polimer Kompozit Filament, Kısa Elyaf Takviyeli kompozit, Sürekli Elyaf Takviyeli Kompozit, Bilgisayar Destekli Tasarım, Sonlu Elemanlar Analizi, Optimizasyon

**2022, ix + 56 sayfa.**

## **ABSTRACT**

MSc/PhD Thesis

### **OPTIMUM DESIGN OF VEHICLE BRAKE PEDAL FROM POLYMER COMPOSITE MATERIAL FOR ADDITIVE MANUFACTURING METHOD AND PRODUCTION AS SERIAL PART REPLACEMENT**

**Serhat DİNÇEL**

Bursa Uludağ University  
Graduate School of Natural and Applied Sciences  
Department of Polymer Materials

**Supervisor:** Prof. Dr. Murat YAZICI

3D printer and tape laying systems (commonly known as additive manufacturing systems) that produce parts from polymer composite materials are developing rapidly. However, production speeds are still low. At the moment, it is efficient to use for low volume production. In order to benefit from this feature of the device, the metal part used in mass production must be designed in accordance with additive production and the material and writing system of the composite 3D printer. In this study, it is about the production of the foot brake pedal which is still used instead of the hand brake in upper segment passenger and commercial vehicles, from polymer composite part as a substitute for steel, by the additive production method and experimentally examining the suitability of the steel part with the desired properties. The aim of the thesis is to make the optimum design of polymer composite 3d printers in accordance with the part printing strategies in order to provide the desired mechanical and physical properties of the part, to examine the suitability of the mechanical performance of the design with Finite Element Analysis and to test the suitability of the final performance with the 3d printer to the requirements expected from the real part by the vehicle manufacturer.

**Key words:** Additive Manufacturing, 3D Printer, Polymer Composite Filament, Short Fiber Reinforced, Continuous Fiber Reinforced, Computer Aided Design, Finite Element Analysis, Optimization

**2022, ix+ 56 pages.**

## TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimin ve tez çalışmalarında bana her zaman destek olan bilgi ve deneyimlerini paylaşan değerli hocam Prof.Dr. Murat YAZICI'ya teşekkürlerimi sunarım.

Yüksek lisans sürecimde yanımda olan ve çalışmalarında desteklerini esirgemeyen Yüksek Lisans Öğrencisi Emir EMİNOĞLU, Arş. Gör. Burak MATYAR'a teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca tez çalışmamdaki desteklerinden ötürü Orhan Otomotiv ve Poligon Mühendisliğe teşekkürlerimi sunarım.

Hayatımın her anında bana destek olan değerli eşim Emine DİNÇEL'e ve kıymetli oğlumuz Kerem DİNÇEL'e teşekkürlerimi sunarım.

Serhat DİNÇEL  
29/07/2022

## İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ.....	v
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vvi
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xi
1. GİRİŞ.....	1
2. KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ARAŞTIRMASI.....	4
2.1. Malzeme.....	4
2.2. Üretimde Malzeme.....	5
2.2. Polimerler.....	5
2.3. Polimerlerin Genel Özellikleri.....	7
2.4. Polimer Türleri.....	7
2.5. Polimerlerde Çekme Eğrisi.....	8
2.6. Polimer Matris Kompozitler.....	10
2.7. Karbon Fiber Takviyeli Polimerler (CFRP).....	13
2.8. Aramid Fiber Takviyeli Polimerler (AFRP).....	14
2.9. Akrilonitril Bütadiyen Stiren (ABS).....	14
2.10. Topoloji Optimizasyonu.....	15
2.11. Eklemeli Üretim.....	16
2.12. Konuyla İlgili Yapılan Çalışmaların İncelenmesi.....	20
3.MATERYAL ve YÖNTEM.....	24
3.1. Giriş.....	24
3.2. Tasarım Girdileri.....	25
3.3. Malzeme Seçimi ve İmalat Yöntemi Değerlendirme.....	28
3.4. Pedal Tasarımının Yapılması.....	31
3.5. Topoloji Optimizasyonu Çalışması.....	32
3.6. Pedal Parçasını 3B Yazıcıda Yazılması.....	41
3.7. Pedal Statik Testi.....	44
4. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	46
4.1. Topoloji Optimizasyonu Sonuçları.....	46
4.2. Statik Test Sonuçları.....	51
5. SONUÇ.....	52
KAYNAKLAR.....	53
ÖZGEÇMİŞ.....	56

## SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

### Simgeler

### Açıklama

%	Yüzde
°	Derece
g/cm <sup>3</sup>	Gram santimetre küp
Gpa	Gigapaskal
kg	Kilogram
kJ/m <sup>2</sup>	Kilojoule metrekare
mm	Milimetre
MPa	Megapaskal
N	Newton
s	Saniye

### Kısaltmalar

### Açıklama

3B	Üç boyutlu
A	Pedal dönme eksen
ABS	Akrilonitril bütadien stiren
AFRP	Aramid fiber takviyeli polimer kompozitler
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Aluminyum Oksit
B	Fren sistemini tahrik ettiği nokta
B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Bor trioksit
CaO	Kalsiyum oksit
CFRP	Karbon fiber takviyeli polimer kompozitler
CaCO <sub>3</sub>	Kalsiyum Karbonat
CO <sub>2</sub>	Karbondioksit
EN	Avrupa Standartları
EYM	Eriyik yığıma methodu
Fd	Park fren sistemine uygulanan kuvvet
FEA	Sonlu elemanlar yöntemi
Fp	Park fren sistemine gelen kuvvet
GF	Cam elyaf
Gcode	G-kodu
GFRP	Cam fiber - takviyeli polimer kompozitler
L <sub>1</sub>	Uygulanan kuvvet ile pedal dönme merkezi arasındaki mesafe
L <sub>2</sub>	Alınan kuvvet ile pedal dönme merkezi arasındaki mesafe
Mg(OH) <sub>2</sub>	Magnezyum hidroksit
P	Pedala kuvvet uygulanan nokta
PA6	Poliamid 6
PLA	Polilaktik asit
PP	Polipropilen
SiO <sub>2</sub>	Silyum Dioksit
SLS	Selektif Lazer Külçeleme
STL	Stereolitografi

PEEK  
TPU

Polieter eter keton  
Termoplastik poliüretan



## ŞEKİLLER DİZİNİ

	<b>Sayfa</b>
Şekil 1.1. Ayak park freni mekanizması fonksiyon diyagramı.....	1
Şekil 1.2. Ayak park fren mekanizmasının parçaları.....	2
Şekil 1.3. Ayak park fren sisteminin parçaları.....	2
Şekil 2.1. Malzemelerin sınıflandırılması.....	4
Şekil 2.2. Monomerlerin oluşturduğu polimer yapı.....	5
Şekil 2.3. Polimer yapısı.....	6
Şekil 2.4. Sıcaklığın yapı ve özelliklere etkisi.....	6
Şekil 2.5. Termoplastik bağ yapısı.....	7
Şekil 2.6. Termoset bağ yapısı.....	8
Şekil 2.7. Elastomer bağ yapısı.....	8
Şekil 2.8. Farklı polimerlerin gerilme-birim uzama davranışları.....	9
Şekil 2.9. Polimerler için tipik gerilme-uzama grafikleri.....	9
Şekil 2.10. Polimer matris kompozitler sınıflandırma sistemi.....	11
Şekil 2.11. Bazı CFRP, AFRP, GFRP, yüksek kuvvetli çelik ve yumuşak çeliğin gerilme-gevşeme eğrilerinin kıyaslamaları.....	12
Şekil 2.12. Bazı fiber takviyeli polimer matris kompozitler SEM mikroskopu kullanılarak iç yapıları fotoğrafları.....	12
Şekil 2.13. Bazı fiber takviyeli polimer matris kompozitler çekme testi dayanımları.....	14
Şekil 2.14. Topoloji optimizasyonu yöntemleri.....	16
Şekil 2.15. Eklemeli üretim yönteminin temel aşamaları.....	18
Şekil 2.16. Eriyik yığılma modelleme yönteminin sistem şematığı.....	19
Şekil 2.17. Pedalın kafes yapısının değiştirilmeden önceki hali.....	21
Şekil 2.18. Pedalın kafes yapısı bal peteği ile değiştirilmiş hali.....	22
Şekil 2.19. Von Mises gerilimi pedalın kafes yapısının değiştirilmeden önceki hali.....	22
Şekil 2.20. Von Mises gerilimi pedalın kafes yapısı bal peteği ile değiştirilmiş hali.....	22
Şekil 3.1. Benzinli binek otomobillerin ağırlıklarına göre ortalama yakıt sarfiyatı.....	25
Şekil 3.2. Ayak fren pedalı modeli.....	26
Şekil 3.3. Ayak fren pedalı temel ölçüleri.....	28
Şekil 3.4. 3B yazıcı ve enjeksiyon döküm karşılaştırılması.....	30
Şekil 3.5. Ayak park freni pedalının tasarımı.....	31
Şekil 3.6. Ayak park freni pedalı üzerinde P, B noktaları ve A dönme eksenini gösterilmesi.....	33
Şekil 3.7. Topoloji optimizasyon çalışması yapılacak pedal.....	34
Şekil 3.8. Boşaltma yapılmayacak bölgeler.....	34
Şekil 3.9. Üzerinde çalışılan çubuk parçası ve farklı mesh boyutlarına göre analiz sonuçları.....	36
Şekil 3.10. Pedal parçasına yapılan mesh işlemi.....	37
Şekil 3.11. P, B noktaları ve A dönme eksenini bölgelerindeki mesh yapısı.....	37
Şekil 3.12. Farklı mesh tipi denemeleri.....	38
Şekil 3.13. Kuvvet giriş-çıkış ve mesnet noktalarının sonlu elemanlar analiz programına tanıtılması.....	39

Şekil 3.14.	PA 6 malzemesi kullanılarak yapılan topoloji optimizasyonu aşamaları .....	40
Şekil 3.15.	Zortrax M300 Plus 3B yazıcısının görüntüsü.....	41
Şekil 3.16.	Pedal parçasının 3B yazıcı tablasındaki yerleşimi .....	42
Şekil 3.17.	Katmanları arası örme açısı gösterilmesi.....	43
Şekil 3.18.	3B yazıcı pedal parçasını imal ederken.....	43
Şekil 3.19.	Pedal karakterizasyon test cihazının temel bileşenleri.....	44
Şekil 3.20.	Pedal karakterizasyon test cihazının görüntüsü.....	45
Şekil 4.1.	PA6 malzeme kullanılarak yapılan topoloji optimizasyonu çalışmasının pedal gövdesi üzerindeki geometrik değişiklikleri.....	46
Şekil 4.2.	ABS malzeme kullanılarak yapılan topoloji optimizasyonu çalışmasının pedal gövdesi üzerindeki geometrik değişiklikleri....	47
Şekil 4.3.	PA6 malzeme kullanılarak yapılan pedalın topoloji optimizasyonu öncesi ve sonrası için yer değiştirme ve eşdeğer asal gerilim (Von Mises stres) sonuçları.....	48
Şekil 4.4.	ABS malzeme kullanılarak yapılan pedalın topoloji optimizasyonu öncesi ve sonrası için yer değiştirme ve eşdeğer asal gerilim (Von Mises stres) sonuçları.....	49
Şekil 4.5.	ABS malzeme ile yapılan pedalın statik testi grafiği.....	51

## ÇİZELGELER DİZİNİ

	<b>Sayfa</b>
Çizelge 2.1. Yapılan çalışmada hesaplanan deplasman ve gerilme değerleri.....	23
Çizelge 3.1. Pedal analizlerinde ve imalatında kullanılacak ABS malzeme ve sadece analizlerde kullanılacak PA6 malzemelerinin mekanik özellikleri kıyaslamalı çizelgesi.....	30
Çizelge 3.2. En uygun mesh boyutu değerlendirme çalışması.....	35
Çizelge 4.1. Topoloji optimizasyonu öncesi ve sonrası yer değişimi değerleri...	50
Çizelge 4.2. Topoloji optimizasyonu öncesi ve sonrası eşdeğer asal gerilim (Von Mises stres) değerleri.....	50
Çizelge 4.3. Topoloji optimizasyonu öncesi ve sonrası elde edilen pedal kütleleri.....	50
Çizelge 4.4. ABS malzeme ile yapılan pedalın statik testi ölçüm değeri.....	51



## 1. GİRİŞ

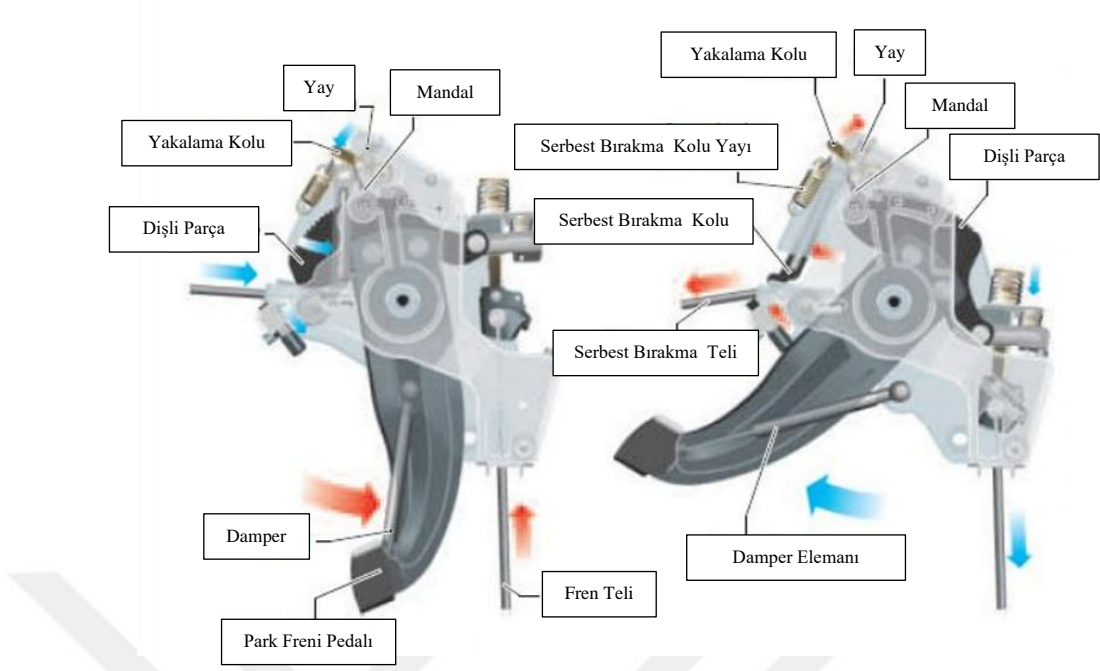
Sürücü otomobilini durdurup, park ettikten sonra aracının hareketsiz kalmasını istemektedir. Araçlarda bu işlevi yerine getirmek için park freni sistemi vardır. Park freni sistemi genelde aracın arka fren disklerini aktif hale getirerek, arka tekerleklerin dönmesini engellemektedir, böylece otomobil olduğu yerde sabit kalabilmektedir. Park freni sistemi mekanik ve elektromekanik sistemlerle iki farklı şekilde çalıştırılabilmektedir. Mekanik sistemler, sürücü kolu veya ayağı ile elektromekanik sistemlerde ise elektrik motoru ile park freni sistemi tahrik edilmektedir. Ayak park freni aracın A veya B direğine konumlandırılabilir. Sürücü, ayak park freni pedalına bastığında, mekanizma kuvveti kontrol teline iletir. Ayak park freni pedal mekanizmasından gelen kuvvet, kuvvet dağıtıcı parça üzerinden ikiye ayrılarak aracın arka iki tekerlekteki fren kampanalarına gider ve fren mekanizması aktif hale gelmiş olur. Ayak park freninin fonksiyon diyagramı Şekil 1.1’de gösterilmiştir.

Kol kuvveti ile fonksiyonunu yerine getiren el freni mekanizması yerine ayak kuvveti ile fonksiyonunu yerine getiren ayak park fren mekanizması sürücüye kullanım kolaylığı sunmaktadır. Dolayısıyla otomotiv ana sanayi üreticilerinin lüks segment araç tasarımlarında ayak park sistemini tercih etmektedir. Aynı zamanda bu yeni tasarım estetik görüntü açısından da araçtaki orta konsolu rahatlatmakta ve yüz binlerce lira verilerek alınan lüks segment araçlardaki kötü görüntüyü ortadan kaldırmaktadır.



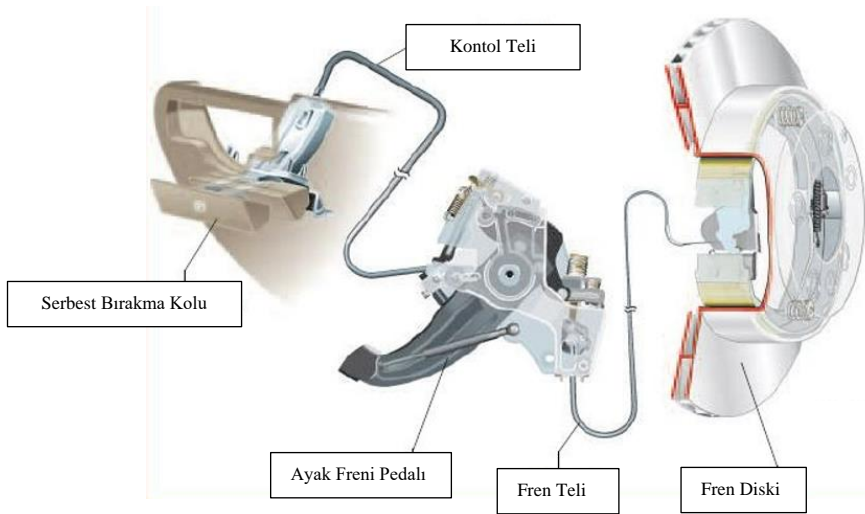
**Şekil 1.1.** Ayak park freni mekanizması fonksiyon diyagramı

Ayak freni uygulanması; dişli parça ve park freni pedalı birbirine bağlıdır ve bir mil üzerinde yataklanmıştır. Ayak park fren mekanizmasının parçaları şekil 1.2’de gösterilmektedir. Park freni pedalına basıldığında kontrol teli tahrik edilir. Dişli parçaya kilitlenen bir mandal freni tutar. Yayın tutma kolu üzerindeki kuvveti mandalın dışarı fırlamasını engeller. Böylelikle ayak park fren mekanizması aktif hale getirilmiş olur.



**Şekil 1.2.** Ayak park fren mekanizmasının parçaları

Ayak freni serbest bırakılması; sürücü serbest bırakma kolunu çektiğinde kilit mekanizmasının yakalama kolu yukarı kalkar ve mandal dişler üzerinde serbest kalır. Ayak park fren sisteminin parçaları şekil 1.3'te gösterilmektedir. Serbest bırakma kolu üzerindeki yay gergin durumdadır. Serbest bırakma kolunu bıraktığımızda yay kuvveti ile kol ilk haline gelir ve araç sürüşe hazırdır.



**Şekil 1.3.** Ayak park fren sisteminin parçaları

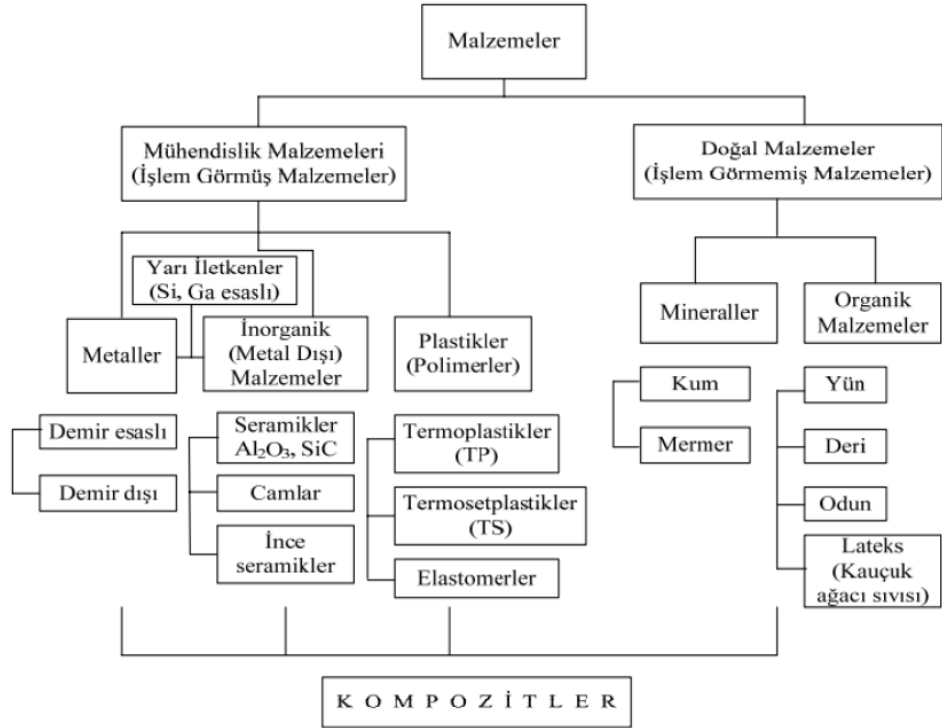
Bu çalışmada halen st segment binek ve ticari araçlarda bulunan el freni yerine kullanılan ayak fren pedalının, elik yerine ikame olarak polimer kompozit parçadan eklemeli üretim yöntemi ile üretimi ve elik parçadan istenen özelliklere uygunluğunun deneysel olarak incelenmesi konusundadır.

Tezin amacı ise polimer kompozit 3B yazıcıların parça yazdırma stratejilerine uygun parçanın istenen mekanik ve fiziksel özellikleri sağlayacak şekilde optimum tasarımının yapılması, yapılan tasarımın mekanik performansının uygunluğunun Sonlu Elemanlar Analizleri ile incelenmesi ve 3B yazıcı ile üretilerek nihai performansının, araç üreticisi tarafından gerçek parçadan beklenen isterlere uygunluğunun deneysel olarak incelenmesidir.

## 2. KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ARAŞTIRMASI

### 2.1. Malzeme

Uygarlığın bugün geldiği noktanın en önemli sebebi malzemeleri etkin bir şekilde kullanılabilmesidir. Malzemelerin etkin şekilde kullanılmasıyla insanların ihtiyaçlarına en etkin şekilde cevap verilebilmektedir. Doğada bulunan malzemelerin ham halleri veya işlenmiş halleri ile insanlık ihtiyacı olan icatları yapabilmektedir. İhtiyaçlar değiştikçe, malzemeler de değişmektedir. Örneğin, malzemedan hafiflik ve rijitlik beklenilmesi kompozit malzemelerin icat edilmesine sebep olmuştur. Yeni ihtiyaçların oluşması, yeni malzemelerin ortaya çıkmasının önünü açmıştır. Malzeme bilimi için gelinen nokta, geçmişe göre çok ileride olsa da, gelecekteki ihtiyaçları karşılamak için bilimsel çalışmalar devam etmektedir. Malzemelerin sınıflandırılması şekil 2.1’de gösterilmektedir.



Şekil 2.1. Malzemelerin sınıflandırılması

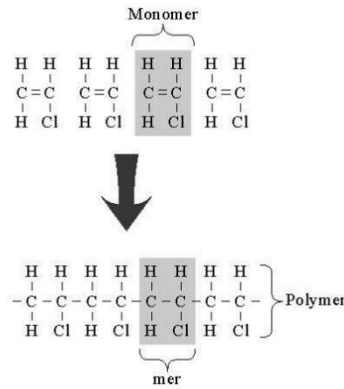
## 2.2. Üretimde Malzeme

Malzemelerle üretilen her şey için uygun malzeme seçilmesi ve bu malzemeyi şekillendirmek için uygun metodun belirlenmesi, malzemenin özelliklerinin iyi bilinmesi ile ilgilidir. Mühendisler, kullanılan malzemenin özelliklerini ne kadar iyi biliyorsa, malzemenin neleri yapabileceğini ne kadar iyi biliyorsa, o malzemeyi en iyi şekilde kullanabilir, işleme yöntemlerini en verimli şekilde belirleyebilir.

Yüksek mukavemet ve düşük ağırlık değerleri istenilen uygulamalarda tek tip malzemeler ihtiyaçları karşılamayabilir. Bunun için farklı malzemelerin, ihtiyaç olan özellikleri alınarak yeni bir malzeme oluşturulabilir. Bir örnek vermek gerekirse, cam elyaf katkıli poliamidi değerlendirebiliriz. Cam elyaf katkıli poliamid kullanılan uygulamalarda, poliamid basma yönünde gelecek kuvvetleri karşılarken, cam elyaf katkısı ise çekme yönünde gelecek kuvvetleri karşılamaktadır. Bu iki bileşenli malzemenin bileşenlerinin özelliklerinin ayrı ayrı bilinmesi ile yeni bir malzeme oluşturulmuştur.

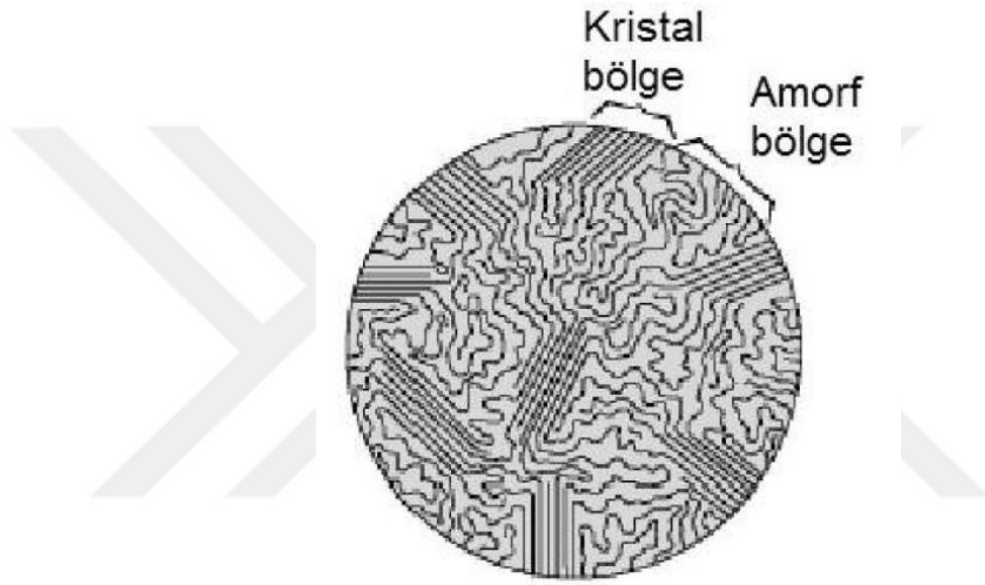
## 2.2. Polimerler

Küçük molekül birimlerinin (mer) ve gruplarının birleşerek oluşturduğu uzun ikincil (zayıf Van der waals bağları ‘yalnızca moleküller arasında’) veya çapraz bağlar polimer olarak adlandırılır (Aran 2008). Şekil 2.2’de monomerlerin oluşturduğu polimer yapı gösterilmiştir.



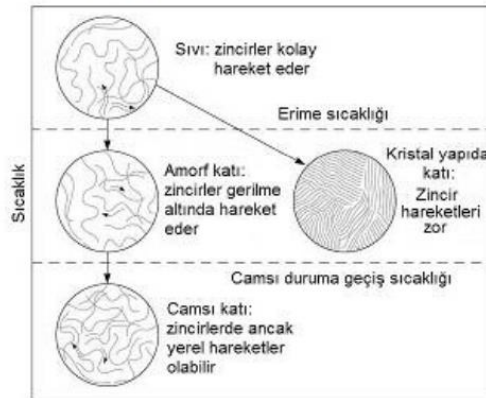
Şekil 2.2. Monomerlerin oluşturduğu polimer yapı

Malzemedeki 'mer' sayısı polimerizasyon derecesini ifade eder. Mer sayısı veya polimerizasyon derecesi arttıkça zincir hareketi zorlaşır, bu sayede malzemenin ısı dayanımı ve rijitliği artar. Moleküllerin birbirlerine zayıf bağlarla bağlandığı durumda molekül yapısı amorfur ve kararlı bir yapıya sahip değildir. Kristal yapıda, malzeme daha düzenli bir geometriye sahiptir, kararlılığı ve rijitliği yüksektir. Polimerlerin yapısı şekil 2.3'te gösterilmiştir. Şekil 2.4'te verildiği üzere kristallik arttıkça malzeme ergime sıcaklığı artar, daha zor işlenir (Aran 2008).



Şekil 2.3. Polimer yapısı (Aran 2008)

#### Sıcaklığın yapı ve özelliklere etkisi



Şekil 2.4. Sıcaklığın yapı ve özelliklere etkisi (Aran 2008)

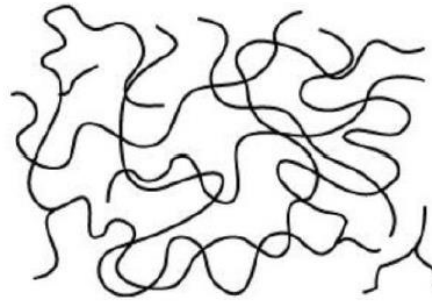
### 2.3. Polimerlerin Genel Özellikleri

Polimer malzemelerin genel özellikleri aşağıda özetlenmiştir:

- Isı ve elektrik iletkenlikleri düşüktür.
- Kolay şekillendirilebilirler.
- Korozyona ve kimyasal etkilere karşı dayanımları yüksektir.
- Tekrar işlenebilirler, geri kazandırılabilirler.
- Hafiftir, özgül ağırlıkları düşüktür.
- Düşük yoğunlukları sayesinde düşük sıcaklıklarda şekillendirilebilirler.
- Yüksek mekanik mukavemete sahiptirler.
- Çeşitli katkı maddeleriyle özellikleri, kullanılmak istenildiği yere göre değiştirilebilir.
- İşleme ve elde edilme maliyetleri düşüktür (Nart 2011).

### 2.4. Polimer Türleri

İşlem şekillerine göre polimerler; termoplastikler, termosetler, elastomerler'dir. Termoplastikler, ikincil bağlarla (Van der Waals) birbirine bağlı olan lineer polimerlerdir. Şekil 2.5'te termoplastik bağ yapısı gösterilmiştir. Van der Waals bağları yaklaşık 100°C'de zayıflar ve malzeme bu sıcaklıkta yumuşamaya başlar. Bu tür bağlara sahip polimerlere şekil verilmesi kolay olmakla birlikte geri dönüştürülerek yeniden kullanılabilirler (Aran 2008).



**Şekil 2.5.** Termoplastik bağ yapısı (Aran 2008)

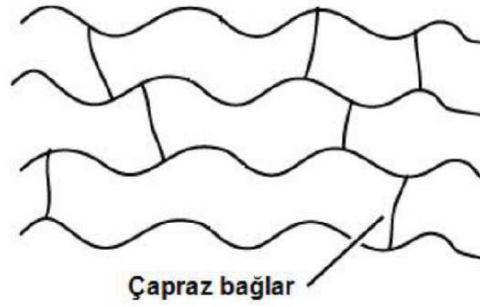
Termosetler; molekül zincirlerinin birbirlerine çapraz bağlarla bağlanarak 3 boyutlu bir yapı meydana getirmesiyle oluşur. Şekil 2.6'da bağ yapısı verilen termosetlerde çapraz bağlanma süreci tamamlandıktan sonra malzeme rijit hale gelir, bu işlem geri çevrilemez.

Yüksek sıcaklıklarda erime ve yumuşama olmadığından malzeme yanar. Bu nedenle termoset malzemelerin geri kazanımı çok zordur. (Aran 2008)



**Şekil 2.6.** Termoset bağ yapısı (Aran 2008)

Elastomerler malzemeler de termosetler gibi birbirlerine çapraz bağlarla bağlanırlar ancak yapılar rijit değildir. Şekil 2.7’de bağ yapısı verilen elastomerlerde polimer zincirleri kuvvet uygulandığında birbirleri üzerinden kayma eğilim göstermeseler de çapraz bağlar sayesinde esneyebilir ve kuvvet uygulaması sona erdiğinde eski hallerine geri dönebilirler. (Aran 2008)



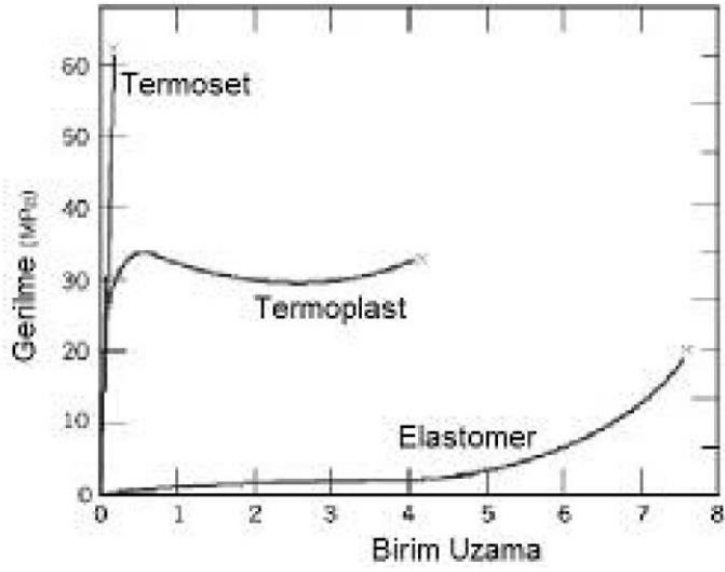
**Şekil 2.7.** Elastomer bağ yapısı (Aran 2008)

## 2.5. Polimerlerde Çekme Eğrisi

Polimerlerin gerilme uzama davranışları molekül-diziliş yapısına göre değişkenlik gösterir. Aşağıdaki grafikte termoset, termoplastik ve elastomerlerin çekme davranışı

gösterilmiştir. Yapısında çapraz bağlar bulunan termosetler, rijit-kararlı ağ yapısıyla çekmeye karşı dayanımı yüksektir. Zayıf bağlara sahip olan termoplastikler akma sınırına kadar elastik deformasyona uğrar ve sonrasında zincirler birbiri üzerinde kayar ve plastik şekil değişime uğrar. Elastomerler rijit olmayan yapısı ile kolay deformasyona uğrar ve çapraz bağlar sayesinde eski haline geri dönebilir. (Aran 2008)

Şekil 2.8’de farklı polimerlerin gerilme-birim uzama davranışları gösterilmiştir.



Şekil 2.8. Farklı polimerlerin gerilme-birim uzama davranışları (Aran 2008)

Şekil 2.9’da polimerler için tipik gerilme-uzama grafikleri gösterilmiştir. (Aran 2008)



Şekil 2.9. Polimerler için tipik gerilme-uzama grafikleri (Aran 2008)

## 2.6. Polimer Matrisli Kompozitler

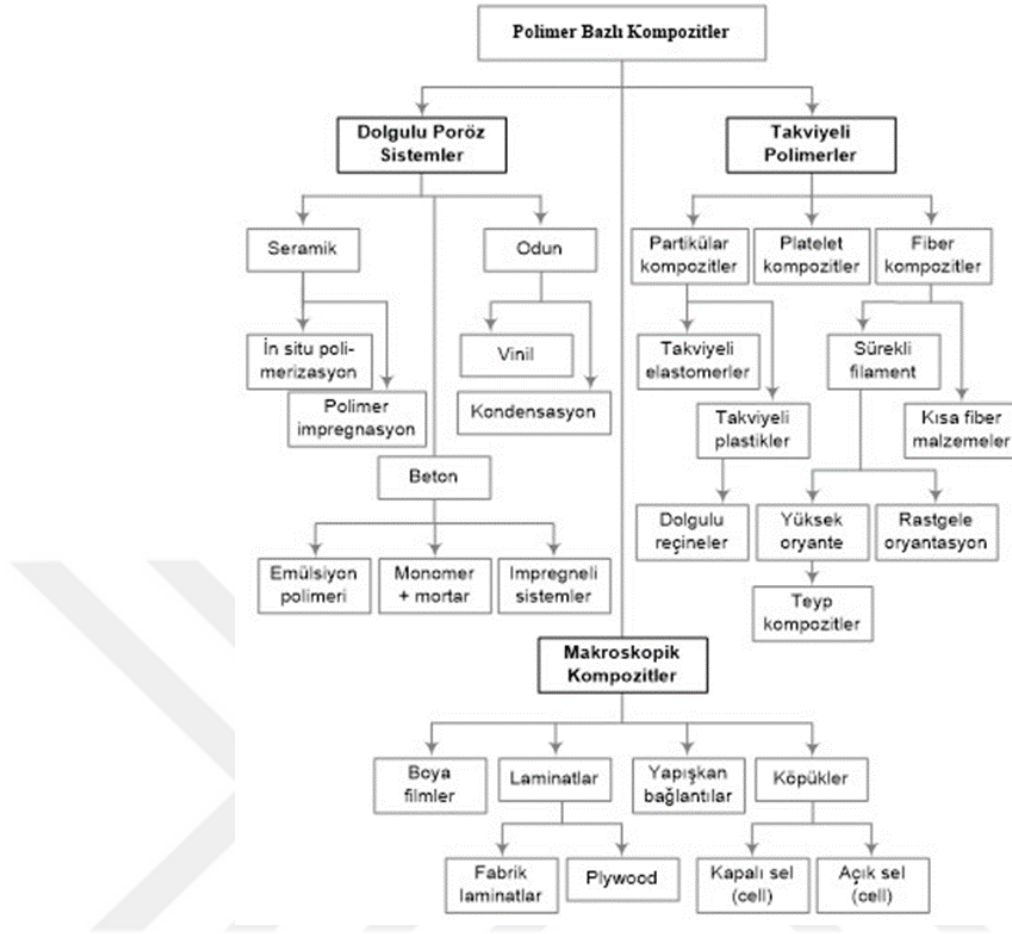
Kompozit malzemeleri oluşturan malzemeler kendilerine has özelliklerini kompozit malzemenin içerisinde de korur. Kompozit malzemeyi oluşturan farklı malzemeler kompozit malzemenin fiziksel ve mekanik özelliklerini belirler.

Kompozitteki primer faz matristir; sürekli ve esnektir, dispers (takviye) fazı tutar ve uygulanan yükün dağıtılmasını sağlar. Dispers faz genellikle matristen daha kuvvetlidir, matris içinde sürekli veya rastgele düzenlemelerde bulunabilir.

Polimer reçine ve takviye polimer kompozit malzemeyi oluşturur. Polimer reçineye matris denir, takviye malzemesi olarakta genellikle fiberler kullanılmaktadır. Matris ve fiber oranları malzemenin kullanım yerine göre değişmektedir. Matris ve takviye arasındaki tutunma kuvveti kimyasal ve fiziksel olabilir.

Polimer matris kompozitler çok çeşitli alanlardaki ihtiyaçlara cevap verebildiği için en sık kullanılan kompozit türüdür. Seri imalat için uygundur, işleme süreleri kısadır. Mukavemetleri, kimyasal dayanımları, aşınma dirençleri gibi özellikleri iyidir. Günlük hayatımızda geniş kapsamlı olarak kullanılmaktadır. Bütün bu olumlu taraflarının yanı sıra olumsuz olarak termal dirençleri düşük ve termal genleşmeleri yüksektir. Bu olumsuz kriterler göz önüne alınarak tasarımlarda tercih edilmelidir.

Şekil 2.10'daki polimer matris kompozitler sınıflandırma sisteminde görüldüğü gibi pek çok türde polimer matris kompozit vardır.



**Şekil 2.10.** Polimer matris kompozitler sınıflandırma sistemi

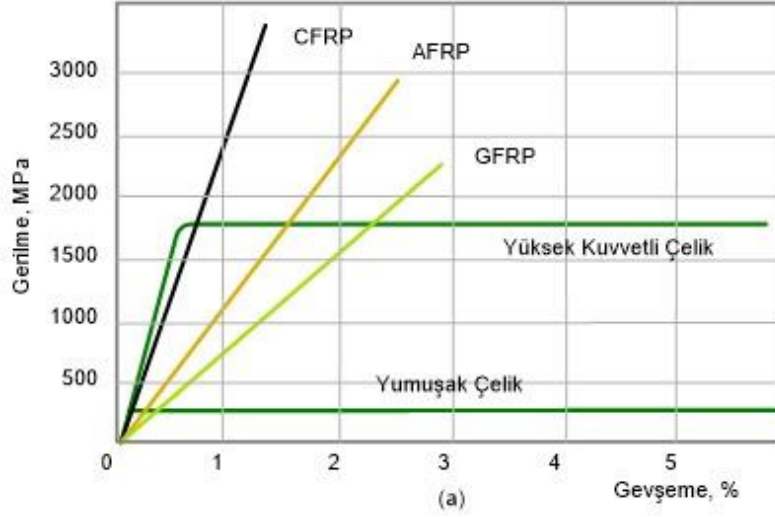
Takviye malzeme partiküller, flaklar, fiberler veya laminatlar olabilir. Partiküller için tercih edilen herhangi bir yönlendirme yapılmaz, matris malzemelerin özelliklerini geliştirmesi ve/veya maliyeti düşürmesi üzerinde durulur; küresel, kübik, platelet, veya düzgün veya düzensiz geometrik formlarda olabilir. Partikülat takviyelerin boyutları her yönde yaklaşık olarak eşittir. Polimerlerin sıklığı, kuvveti ve kırılma dayanımı düşüktür. Bu özellikler mikro-/nano-SiO<sub>2</sub>, cam, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Mg(OH)<sub>2</sub> ve CaCO<sub>3</sub> partiküller, karbon nanotüpler ve tabakalı silikatlar gibi inorganik partikülatlarla takviye edilerek yükseltilir.

Teknolojik olarak en önemli polimer matris kompozitler, dispers (takviye) fazın bir fiber formda olduğu kompozitlerdir.

Fiber takviyeli polimer matris kompozitler içerdikleri takviye malzemelerine göre dört grup altında toplanabilir:

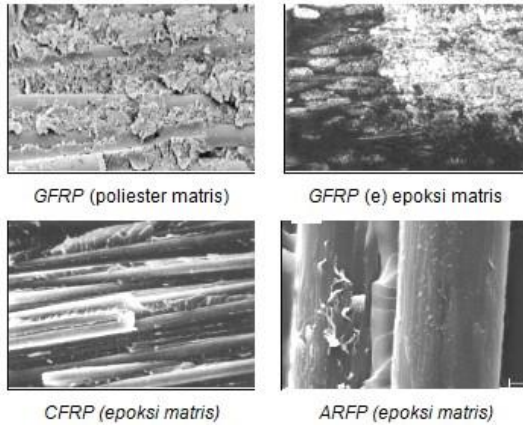
- Cam Fiber-Takviyeli Polimer Kompozitler (GFRP)
- Karbon Fiber Takviyeli Polimer Kompozitler (CFRP)
- Aramid Fiber Takviyeli Polimer Kompozitler (AFRP)
- Diğer Fiber Takviyeli Polimerler

Mukavemet açısından değerlendirmesini Şekil 2.11’de gösterilmektedir.



**Şekil 2.11.** Bazı CFRP, AFRP, GFRP, yüksek kuvvetli çelik ve yumuşak çeliğin gerilme-gevşeme eğrilerinin kıyaslamaları

Bazı fiber takviyeli polimer matris kompozitler SEM mikroskobu kullanılarak iç yapıları fotoğraflandırılmıştır. Şekil 2.12’de gösterilmektedir.



**Şekil 2.12.** Bazı fiber takviyeli polimer matris kompozitler SEM mikroskobu kullanılarak iç yapıları fotoğrafları

Fiberglas, bir polimer matriste sürekli veya süreksiz cam fiberlerin bulunduğu basit bir kompozittir. En çok kullanılan cam (E-cam) fiberlerin çapı 3-20 µ arasındadır; bileşimi: % 52-56 SiO<sub>2</sub>, % 12-16 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, % 16-25 CaO, ve % 8-13 B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

Fiberglaslar üretilirken termoset ve termoplastik matrisler kullanılır. Termosetler matrislere örnek olarak poli-esterler ve epoksiler, termoplastik matrislere örnek olarak ise poliamid, polikarbonat, polistiren ve polivinilklorür gösterilebilir. Fiberglaslardaki fiber oranı %40-70 aralığında değişebilir. Bu oran, tasarlanan parçadan beklenen malzeme performansına göre değişebilir.

Cam fiberlerin yüzeylerinde oluşan çatlama, cam fiberlerin gerilme özelliklerini büyük ölçüde etkilemektedir. Cam fiber yüzeyleri, sert bir malzeme ile temas ettiğinde çatlayabilir. Cam fiberlerin üretimini esnasında atmosferden etkilenmemesi için bir kaplama ile kaplanmaktadır. Bu kaplama atmosfer ile cam fiber arasında oluşabilecek etkileşimi engelleyerek cam fiberin çatlamasını engellemektedir.

Başta otomotiv ve deniz araçları gövdeleri olmak üzere fiberglaslar kullanıldığı birçok alan vardır. Her geçen gün kullanım alanları da artmaktadır.

## **2.7. Karbon Fiber Takviyeli Polimerler (CFRP)**

Karbon fiber takviyeli polimerler (CFRP) üretiminde matris olarak genellikle termoset epoksiler, poliesterler ve poliamidler kullanılmaktadır. CFRP laminant yapıya sahip olduğu için malzeme enlemesine ve boylamasına takviye etkisi göstermektedir. Açık, kapalı kalıplama ve pultrüzyon yöntemleri ile üretimi gerçekleştirilebilmektedir.

Kullanılan karbon oranı karbon fiber takviyeli epoksi matrisli kompozitlerin sertliğini ve mukavemetini belirleyen bir parametredir. İçeriğin karbon oranını değiştirerek istenilen sertlik ve mukavemette kompozit elde edilebilir. Karbon oranı değiştirilerek, malzemenin performansı ayarlanabilir. Mukavemet ve hafiflik istenilen uygulamalarda sıklıkla kullanılır. Örneğin; uzay roketlerinde, savaş jetlerinde, uydu ve uzay araçlarında, spor otomobil parçalarında, deniz taşıtlarında, basınçlı depolama tanklarında kullanılmaktadır.

## 2.8. Aramid Fiber Takviyeli Polimerler (AFRP)

Polimer matrislerde genellikle aramid fiberler kullanılmaktadır. Epoksi ve poliesterler, aramid fiberler ile kullanılan matrislerdir. Tekstil uygulamalarında aramid fiberler tercih edilmektedir. Bunun sebebi aramid fiberlerin esnek ve sünek olmasıdır. Tekstil uygulamalarında bu iki özellikten faydalanılmaktadır. Aramid fiberler ile kurşun geçirmez yelek, halat, spor ekipmanları, conta, fren balatası gibi farklı ürünler yapılabilmektedir.

Sürekli ve dizili cam, karbon ve aramid fiber takviyeli epoksi matrisli kompozitlerin özellikleri şekil 2.13'te verilmiştir; fiberlerin, hacim fraksiyonu 0.60'tır. (L: boylamasına "longitudinal", T: enlemesine "transverse" dizilişi gösterir.)

	GFRP (E-cam)		CFRP (karbon)		AFRP (Kevlar 49)	
Spesifik gravite	2.1		1.6		1.4	
Gerilme modülü, GPa	45 L	12 T	145 L	10 T	76 L	5.5 T
Gerilme kuvveti, MPa	1020 L	40 T	1240 L	41 T	1380 L	30 T
Son gerilme gevşemesi, %	2.3 L	0.4 T	0.9 L	0.4 T	1.8 L	0.5 T

Şekil 2.13. Bazı fiber takviyeli polimer matris kompozitler çekme testi dayanımları

## 2.9. Akrilonitril Bütadiyen Stiren (ABS)

ABS, üç çeşit monomerden oluşan ve bu monomerlerin özelliklerini taşıyan termoplastik bir polimerdir. Önemli mekanik özellikleri şunlardır; çekme dayanımı, sertlik ve elastiklik. Özellikle darbe dayanımı ve tokluk ihtiyacı olan uygulamalarda tercih edilmektedir. Ayrıca ABS, kolay işlenebilmektedir, kimyasallara karşı direnci yüksektir, elektriksel iletkenliği yüksektir.

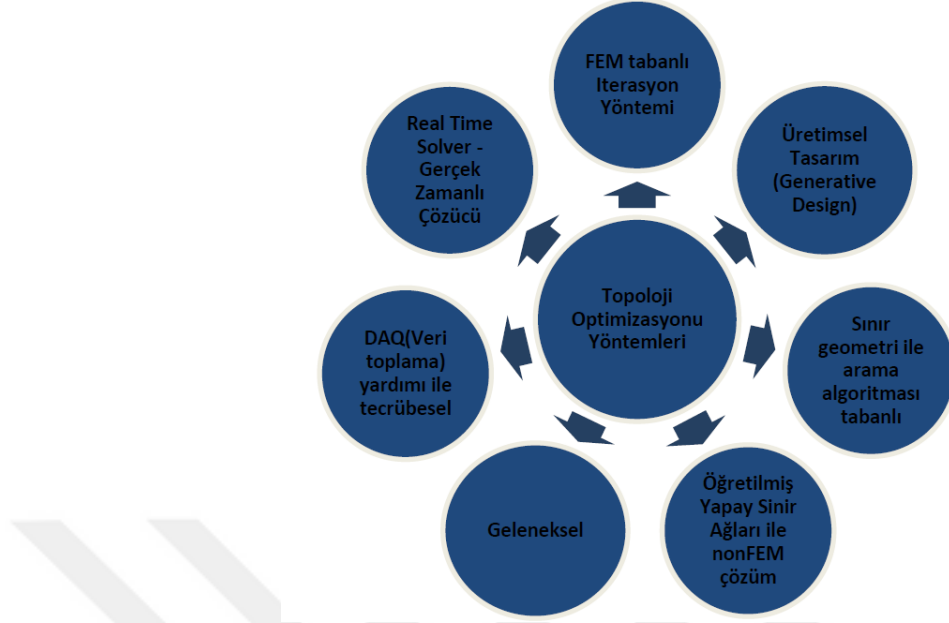
ABS kolay işlenebilen, darbe dayanımı yüksek, elektrik yalıtımı iyi, hafif bir malzeme olduğu için metal ve tahta yerine kullanılmaktadır. Ayrıca kimyasallara karşı dayanımı yüksektir, bu özelliği sayesinde kimyasalları paketlenmede ve saklamada kullanılmaktadır.

ABS malzemenin avantajlarının yanı sıra bazı dezavantajları da vardır. Diğer plastik malzemelerle kıyaslandığında maliyetleri daha yüksektir. Olumlu özellikleri göz önüne alındığında günlük hayatımızda ve sanayi uygulamalarında sıklıkla kullanılmaktadır.

Aseton ile çözülebilen ABS bir petrol ürünüdür. ABS malzemesi kullanılarak üretilen ürünler, 20 ile 80°C arasında kullanıma uygundur. ABS malzemesinin 80°C üzerindeki bir ortamda çalışması durumunda yumuşama ve şekil bozukluğu yaşanabilir. ABS malzemesi kullanılarak üretilen ürünler yoğun güneş ışınlarına maruz bırakılırsa zarar görebilir. ABS malzemesi yüksek mukavemet ve darbe direnci özellikleri nedeniyle üç boyutlu yazıcılarda sıkça tercih edilen bir malzemedir. (Evlen, H. 2018, Pınar, E. 2010)

## **2.10. Topoloji Optimizasyonu**

Topoloji optimizasyonunu temeli uygulamalı matematiktir. Birçok alanda uygulamaları bulunmaktadır. Örneğin; otomotiv, savunma sanayi, makine imalatı, uzay, havacılık vb. Topoloji optimizasyonunda asıl amaç bir yapının tasarımı, performans limitleri ve imalat kısıtlarına göre en uygun malzeme yerleşimini belirlemektir. Topoloji optimizasyon yöntemleri Şekil 2.14'te gösterilmiştir.



**Şekil 2.14.** Topoloji optimizasyonu yöntemleri (Okudan, 2018)

### 2.11. Eklemeli Üretim

Eklemeli üretim, tasarlanan parçanın üç boyutlu modelinin verilerini katmanlar haline getirilip, imal edilecek malzemeyi üst üste yığarak model malzemeyi üretme yöntemidir.

Eklemeli üretim yöntemi kullanarak tasarlanan parçayı üretmek diğer üretim yöntemleri ile kıyaslandığında çok daha hızlıdır. Bu sebeple eklemeli üretim yöntemi prototip parça üretimlerinde sıklıkla kullanılmaktadır. Eklemeli üretim yöntemleri dışındaki üretim yöntemleri parça üretim esnasında birden fazla üretim metodu kullanmak zorunda iken eklemeli üretimde yönteminde ise sadece parçanın CAD verisi gereklidir. Eklemeli üretim ilk olarak ultraviyole ışığa duyarlı sıvı polimerin bir lazer ışık kullanarak katılaştırılması sonucu oluşturulan tabakaları birleştirilmesiyle gerçekleştirilmiştir.

Eklemeli üretim yöntemi ilk çıktığında bu yöntem ile kullanılacak malzeme çeşidi sınırlı sayıdaydı ayrıca üretilen parçaların iç boşlukları çok, üretim esnasında oluşan hataları fazla, yüzey kalitesi kötüydü. Bu problemler giderilene kadar eklemeli üretim

yöntemi tercih edilmemiştir. Gelişen teknoloji ile tüm bu hatalar giderilmiş ve prototip parça imalatında ilk akla gelen yöntem olmuştur.

Geleneksel üretim teknikleriyle karşılaştırıldığında eklemeli üretim bazı avantajları ile cazip hale gelmektedir. Bu avantajlardan bazıları aşağıda belirtilmiştir. (Ercan, 2019)

- Talaş kaldırma esasına dayanan eksiltmeli üretim yöntemleriyle kıyaslandığında, eklemeli üretim atık malzeme miktarını minimum seviyeye indirerek malzeme verimliliği arttırmaktadır. (Smith ve Dean, 2013)
- Eklemeli üretim, geleneksel üretim tekniklerinde kullanılan aparat, kesici takım, kalıp gibi ilave yardımcı aletlere gereksinim duymamasından dolayı maliyeti önemli ölçüde azaltmaktadır (Weller, Kleer ve Piller, 2015).
- Eklemeli üretim, ilave üretim süreçlerine gerek kalmadan parçaların doğrudan tek seferde üretebildiği bir yöntemdir. 3 boyutlu yazıcılar ile tasarım ve üretim arasındaki kademeler atlanarak, tasarımdan doğrudan imalat yapılır. Bu özelliğinden dolayı iş gücünü ve zamanı azaltarak verimliliği artırır. (Huang, Liu, Mokasdar ve Hou, 2012)
- Geometrik kısıtlamaları ortadan kaldırır ve tasarım özgürlüğünü sağlar, geleneksel tekniklerle üretilmesi çok zor veya imkânsız olan periyodik hücreli yapılar eklemeli üretim ile kolayca üretilebilir (Yazdani Sarvestani, Akbarzadeh, Niknam ve Hermenean, 2018).
- Prototip üretiminde maliyeti önemli ölçüde azaltır. (Huang, Liu, Mokasdar ve Hou, 2012)
- İki veya daha fazla parçadan oluşan parçalar doğrudan tek bir seferde basılabildiğinden montaja gerek yoktur. (Ercan, 2019)

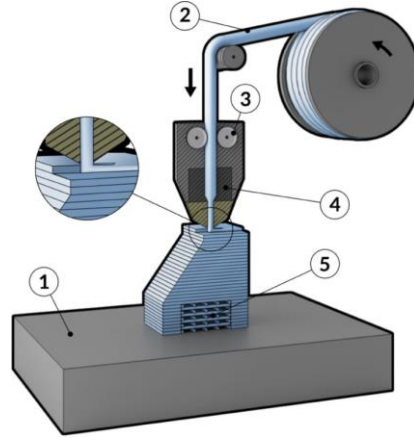
Eklemeli üretimin temel süreçleri baştan sona şekil 2.15'te gösterilmiştir. Eklemeli üretimin ilk adımı üretilmek istenilen parçanın bilgisayar destekli tasarım programları kullanarak tasarlanmasıdır. Sonrasında tasarlanan model STL (STereoLithography) formatına çevrilir. STL verisi parçanın üç boyutlu yüzey verisini tanımlamaktadır. İlk stereolitografik 3 boyutlu yazıcı 1987'de Chuck Hull tarafından icat edilmiştir.

STL formatındaki veriyi 3 boyutlu yazıcının anlayabileceği şekle çevirebilmek için “Slicer” bir diğer anlamıyla “dilimleyici” diye bilinen bir ara yüz programının kullanılması gerekmektedir. “Cura” isimli program bu iş için kullanılan, en çok bilinen bilgisayar programıdır. Cura programı kullanılarak üretilmek istenilen parçanın 3 boyutlu modeli katmanlara ayrılır. Böylece, 3 boyutlu model katmanlar haline getirilmiş olur. Her katman ara yüz programı vasıtası ile Gcode formatına çevrilir. Gcode, 3 boyutlu yazıcının nozulunun hareketini sağlayan motorların hareket etmesi için gerekli komutları veren kodlardır. 3 boyutlu yazıcının hareket kodları belirlendikten sonra parçayı yazmak için diğer parametreler belirlenir. Bunlar; işleme sıcaklığı, katman kalınlığı, işleme hızı, tabla sıcaklığı vb.



**Şekil 2.15.** Eklemeli üretim yönteminin temel aşamaları (Ercan 2019)

Şekil 2.16’da EYM yönteminin sistem şematiği gösterilmektedir. Burada 1 numara, inşa platformunu (işleme tablası), 2 numara termoplastik filament, 3 numara birbirine ters yönde dönen merdaneleri, 4 numara nozzle ve ısıtıcının bulunduğu ekstrüzyon kafasını ve 5 numara ise üretilen parçayı göstermektedir. (Ercan 2019)



**Şekil 2.16.** Eriyik yığıma modelleme yönteminin sistem şematığı (Ercan 2019)

EYM üretim yönteminde kullanılan yazıcının hareketini gerçekleştirebilmesi için G code formatında veriye ihtiyaç vardır. Bu veriyi elde edebilmek için imal edilmek istenilen ürünün datasının stl (Stereolitografi) formatında olması gerekmektedir. Farklı bilgisayar programları kullanılarak (örneğin CURA) stl formatındaki veri katmanlara ayrılarak G code larına dönüştürülür. Ayrıca ürün kalitesini belirleyen eriyik sıcaklığı, tabaka kalınlığı, doluluk oranı eriyik akış oranı, işleme hızı gibi parametreler üç boyutlu yazıcıya gönderilir. İmal edilecek parça geometrisi ve işleme stratejisine göre ihtiyaç halinde destek malzemesi de kullanılabilir. Destek malzemesi uygulanması için üç boyutlu yazıcının çift nozullu olması gerekmektedir.

Polilaktik asit (PLA), akrilonitril bütadien stiren (ABS), termoplastik poliüretan (TPU), Polieter Eter Keton (PEEK) malzemeleri EYM’de sıklıkla kullanılan malzemelerdir. Bu malzemeler termoplastik özellik göstermektedir. Termoplastikler ısıyla şekillendirilebilen, hafif, yüksek dayanımlı ve esnek, yüzey kaliteleri iyi, kolay renklendirilebilen malzemelerdir. Bu özellikler göz önüne alınarak tasarımcılar parçaları tasarlar ve EYM ile parçaları fiziki olarak üretebilir.

Termoplastiklerin imalat yöntemlerinden biri de ekstrüzyon yöntemidir. Bu yöntem ile üretilen parçalar EYM ile üretilen parçalara göre daha mukavimdir. Bunun sebebi EYM

yöntemi ile üretilen parçalar anizotropik özellikler göstermesidir. Anizotropi, EYM'nin parametrelerinden kaynaklanmaktadır. Bunlar; tarama deseni ve tarama yönüdür. Anizotropik parçalar, farklı yönlerde ve doğrultularda fiziksel özellikleri farklılıklar gösterirken, izotropik parçalar her doğrultu ve yönde aynı fiziksel özellikler gösterir.

EYM parametreleri üretilen parçanın mekanik özelliklerini önemli ölçüde etkilemektedir. EYM kullanılarak üretilen parçaların mekanik özelliklerini iyileştirmek için araştırmalar yapılmaktadır. Eriyik malzeme sıcaklığı, malzeme yığıma yönü, hızı gibi parametreler EYM için önemli parametrelerdir. Bu parametreleri kontrol ederek uygun istenilen ürün özellikleri oluşturulmaya çalışılır.

- Dilimleme parametreleri: Katman (tabaka) kalınlığı, nozzle çapı, akış hızı, işleme hızı, doluluk oranı, tarama yönü, tarama açısı, tarama genişliği, tarama deseni, kontur genişliği, üst kalınlık, alt kalınlık gibi parametrelerdir ve üretilecek parçanın mekanik davranışına etki etmektedir.
- İnşa yönü: EYM yöntemi ile üretilen parçalar, tarama deseni, tarama yönü ya da inşa yönüne bağlı olarak anizotropik özellikler göstermektedirler. Üretilecek parçaların dikey, yatay ya da yanal inşa yönünde üretilmesi, yapının farklı mekanik özellikler göstermesine neden olur.
- Sıcaklık koşulları: EYM yönteminde kullanılan termoplastik malzemeler, çevre sıcaklığı, işleme sıcaklığı (ekstrüzyon sıcaklığı) ve tabla sıcaklığının değişimine bağlı olarak farklı mekanik özellikler gösterirler.

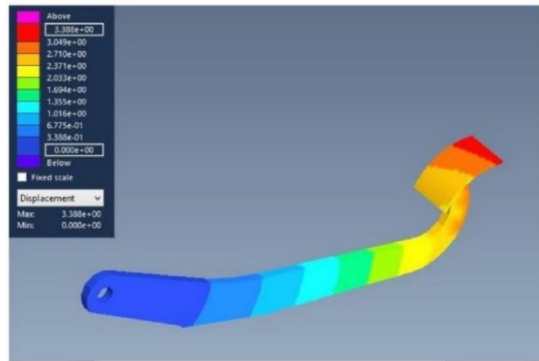
## **2.12. Konuyla İlgili Yapılan Çalışmaların İncelenmesi**

Ingale (2019) çalışmasında, güvenlik faktöründen ödün vermeden minimum kütle kullanarak ATV motorları için fren pedalının topolojik optimizasyonunu incelemiştir. Bir pedalın üç boyutlu katı modeli oluşturulmuş ve statik yapısal analiz ve topoloji optimizasyonu yapılmıştır. Çalışmanın temel amacı, güvenlik faktöründen ödün vermeden pedalın ağırlığının en aza indirmektir. Ağırlığı azaltmak için alüminyum malzemesini tercih etmiştir. Optimize edilen tasarımda oluşan stres ile pedalın orjinal

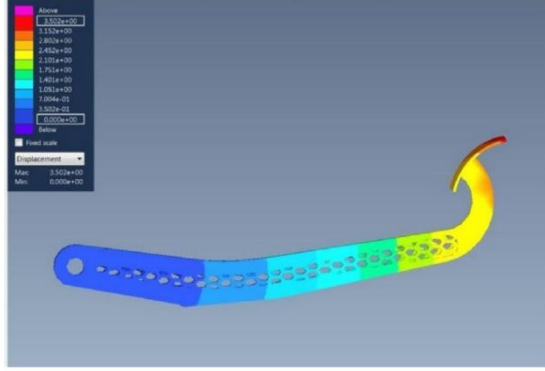
halinde oluşan stress birbirine yakındır. Topoloji optimizasyonundan sonraki ağırlığı ise orijinal modelin yaklaşık yarısı kadardır.

Sargini çalışmasında, geleneksel yöntemler (pres, kaynak vb.) ile üretilen fren pedalının, eklemeli imalat yöntemleri kullanılarak üretilebilirliğini incelemiştir. Üretilebilirliğin yanı sıra, sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak fren pedalının dayanımına bakmış ve topoloji optimizasyonundan faydalanarak parça ağırlık azaltımına gitmiştir. Yaptığı sayısal analizlerde topoloji optimizasyon uygulanan fren pedalının analizlerden geçtiğini görmüştür. Bunun yanında yaptığı tasarımın ağırlığı, orijinal tasarıma göre %54 oranında azaltılmıştır. Çalışmaya göre yapısal analiz sonuçları, eklemeli imalat teknolojileri kitlesel pazar uygulaması için uygulanabilir olduğunu göstermiş ve ayrıca önemli bir ağırlık azalması yapılmıştır. Mevcut tasarım ile yapısal performansı etkilemeden endüstriler için bir fırsat yaratılmıştır.

Arun v.d. yapmış oldukları çalışmada fren pedalının kafes yapısının topoloji optimizasyonu incelemiştir. Kafes yapılarında yaptıkları iyileştirmelerle pedalın kütlesinde %21,2'lik bir azalma sağlamışlardır. Araştırmacılar yaptıkları çalışmada çelik malzeme kullanmışlar ve pedal imalat yöntemi konusunda SLS yöntemini tercih etmişlerdir. SLS yöntemi ile metal malzemeler 3 boyutlu olarak yazılabilmektedir. SLS yöntemi kullanılarak çelik malzeme ile imal edilecek olan pedalın şekil 2.17 ve 2.18'de pedala 1100 N kuvvet uygulandığında pedalın maksimum yer değiştirme miktarı gözükmektedir. Şekil 2.17 pedalın kafes yapısının değiştirilmeden önceki halini, şekil 2.18 ise kafes yapısı bal peteği ile değiştirilmiş bir pedalın maksimum yer değişim miktarını göstermektedir.

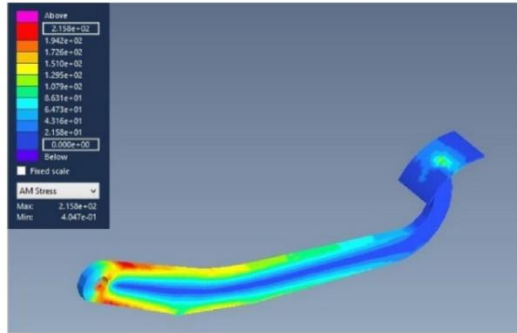


**Şekil 2.17.** Pedalın kafes yapısının değiştirilmeden önceki hali (Arun v.d., 2021)

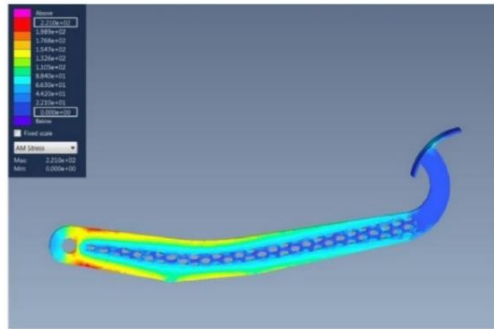


**Şekil 2.18.** Pedalın kafes yapısı bal peteği ile değiştirilmiş hali (Arun v.d., 2021)

Şekil 2.19 ve 2.20 ise sonlu elemanlar metodu kullanılarak pedalın kafes yapısının değiştirilmeden önceki hali ve kafes yapısı bal peteği ile değiştirilmiş hali üzerindeki maksimum gerilme oluşan bölgelerini ve değerlerini göstermektedir.



**Şekil 2.19.** Von Mises gerilimi pedalın kafes yapısının değiştirilmeden önceki hali (Arun vd., 2021)



**Şekil 2.20.** Von Mises gerilimi pedalın kafes yapısı bal peteği ile değiştirilmiş hali (Arun v.d., 2021)

Yapılan çalışmada maksimum yer değişimi, gerilme ve ağırlıkları çizelge 2.1’de özetlenmiştir.

**Çizelge 2.1.** Yapılan çalışmada hesaplanan deplasman ve gerilme değerleri

No	Cins	Ağırlık (Kg)	Yer değişimi (mm)	Von Mises Gerilimi (Mpa)
1	Kafes yapısının değiştirilmeden önceki hali	0.8374	3.10	215.80
2	Kafes yapısı bal peteği ile değiştirilmiş hali	0.6598	3.19	221.00

### 3. MATERYAL ve YÖNTEM

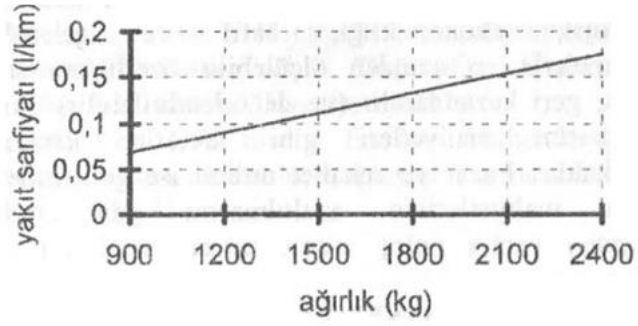
#### 3.1. Giriş

Ulaşım, günümüzün en önemli ihtiyaçları arasında yer almaktadır. Bu ihtiyaçlarımızı genellikle motorlu taşıtlar ile karşılamaktayız. Motorlu taşıtlar, ulaşım ihtiyaçlarımızı karşılayarak hayatımızı kolaylaştırırken aynı zamanda birçok problem de yaratmaktadır. Yarattığı en önemli problem, petrol kaynaklarının hızla tüketilmesi ve emisyon salınımıdır. Problemlerin etkilerini her geçen gün daha fazla hissetmekteyiz. Problemlerin kök neden incelendiğinde araç ağırlıkları yakıt tüketimini dolayısıyla emisyon salınımını önemli ölçüde etkilediği görülmektedir. Araç ağırlıklarını azaltmak için alternatif malzeme ve imalat yöntemleri bulunması problemin çözümüne katkıda bulunacaktır. Özetle; sürdürülebilir bir şekilde ulaşım ihtiyaçlarımızı karşılayabilmek için araç ağırlıklarını düşürmek en etkili çözüm olduğu görülmektedir.

Otomotiv için tasarlanan parçaların ağırlığını azaltmak için topoloji optimizasyonu yöntemi sıklıkla kullanılan bir yöntemdir. Yapılacak iyi bir topoloji optimizasyonu çalışması araçta önemli ölçüde yakıt ekonomisi sağlayacaktır.

Güvenlik, yakıt tüketimi gibi verilen performans hedefleri açısından araç ağırlığını azaltılması son derece yararlıdır. 1300 kg ağırlığında bir otomobilde 100 kg ağırlık azaltıldığında, 100 km'de 0.35 lt yakıt tasarrufu ve 8.4 g CO<sub>2</sub>/km egzoz emisyonunda azalma sağlanmaktadır. Başka bir ifadeyle, 100 km'de egzoz emisyonunu 1 g CO<sub>2</sub>/km azaltmak için otomobilin ağırlığı yaklaşık olarak 12 kg azaltılmalıdır (Meyer-Pruessner, 2007).

Otomotivde kullanılan parçaların ağırlık azaltma çalışmaları iki farklı yöntem ile gerçekleştirilmektedir. İlk olanı, öz kütle değeri yüksek olan malzeme yerine daha düşük öz kütleli malzeme kullanarak ağırlık azaltılması yapılabilir. Bu yöntemle direkt azalma yöntemi denir. İkinci yöntem ise, optimizasyon çalışmaları ile parçanın geometrisini değiştirerek yeni bir parça oluşturulmasıdır. Yeni oluşan parça, ilk haline göre daha az malzeme kullanıldığından ağırlığı azaltılmış olur. Bu yöntemleri kullanırken parçadan beklenen performans kriterleri de göz önüne alınarak iyileştirmeler yapılmaktadır.



**Şekil 3.1.** Benzinli binek otomobillerin ağırlıklarına göre ortalama yakıt sarfiyatı (Muter, 1984)

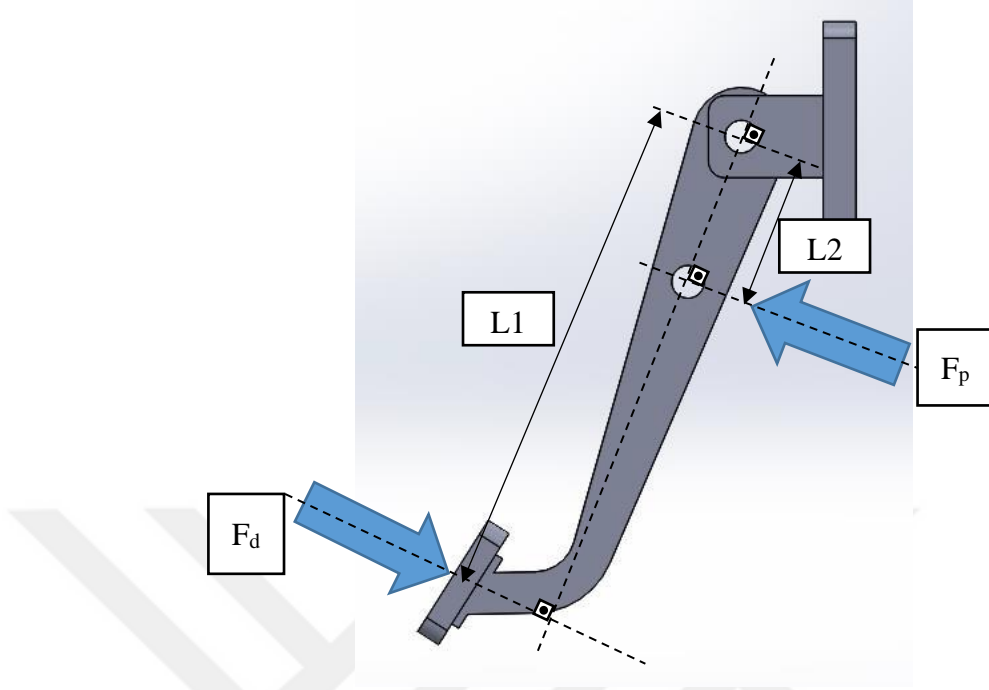
Bu tezde, eklemeli imalat ile üretilen bir ayak freni pedalının optimize edilmiş yeni bir tasarımı anlatılmaktadır. Ayak freni tasarım girdileri, malzeme seçimi, topoloji öncesi ve sonrası FEA analizleri, 3B yazıcı ile ayak fren pedalının yapılabirliğinin incelenmesi ve imalatı, müşteri isterleri ile fiziki testlerin gerçekleştirilmesi, çıkan test sonuçları ile FEA analizleri sonuçlarının karşılaştırılması değerlendirilecektir.

### 3.2. Tasarım Girdileri

Ayak freni pedalının başlıca tasarım girdileri şunlardır:

- Pedal geometrik temel ölçüleri,
- Uygulanacak en yüksek kuvvet altındaki, en yüksek yer değiştirme değeri,
- Pedal ağırlığı,

Temel olarak, ayak freni pedalı basit bir makinedir. Basit makineler, kuvvetten kazanç sağlamak, yoldan kazanç sağlamak, kuvvetin yönünü değiştirmek, işin yapılma hızını değiştirmek ya da bir enerji türünü başka bir enerji türüne dönüştürmek amaçlarıyla kullanılabilir. Şekil 3.2’de, basit bir makine olarak modellenen ayak fren pedalı gösterilmektedir.



**Şekil 3.2.** Ayak fren pedalı modeli

Matematiksel olarak ayak fren pedalını şu şekilde modelleyebiliriz:

$$\frac{F_p}{L1} = \frac{F_d}{L2}$$

$F_p$  : Park fren sistemine gelen kuvvet (N)

$F_d$  : Park fren sistemine uygulanan kuvvet (N)

L1: Uygulanan kuvvet ile pedal dönme merkezi arasındaki mesafe (mm)

L2: Alınan kuvvet ile pedal dönme merkezi arasındaki mesafe (mm)

**Şekil 3.20.** Ayak fren pedalı matematiksel modeli

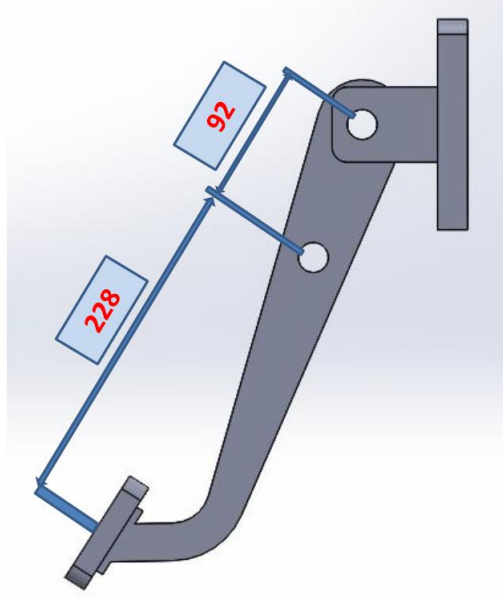
Ayak park freni pedalının geometrik ölçüleri belirlenirken sürücü kabini iç tasarımı dikkate alındı. Ayak park freni pedalı sürücünün ayak bölgesinde, genellikle sol ayağı ile kumanda edebileceği bir yerde bulunmaktadır. Ayak park freni pedalının yanında manuel şanzımanlı araçlarda, debriyaj pedalı, fren pedalı ve gaz pedalı bulunur. Otomatik

şanzımanlı araçlarda ise debriyaj pedalı bulunmadığından sadece fren ve gaz pedalı bulunmaktadır. Bu iki durum dikkate alınarak ayak park freni pedalının kaplayabileceği hacim belirlenir. Bir diğer kriter de sürücü ergonomisidir. Sürücünün ayak park freni pedalını rahatlıkla aktif ve pasif hale getirebiliyor olması gerekmektedir. Tüm bu kriterlerin yanında araç park freni sisteminin ihtiyaç duyduğu kuvvet değeri de ayak park freni pedalının geometrik ölçülerini etkilemektedir.

Bu çalışmada kullanılan ayak park fren pedalı tasarlanırken mevcut pedallar örnek alındı ve bu pedalların temel ölçüleri kullanıldı.

Pedala uygulanacak kuvvet değerini otomobil tasarımı yapan üreticiler kendi isterlerinde belirtilmektedir. Park frenin sisteminin güvenli bir şekilde çalışmasını sağlamak için pedala uygulanacak en fazla kuvvet değeri 100 daN dır. Pedal sabitlendiğinde en fazla kuvvet uygulandığında pedalın da en fazla 10 mm hareket etmesine izin verilmektedir. En fazla kuvvet ve yer değişimi değerleri pedal tasarımında en önemli tasarım kriterlerini oluşturmaktadır.

Konvensiyonel metal pedalların ağırlıkları ortalama 1,5 kg civarındadır ve günümüzde kullanılan otomobillerde bu ağırlık değeri kabul edilebilir seviyededir. Bu çalışma sonucunda çıkacak ayak pedalının hedef ağırlığı mevcut metal pedalların ağırlığını %50'si kadardır. Pedal ağırlığı düşerken ürün performansı da metal pedallarındaki gibi olacaktır. Şekil 3.3'te tasarlanacak pedalın temel ölçüleri gösterilmiştir.



**Şekil 3.3.** Ayak fren pedalı temel ölçüleri

### **3.3. Malzeme Seçimi ve İmalat Yöntemi Değerlendirme**

Mevcut ayak park freni pedallarını malzeme açısından değerlendirecek olursak pedalların malzemeleri sadece metal veya metal+polimer malzemedен oluşmaktadır. Metal+polimer malzeme kullanılan pedallarda; metal malzeme üzerine polimer malzeme kaplanarak hibrit bir yapı oluşturulmaktadır. Pedalı imal ederken metalin üzerine polimer kaplanmasının sebebi, pedalın yapısını hem daha dayanıklı hem de daha tok hale getirmektir. Sadece metal malzemedен imal edilen pedallarda genellikle EN 10025-2 standardına sahip S235JRC kalite metal malzeme kullanılmaktadır. Metal+polimer pedallarda ise EN 10025-2 standardına sahip S235JRC kalite metal malzeme ile PP GF50 polimer malzeme kullanılmaktadır.

EN 10025-2 standardına sahip S235JRC malzeme; genel konstrüksiyon levhaları, muhtelif makine parçası imalatı, kara ve demiryolu araçları imalatı için genel yapı çelikleri gibi alanlarda kullanılmaktadır. (<https://www.gazimetal.com.tr/urunler/celik-kaliteleri/>) (Erişim tarihi: 01.04.2022)

PP GF50 polimer malzeme ise otomotiv sanayiinde kullanılan parçalardan, tekstil ve gıda paketlemesine kadar geniş kullanım alanı bulunan polipropilen (PP), ambalaj ve

etiketleme, tekstil (halat, termal iç çamaşırı ve halı gibi), kırtasiye, plastik parçalar ve yeniden kullanılabilir kaplar, laboratuvar ekipmanı, hoparlör, otomotiv parçaları gibi birçok uygulamada kullanılır.

Sadece metal malzeme ile üretilen pedallar bir sac şekillendirme kalıbı ile sac levhadan kesilerek form verilir ve nihai pedal şeklini alır. Bu yöntem seri imalat için uygundur. Metal+polimer malzemeli pedallarda ise pedal formu verilen metal parça üzerine plastik enjeksiyon yöntemi ile kaplama yapılır. Metal parça bu hibrit tasarımda polimer malzemeye iskelet olmaktadır. Bu imalat yöntemi imal edilecek parça sayısı yüksek olan seri imalatlar için uygundur.

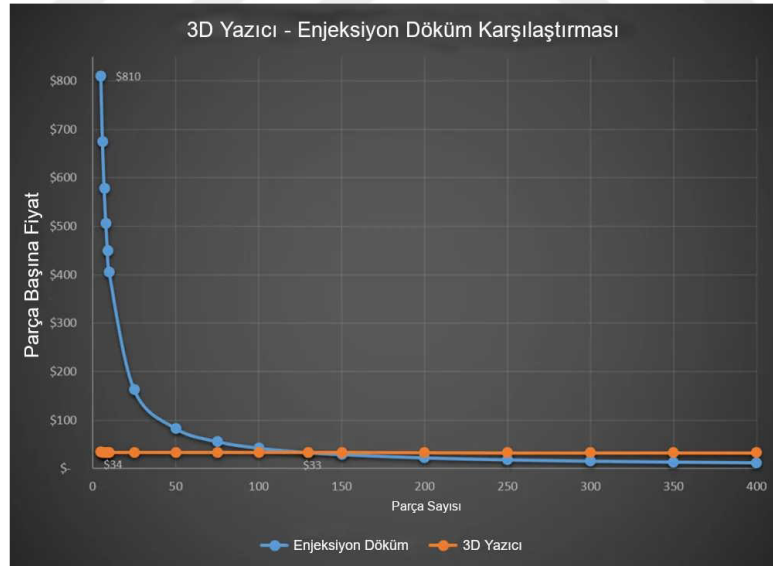
Bu çalışmada üretim adetleri düşük olan ayak park freni pedalının, yine üretim adetleri düşük imalatlar için ideal bir yöntem olan 3B yazıcı kullanılarak imal edilebilirliği incelenmektedir. Üretilen park freni pedalı için en uygun malzeme ABS olarak öngörülmüştür. ABS malzemesi 3B yazıcılarda sıklıkla kullanılmaktadır ve diğer 3B yazıcı için uygun olan malzemeler arasında fiyatı düşüktür. Ayrıca, pedal gibi fonksiyonel parça imalatında mekanik özellikleri yeterli olduğu için kullanılmaktadır. Bu çalışmada Zortrax markasının ticari ismi Z-ABS 2 olan ABS cinsi malzemesi kullanılmıştır. Çizelge 3.1’de pedal imalatında kullanılan ABS malzemenin mekanik özellikleri gösterilmiştir.

Alternatif olarak, yine 3B yazıcı imalat yöntemi göz önüne alınarak tercih edilen ve yine pedal gibi fonksiyonel parça imalatında tercih edilen PA6 malzemesi de alternatif olarak analizlerde değerlendirilecektir. PA6 malzemesi ABS malzemeye göre daha pahalıdır. PA6 malzeme olarak Novamid markasının ticari ismi AM 1030 FR (F) olan PA6 malzemesi seçilmiştir. Çizelge 3.1’de analizlerde kullanılacak PA6’nın mekanik özellikleri, ABS malzeme ile kıyaslamalı olarak gösterilmiştir.

**Çizelge 3.1.** Pedal analizlerinde ve imalatında kullanılacak ABS malzeme ve sadece analizlerde kullanılacak PA6 malzemelerinin mekanik özelliklerinin karşılaştırma çizelgesi

	ABS	PA6
<b>Mekanik Özellikler</b>	<b>Metrik</b>	
Çekme Mukavemeti (Mpa)	45	35
Gerilme Modülü (GPa)	2,3	5,7
Çekme Uzaması (%)	2,5	2,8
Izod Darbe, çentikli (kJ/m <sup>2</sup> )	9	3
Izod Darbe, çentiksiz (kJ/m <sup>2</sup> )	19	29,7
Öz kütle (g/cm <sup>3</sup> )	1.05	1.12

Parça başı maliyet fiyatları incelendiğinde plastik enjeksiyon kalıpla yapılan üretim ile 3B yazıcıda yapılan üretimin arasında düşük üretim adetlerinde ciddi bir fark vardır. Şekil 3.4'te 3B yazıcıda imal edilen ve enjeksiyon döküm yöntemi ile imal edilen parçaların adedine göre parça başı maliyet değerleri incelenmiştir.



**Şekil 3.4.** 3B yazıcı ve enjeksiyon döküm karşılaştırılması (<https://imalusulleri.com/3d-yazicilarin-avantajlari-ve-dezavantajlari/>)(Erişim tarihi: 01.04.2022)

Şekil 3.4'teki grafiği yorumlayacak olursak; imal edilmek istenen parça adedi ne kadar düşük ise 3B yazıcı kullanmanın maliyeti o kadar az oluyor. Üretilmek istenen parça

adedi arttıkça enjeksiyon döküm yönteminin parça başına düşen maliyeti azalmakta hatta şekil 3.4'teki grafiğe göre 533. üretilen parçada 3B yazıcı ile üretilen parça maliyeti ile enjeksiyon döküm ile üretilen parça başı maliyeti eşitlenmekte, başa baş noktasına gelmektedir. Bu noktadan sonra 3B yazıcı ile üretilen parçanın maliyeti neredeyse aynı kalmakta fakat enjeksiyon döküm ile üretilen parça maliyeti parça üretim sayıları arttıkça azalmaktadır. Özetle, üretilmek istenen parça sayısı 500 adet civarlarına kadar 3B yazılara maliyet olarak avantajlıdır. Enjeksiyon döküm yöntemi ise üretilmek istenen parça sayısı 500 adet civarının üzerinde maliyet olarak avantajlıdır. Parça başı maliyetin yanı sıra imalat yöntemini seçerken, parça başı imalat sürelerini de göz önüne almak gerekir. Bu çalışmada imal edilen pedalın imalat süresi 3B yazıcıda yaklaşık 28 saat sürmüştür. 3B yazıcı imalat süreleri ile enjeksiyon döküm yöntemi imalat süreleri kıyaslanamayacak kadar uzundur.

#### **3.4. Pedal Tasarımının Yapılması**

Tasarım girdileri ( pedal temel ölçüleri, pedala uygulanacak en fazla kuvvet ve istenen pedal ağırlığı), pedal malzemesi ve imalat yöntemi dikkate alınarak ayak park freni pedalının 3 boyutlu tasarımı yapılmıştır. Şekil 3.5'te yapılan ilk tasarım gösterilmiştir.



**Şekil 3.5.** Ayak park freni pedalının tasarımı

Yapılan ayak park freni pedalı tasarımı, piyasadaki hali hazırda üretilen ayak park freni pedallarının ölçülerine göre boyutlandırılmıştır ve bu haliyle müşteri isterlerini karşılamaktadır. Çalışmanın sonunda elde edilecek ayak park freni pedalı tasarımı, testlerden geçtiği takdirde endüstriyelendirilebilir. Çalışmanın bir diğer amacı da tasarlanan pedalın, 3B yazıcılarda üretilerek, ayak park freni pedalı yedek parçası olarak kullanılabilirliğini değerlendirmektir.

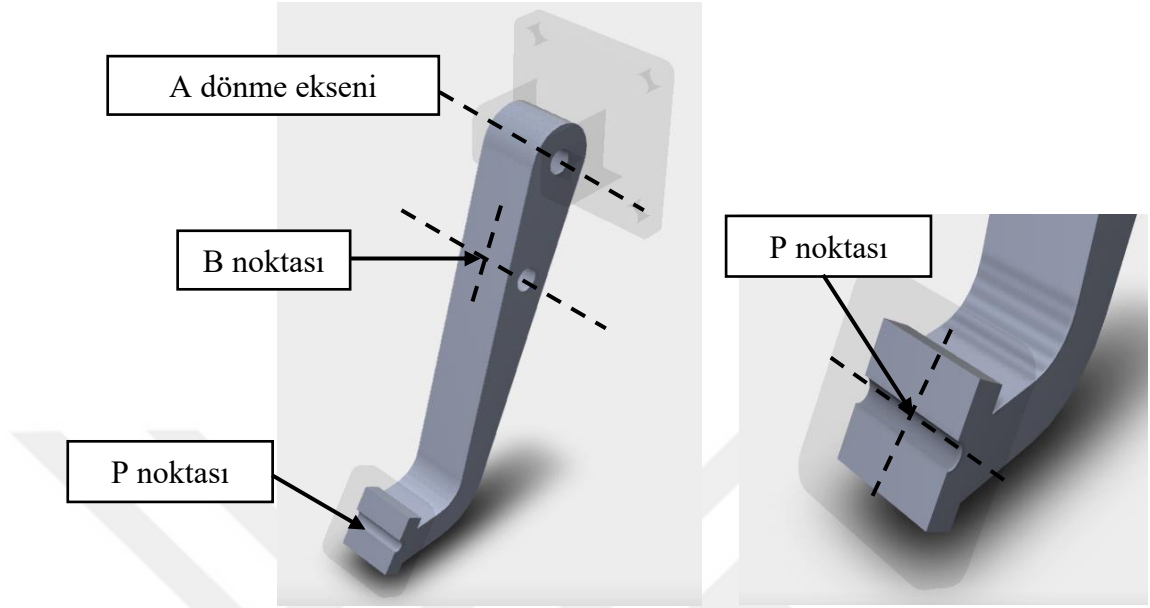
Tasarım girdilerine göre yapılan pedal tasarımının ağırlığı 1009 gramdır. Bu ağırlık hesaplanırken ABS malzemenin öz kütlesi dikkate alınmıştır. Yapılan yeni tasarımı ağırlık olarak değerlendirdiğimizde ise yapılan pedal tasarımı mevcut hali ile bile müşteri isteri olan 1,5 kg'ın altındadır. 1,5 kg'lık pedal ağırlığı değeri sadece metal veya metal+polimer malzeme kullanıldığında izin verilen en fazla ağırlıktır. Bu değer aşılması durumunda otomobil tasarımı yapılırken pedal için ayrılan ağırlık limiti aşılmış olur ve ağırlık limiti aşılana kadar otomobillerin yakıt tüketimi artar. Yakıt tüketimleri arttıkça araçlar daha fazla karbondioksit açığa çıkarır. Bu durum doğa için risk oluşturmaktadır. Her ne kadar aracın ağırlığı ile kıyaslanamayacak kadar küçük ağırlık azaltılmaları söz konusu olsa da, pedal komponenti bazında baktığımızda büyük farklar yaratmaktadır.

### **3.5. Topoloji Optimizasyonu Çalışması**

Topoloji optimizasyonunun temel amacı tasarlanan parçanın ağırlığının azaltılmasıdır. Ağırlığı azaltma çalışmalarının, parça dayanımını etkilememesi gerekmektedir. Hem parça ağırlığını azaltıp hem de parça dayanımını beklenen seviyede tutarak ideal parça geometrisini oluşturma çalışmaları topoloji optimizasyonun en önemli konularıdır. Bu çalışmada topoloji optimizasyonu çalışmaları yapılırken HyperMesh bilgisayar programı kullanılmıştır.

Pedal üzerinde kuvvetin uygulanacağı nokta ile pedal hareket değerinin ölçülüp değerlendirileceği nokta aynı noktadır. Tüm hesaplamalar ve analizler bu noktaya göre yapılır, bu noktanın adı P noktasıdır. Ayrıca pedalın fren mekanizmasını tahrik edebilmesi için açılabilir bir hareket etmesi gerekmektedir. Açılabilir hareketini yapması için

döndüğü merkeze A dönme eksenini ve dönerken fren mekanizmasını tahrik ettiği noktaya da B noktası denir. Şekil 3.6'da P, B noktaları ve A dönme eksenini gösterilmiştir.



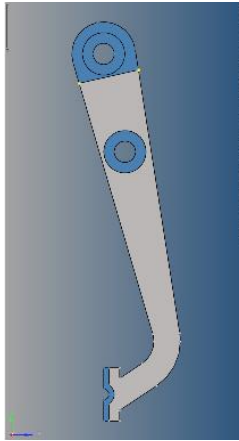
**Şekil 3.6.** Ayak park freni pedalı üzerinde P, B noktaları ve A dönme eksenini gösterilmesi

Topoloji optimizasyonunun ilk adımı olarak tasarlanan pedalın tasarım hacminin oluşturulması gerekmektedir. Tasarım kriterlerine uygun olarak tasarlanan parçanın hacmi kullanılacaktır çünkü pedalın araç üzerindeki işgal edebileceği hacim araç üreticileri tarafından belirlendiği için bu hacim dışarısına çıkılamamaktadır. Yani tasarlanan ilk parçanın hacmi topoloji optimizasyon için kullanacağımız tasarım hacmi ile aynıdır. Şekil 3.7'de topoloji optimizasyon çalışması yapılacak pedal gösterilmiştir.



**Şekil 3.7.** Topoloji optimizasyon çalışması yapılacak pedal

İkinci adım olarak topoloji optimizasyon çalışmalarında boşaltma yapılabilecek bölgeler ile boşaltma yapılamayacak bölgeler belirlenir. Boşaltma yapılamayacak bölgeler pedalın P, B noktaları ve A dönme eksenine yakın yerlerdir. Bu bölgelerde topoloji optimizasyonu çalışmaları yapılırken herhangi bir boşaltma yapılmaması istenmektedir. Çünkü parçaya giren veya çıkan kuvvetler bu bölgeler üzerinden karşılanmaktadır, bu bölgelerde yapılacak boşaltmalar parçanın dayanımını düşürebilir ve hatta parçanın hasara uğramasına sebep olabilir. Şekil 3.8’de pedal üzerinde mavi ile işaretlenmiş boşaltma yapılmayacak bölgeler gösterilmiştir.



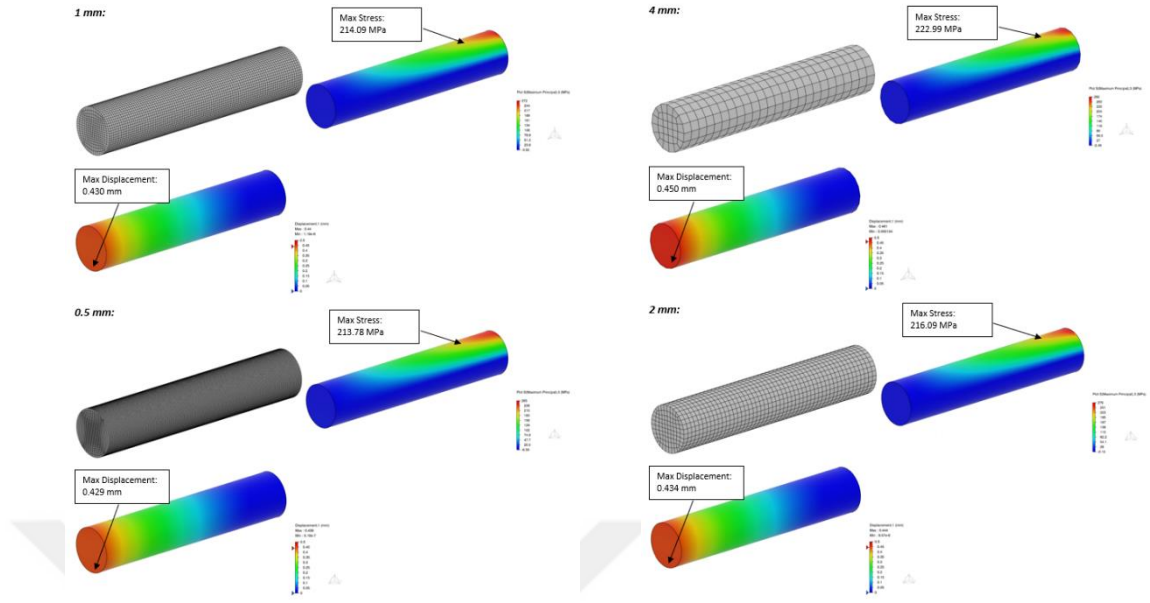
**Şekil 3.8.** Boşaltma yapılmayacak bölgeler (Mavi işaretli)

Üçüncü adımda fren pedalının sonlu elemanlar modelinin oluşturulmasıdır. Sonlu elemanlar modelini oluşturulması çalışmasının bir adımı olan mesh örme adımında mesh büyüklüğünü belirlemek için daha önce yapılmış benzer çalışmalardan ve geçmiş tecrübelerden faydalanılmıştır. Van Wagnen yapmış olduğu çalışmada bir çubuk parçası üzerinde, farklı mesh boyutlarında sonlu elemanlar analizleri yapmış ve en uygun mesh boyutunu belirlemeye çalışmıştır. Çizelge 3.2’teki sonuçları elde etmiştir.

**Çizelge 3.2.** En uygun mesh boyutu değerlendirme çalışması (<https://www.fidelisfea.com/post/element-size-in-fea-does-it-matter>) (Erişim tarihi: 01.04.2022)

Mesh Boyutu	Element (adet)	Düğüm (adet)	Zaman (s)	En Fazla Yer Değişimi Z Yönünde (mm)	Yer Değiştirme Hatası (%)	En Fazla Gerilim (Mpa)	Gerilim Hatası (%)
4 mm	800	1066	0	0.450	6.03	222.99	4.25
2 mm	4800	5763	1	0.434	2.26	216.09	1.02
1 mm	30200	33734	5	0.430	1.32	214.09	0.09
0.5 mm	223600	237582	70	0.429	1.08	213.78	-0.06

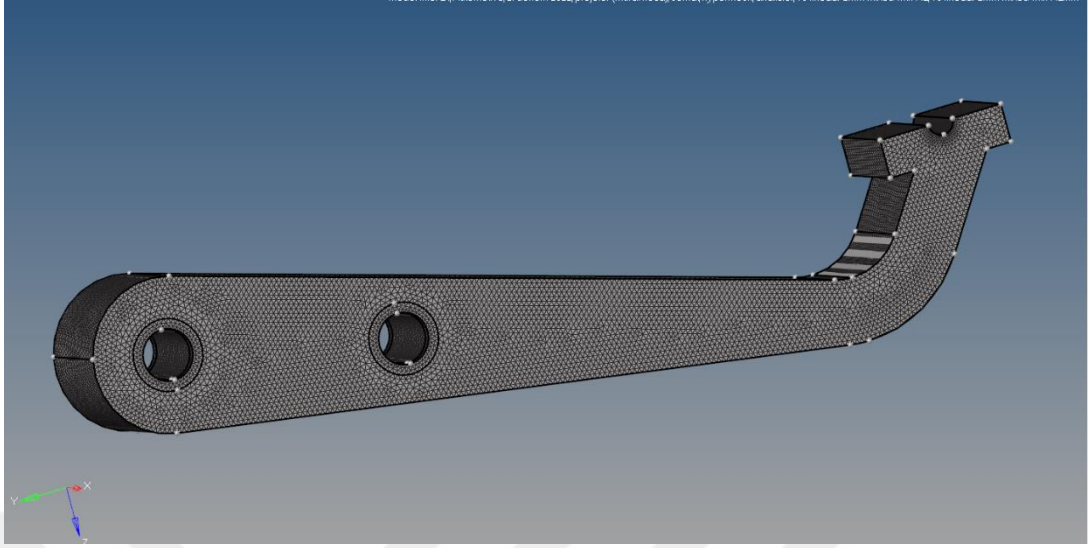
Üzerinde çalışılan çubuk parçası ve farklı mesh boyutlarına göre analiz sonuçları şekil 3.9’da gösterilmiştir.



**Şekil 3.9.** Üzerinde çalışılan çubuk parçası ve farklı mesh boyutlarına göre analiz sonuçları (<https://www.fidelisfea.com/post/element-size-in-fea-does-it-matter>) (Erişim tarihi: 01.04.2022)

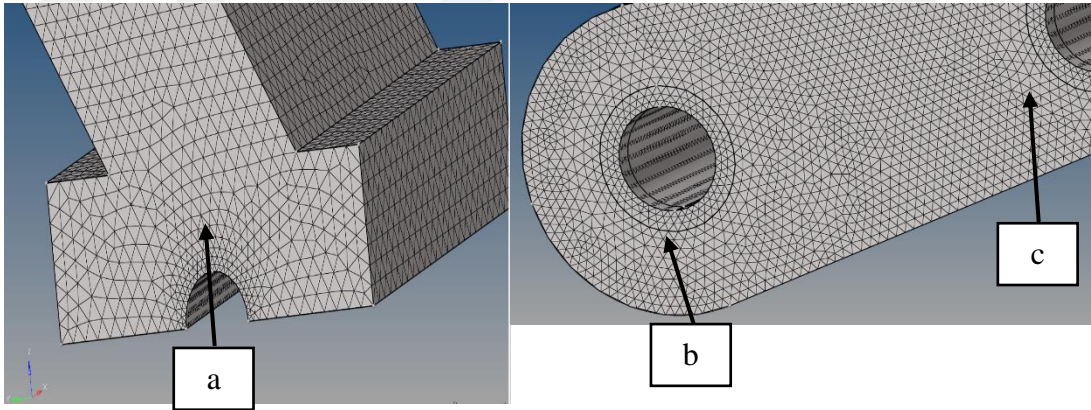
Van Wagnen yapmış olduğu çalışmada elle hesapladığı en fazla yer değişimi 0,4244 mm'dir. Çalışmadan anlaşılacağı gibi mesh boyutu küçüldükçe en fazla yer değiştirme değeri hesaplanan değere doğru yakınsamaktadır. Ancak, çizelge 3.3'te gösterildiği gibi, çalışma süresinin katlanarak büyüdüğü ve çözüm doğruluğu açısından azalan marjinal getiriler sağlamadığı görülmüştür. Analiz süreleri de mesh boyutunu belirlemede önemli bir kriter olmuştur. Mesh boyutunun küçülmesi ile artan analiz süreleri mesh boyutunu belirlerken dikkate alınmıştır.

Yapılan literatür araştırmaları ve geçmiş tecrübeleri kullanarak bu çalışmadaki pedal analizleri için en uygun mesh boyutunun 2 mm olmasına karar verilmiştir. Şekil 3.10'da pedal parçasına yapılan mesh gösterilmiştir.



**Şekil 3.10.** Pedal parçasına yapılan mesh işlemi

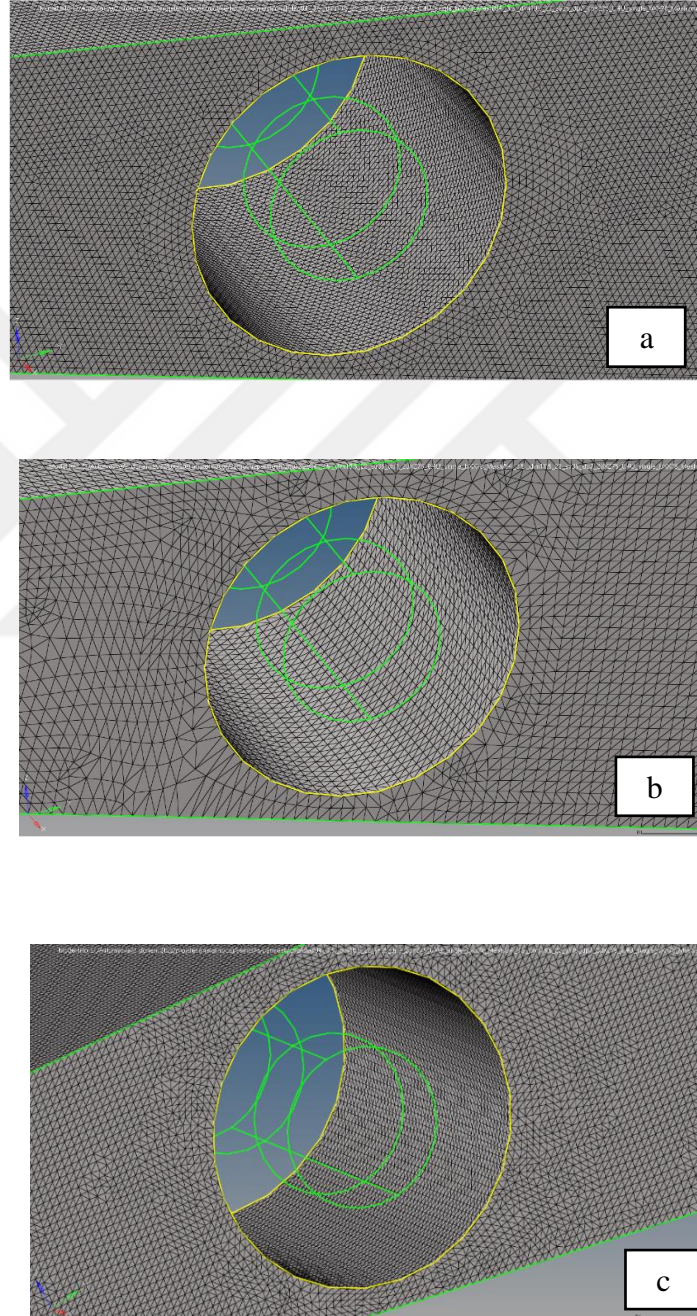
P, B noktaları ve A dönme eksenini bölgelerinde mesh yapısı mümkün olduğunca homojen olması sağlanmıştır. Şekil 3.11’de P, B noktaları ve A dönme eksenini bölgelerindeki mesh yapısı gösterilmiştir.



**Şekil 3.11.** P, B noktaları ve A dönme eksenini bölgelerindeki mesh yapısı  
(a) P noktası bölgesi mesh yapısı, (b) A dönme eksenini bölgesi mesh yapısı,  
(c) B noktası bölgesi mesh yapısı

Mesh örme adımının bir diğer parametresi mesh tipidir. Gerçek sonuçlara yakın analiz yapabilmek için parça üzerinde boşaltma yapılan bölgelerdeki ve kuvvete maruz kalan bölgelerdeki mesh kalitesi önemlidir. Özellikle bu bölgelerde mesh boyutları homojen olmalıdır. Böylelikle analizden alacağımız sonuçlar gerçek durumu simüle edecektir.

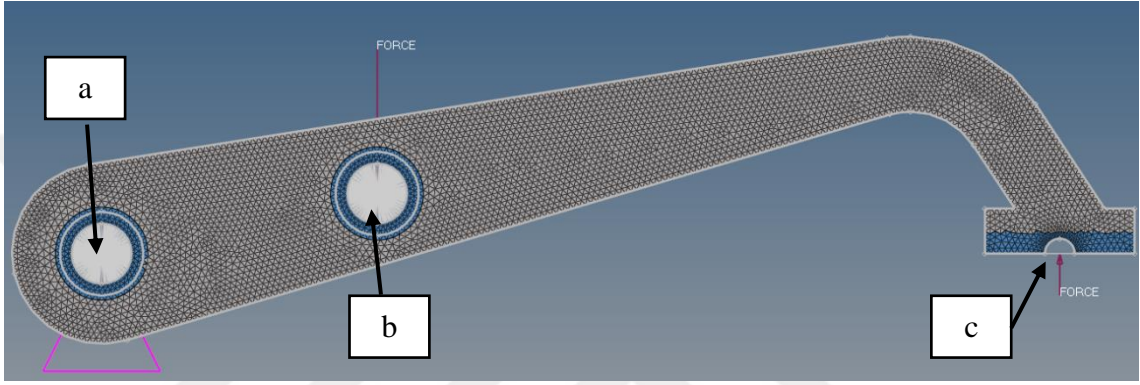
Yapılan analiz çalışmaları denemelerinde en uygun mesh tipinin ‘Mixed’ olduğu görülmüştür. Farklı mesh tipi denemeleri şekil 3.12’de gösterilmiştir. Pedalın farklı bölgelerindeki mesh boyutları bölge geometrisine göre farklılık gösterebilir. Mesh boyutu 2 mm belirlenmesine karşılık, parça geometrisine göre mesh boyutu en az 0.5 mm’ye kadar düşmektedir.



**Şekil 3.12.** Farklı mesh tipi denemeleri, (a) Trias, (b) Quadas, (c) Mixed

Mesh örme işleminin sonunda tasarım hacmini oluşturan pedal tasarımı için toplamda 343 823 element ve 71 438 düğüm noktası oluşturulmuştur.

Mesh boyutunu ve tipini belirledikten sonra pedala uygulanacak kuvvet giriş noktası yani pedala ayak ile basılan nokta, uygulanan kuvvetin pedal üzerinden ayak freni mekanizmasını tahrik ettiği nokta ve pedalın mesnet noktası analizde kullanılmak için sonlu elemanlar analiz programına tanıtıldı. Şekil 3.13’de bu noktalar gösterilmiştir.



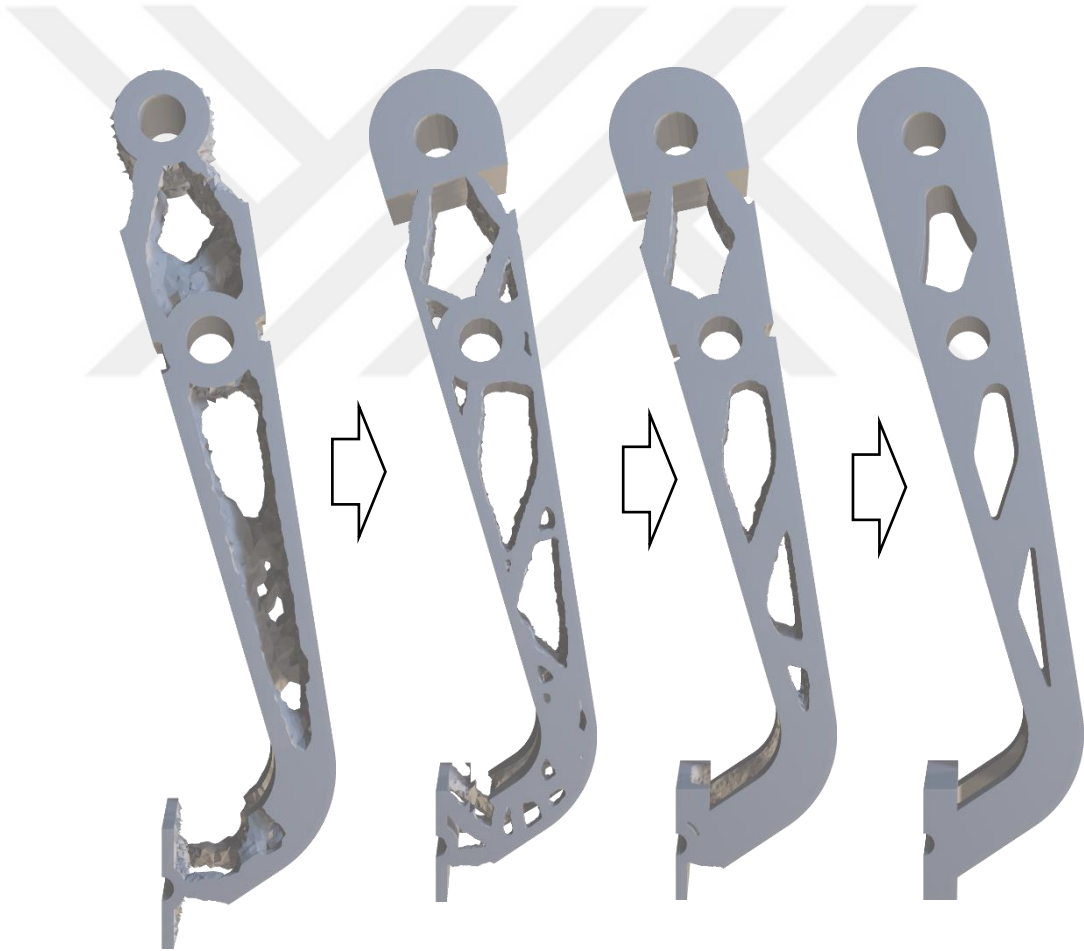
**Şekil 3.13.** Kuvvet giriş-çıkış ve mesnet noktalarının sonlu elemanlar analiz programına tanıtılması, (a) Pedalın mesnet noktası, (b) Ayak freni mekanizmasını tahrik ettiği nokta, (c) Pedala uygulanacak kuvvet giriş noktası

Pedal parçası üzerindeki kuvvet giriş-çıkış yerleri ve mesnet yeri belirlenip, analiz programına tanıtıldıktan sonra analiz yapılacak kuvvet değeri de programa girilir. P noktasından pedala en fazla 100 daN uygulanacaktır. Müşteri isterlerini karşılayabilmek için pedal parçası 100 daN uygulandığında hasara uğramadan fonksiyonunu yerine getirebilmeli ve ayrıca 100 daN uygulandığında P noktası en fazla 10 mm yer değiştirmelidir. 100 daN altında hasara uğramadan ve P noktası en fazla 10 mm hareket ettiğinde pedal parçası fonksiyonunu yerine getirmiş olacaktır.

Analiz yöntemi olarak lineer analiz yöntemi tercih edildi. Analiz yapılacak malzeme cinsi, tasarım geometrisi, literatür ve geçmiş tecrübeler dikkate alındığında lineer analiz yönteminin bu çalışma için en uygun yöntem olduğuna karar verildi.

Gerçek koşullarda pedal parçasından beklenen karakteristik özellikleri test edilirken pedal statik olarak test edilmektedir. Yani, pedal test edilirken hareket etmemektedir. P noktasına kuvvet uygulanırken dönme hareketi yapmaması için B noktasından da uygulanan kuvvete zıt yönde destek verilerek dönmesi engellenmektedir. Bu koşullar ile topoloji optimizasyonu çalışmaları statik olarak gerçekleştirilmektedir.

Özetle; topoloji optimizasyon çalışmaları gerçek koşullardaki test koşulları göz önüne alınarak lineer analiz yöntemi kullanılarak statik koşullarda gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.14'te PA 6 malzemesi kullanılarak yapılan topoloji optimizasyonu aşamaları gösterilmiştir.



**Şekil 3.14.** PA 6 malzemesi kullanılarak yapılan topoloji optimizasyonu aşamaları (ilk durumdan son duruma doğru)

PA6 malzeme için yapılan topoloji optimizasyonu çalışmasından sonra malzeme özellikleri hariç topoloji analizi parametreleri kullanılarak ABS malzeme için de topoloji optimizasyonu çalışması yapılmıştır.

### 3.6. Pedal Parçasını 3B Yazıcıda Yazılması

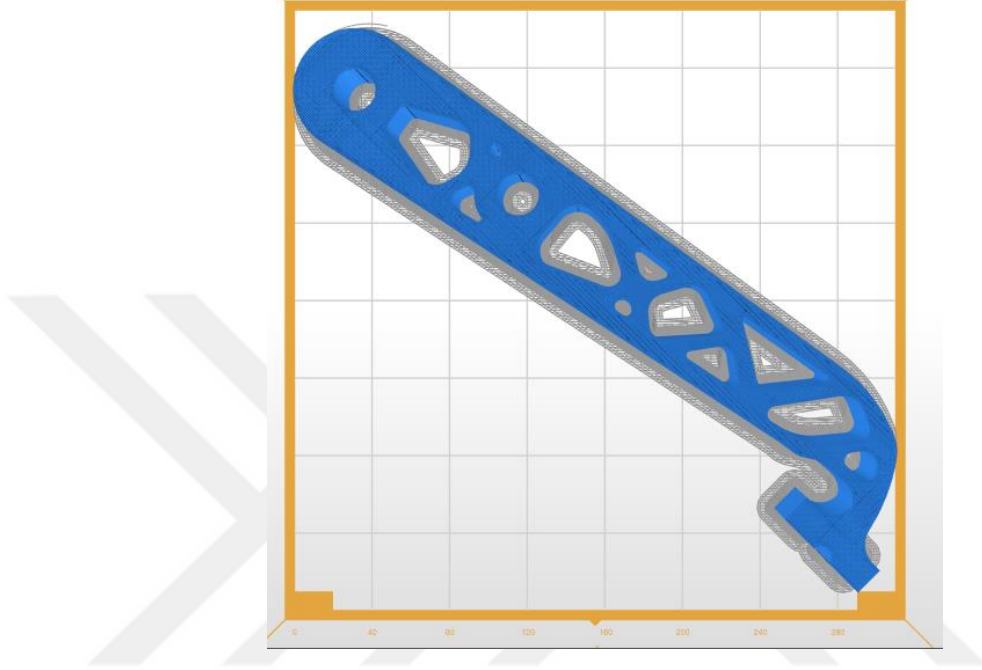
Topoloji optimizasyonu çalışmasından sonra ABS malzeme ile eklemeli imalat yöntemlerinden biri olan Eriyik Yığılma Modelleme (EYM) yöntemi kullanılarak pedal parçası imal edilmiştir. Bu çalışmada Zortrax M300 Plus yazıcısı kullanılmıştır. Şekil 3.15'te 3B yazıcının görseli bulunmaktadır. Bu yazıcının bazı özellikleri şunlardır:

- Baskı hacminin ölçüleri, eni 300 mm, boyu 300 mm ve yüksekliği 300 mm'dir.
- Baskı hassasiyeti 90-290 mikron 'dur.
- Nozul çapı 0,4 mm'dir.
- Nozul sıcaklığı 290 °C'dir.
- Platform sıcaklığı 105 °C'dir.



Şekil 3.15. Zortrax M300 Plus 3B yazıcısının görüntüsü

Tasarlanan modeli yazıcıya aktarmak için Z-Suite ara yüz programı kullanılmaktadır. Bu program ile tasarlanan parça datası 3B yazıcının anlayabileceği formata sokularak, yazıcıya gönderilmektedir. Şekil 3.16'da pedal parçasının yazıcı tablasındaki yerleşimi gösterilmiştir.

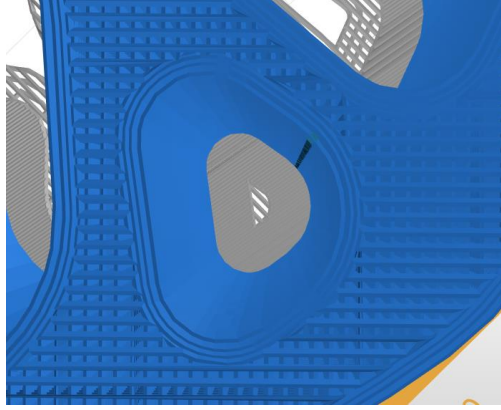


**Şekil 3.16.** Pedal parçasının 3B yazıcı tablasındaki yerleşimi

Yazma doluluk oranı 90% seçilmiştir. Bu oranın yüksek olması, üretilen parçanın katmanları arasındaki doluluğun yüksek olması anlamına gelmektedir. Yüksek doluluk oranı da parçada yüksek mukavemet değeri vermektedir. Böylece sonlu elemanlar analiz sonuçları ile üretilen parçanın test sonuçları birbiri ile örtüşebilmektedir.

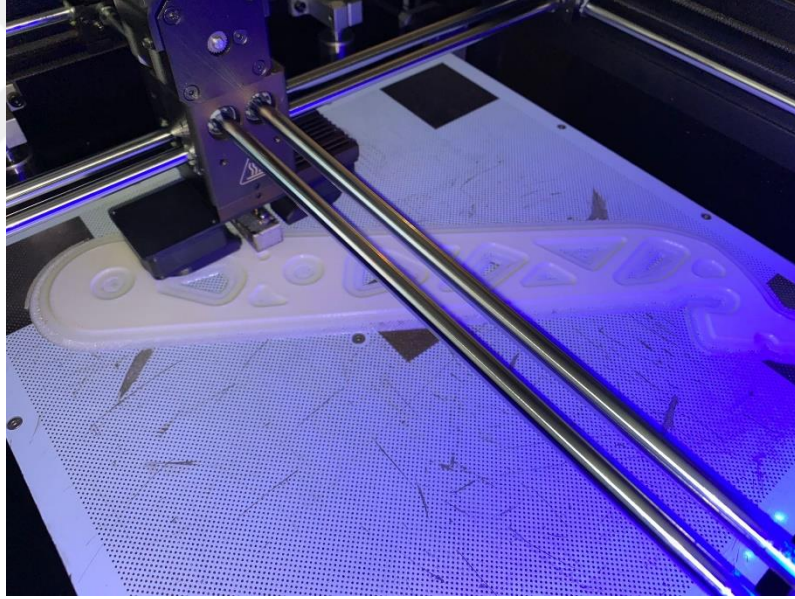
Doluluk oranının yüksek olması, parça imalat süresini uzatmaktadır. Bu çalışmada imal edilen pedal parçası 20 saat 44 dakikada imal edilmiştir. Seri imalat şartlarında bu süre kabul edilebilir seviyede değildir.

İmal edilen pedal parçasının katmanları arası örme açısı 90°'dir. Şekil 3.17'de katmanlar arası örme yönü detayı gösterilmiştir.



**Şekil 3.17.** Katmanları arası örme açısı gösterilmesi

Z-Suite arayüz programı ile sanal ortamda yazıcıya yerleştirilen pedal parçası modeli, gerçek yazıcıda imal edilirken şekil 3.18'deki gibi görülmektedir.



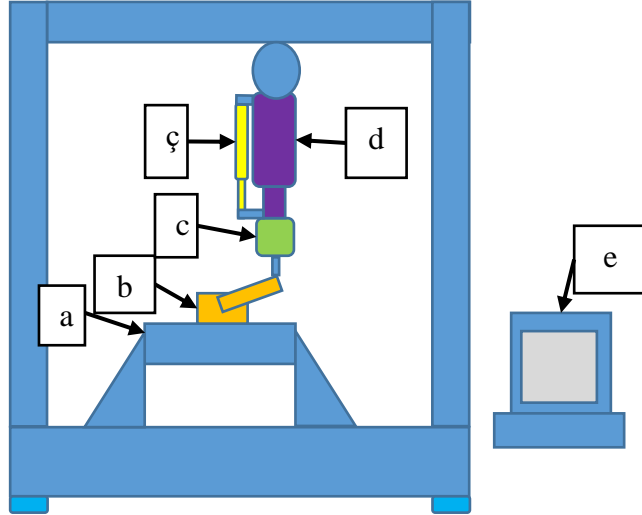
**Şekil 3.18.** 3B yazıcıda pedal parçasının imalatı

### **3.7. Pedal Statik Testi**

Ayak park freni pedalından beklenen en önemli özellik, tasarım girdisi de olan uygulanan en fazla kuvvet altındaki en fazla yer değiştirme değeridir. Bu değeri fiziki parça üzerinde ölçebilmek için pedal karakterizasyon test düzeneği kullanılmaktadır. Pedal

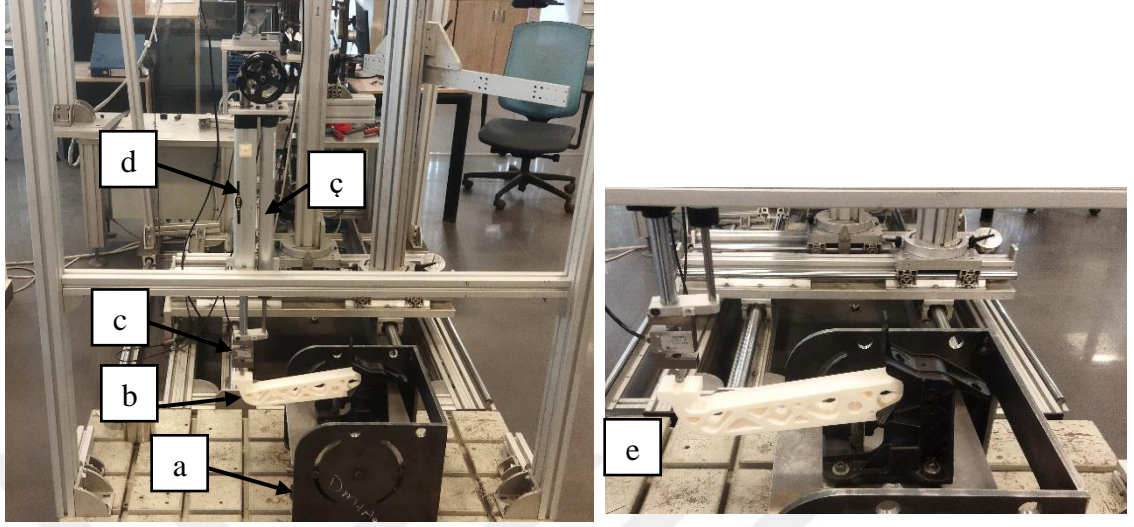
karakterizasyon test düzeneği pedala kuvvet uygulayarak, uygulanan kuvvete bağlı yer değişimi değerini ölçebilmektedir. Ölçülen yer değişimi değeri ile müşteri isteri yer değiştirme değeri kıyaslanarak fiziki parçanın performansı belirlenebilir. Yapılan bu test, pedal statik durumda iken yapılmaktadır yani pedala P noktasından kuvvet uygulanmasına karşılık A dönme ekseninde hareket etmemektedir. Hareketini engellemek için B noktası sabitlenmektedir. Şekil 3.25'te P, B noktaları ve A dönme eksenini gösterilmiştir. Pedal parçasının bu testte başarılı olabilmesi için P noktasına 100 daN uygulandığında, P noktasının en fazla 10 mm hareket etmesi ve deforme olmaması gerekmektedir. Eğer pedal statik testten geçerse, gerçek kullanım koşullarında pedala uygulanabilecek olağanüstü kuvvet karşısındaki güvenilirliği teyit edilmektedir.

Pedal karakterizasyon test düzeneği temel olarak; elektrik motorunun (AC veya DC motor) dönme hareketini doğrusal harekete dönüştüren bir doğrusal aktüatör, uygulanan kuvvet değerini ölçmek için kuvvet sensörü, uygulanan hareketin ölçülmesi için doğrusal cetvel ve test parçasını yerleştirdiğimiz test standından oluşmaktadır. Test esnasında kuvvet ve yer değişimi verilerini toplayıp, işleyen ve grafiklendiren bir test bilgisayarı da kullanılmaktadır. Şekil 3.19'da pedal karakterizasyon test cihazının temel bileşenleri şematize edilmiştir.



**Şekil 3.19.** Pedal karakterizasyon test cihazının temel bileşenleri, (a) Pedal bağlama yeri, (b) Test edilen pedal, (c) Kuvvet ölçme sensörü, (ç) hareketin ölçülmesi için doğrusal cetvel, (d) Doğrusal aktüatör, (e) Veri toplama bilgisayarı

Pedal karakterizasyon test düzeneğinin görüntüsü şekil 3.20’de gösterilmiştir.



**Şekil 3.20.** Pedal karakterizasyon test cihazının görüntüsü, (a) Pedal bağlama yeri, (b) Test edilen pedal, (c) Kuvvet ölçme sensörü, (ç) hareketin ölçülmesi için doğrusal cetvel, (d) Doğrusal aktüatör, (e) Test düzeneğinin detay görüntüsü

Test edilecek pedal, test düzeneği üzerindeki bağlama yerine montaj edilerek, sabitlenir. Doğrusal aktüatör pedalın kuvvet uygulanacak noktasına yani P noktasına pozisyonlanır, kuvvet uygulama doğrultusu test başlamadan önce pedal gövdesine dik olmalıdır. Statik testlerde pedalın esnemesinden dolayı pedalın yaptığı açısal hareket dikkate alınmaz. Kuvvet ölçer P noktasına temas ettirilir ve 5 daN’luk bir ön yük verilir. Ön yük verildikten sonra doğrusal cetvel sıfırlanır ve bu noktadan sonra artan kuvvete bağlı yer değişimi değerini ölçer. Ön yük verildikten sonra, testin hedefi olan 100 daN’luk kuvvete çıkılır. Test hızı, 1 mm/s’dir. Bu hız değeri doğrusal aktüatörün elektrik motoru ile sağlanır. Test devam ederken hedef kuvvete gelindiğinde doğrusal aktüatör durur ve geri çekilerek pedalın üzerindeki kuvveti sıfırlanana kadar azaltır. Pedal üzerindeki kuvvet değeri sıfır olduğunda test biter. Test sırasında toplanan kuvvet ve yer değişimi değerleri bilgisayar ekranında otomatik olarak grafiklendirilir. Hazırlanan grafik üzerinden istenilen değerler okunarak, müşteri isterleri ile kıyaslanır.

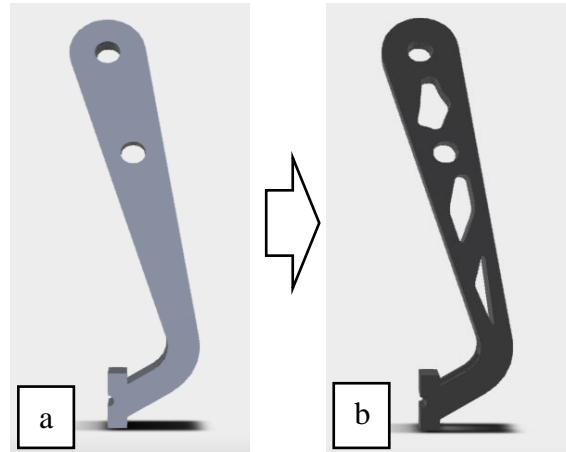
#### 4. BULGULAR ve TARTIŞMA

Bu çalışmada tasarlanan ayak freni pedalının statik dayanımına topoloji optimizasyonu aşamasında HyperMesh programında, gerçek koşullarda ise pedal karakterizasyon test düzeneğinde test edilerek değerlendirilmiştir.

Bilgisayar ortamında yapılan topoloji optimizasyonu çalışmalarında, ABS ve PA6 malzemeleri kullanılmıştır. Test aşamasında ise ABS malzeme kullanılarak 3B yazıcı ile imal edilen bir pedal üretilmiş ve üzerinde statik ürün testi gerçekleştirilmiştir.

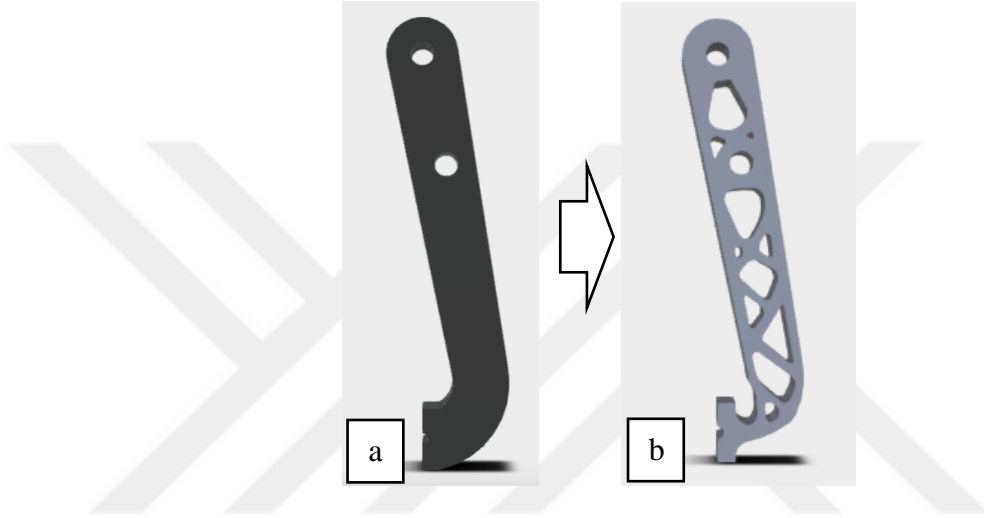
##### 4.1. Topoloji Optimizasyonu Sonuçları

Yapılan topoloji optimizasyonu çalışmasının sonucunda pedalın ilk tasarlanan geometrisi değişmiştir. Değişiklikler, pedal gövdesinde boşaltmalar oluşturmuştur. Analizlerde kullanılan PA6 ve ABS malzemelerine göre pedal gövdesindeki boşaltmalar da farklılık göstermektedir. Şekil 4.1’de PA6 malzeme kullanılarak yapılan topoloji optimizasyonu çalışmasının pedal gövdesi üzerindeki geometrik değişiklikleri gösterilmektedir.



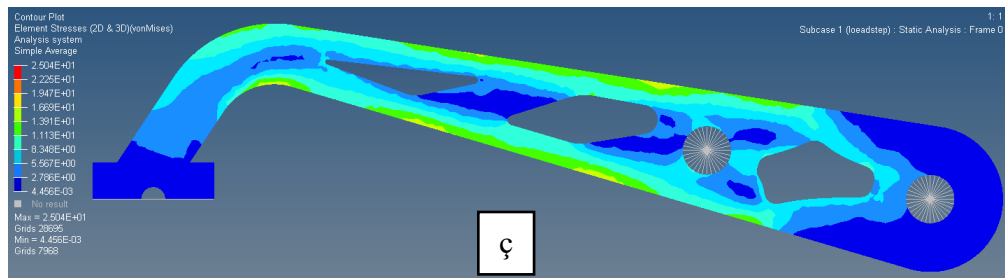
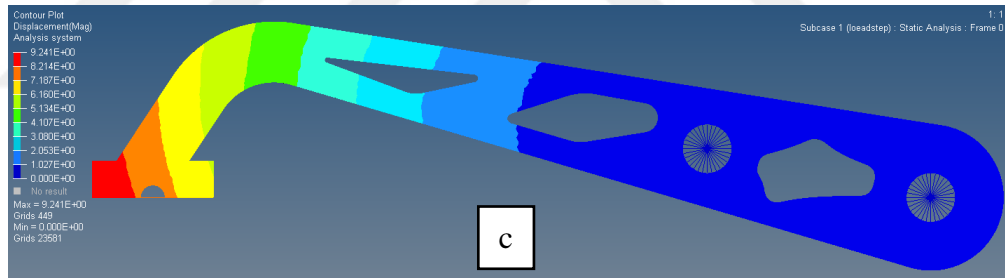
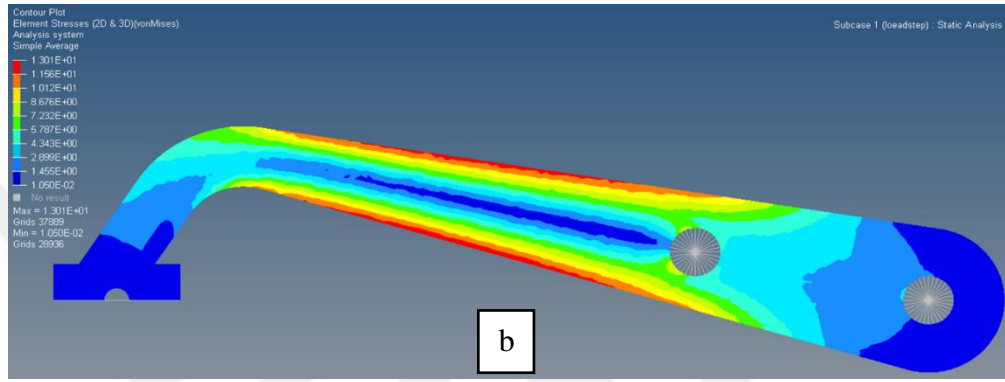
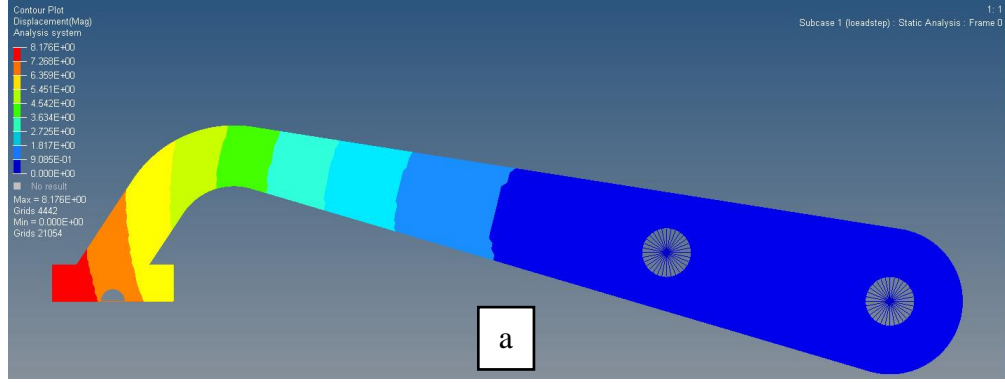
**Şekil 4.1.** PA6 malzeme kullanılarak yapılan topoloji optimizasyonu çalışmasının pedal gövdesi üzerindeki geometrik değişiklikleri, (a) Topoloji optimizasyonu öncesi, (b) Topoloji optimizasyonu sonrası

ABS malzeme ile yapılan pedal tasarımında pedalın ilk geometrisi PA6 malzeme ile yapılan pedal geometrisine göre farklılık göstermektedir. Bunun nedeni ABS malzemenin PA6 malzemeye göre daha düşük mukavemete sahip olmasıdır. Tasarımda tecrübelerle istinaden parça üzerinde geometrik değişiklikler yapılmıştır. Yapılan bu değişiklikler müşterinin beklediği geometrik şartları etkilememektedir. Şekil 4.2’de ABS malzeme kullanılarak yapılan topoloji optimizasyonu çalışmasının pedal gövdesi üzerindeki geometrik değişiklikleri gösterilmektedir.

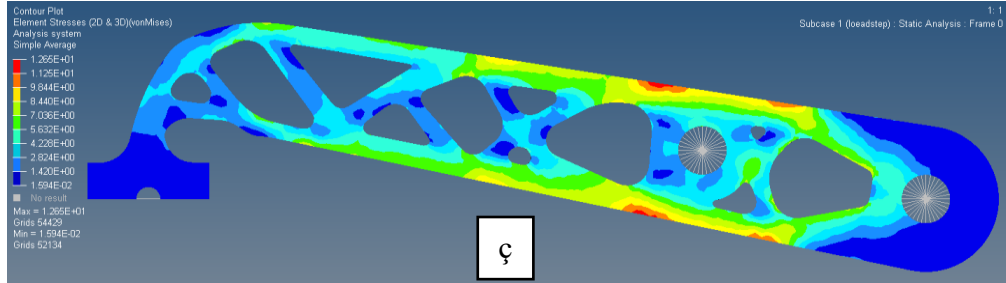
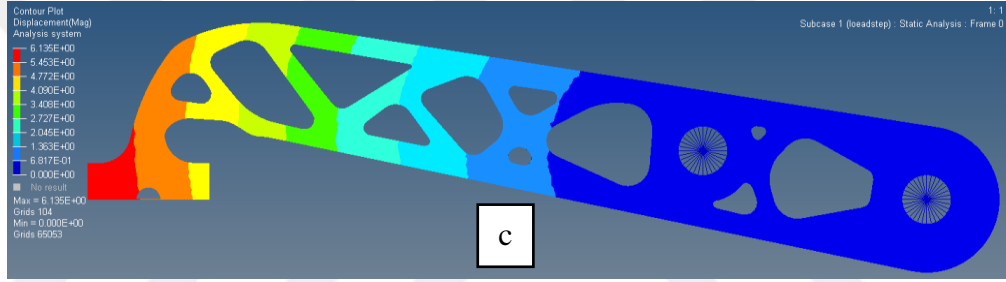
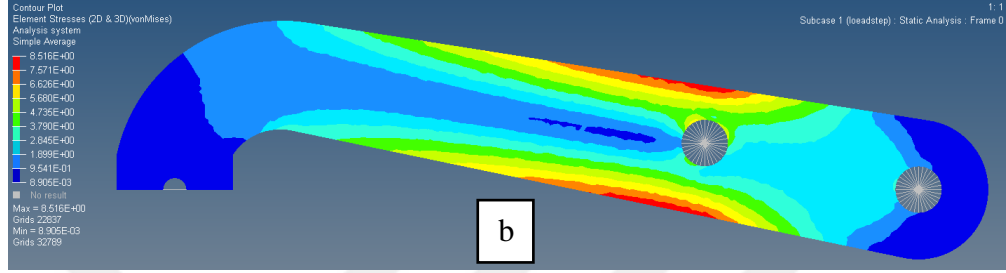
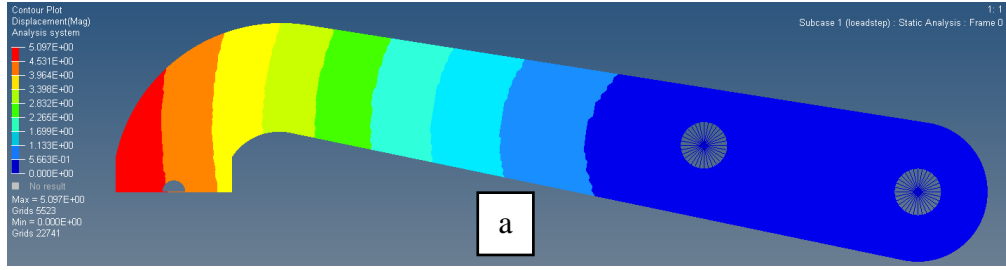


**Şekil 4.2.** ABS malzeme kullanılarak yapılan topoloji optimizasyonu çalışmasının pedal gövdesi üzerindeki geometrik değişiklikleri, (a) Topoloji optimizasyonu öncesi, (b) Topoloji optimizasyonu sonrası

PA6 ve ABS malzemedен tasarlanmış pedal geometrileri, sonlu elemanlar analizi uygulanarak yer değiştirme değerleri ve eşdeğer asal gerilim (Von Mises stres) değerleri hesaplatılmıştır. Şekil 4.3’de PA6 malzeme kullanılarak yapılan pedalın topoloji optimizasyonu öncesi ve sonrası için yer değiştirme ve eşdeğer asal gerilim (Von Mises stres) sonuçları gösterilmiştir. Şekil 4.4’te ABS malzeme kullanılarak yapılan pedalın topoloji optimizasyonu öncesi ve sonrası için yer değiştirme ve eşdeğer asal gerilim (Von Mises stres) sonuçları gösterilmiştir.



**Şekil 4.3.** PA6 malzeme kullanılarak yapılan pedalin topoloji optimizasyonu öncesi ve sonrası için yer değiştirme ve eşdeğer asal gerilim (Von Mises stres) sonuçları, (a) Topoloji öncesi yer değiştirme, (b) Topoloji öncesi eşdeğer asal gerilim (Von Mises stres), (c) Topoloji sonrası yer değiştirme, (ç) Topoloji sonrası eşdeğer asal gerilim (Von Mises stres)



**Şekil 4.4.** ABS malzeme kullanılarak yapılan pedalin topoloji optimizasyonu öncesi ve sonrası için yer değiştirme ve eşdeğer asal gerilim (Von Mises stres) sonuçları, (a) Topoloji öncesi yer değiştirme, (b) Topoloji öncesi eşdeğer asal gerilim (Von Mises stres), (c) Topoloji sonrası yer değiştirme, (ç) Topoloji sonrası eşdeğer asal gerilim (Von Mises stres)

Topoloji optimizasyonu öncesi ve sonrası sonlu elemanlar analizleri sonucu elde edilen yer değişimi değerleri çizelge 4.1’de gösterilmiştir.

**Çizelge 4.1.** Topoloji optimizasyonu öncesi ve sonrası yer değişimi değerleri

<b>Kullanılan Malzeme</b>	<b>Topoloji Öncesi Yer Değişimi (mm)</b>	<b>Topoloji Sonrası Yer Değişimi (mm)</b>	<b>Değişim Oranı</b>
PA6	8.176E+00	9.241E+00	+13%
ABS	5.097E+00	6.135E+00	+20%

Topoloji optimizasyonu öncesi ve sonrası sonlu elemanlar analizleri sonucu elde edilen eşdeğer asal gerilim (Von Mises stres) değerleri çizelge 4.2’te gösterilmiştir.

**Çizelge 4.2.** Topoloji optimizasyonu öncesi ve sonrası eşdeğer asal gerilim (Von Mises stres) değerleri

<b>Kullanılan Malzeme</b>	<b>Topoloji Öncesi Eşdeğer Asal Gerilim (Von Mises stres) (MPa)</b>	<b>Topoloji Sonrası Eşdeğer Asal Gerilim (Von Mises stres) (MPa)</b>	<b>Değişim Oranı</b>
PA6	1.301E+01	2.504E+01	+92%
ABS	8.516E+00	1.265E+01	+48.5%

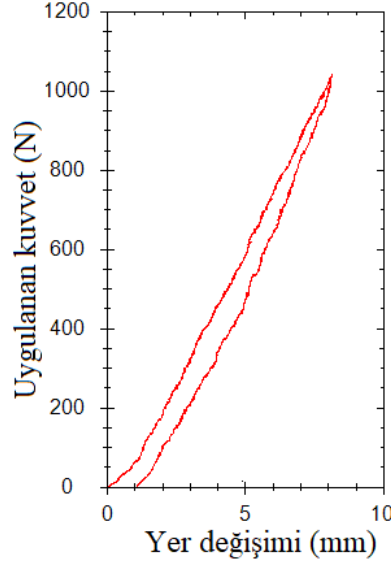
Topoloji optimizasyonu öncesi ve sonrası elde edilen pedal kütleleri çizelge 4.3’te gösterilmiştir.

**Çizelge 4.3.** Topoloji optimizasyonu öncesi ve sonrası elde edilen pedal kütleleri

<b>Kullanılan Malzeme</b>	<b>Topoloji Öncesi Pedal Kütlesi (gram)</b>	<b>Topoloji Sonrası Pedal Kütlesi (gram)</b>	<b>Değişim Oranı</b>
PA6	849.6	674.7	-20%
ABS	1009.2	690.3	-31.5%

## 4.2. Statik Test Sonuçları

BS malzeme ile 3B yazıcıda imal edilen pedal parçası statik testte 100 daN'luk yük altında test edilmiş ve 100 daN altındaki pedalın P noktasındaki yer değişimi değeri ölçülmüştür. Şekil 4.5'te pedal statik test sonucunun grafiği gösterilmiştir.



**Şekil 4.5.** ABS malzeme ile yapılan pedalın statik testi grafiği

Ölçülen değer çizelge 4.4'de gösterilmiştir.

**Çizelge 4.4.** ABS malzeme ile yapılan pedalın statik testi ölçüm değeri

Kullanılan Malzeme	Statik Test Yer Değişimi (mm)
ABS	7,9

## 5. SONUÇ

Tez kapsamında, halen otomobillerde kullanılan, çelik malzemeden soğuk sac şekillendirme ile üretilen ayak park freni mekanizması pedalının, 3B yazıcı kullanılarak PA6 ve ABS malzemeleri ile üretilen pedala göre ikame edilebilirliği incelenmiştir. İnceleme yapılırken, 3B yazıcı imalatına geçmeden önce bilgisayar ortamında topoloji optimizasyonu çalışması gerçekleştirilmiştir. Müşteri isterlerine göre 100 daN altında sonlu elemanlar analizi yapılmış ve bu çalışmalardan sonra ABS malzeme kullanarak 3B yazıcıda eriyik yığıma methodu (EYM) kullanılarak, optimize edilmiş pedal geometrisi imal edilmiştir. İmal edilen pedal ile pedalın sonlu elemanlar analizi sonucunu kıyaslamak için fiziki parça üzerinde 100 daN kuvvet uygulanarak statik pedal testi de yapılmıştır. Test sonucu pedalın P noktasının yer değiştirme miktarı ve pedal üzerinde hasara oluşumu kontrol edilmiştir. Yapılan çalışmalar sonucunda elde edilen bulgular şu şekildedir; sonlu elemanlar analizinde, tasarlanan pedal geometrisi ile yapılan topoloji optimizasyonu çalışmasında ABS malzemenin PA6 malzemeye göre uygulanan yük altında daha fazla yer değiştirdiği görülmüştür. Uygulanan 100 daN altında ABS malzeme ile analiz edilen pedal, PA6 malzeme ile analiz edilen pedala göre %7 daha fazla yer değiştirmiştir. Her iki malzeme ile yapılan denemelerde topoloji sonrası yer değişimi değerleri pedalın kullanılabilir esneme limitleri içerisindeydir. Yani gerçek bir araçta kullanılabilir. Topoloji öncesi sonrası eş değer asal gerilimler (Von Mises stres) değerleri kıyaslandığında ABS malzeme ile tasarlanan pedal, PA6 malzeme ile tasarlanan pedala göre daha az gerilmiştir. PA6 ile tasarlanan pedal ise topoloji sonrasındaki gerilim değerleri neredeyse 2 kat artmıştır. 3B yazıcı ile ABS malzeme kullanılarak imal edilen pedal, statik testte 100 daN kuvvet altında pedal P noktası 7,9 mm yer değiştirmiştir. Bu değer gerçek bir araçta kullanılması için uygun bir değerdir.

## KAYNAKLAR

- Gülmez, S. 2018. Otomotiv Endüstrisinde Kullanılan Polimer Matrisli Kompozit Malzemeler. *Tezsiz yüksek lisans projesi*, Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Denizli.
- Aran, A. 2008. Mal 201 – Malzeme Bilgisi Ders Notları
- Nart, Ç. 2011. Plastik Boru Üretimi için SpiRal Kanallı Radyal Ekstrüzyon Kalıbının Sistematik Tasarımı. *Yüksek Lisans Tezi*, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Makina Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul.
- L.G. Blok. (2018). An investigation into 3D printing of fibre reinforced thermoplastic Composites. *Additive Manufacturing* 22 (2018), Pages 176-186
- Yasar, H. (1992). Plastikler Dünyası, TMMOB Makine Mühendisleri Odası, Ankara
6. Erdem, S. (2008). Çatıda kullanılan polimer kökenli levhaların karşılaştırmalı analizi.
- Evlen, H. (2018). Açık ve kapalı sistemlerde doluluk oranının parça mukavemetine etkisinin incelenmesi, *Politeknik Dergisi*, 21(3): 651-662
- Pınar, E. (2010). Plastik enjeksiyon yöntemiyle imalatta hataların tespiti ve proses şartlarının optimizasyon uygulaması. *Yüksek lisans tezi*, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Dias, E., B., L. (2017). The Effect of Manufacturing Defects on Compressive Strength of Polymeric Lattices Fabricated via Fused Deposition Modeling, (Yüksek lisans tezi). ProQuest tezler veritabanı (UMI No. 10288890)
- Wong, K. V., & Hernandez, A. (2012). A Review of Additive Manufacturing. *ISRN Mechanical Engineering*, 1–10. doi:10.5402/2012/208760
- Rodríguez, J. F., Thomas, J.P., & Renaud, J., E. (2003). Mechanical behavior of acrylonitrile butadiene styrene fused deposition materials modeling, *Rapid Prototyp*, 9, 219–230.
- Ziemian, C., W., Cipoletti, D., E., & Ziemian, S., N. (2014). Monotonic and Cyclic Tensile Properties of ABS Components Fabricated by Additive Manufacturing, In: *Proceedings of 25th International Solid Freeform Fabrication Symposium*. Austin, TX, 525–541.
- Aliheidari, N., Tripuraneni, R., Ameli, A., & Nadimpalli, S. (2017). Fracture resistance measurement of fused deposition modeling 3D printed polymers, *Polymer Test*, 60, 94–101.

ERCAN, N. 2019. 3B Eklemeli Üretim Yöntemiyle Üretilmiş Hücresel Kafes Yapılı Sandviç Panellerin Mekanik Davranışlarının İncelenmesi. *Yüksek Lisans Tezi*, Bursa Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Bursa.

Smith, W., C., & Dean, R., W. (2013). Structural characteristics of fused deposition modeling polycarbonate material, *Polymer Testing*, 32(8), 1306–1312.m

Weller, C., Kleer, R., & Piller, F., T. (2015). Economic implications of 3D printing: Market structure models in light of additive manufacturing revisited, *Int. J. Production Economics*, 164, 43–56.

Huang, S., H., Liu, P., Mokasdar, A., & Hou, L. (2012). Additive manufacturing and its societal impact: a literature review, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 67(5-8), 1191–1203.

Yazdani Sarvestani, H., Akbarzadeh, A. H., Niknam, H., & Hermenean, K. (2018). 3D printed architected polymeric sandwich panels: Energy absorption and structural performance, *Composite Structures*, 200, 886–909.

Scott\_Crump. Erişim: 25 Nisan 2019, [https://en.wikipedia.org/wiki/S.\\_Scott\\_Crump](https://en.wikipedia.org/wiki/S._Scott_Crump)

20- Lim, S., Buswell, R. A., Le, T. T., Austin, S. A., Gibb, A. G., & Thorpe, T. (2012). Developments in construction-scale additive manufacturing processes, *Automation in construction*, 21, 262-268.

Rodríguez, J. F., Thomas, J. P., & Renaud, J. E. (2003). Mechanical behavior of acrylonitrile butadiene styrene fused deposition materials modeling, *Rapid Prototyping Journal*, 9(4), 219-230.

Popescu, D., Zapciu, A., Amza, C., Baciu, F., & Marinescu, R. (2018). FDM process parameters influence over the mechanical properties of polymer specimens: A review, *Polymer Testing*, 69, 157–166.

Köse, E., ve Mühürçü, A. (2018). Çeşitli kriterlere göre elektrikli otomobillerin karşılaştırılması. Presented at the 3rd International Mediterranean Science and Engineering Congress (IMSEC 2018), Adana

Meyer-Pruessner, R. (2007). Significant weight reduction by using topology optimization in volkswagen design development with emphasis on engine design [PDF Belgesi] 21.07.2020 tarihinde [https://www.altairhyperworks.co.uk/html/en-GB/session1/Meyer-Pr%FCessner\\_Volkswagen.pdf](https://www.altairhyperworks.co.uk/html/en-GB/session1/Meyer-Pr%FCessner_Volkswagen.pdf) adresinden edinilmiştir

Sudin, M. N., Tahir, M. M., Ramli, F. R. ve Shamsuddin, S. A. (2014). Topology optimization in automotive brake pedal redesign. *International Journal of Engineering and Technology (IJET)*, 6(1), 398-402

Ingale, P.M. (2019). Topology Optimization of an All-Terrain Vehicle Brake Pedal. *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, 8(6), 763-767

Langnau, L., (2019). What is topology optimization? 1.11.2020 tarihinde <https://www.makepartsfast.com/what-is-topologyoptimization> adresinden edinilmiştir.

Beker, S., (2020). Topoloji Optimizasyonu Yaklaşımıyla Ürün Geliştirme, 01.11.2020 tarihinde [https://www.poligonmu\\_hendislik.com/blog/urun-gelistirme/topoloji-optimizasyonu-yaklasimi-ile-urun-gelistirme](https://www.poligonmu_hendislik.com/blog/urun-gelistirme/topoloji-optimizasyonu-yaklasimi-ile-urun-gelistirme) adresinden edinilmiştir.

Top, N., Gökçe, H. ve Şahin, İ. (2019). Eklemeli imalat için topoloji optimizasyonu: el freni mekanizması uygulaması. Selçuk-Teknik Dergisi, 18(1), 1-13

James VanWagnen: 01 Mart 2022, <https://www.fidelisfea.com/post/element-size-in-fea-does-it-matter>

Sargini, M., (2020). Finite element analysis of automotive armbrake pedal forrapid manufacturing, MEAMT 2019

Arun, J. K., (2021). Topology optimization of lattice structure on a brake pedal . <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.06.059>

Rozvany, G. I. N. (2008). A critical review of established methods of structural topology optimization. Structural and Multidisciplinary Optimization, 37(3), 217-237. doi:10.1007/s00158-007-0217-0

Okudan, A. (2018, 6 Eylül). Topoloji optimizasyonu 101. 09.08.2020 tarihinde <https://tr.linkedin.com/pulse/topoloji-optimizasyonu-101-ahmet-okudan> adresinden edinilmiştir.

Muter Ş., (1984). "Motorlu Taşıtlarda Alüminyum Alaşımı Kullanımında Planlanan Gelişmeler", Motor ve Taşıt Tekniği Semp.