

**T.C.
MANİSA CELAL BAYAR ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**YÜKSEK LİSANS
METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ BİLİM DALI**

**KATMANLI İMALAT YÖNTEMİ VE TALAŞLI İMALAT YÖNTEMİ
İÇİN OPTİMİZASYON YÖNTEMLERİNİN DENENMESİ VE
KARŞILAŞTIRILMASI**

Halil TOSUN

**Danışman
Dr.Öğr.Üyesi Ahu ÇELEBİ**



MANİSA - 2021

**Halil
TOSUN**

**KATMANLI İMALAT YÖNTEMİ VE TALAŞLI İMALAT YÖNTEMİ İÇİN
OPTİMİZASYON YÖNTEMLERİNİN DENENMESİ VE
KARŞILAŞTIRILMASI**

2021

TAAHHÜTNAME

Bu tezin Celal Bayar Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü'nde, akademik ve etik kurallara uygun olarak yazıldığını ve kullanılan tüm literatür bilgilerinin referans gösterilerek tezde yer aldığını beyan ederim.

Halil TOSUN



İÇİNDEKİLER

	Sayfa
İÇİNDEKİLER	I
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	III
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	IV
TABLO DİZİNİ	VI
TEŞEKKÜR.....	VII
ÖZET.....	VIII
ABSTRACT	IX
1. GİRİŞ	1
2. TASARIM	4
2.1. Kavramsal Tasarım.....	6
2.2. Şekillendirme Tasarımı	8
2.3. Ayrıntılı Tasarım	9
3. OPTİMİZASYON NEDİR?	12
3.1. Optimizasyon Türleri	13
3.1.1. Boyut optimizasyonu	13
3.1.2. Şekil Optimizasyonu	14
3.1.3. Topoloji Optimizasyonu	14
3.2. Optimizasyonla İlgili Yapılan Çalışmalar	16
3.3. Tasarımın Simülasyon ve Optimizasyonu.....	19
4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	23
4.1. Kullanılan Malzeme	24
4.2. Tasarım Programı İçin Katmanlı İmalatta Kullanılan Malzemenin Çekme Dayanımının Belirlenmesi.....	26
4.3. Tasarım ve Optimizasyonda Kullanılan Yazılımlar	29
4.4. Tasarım ve Optimizasyon.....	29
4.4.1. Optimizasyon Öncesi Sonlu Elemanlar Analizi.....	33
4.4.2. İlk Optimizasyon Adımı.....	35
4.4.3. İlk Optimizasyon Sonrası Sonlu Elemanlar Analizi	36
4.4.4. İkinci Optimizasyon Adımı.....	37
4.4.5. İkinci Optimizasyon Sonrası Sonlu Elemanlar Analizi	38
4.5. Kullanılan Cihazlar.....	39
4.5.1. 3 Boyutlu Yazıcı	39
4.5.2. CNC Router.....	40
4.5.3. Hassas Terazî	42
4.5.4. Dijital Mikroskop.....	42
4.5.5. Çekme Cihazı.....	43
4.5.6. Sertlik Cihazı.....	44
4.5.7. Yüzey Pürüzlülük Cihazı	44
4.5.8. Kullanılan Diğer Yazılımlar.....	45
4.6. Numunelerin Hazırlanması.....	47
4.7. Numunelere Yapılan Testler.....	48
4.7.1. Sertlik Testi	48
4.7.2. Kütle Ölçümü	49
4.7.3. Yüzey Pürüzlülüğü.....	49
4.7.4. Çekme Testi	49
4.7.5. Yoğunluk Ölçümü.....	51
4.7.6. Çekme Testi Sonrası Kırılma Yüzeyi ve Mikro İncelemeler.....	51

5. DENEYSEL SONUÇLAR	53
5.1. Sertlik Testi	53
5.2. Kütle Ölçümü	54
5.3. Yüzey Pürüzlülüğü	56
5.4. Çekme Testi.....	58
5.5. Yoğunluk Ölçümü	62
5.6. Çekme Testi Sonrası Kırılma Yüzeyi ve Mikro İncelemeler	64
5.7. Maliyet ve Zaman Analizi	67
6. GENEL DEĞERLENDİRME	70
KAYNAKLAR	73
ÖZGEÇMİŞ	79



SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

3B	Üç Boyutlu
ABS	Akrlonitril Bütadien Stiren
AR-GE	Araştırma ve Geliştirme
AT	Ayrıntılı Tasarım
BDİ	Bilgisayar Destekli İmalat (CAM)
BDM-CAE	Computer Aided Engineering (Bilgisayar Destekli Mühendislik)
BDT-CAD	Computer Aided Design (Bilgisayar Destekli Tasarım)
CAM	Computer Aided Manufacturing (Bilgisayar Destekli Üretim)
CNC	Computer Numeric Control (Bilgisayarlı Sayısal Kontrol)
FDM	Fused Deposition Modeling(Ergiterek Biriktirme Yoluyla Modelleme)
KT	Kavramsal Tasarım
PET	Polietilen Tereftalat
PET-G	Polietilen Tereftalat Glikol
PLA	Polilaktik Asit
STL	Standart Triangle Language (Standart Üçgen Dili)
ŞT	Şekillendirme Tasarımı

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 2.1. Tasarım ve geliştirme esnasındaki etki ve sınırlayıcılar	4
Şekil 2.2. Tasarımın diğer disiplinler arasındaki yeri	5
Şekil 2.3. Kavramsal tasarım aşamaları	7
Şekil 2.4. Şekillendirme tasarım adımları	9
Şekil 2.5. Ayrıntılı Tasarım basamakları.....	10
Şekil 2.6. Tasarım süreci	11
Şekil 3.1. Boyut optimizasyonu	14
Şekil 3.2. Şekil optimizasyonu	14
Şekil 3.3. Topoloji optimizasyonu	14
Şekil 3.4. Klasik tasarım yaklaşımı ile optimizasyonun karşılaştırılması.....	15
Şekil 3.5. Uydu braketi optimizasyonu	16
Şekil 3.6. Otomotiv gaz pedalı topoloji optimizasyona bir örnek	16
Şekil 3.7. El freni mekanizması içerisinde bulunan saç parçanın optimizasyonu	17
Şekil 3.9. Salıncak kolunun optimizasyonu	18
Şekil 3.10. Eklemeli imalatta optimizasyon.....	18
Şekil 3.11. Askeri taşıt alt salıncak optimizasyonu.....	18
Şekil 3.12. Makas gözü bağlantı parçası optimizasyonu.....	19
Şekil 3.13. Airbus tarafından optimizasyonu yapılan braket	19
Şekil 3.14. Simufact Additive programı ile Yatay ve Dikey olarak seçilen braket	22
Şekil 3.15. Tosca yazılımı ile havacılıkta kullanılan braketin optimizasyonu.....	22
Şekil 4.1. İş akış şeması	23
Şekil 4.2. Pet-G malzeme a) levha b) filament	25
Şekil 4.3. Astm D638 standardına göre TipI ve TipIV çekme numuneleri.....	26
Şekil 4.4. Kavramsal model ve ölçüleri	30
Şekil 4.5. Program ara yüzünden seçilen mesnet ve kuvvetlerin gösterimi	31
Şekil 4.6. Program ara yüzünden seçilen ağ örgü(mesh) boyutları.....	32
Şekil 4.7. Optimizasyon öncesi sonlu elemanlar analizinde Von Mises gerilmeleri	34
Şekil 4.8. Program ara yüzünden ilk optimizasyon için kısıtların girilmesi	35
Şekil 4.9. İlk optimizasyon sonucu	36
Şekil 4.10. Optimizasyon sonrası parçanın son hali.....	38
Şekil 4.11. İkinci optimizasyon sonrası sonlu elemanlar analizi ile parça üzerindeki yer değiştirme.....	38
Şekil 4.12. Leopfrog marka yazıcının görüntüleri	40
Şekil 4.13. Eurocnc marka CNC Router	41
Şekil 4.14. Radwag PS 6000/C/2 marka model tartı	42
Şekil 4.15. Dijital mikroskop	42
Şekil 4.16. Çekme cihazı ve kullanıcı ara yüzü	43
Şekil 4.17. Portatif sertlik ölçüm cihazı	44
Şekil 4.18. PST-200 yüzey pürüzlülük cihazı	45
Şekil 4.19. Inventor programı ve oluşturulan takım yolları	46

Şekil 4.20.	Simplfy3d programından bir görünüm.....	47
Şekil 4.21.	CNC Router ile üretilen parçalar.....	47
Şekil 4.22.	3B yazıcı ile üretilen parçalar	48
Şekil 4.23.	Çekme testi uygulanan tüm numuneler.....	50
Şekil 4.24.	Çekme esnasında kullanılan aparatlar	50
Şekil 4.25.	CNC Router ile elde edilen numuneler	51
Şekil 4.26.	Kavramsal tasarım üzerinde yüzeylerin gösterimi	52
Şekil 5.1.	Katmanlı imalat yan(işlem) yüzey mikro incelemeleri.....	54
Şekil 5.2.	Talaşlı imalat yan(işlem) yüzey mikro incelemeleri.....	57
Şekil 5.3.	Talaşlı imalat üst yüzey mikro incelemeleri	58
Şekil 5.4.	Çekme testindeki gerilme-şekil değişimi eğrilerine birer örnek	61
Şekil 5.5.	Katmanlı imalat üst yüzey mikro incelemeleri	65
Şekil 5.6.	Katmanlı imalat kırılma yüzeyi mikro incelemeleri	66
Şekil 5.7.	Talaşlı imalat kırılma yüzeyi mikro incelemeleri	66
Şekil 5.8.	Çekme testi sonrası kırılma yüzeylerine birer örnek.....	67
Şekil 5.9.	Hurda malzeme karşılaştırılması a) Talaşlı imalat b) Katmanlı.....	68

TABLO DİZİNİ

	Sayfa
Tablo 4.1. ABS, HIPS, Pet-G ve PLA filamentlerinin bazı termal ve mekanik özellikleri	25
Tablo 4.2. Pet-G levhaya ait teknik bilgi formu	27
Tablo 4.3. Tip I çekme numunelerinin test sonuçları	28
Tablo 4.4. Tip IV çekme numunelerinin test sonuçları	28
Tablo 4.5. Seçilen ayarlar sonrasında ağ örgü özellikleri	32
Tablo 4.6. Optimizasyon öncesi yapılan analiz sonuçları	34
Tablo 4.7. İlk optimizasyon sonrası analiz sonuçları	37
Tablo 4.8. İkinci optimizasyon sonrası analiz sonuçları	39
Tablo 4.9. Leapfrog Creatr HS 3B yazıcının özellikleri	40
Tablo 4.10. CNC Router teknik özellikleri	41
Tablo 4.11. Pürüzlülük cihazı genel özellikleri	45
Tablo 4.12. Pürüzlülük cihazı ara yüzü ayarları	49
Tablo 5.1. Optimizasyon aşamalarında yapılan sertlik ölçümleri	53
Tablo 5.2. Program ve gerçekte ölçülen kütle ve hacim değerleri	55
Tablo 5.3. Yüzey pürüzlülük ölçümleri	56
Tablo 5.4. Talaşlı imalat çekme numuneleri test sonuçları	59
Tablo 5.5. Katmanlı imalat çekme numuneleri test sonuçları	59
Tablo 5.6. Talaşlı ve Katmanlı imalat çekme numuneleri test sonuçlarının karşılaştırılması	60
Tablo 5.7. Program üzerinde Von Mises gerilmesi ve yer değiştirme sonuçları ..	61
Tablo 5.8. CNC Router ile kesilen parçaların kütle ölçümleri	63
Tablo 5.9. Hammadde fiyatları	68
Tablo 5.10. Talaşlı imalat ve 3B yazıcı yöntemi üretim-zaman tablosu	69
Tablo 6.1. Optimizasyon öncesi ve sonrası elde edilen değerler	71

TEŞEKKÜR

Manevi destekleri ile her zaman yanımda olan aileme ve eőim Nihal TOSUN'a teşekkür ederim.

Çalıőmamın her aşamasında, ilgi ve desteğini esirgemeyen, bilgi ve tecrübesiyle, tezimin bilimsel temeller ışığında yürümesine büyük katkısı olan Sayın Dr.Öğr.Üyesi Ahu ÇELEBİ' ye sonsuz teşekkür ederim.

Görev yaptığım kurum ESHOT Genel Müdürlüğüne, görüş ve önerilerinden faydalandığım çalışma arkadaőım Sayın Dr. Mak. Müh Ali Çaçlar ÖNÇAğ'a teőekkürü bir borç bilirim.

Manisa Celal Bayar Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü'ndeki laboratuvar sorumlusu Gökhan EYİCİ'ye ve tüm öğretim üyeleri hocalarıma, anlayıőlarından ve katkılarından dolayı teşekkür ederim.

Halil TOSUN
Manisa, 2021

ÖZET

Yüksek Lisans

KATMANLI İMALAT YÖNTEMİ VE TALAŞLI İMALAT YÖNTEMİ İÇİN OPTİMİZASYON YÖNTEMLERİNİN DENENMESİ VE KARŞILAŞTIRILMASI

Halil TOSUN

Manisa Celal Bayar Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Dr.Öğr.Üyesi Ahu ÇELEBİ

Gelişen teknoloji ve bilgisayar programları sayesinde mühendislik parça analizleri ve optimizasyonları günümüzde bilgisayar programları aracılığı ile yapılabilmektedir. Bilgisayar programları sadece analiz için değil ayrıca tasarımdaki değişiklikler ile parçanın hafifletilmesi sonucu malzeme maliyetinin düşürülmesinde de aktif rol almaktadır. İmalat yöntemleri ve bu yöntemlerin birbirleri ile olan karşılaştırmaları daima araştırma konusu olmuştur. Bir parçayı imal etmek için hangi yöntem(ler)in seçileceği, o işletme açısından büyük önem arz etmektedir. Tasarlanan parçanın çalışma koşulları altında maruz kalınan yükleri ve dayanımı üretici için çok önemlidir.

Bu tezde, katmanlı imalat ve talaşlı imalatın avantaj / dezavantajları araştırılmış ve bu yöntemler Pet-G malzeme kullanımı için karşılaştırılmıştır. Katmanlı imalat yönteminde bir FDM (Fused Deposition Modeling-Ergiterek Biriktirme Yoluyla Modelleme) tipi 3B(üç boyutlu) yazıcı kullanılmıştır. Talaşlı imalat yöntemi için ise bir CNC Router (Computer Numerical Control Router-Bilgisayarlı Sayısal Kontrol Yönlendiricisi) kullanılmıştır. Söz konusu imalat yöntemlerine göre oluşturulan bir parça tasarımı ve iki kez optimizasyonundan sonra mekanik özellikleri incelenmiş ve karşılaştırılmıştır.

Yapılan optimizasyonlar sonrasında hedeflenen kütle azalımı sağlanmıştır. İkinci optimizasyon sonrası numune, tasarım programına göre ilk halinden kütle olarak yaklaşık % 63 oranında hacimsel ve kütleli olarak küçülmüştür. Yaklaşık olarak 300 gram olan numunenin kütlesi, 100 grama düşürülmüştür. Katmanlı imalatla üretilen numunelerin, talaşlı imalatla üretilen numunelere göre yoğunluk değerleri düşük, yüzey pürüzlülük değerleri yüksek çıkmaktadır. Yüksek yüzey pürüzlülük değerinin istenmediği yerlerde ve karşılıklı çalışan parçalarda (yataklar, miller vb.) talaşlı imalat yönteminin kullanılmasının daha avantajlı olduğu görülmüştür. Yapılan testler sonucunda, talaşlı imalatla üretilen numunelerin mukavemet değerlerinin daha yüksek çıktığı gözlemlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: (Tasarım Optimizasyonu, Şekil Optimizasyonu, Topoloji Optimizasyonu, Katmanlı(Eklemeli) İmalat, Talaşlı İmalat, 3B Yazıcı)

2021, 80 sayfa

ABSTRACT

M.Sc.Thesis

TESTING AND COMPARISON OF OPTIMIZATION METHODS FOR LAYERED MANUFACTURING METHOD AND MECHANIC MANUFACTURING METHOD

Halil TOSUN

**Manisa Celal Bayar University
Graduate School of Applied and Natural Sciences
Department of Metallurgical and Materials Engineering**

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Ahu ÇELEBİ

Thanks to the developing technology and softwares, analysis and optimization of the engineering parts can be done through computer programs nowadays. Softwares play an active role not only in analysis but also in reducing the material cost as a result of lightening the part with changes in design. Manufacturing methods and comparisons of these methods with each other have always been the subject of research. Choosing the methods of manufacturing of material has a great importance for enterprise. The loads and strength of the designed part under operating conditions are very important for the manufacturer.

In this thesis, the pros and cons of both production methods which are additive manufacturing and machining have been investigated and these methods have been compared for the use of Pet-G material. An FDM (Fused Deposition Modeling) type 3D (three-dimensional) printer has been used in the additive manufacturing method and CNC Router (Computer Numerical Control Router) has been used for the machining method. A part design created in accordance with the mentioned manufacturing methods and its mechanical properties after its twice optimization have been examined and compared.

After the optimizations, the targeted reduction on the mass of production has been achieved. After the optimization process, the sample has reduced by about 63% in volume and mass according to the design program. The mass of the sample, which is approximately 300 grams, has been reduced to 100 grams. The density values of the samples manufactured by additive manufacturing are low and the surface roughness values are higher than the samples produced by machining. It has been observed that it is more advantageous to use the machining method in places where high surface roughness value is not desired and in mutually working parts (bearings, shafts, etc.). As a result of the tests, it has been observed that the strength values of the samples manufactured by machining are higher.

Key words: (Design Optimization, Shape Optimization, Topology Optimization, Additive Manufacturing, Machining, 3D Printer)

2021, 80 pages

1. GİRİŞ

Geleneksel yöntemlerden olan talaşlı imalat ile günümüzde birçok çeşitlikte parça üretilmektedir. Fakat son yıllarda teknolojinin gelişmesiyle farklı imalat yöntemleri gelişmiştir. Talaşlı imalat, talaş kaldırma yöntemlerinin kullanıldığı bir üretim yöntemidir. Genellikle frezeleme, tornalama, delme vb. imalat yöntemlerini içinde barındırmaktadır. Bu üretim yönteminde bir parça, tasarımından son hale gelene kadar çok fazla hacimsel olarak küçülür ve küçülme esnasında yüzeyden kaldırılan bu malzemeye “talaş” adı verilir. Talaşlar işe yaramadığından hurda olmaktadır. Bu üretim yöntemi aksine, katmanlı imalat yöntemlerinde talaş ve hurda olan malzeme çok azdır. Katmanlı imalatta hurda olarak nitelendirilebileceğimiz malzeme sadece destek malzemeleri olabilmektedir. Dolayısıyla üretime giren hemen hemen her malzeme ürün olarak elde edilmektedir.

Tasarımı yaparken imalat koşulları da göz önünde bulundurulmalıdır. Özellikle son yıllarda geleneksel talaşlı imalat yöntemlerinin yanı sıra katmanlı imalat yöntemleri ile tasarım çeşitliliği artmaktadır. Özellikle optimizasyon sonrasında elde edilen yüzeylerin talaşlı imalat yöntemleri ile elde edilmesi bir hayli zordur. Ayrıca malzeme katmanlı imalat yöntemleri ile daha hafif hale getirilmekte daha kolay işlenebilmektedir.

İngilizcede “design” olarak bilinen tasarım “zihni bir plan” anlamını taşımaktadır. Elizabeth Adams Hurwitz göre tasarım “gerekli olanın araştırılması” diye tanımlarken genel sözlük bilgisi olarak tasarım; insan zihninde oluşan bir olgunun, gerçek hayata aktarılmasıdır. Sanatçı, sanat yapıtını yaratırken, tasarımcı ise teknik sanayi ürünü yaratır. Tasarım, mühendis için imal koşulları, mukavemet ve rijitlik gibi konuları içerirken, bir sanatçı için bu konular hiç önem arz etmeyip, onun için sadece kişisel duygu, düşünce, hayal gücü ve beceri önemlidir. Bu tezde tasarımcı bundan sonra tasarım mühendisi, geliştirme mühendisi ve konstrüktör ile aynı anlamda kullanılacaktır. Tasarımcı, tasarımı yaparken birçok kısıt ile karşı karşıya kalmaktadır. Sanatçı ise özgür bir çalışma ile sanatını icra etmektedir [1].

Tasarım bir işletmeci için sadece karlılık, pazar ve satış gibi olguları anlatırken, ergonomik tasarım yapan kişi için ise kullanıma elverişi, rahat ve uygun olup olmadığı önemlidir.

Tasarım, her alanda tasarım olmalıdır. Sadece maliyet, dayanım, malzeme gibi gereklilikleri değil aynı zamanda tasarlanan parçanın pazar, satış, montaj ve bakım kolaylıklarını da yerine getirmelidir. Eğer tasarlanan ürün kullanıldığı yerde yerine takılamayıp, montaj ya da demontaj yapılamıyor ise o tasarımın hiçbir katma değeri yoktur. O, artık bir tasarım değildir [2].

Tasarımcı, tasarımını yaptığı parça üzerindeki bütün sınır ve kısıtlayıcı şartları düşünmek zorundadır. Aksi halde tasarladığı şey sadece bilgisayar ve kâğıt üzerinde kalmakta hiçbir katma değer sunmamaktadır. Tasarımı yapılan parçanın kısıt ve sınır koşulları yerine getirmesi gerekmektedir. Böylelikle ekonomik ve üretimi yapılması gerekli hale gelir.

Optimizasyon kelimesi latince “optimus” sözcüğünden türemiştir. Türkçe’de en iyi anlamına gelen kelime mühendislik tasarımı ya da mühendisçe tasarlanan bir konstrüksiyon söz konusu olduğunda aslında ulaşılmaya çalışılan hedefi göstermektedir. Dolayısıyla Mühendislikte tasarımın veya konstrüksiyonun en iyi hale getirilmesi manasında bir kavram olarak ele alınmaktadır. Bir mühendisin hedefinin en iyisini yaratmak olduğu düşünüldüğü taktirde bir mühendislik tasarımının ya da konstrüksiyonun aslında bir optimizasyon olduğu sonucuna varılabilir. Doğal olarak bunun tersini söylemekte mümkündür [3].

Tasarım devamlı tekrarlayan bir işlemdir. Tasarımı yapılan ürün analiz ve test sonuçlarına göre değiştirilmesi gerekebilir. Parça boyutlarında, kalınlığında veya köşe yuvarlatmasında yapılan bir değişiklik ise optimizasyondur. Bir yazılımcı için optimizasyon, en az komut ve satırda sonuca gitmek iken, bir işletmeci için ise optimizasyon en az gider ile en çok kazanç elde etmektir. Optimizasyon ile ilgili diğer görüş ve detaylar Bölüm.3’te verilecektir. İlerleyen teknoloji ile bilgisayar destekli yazılımların gelişmesi sonucunda sınır koşullar, kısıtlar ve yükler bilgisayar programlarına girilmektedir. Bunun sonucunda zihinde tasarlanan parçanın çok daha iyisini bilgisayar programları hesaplamaktadır [4].

Tasarım aşamaları artık literatürdeki gibi gerçekleşmemektedir. Bilgisayar ve bilgisayar programları tasarım aşamalarının daha kolay yapılmasını sağlamaktadır. Yakın gelecekte bilgisayar yazılımlarına hangi bölgeye parça tasarlanacağı ve

parçanın bağlanacağı yer seçilip, diğer elemanlar arasındaki kısıtlar girildikten sonra parça tasarım ve optimizasyonunu programın vermesi öngörülmektedir.

Parçanın oluşumunda ilk olarak zihinde bir parça tasarlanmaktadır ve daha sonra optimizasyon aşamasından geçirilmektedir. Tasarım ve optimizasyonu biten parça üretim aşamasına geçmektedir. Bu tezde bu üretim aşamalarından katmanlı imalat ve talaşlı imalat arasındaki farklar ele alınacaktır.

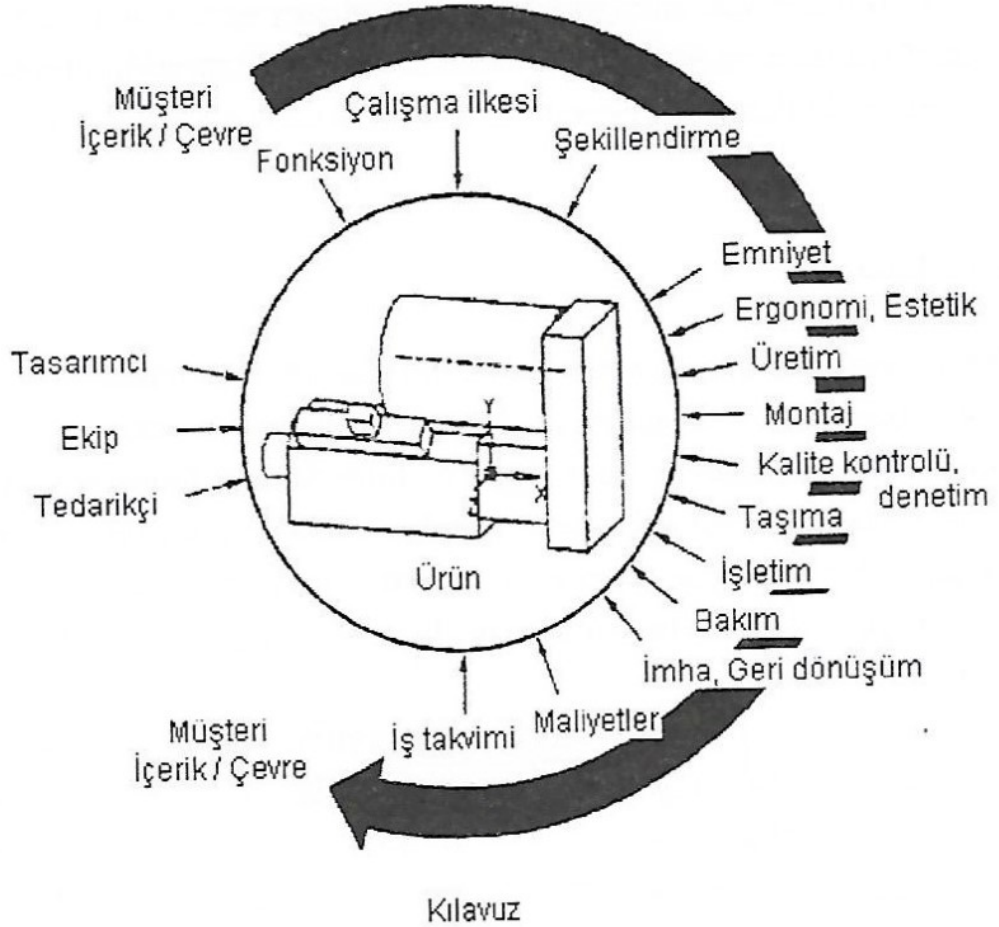
Bu tez çalışmasında tasarım ve optimizasyon konularına malzeme seçimi ve imalat koşulları bakımından yaklaşılabilecektir. Aynı tip malzemenin bir parçanın imalatında katmanlı imalat ya da talaşlı imalat yöntemi kullanılması sonucunda tasarım, mekanik ve teknolojik özellikler bakımından ne gibi farklılıklar ortaya çıktığı üzerinde durulacaktır. Bununla birlikte tasarımda optimizasyon açısından imalat yöntemlerinin etkisinin de ne derece etkin olduğu tespit edilecektir. Ayrıca en önemli üretim parametresi olan kütle, hedeflenen şekilde düşürülmeye çalışılacaktır.

2. TASARIM

Günümüzde tasarım kalitesi artmakta ve tasarımcıdan çağın gerekliliklerine, şartlarına cevap verebilecek teknolojiye uygun tasarımlar gerçekleştirmesi beklenmektedir.

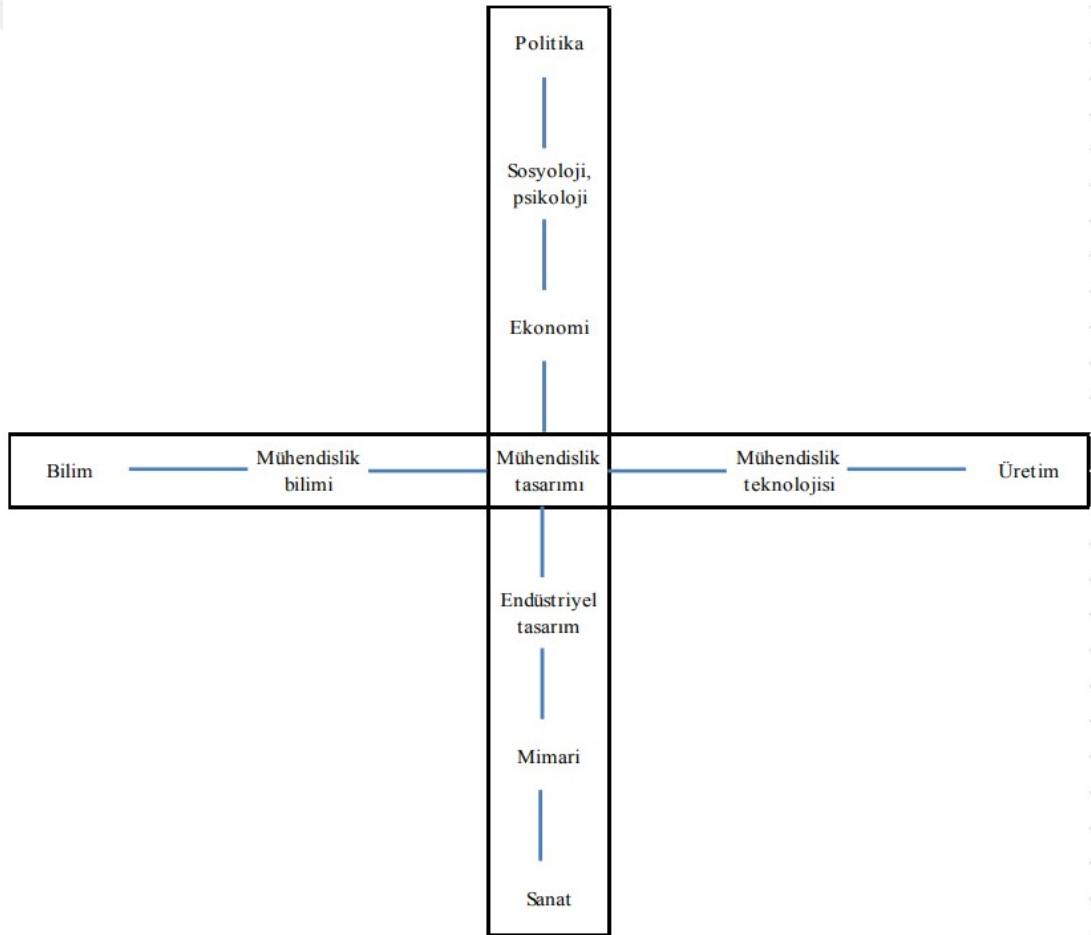
Mühendislerin tasarımdaki asli görevi; bilimsel ve mühendislik bilgilerini teknik problem çözümlerine uygulamaktır. Uyguladığı bu çözümleri; malzeme, teknolojik, ekonomik, yasal, çevresel ve insan ilişkili hususlarda oluşan ihtiyaç ve sınırlayıcılarla optimize etmektir [5].

Tasarımı gerçekleştiren tasarımcı, problem çözümünde en iyi sonuca gitmek için tüm tasarım kısıtlarını göz önünde bulundurmalıdır. Tasarımcı, soyutlama ile önemli sorunları belirler, fonksiyon yapıları saptar, uygun çalışma ilkeleri araştırır. Bunları bir çalışma yapısında birleştiren bir çözüm ilkesi detaylandırmak suretiyle temel bir çözüm yolu ortaya koyar [6].



Şekil 2.1. Tasarım ve geliştirme esnasındaki etki ve sınırlayıcılar [5].

Tasarımcı tasarım yaparken bütün tasarım evrelerini belli bir plan ve belli bir sistemde kullanmaktadır. Fakat günümüzde bu tasarım evreleri bilgisayar programları ile birlikte uygulanmakta ya da diğer basamaklar bu programlar sayesinde farkında olmadan yerine getirilmektedir. Sivri'ye göre; “Kavramsal tasarımın bünyesinde soyut bir basamak olan fonksiyonel modeli barındırması, tasarımcıların kavramsal tasarım sürecinden kaçınmalarının en temel nedenidir. Fonksiyonel model oluşturma, kavramsal tasarım sürecinin anahtar basamağıdır.” Tasarımın belli prosedüre bağlı yapılması, fonksiyonel model oluştururken tasarımcıyı engellemektedir. Tasarım belli aşamalar sonucunda olgunlaşmakta, belli kuralların uygulanması ile gerçekleşmektedir [7].



Şekil 2.2. Tasarımın diğer disiplinler arasındaki yeri [8].

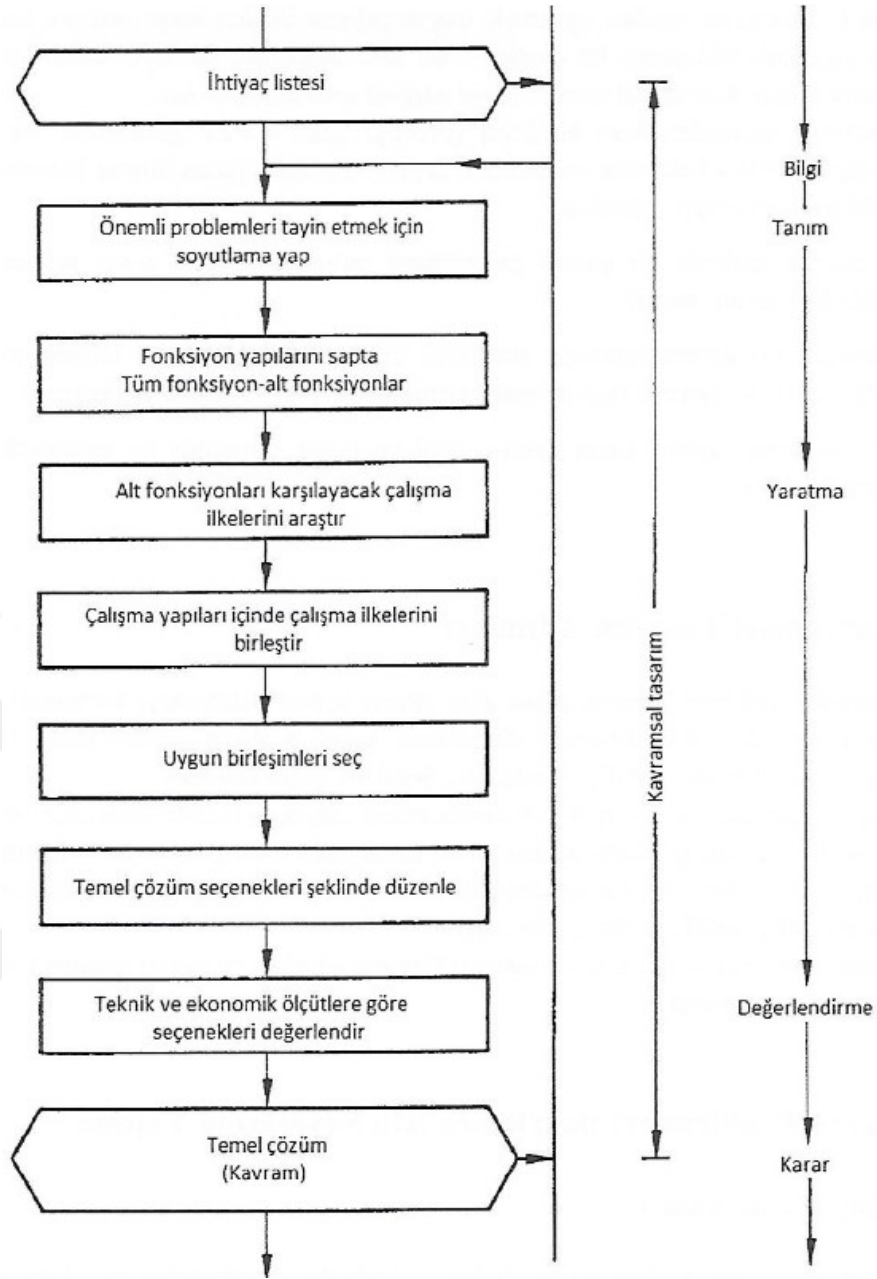
Tasarımcı, tasarım yaparken aşağıda verilen aşamaları sırasıyla gerçekleştirmesi gerekmektedir. Bu aşamalar:

- Kavramsal tasarım
- Şekillendirme tasarımı
- Ayrıntılı tasarım [9].

2.1. Kavramsal Tasarım

Kavramsal tasarım(KT), tasarımcı için tasarımın en kritik aşamasıdır. Bu aşama tasarımın ilk aşaması olup, ürün maliyetini büyük oranda etkilemektedir. Burada yapılan tasarım bir nevi optimizasyonun da ilk adımıdır. Kavramsal tasarım problemleri belirlemek, fonksiyon yapılarını saptamak, uygun çalışma ilkeleri araştırmak ve bu ilkeleri tasarım aşamasında birleştirmeyi içermektedir. Tasarım yazılımları daha çok şekillendirme ve ayrıntılı tasarımı desteklemektedir. Bu yazılımlar çizim, analiz ve simülasyon işlemlerini yapmaktadırlar. Yenilikçi bir yöntem olan bu yazılımlar, kavramsal tasarım aşamalarının farkında olmadan gerçekleşmesini sağlamaktadırlar. Bu yazılımlar sayesinde en uygun (optimum) kaliteli bir tasarım çözümü sağlanmaktadır [10, 11].

Tasarımcı KT sürecinde, teoride birçok aşamayı uygulaması gerekmekte, fakat pratikte bu böyle olmamaktadır. Bu durumun nedeni mevcut KT aşamalarının uygulamasına teşvik olmamasıdır. Ayrıca işletmeler tarafından böyle bir süreci takip etmek zaman kaybı olarak görülmektedir. KT kaliteli bir ürün üretmek olarak da tanımlanabilir. Bununla birlikte tasarımcı ürünün işlevi üzerinde yoğunlaşmalıdır. Tasarım sürecinde gerçekleştirilen konstrüksiyon, çalışma prensiplerine uygun ve üretilebilirliği olmalıdır. KT süresince her aşama ayrı ayrı değerlendirilmeli ve her aşama sonunda çözümlerin yorumlanması gerekmektedir. Böylece tasarımcı bu tasarıma ait çözüme daha hızlı ulaşmakta ve istediği tasarımı gerçekleştirmiş olmaktadır [12].



Şekil 2.3. Kavramsal tasarım aşamaları [5].

Tasarım yapılırken kullanılan kılavuzlardan biri Alman Mühendisler Birliği tarafından hazırlanan VDI 2221 (1987; 1993) standardıdır. Zihinde olan soyut bir şeyden somuta ulaşmak için yapılması gerekli faaliyetleri ve sonuçları gösteren bir rehberdir. Bu standart, ürün işlevselliğinin anlaşılmasına, ürün işlevsel yapılarının belirlenmesine öncelik veren bir yöntemdir. Dolayısıyla tasarımcı ürün işlevselliğine önem vermesi gerektiği kanısına varmaktadır. Tasarım yaklaşımı yedi aşamaya bölünmüş ve tüm aşamaların önceki aşamaları tekrarlamasının gerekli olup olmadığı bu standartta belirtilmektedir [13].

2.2. Şekillendirme Tasarımı

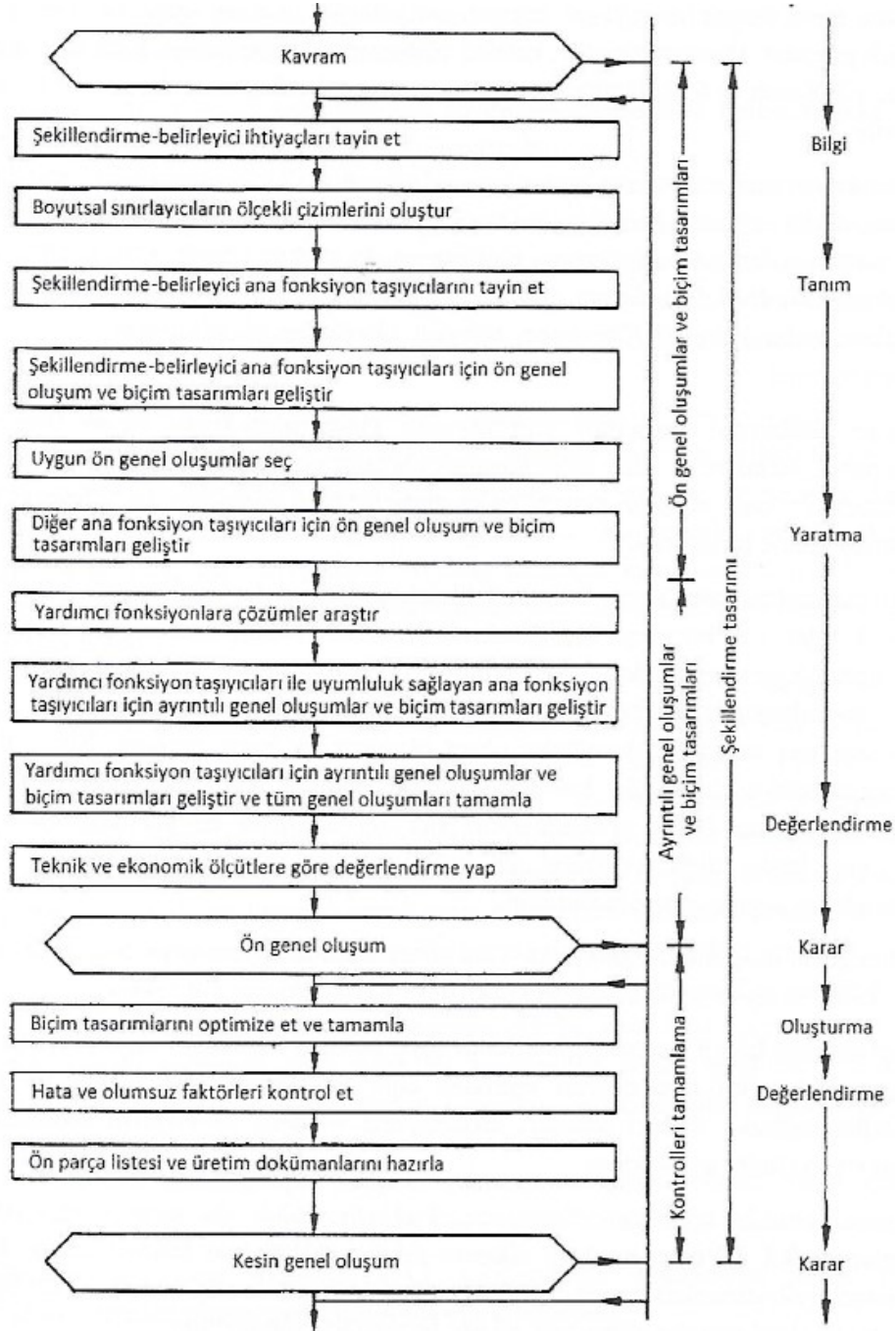
Şekillendirme tasarımı (ŞT) diğer bir tasarım işlem basamağıdır. Kavramsal tasarım sonrasında eskiz halde olan veya zihinde olan bir ürün artık bu aşamada şekillenmeye başlamaktadır. Şöyle ki, soyuttan somuta doğru bir tasarım vardır. Diğer montaj parçaları ile arasındaki ilişkiler ve taslakta kalan düşünce, ölçüler bu aşamada şekillenecektir. Ürüne ait temel çözüm veya kavramdan başlayarak, teknik ve ekonomik ölçütlere uygun bir konstrüksiyon yapısı belirmeye başlar. Bu durumda tasarım ölçü verilerek yapılan çizimler sayesinde daha anlaşılır bir hale gelmektedir. Tasarımcı artık tecrübesini konuşturarak farklı konstrüksiyonlar yapmakta ve bunlar arasındaki avantaj ve dezavantajları irdelemektedir. Bu aşamada teknik ve ekonomik olarak tasarım artık son bulmaktadır. İşlevsellik, dayanım, malzeme, iş planlama vb konularda bu sürece dâhil edilip en uygun tasarımın yapılması sağlanır. İstenmeyen ve güvenli olmayan konstrüksiyonlar elenip, en iyi konstrüksiyona şekillendirme tasarımı ile ulaşılmaktadır [14].

Standartlar hakkında bilgi derleme oldukça zahmetlidir. ŞT yaparken Alman Mühendisler Birliği tarafından hazırlanan “VDI 2223 Teknik Ürünler Sistematik Şekillendirme” kılavuzu da kullanılmaktadır. Standartların kullanılması bazı basamakların geçilerek ilk başta yapılması gereken bir adımın iş bitiminde karşımıza çıkmasını engellemektedir. Çünkü ŞT aşamasında;

- Çoğu işlem aynı zamanlı yapılır,
- Yüksek tecrübe ve bilgi düzeyine sahip olsanız bile birçok basamak tekrarlanır.
- Tasarım üzerinde yapılan küçük bir değişiklik konstrüksiyon üzerindeki tüm parçaları etkilemektedir.

Bu nedenlerden dolayı ŞT yaparken bir plan üzerinden hareket etmek gerekmekte, bu da her zaman mümkün olmamaktadır. Burada yapılan plan mevcut tasarımda oluşacak sorunu minimize etmektedir. ŞT yaparken Şekil 2.4.’te uygulanması gereken bir plan görülmektedir. Sonuç olarak ŞT yaparken konstrüksiyon yapısı geliştirilmeli, malzeme seçimi ve hesaplama yapılmalıdır. Bu aşamada en iyi ön biçim tasarımı hesaplanmalıdır. Yapılan tüm tasarımlar teknik ve ekonomik ölçütlere göre değerlendirilmelidir. Tanımlanan ve kabul gören tasarıma

göre zayıf noktalar giderilmelidir. Hatalar, olumsuz etkiler ve minimum faaliyetler için kontroller yapıldıktan sonra, ön parça listeleri, üretim ve montaj dokümanları hazırlanmalıdır [15].



Şekil 2.4. Şekillendirme tasarım adımları [5].

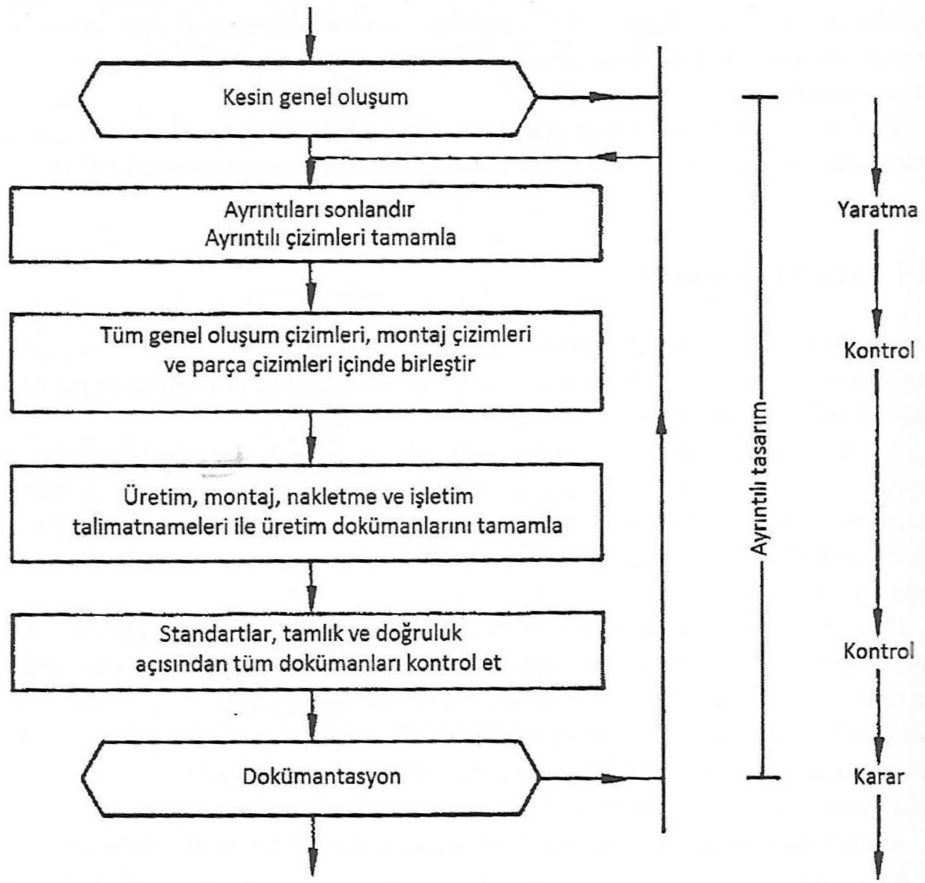
2.3. Ayrıntılı Tasarım

Tasarım aşamasının son basamağı olan ayrıntılı tasarım(AT) sürecinde, konstrüksiyondaki tüm parçaların bütün özellikleri ortaya konulmuştur. Malzeme

analizleri bitmiş ve malzeme seçilmiştir. Üretim nasıl ve ne şekilde olacağına dair kararlar verilmiş, kısacası daha önceki aşamalardan olan KT ve ŞT’nda oluşturulan tüm basamakları kapsamaktadır. Tasarımcı bu aşamada dikkatli olmalıdır. Aksi takdirde; daha önceden alınan tüm fikir, plan ve onayların dışına çıkabilir. Hal böyle olunca tasarımın yeniden oluşturulması gerekebilir.

Bu aşamada geçen her faaliyet artık BDT (Bilgisayar Destekli Tasarım) yazılımları kullanılarak yürütülmektedir. Parça resimleri bu yazılımlarda oluşturulup, üretim planları CNC takım tezgâhlarında yapılmaktadır.

AT’da parçaların üretimi yapılırken, kalite kontrol prosedürleri, montaj ve taşıma talimatları ve bunların hepsinin bir arada bulunduğu kullanım kitapları oluşturulmalıdır. Bu aşamada hazırlanan dokümanlar, talimatları yerine getirme ve üretim programlamanın temelini oluşturmaktadır. Şekil 2.5.’de ayrıntılı tasarım basamakları görülmektedir. Kesin genel oluşum aşamasında teknik resimler detaylandırılıp, tolerans ve ayrıntılara kadar her şeyi kapsar.

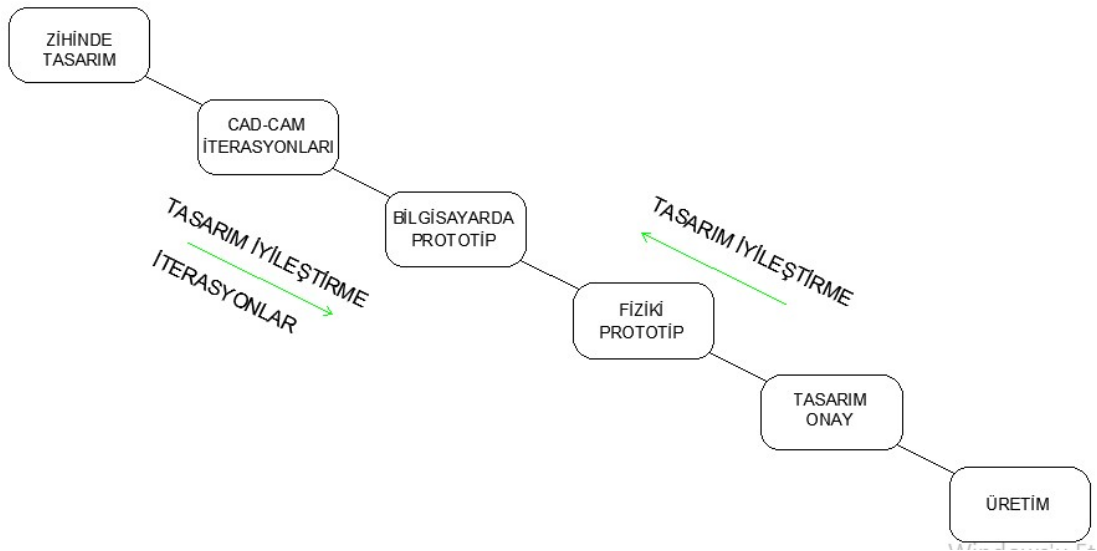


Şekil 2.5. Ayrıntılı Tasarım basamakları [5].

AT aşamaları asla yüzeysel çalışmaları barındırmaz. Bu aşamada üretim işlemleri sırasında hataların giderilmesi kritik bir yere ve öneme sahiptir. KT ve ŞT birbirini tamamlayıcı nitelikte olup, AT sürecine yönelik olarak döküm ve dövme gibi üretimi uzun sürecek parçaların tasarım aşamaları ön plana alınmalıdır. Böylece, tasarım süresini hızlandırmak mümkün olacaktır.

Tasarım aşamaları yukarıda verilen plana uygun olarak yapan tasarımcının gerçekleştirdiği tasarımın başarılı olması beklenmektedir. Hâlbuki verilen tasarım aşamalarını sırasıyla irdelemeyen tasarımcı başarılı olamayacaktır. KT ile zihinde oluşan soyut tasarım somut hale dönüştürülmüştür, ŞT sonunda ise kavram somutlaşmış, temel kurallara uygunluğu gözden geçirilmiş ve CAD modelleri oluşturulmuştur.

Günümüzde tasarım süresini hızlandırmak için simülasyon ve optimizasyon programları kullanılmaktadır. Tasarımcının bir sistem tasarım süreci Şekil 2.6.'da görüldüğü gibidir. Genel tasarım süreci zihinde tasarım yani kavramsal tasarımın oluşturulması ile başlar. Bilgisayar ortamında birkaç iterasyon sonrasında prototipleme ile devam etmektedir. Oluşturulan tasarımın doğrulanması ve onay alınması ardından son testler yapılmaktadır. Eğer tasarım istenilen gereksinim ve ihtiyaçlara cevap vermedi ise tasarım iyileştirilmek üzere tekrardan bilgisayar ortamında iterasyon yapılmaktadır. Test ve tasarım onayı alan prototip, üretimin gerçekleşmesi ile son bulmaktadır.



Şekil 2.6. Tasarım süreci

3. OPTİMİZASYON NEDİR?

İnsanoğlu var olduğundan bu yana her zaman mükemmeliyetçi olmuş veya mükemmeli aramıştır. Tasarımcı, tasarımını en güvenli ve insan yaşamını tehlikeye atmadan yapmak ister. Yalnız bu tasarımı yaparken bazen yapılan tasarımın güvenli olması için seçilen kesit, boyut, cidar gibi kriterleri olağandan büyük seçerek yaptığı konstrüksiyonun güvenli olmasını ister. Yapılan tasarım güvenli olmakta fakat, ekonomik açıdan uygun olmayabilir. Tasarımcıdan tasarımın hem güvenli aynı zamanda da ekonomik olması istenmektedir. Bu ve bunun gibi birkaç parametrenin bir tasarım yapılırken aynı anda düşünülmesi ve en uygun çözümün bulunması gerekmektedir. Bütün bu çözümlerin sentezlenip en uygun olanının bulunmasına, optimizasyon denilmektedir [16].

Zhang'a göre, optimizasyon standart ve devamlı olarak kullanılan parçalarda en uygun malzemelerden maksimum faydalanma, maliyet etkinliği ve üretimi kolaylığını amaçlar. Birçok tasarım yapılırken, malzemeden tasarruf edilmesi beklenmektedir. Fakat yalnızca malzemeden tasarruf edilmesi yetmemektedir. Bununla birlikte toplam maliyetin de düşürülmesi hedeflenmektedir. Özellikle otomobil ve uzay teknolojisinde yapılan bu tasarruflar sadece toplam maliyeti değil, ayrıca yakıt verimliliğini de etkilemektedir [17].

Kroo'ya göre, optimizasyon bir kavram üzerinde çeşitlemelerle elde edilen bilginin işlenmesiyle gerçekleştirilen iyileştirme çabasıdır. Özellikle optimizasyon şu iki soruya cevap aramaktadır; "En iyi nedir"? "Mevcut çözüm tek midir"? Optimizasyon bu iki soruya sayısal değerlerle cevap arayan ve matematiksel optimizasyon olarak da anılan bir bilim dalıdır. Farklı alanlarda optimizasyon problemleri olmakta, yaşamın her alanında olan bu problemlere de çeşitli çözümler getirilmektedir [18].

Optimizasyon iteratif bir işlemdir. Yapılan optimizasyon devamlı değişerek son halini almaktadır. Tasarımı yapılan parçanın boyut, kalınlık vb. özellikleri devamlı değişebilir. Bu değişimleri elle yapmak mümkün olmamakta, yapıldığında ise bir kesit hesabı bile çok zahmetli olmaktadır. Harcanan zaman ise çabasıdır. Artık bu tarz optimizasyon işlemleri bilgisayar yazılımları ile yapılmaktadır [19].

3.1. Optimizasyon Türleri

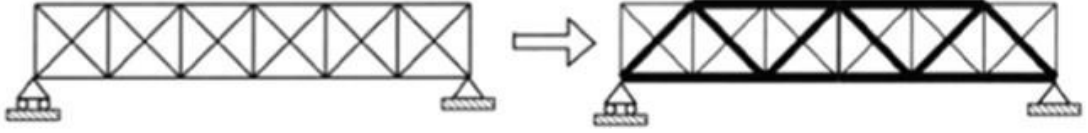
Optimizasyon teknikleri, tasarımı yapılan geometriyi tanımlamak ve tasarım değişkenlerinin tiplerine göre sınıflandırılmaktadır. Burada amaç fonksiyonu ve kısıtlar, tasarım değişkenleri tarafından tanımlanan fonksiyonlar ile ifade edilmektedir. Tasarım değişkenleri tarafından kontrol edilebilen yapısal özelliklere bağlı olarak yapısal optimizasyon genel anlamda boyut, şekil ve topoloji optimizasyonu olmak üzere 3 farklı şekilde incelenmektedir. Literatürde kullanılan en eski optimizasyon çeşidi, boyut (parametrik) optimizasyonudur. Optimizasyon ilk olarak topoloji optimizasyonu ile başlamaktadır. Burada malzeme ve çeşitli kısıtlar altında en iyi optimizasyonu yapmak hedeflenmektedir. Tasarımcı optimizasyon yaparken aşağıdaki işlem basamaklarını uygulamaktadır [20].

- En iyi başlangıç topolojisini oluşturmak
- Oluşturulan en iyi topolojik optimizasyon bilgisayar ortamında tasarıma dönüştürülür.
- En son olarak parça dış hatları ve şekli oluşturularak en uygun geometride tasarım yapılır. Gerekli görüldüğü takdirde de boyutlar değiştirilerek boyut optimizasyonu ile tasarım son bulmaktadır [21].

Yapısal optimizasyon teknikleri, sınır koşullar ve kısıtlara bağlı olarak tasarımın boyut, şekil ve topolojisi en iyi hale gelene kadar tekrarlayan işlem zincirlerinden oluşmaktadır ve üç ana gruba ayrılmaktadır. Bunlar boyut optimizasyonu, şekil optimizasyonu ve topoloji optimizasyonudur.

3.1.1. Boyut optimizasyonu

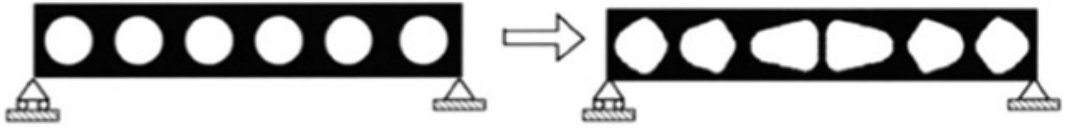
Optimizasyon çeşitleri içinde sonuca ulaşmak için en basit yöntemdir. Bu aşamada sadece ölçü olarak değişiklik yapılmaktadır. Yapılan tasarım için optimum değerler bulunmaktadır. Bu değerler bazen parçaların et kalınlıkları, bazen kesit, bazen yarıçap, bazen de genişlik ve uzunluk gibi değerler olabilir. Kısaca bu aşamada kalınlık, genişlik ve yükseklik gibi tasarım ölçülerinin belirlenmesi için uğraşmaktadır [22].



Şekil 3.1. Boyut optimizasyonu [23].

3.1.2. Şekil Optimizasyonu

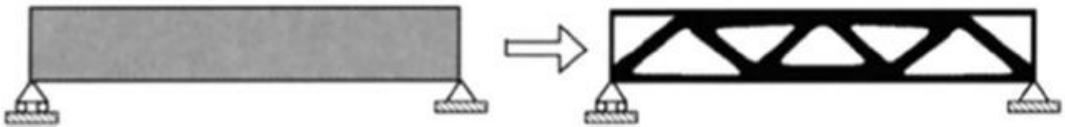
Parça üzerinde bulunan deliklerin ve boşaltmaların yerlerinin değiştirildiği ve parça dış ölçülerinin tespit edildiği aşamadır. Burada amaç en iyi yapısal tasarıma ulaşmaktır. Ayrıca yapının topolojisi de sabit tutulmaktadır. Bu nedenle tasarım boyut optimizasyonun genişletilmiş bir halidir [24].



Şekil 3.2. Şekil optimizasyonu [23].

3.1.3. Topoloji Optimizasyonu

Topoloji optimizasyonu sırasında malzeme dağılımı ve yeni sınırlar oluşturmak koşulu ile parça şeklinin değiştirilmesi işlemi yapılmaktadır. Topoloji optimizasyonu parçanın malzeme, boyut ve şeklinin belirlenmesi için en iyi yöntemdir. Burada herhangi bir yapının delik sayısı aynı kalması koşulu ile yapılan optimizasyona aynı topolojiye sahip optimizasyon denmektedir [25].

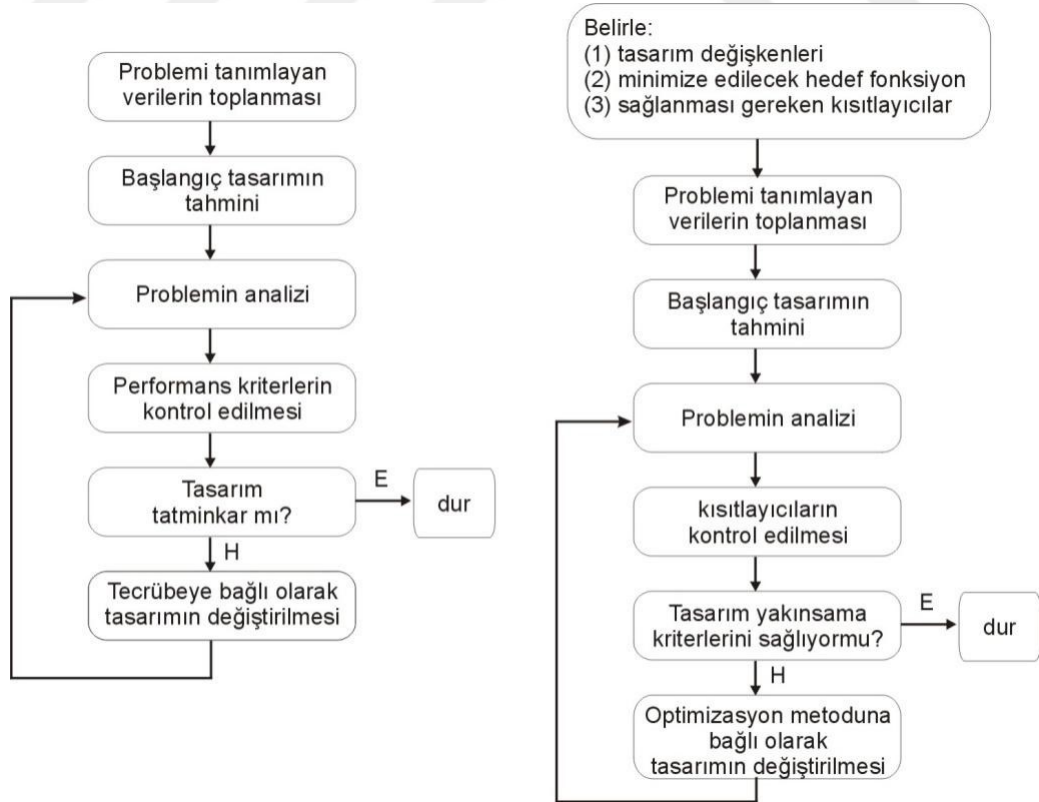


Şekil 3.3. Topoloji optimizasyonu [23].

Boyut ve şekil optimizasyon yöntemlerinde, kavramsal tasarım üzerinde parça boyutu ve geometrisi değiştirilerek yeni şekle ulaşılmaktadır. Bu nedenle şekil optimizasyonunda elde edilen sonuç optimum olmaktan çok uzaktadır. Bu yüzden optimizasyona kavramsal tasarım üzerinden en iyi topolojiye ait tasarım üzerinden başlanmalıdır. Böylece oluşan tasarım üzerinde şekil ve boyut optimizasyonu uygulamakta kolaylaşır [26].

Topoloji optimizasyonunda ilk olarak malzeme yerleşimi belirlenmektedir. İkinci adımda yapısal direngenliğini belirleyen bölgesel dağılım tanımlanmaktadır. Bu iki adım ile tasarımın şekil ve malzeme dağılımı geometrik olarak optimize edilmiş olmaktadır. Boyut ve şekil optimizasyonu bu iki adımı iyileştirmektedir, bu nedenle optimizasyon çeşitleri kendi arasında birbirlerini geliştirmekte ve en iyi optimizasyona ulaşılmaktadır [27].

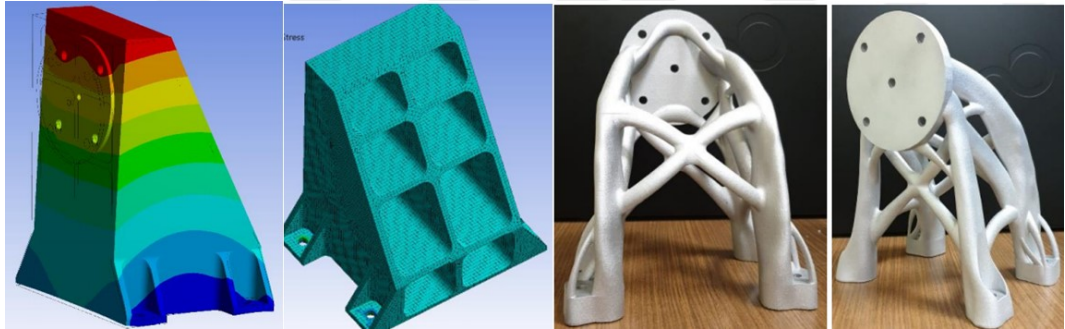
Topolojik optimizasyonda, bütün yapıdaki malzeme dağılım fonksiyonu optimizasyon parametresi olarak alınır. Bu tez çalışmasında optimizasyon tekniği olarak evrimsel topolojik optimizasyon kullanılmıştır. Evrimsel yapı optimizasyonu kullanılmasının sebeplerinden biri, tasarımda gerilmenin az olduğu yerde malzeme eksiltme, büyük olduğu yerde ise malzeme eklemektir. Başka bir sebep ise, iki boyutlu parçaların boyutlandırılması ve optime edilmesinde başarılı sonuçlar elde edilmesidir. Bu yöntemde diğer optimizasyon yöntemlerindeki gibi matematiksel ifadeler kullanılmamaktadır. Çözümler yaklaşık ve gerçeğe daha yakın olarak elde edilmektedir. Evrimsel algoritmanın mühendisler tarafından BDT programları sayesinde daha kolay uygulandığı gözlemlenmektedir [28].



3.2. Optimizasyonla İlgili Yapılan Çalışmalar

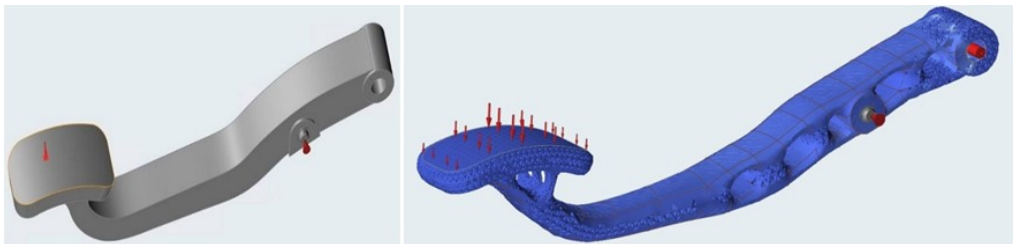
Optimizasyon ile son yıllarda çalışmalar artmıştır. Çalışmaların artma nedenlerinden en önemlisi, toz katmanlı imalat malzemelerinin pahalı olmasıdır. Tasarımcılar özgün ve istediği tasarımı yapmakta kendini özgür hissetmesi gerekmektedir. Tasarımcı tasarladığı karmaşık yapıya sahip parçaların imalatı da geleneksel yöntemlerle çok zordur. Bu yüzden katmanlı imalat yöntemleri kullanılmaktadır. Bunun için genellikle dayanım ve mukavemet istenilen yerlerde toz katmanlı imalat yöntemleri kullanılmaktadır. Bu üretim yöntemi tasarımcıyı özgür tutmaktadır ayrıca programlar sayesinde optimizasyona uğratılmış bir parçanın geleneksel yöntemlerle üretimleri imkânsız hale gelmektedir.

Badır, yapmış olduğu çalışmada ürettiği uydu braketini geleneksel yöntemlerle üretmek imkansızdır. Şekil 3.5.'te bir uyduda kullanılmak üzere imal edilen bir braketin hafifletilmesi üzerine yapılan optimizasyon aşamaları görülmektedir [30].



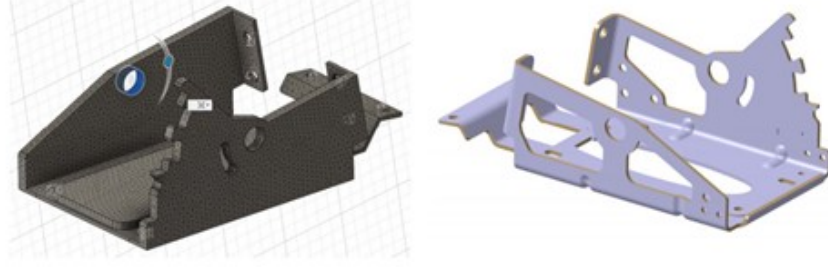
Şekil 3.5. Uydu braketinin optimizasyonu [30].

Beker, otomotiv parçalarının topoloji optimizasyonu üzerine çalışmalar yapmıştır. Şekil 3.6.'da bir otomotivin gaz pedalının optimizasyonu görülmektedir. Beker yaptığı bu çalışmada kütlesi 1.6 kg kavramsal tasarıma sahip gaz pedalını topoloji optimizasyonu sonrasında 0.4 kg'a kadar düştüğünü gözlemlemiştir [31].



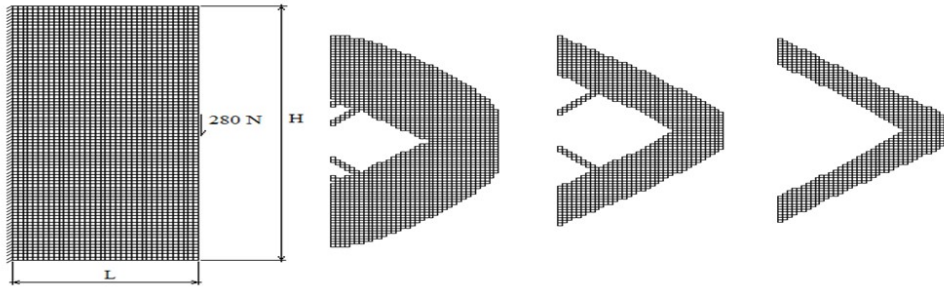
Şekil 3.6. Otomotiv gaz pedalının topoloji optimizasyonu bir örnek [31].

Top ve ark., el freni mekanizması içerisinde bulunan bir saç parçayı topoloji optimizasyonu ile ideal yapıya ulaşmasını sağlamışlardır. Bu çalışmada Autodesk Fusion 360 kullanılmıştır. Şekil 3.7.'de program ile optimizasyona uğratan saç parça görülmektedir [32].



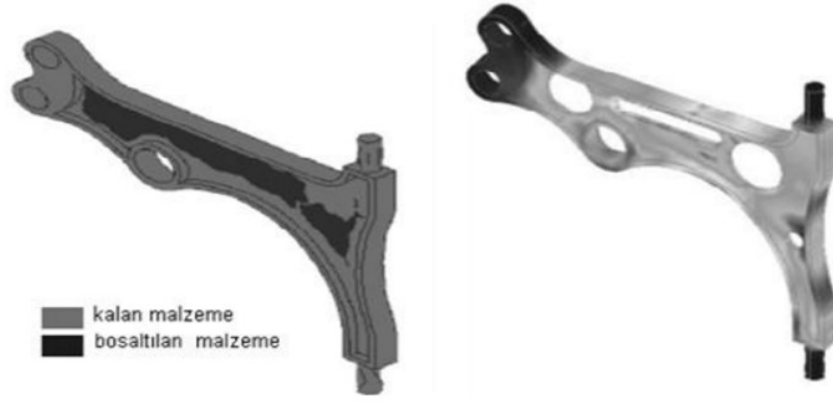
Şekil 3.7. El freni mekanizması içerisinde bulunan saç parçanın optimizasyonu [32].

Savaş ve Ülker, tasarladığı sistemde sekiz elemanlı düğüm noktası ve üç serbestlik derecesi olan Şekil 3.8.'de görüldüğü gibi şeklin ortasından 280N'luk bir yüke maruz kalan kirişin farklı hesaplamalar sonucundaki evrimsel topolojik optimizasyonu görülmektedir. Bu çalışmada optimizasyonun parça hacmine etkisi de incelenmiştir [33].



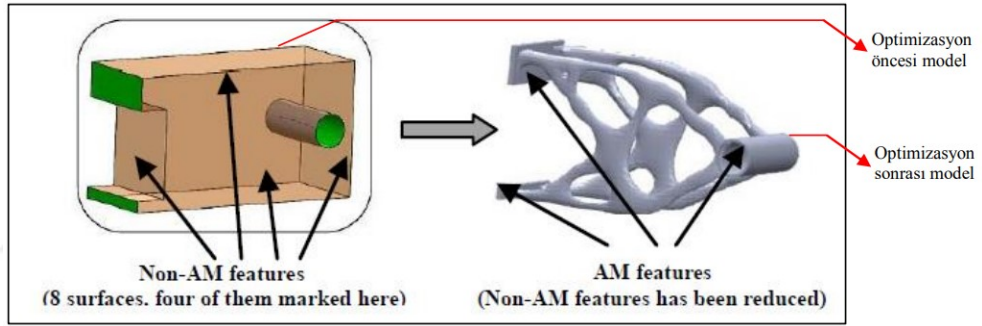
Şekil 3.8. Evrimsel topolojik optimizasyona bir örnek [33].

Yıldız ve ark., ürün maliyetinin azaltılması ve pazarda daha kolay alıcı bulabilmesine yönelik, topoloji optimizasyonu yöntemini kullanmıştır. Malzeme dağılımını esas alan bu çalışmada araç salıncağı ve motor bağlantı elemanının optimum yapısal modelleri üzerinde çalışmalar yapmışlardır. Elde ettikleri sonuç, topoloji optimizasyon yaklaşımının, taşıt elemanları tasarımının, bu yöntemle yapılabileceği yönünde olmuştur. Şekil 3.9.'da yaptıkları salıncak kolunun optimizasyonu görülmektedir [34].



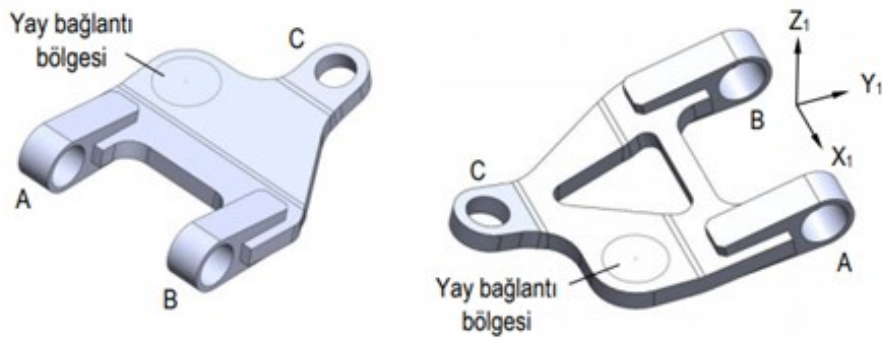
Şekil 3.9. Salıncak kolunun optimizasyonu [34].

Zhang ve ark., eklemeli imalat üzerinde optimizasyon üzerinde yaptıkları çalışmada Şekil 3.10.'da gösterilen yeşil bölgeleri sınır koşullar olarak belirlemişlerdir [35].



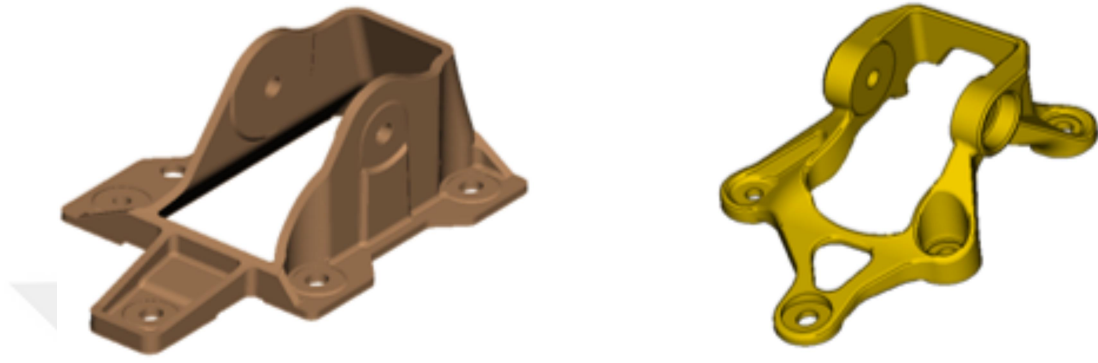
Şekil 3.10. Eklemeli imalatta optimizasyon [35].

Topaç ve ark. askeri taşıt bağımsız ön süspansiyonu için alt salıncak tasarımını farklı arazi ve koşullar için optimizasyona uğratmışlardır. Optimizasyon sonucunda kütle yaklaşık 1/5 oranında azaltılmıştır. Ayrıca farklı yol ve sürüş koşullarından farklı optimizasyon sonuçlarına ulaşmışlardır. Yaptıkları optimizasyonun son hali Şekil 3.11'de görülmektedir [36].



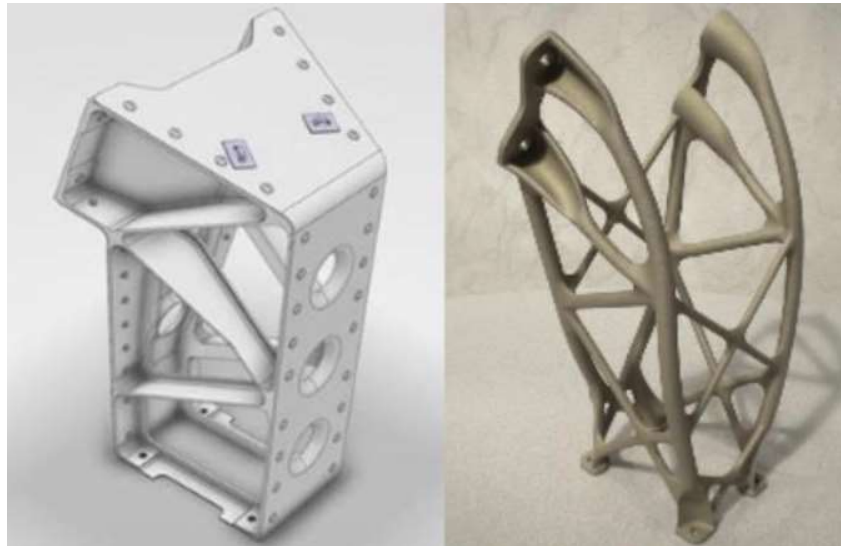
Şekil 3.11. Askeri taşıt alt salıncak optimizasyonu [36].

Çalışkan, bir ticari taşıtın makas gözü bağlantı parçasının optimizasyonunu, farklı denemeler sonucunda üç farklı tasarım elde etmiştir. İterasyonlar sonucunda elde ettiği üç tasarıma incelemeler ve analizler yapmıştır. Yapılan çalışma sonucunda ilk tasarımı yaklaşık olarak yüzde yirmi hafifleterek Şekil 3.12.'deki son tasarım halini almıştır [22].



Şekil 3.12. Makas gözü bağlantı parçası optimizasyonu [22].

Şekil 3.13'de Airbus Savunma ve Uzay Departmanı tarafından optimizasyonu yapılan parça görülmektedir. Toplamda 44 parça ve 4 bağlantı elemanından oluşan bu tasarım belli iterasyonlar sonucunda tek bir parça olarak üretilmiştir. [37].



Şekil 3.13. Airbus tarafından optimizasyonu yapılan braket [37].

3.3. Tasarımın Simülasyon ve Optimizasyonu

Tasarımcıya birçok kolaylık sağlayan simülasyon ve optimizasyon, günümüzde bilgisayar programları sayesinde yapılmaktadır. Sanayideki rekabet

ortamında tasarımcının daha hızlı tasarım yapması gerekmektedir. Bu tarz firmalar müşteri isteklerine hızlı cevap vermek ve ayakta durabilmek için, kısa zamanda ürün geliştirmek zorundadırlar. Böyle olunca da bu firmaların imdadına tasarım yapabilecekleri, aynı zamanda analiz yapacakları ürünler BDT programları yetişmektedir. Simülasyon ve optimizasyon tasarım için sistem çözümlerinin niteliklerini prototip imalatı yapmadan önce tahmin etmek üzere kullanılmaktadır. Optimizasyon en uygun tasarım bulunana kadar devam etmektedir. İlk optimizasyonda nihai tasarım elde edilemez. Aynı zamanda simülasyonlar sonucunda yaptığımız tasarımın gerçekçi olup olmadığını veya yanlış tasarlandığı teyit etmiş oluruz [38].

Roozenburg ve Eekels, simülasyon terimini şu şekilde ifade etmişlerdir; “Tasarlanmış bir ürünün nitelik ve davranış sistemlerinin muhakeme ve/veya modeller ile test edilmesiyle bir şekle sokulmasıdır.”. Modellerin belirlenmesi için simülasyon programları sayesinde tekrar tekrar analiz yapılması gerekmektedir. Yapılan optimizasyon tekniği ve çıkan analiz sonuçları sayesinde model oluşturulmaktadır. Tasarım sürecinde kullanılan simülasyon ise modelleri belirlemektedir. Sınır şartlar altında yapılan devamlı hesaplamalar, hep aynı sonucu vermektedir. Bununla birlikte gerçek hayatta sistem değişkenleri daima çeşitli sonuçlar vermektedir [39].

Optimizasyon, simülasyondan elde edilen verilere dayanmaktadır. Optimizasyon farklı tasarımların kullanılması için elde edilmiş sonuçlardır ve daha iyi tasarımların oluşturulmasına katkı sağlamaktadır. Kısaca optimizasyon hem değerlendirme hem de çözümü içermektedir. Yeni çözümler bulunması farklı optimizasyon yöntemlerinin uygulanmasından geçmektedir. Genel olarak BDT programlarında tasarım yöntemleri, statik ve dinamik analiz çözümlerini uygulanabilmektedir. Son yıllarda optimizasyon ve simülasyon konusunda pek çok araştırma ve çalışma yapılmıştır. Bu da gösteriyor ki, model ve prototip imalatına ve test süresine ayrılacak zamanı azaltmaktadır. Bununla birlikte firmanın piyasadaki rekabet gücü artmakta, bu da simülasyon ve optimizasyon ile olmaktadır.

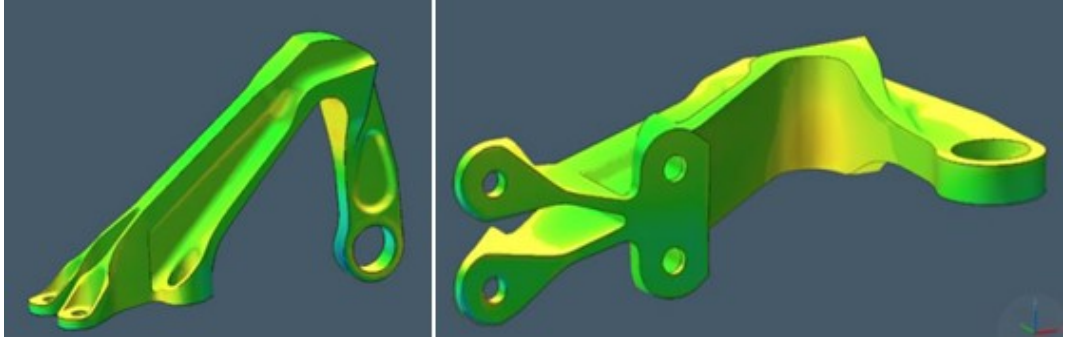
Optimizasyon için geliştirilen programlar son otuz yılda kullanılmaya başlamıştır. Optimizasyon için geliştirilen yazılımlardan başlıcaları şunlardır [40];

- Altair Opti Struct
- Vanderplaats Genesis
- Simulia Tosca
- Abaqus Atom (Tosca)
- MSC Nastran
- Solid Thinking Inspire
- Within Enhance (Autodesk)
- Permas Topo
- FEM tools Optimization
- Optishape Ts

Yukarıda sayılan programlar bir katı modelin optimizasyonu esnasında kullanılmaktadır. Bu programlar tasarımı ve analizi yaparak parçayı optimizasyona uğratırlar. Ayrıca katmanlı imalat yöntemleri esnasında herhangi bir olumsuzluk yaşanmaması için oluşturulan yazılımlar vardır. Bunlardan en önemlileri, toz katmanlı imalat yapan tezgâhlarda hazırlanan programlardır.

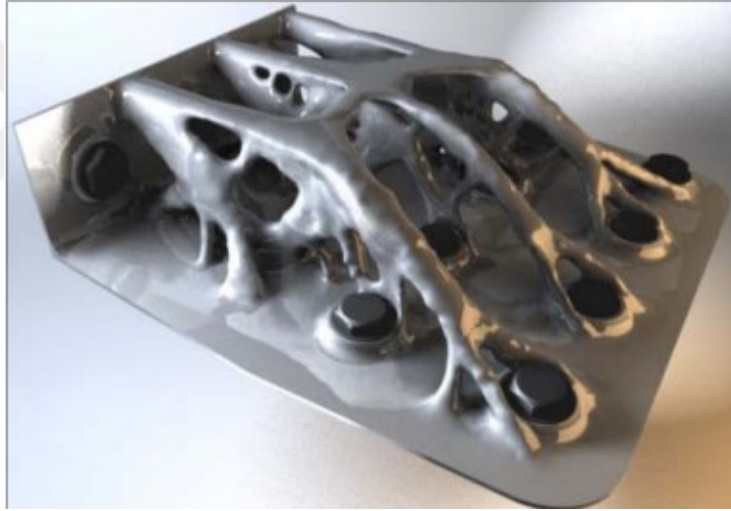
Katmanlı imalat için simülasyon programları son yıllarda önem arz etmektedir. Toz yataklı katmanlı imalat yöntemleri simülasyonunda üretimi yapılacak parçanın malzeme maliyeti girdisi yüksek olduğundan, tekrar tekrar üretim yapmak, deneme yanılma yolunu seçmek yüksek maliyetlere neden olmaktadır. Bu alanda çıkan programlar sayesinde üretimi yapılacak numuneye gerçekliği yaşatarak en iyi sonuçlar elde edilmektedir. Simufact additive bu alanda kullanılan başarılı yazılımlardan biridir.

Çelebi ve Seziş yaptığı çalışmada katmanlı imalat sektöründe en çok kullanılan yazılımlardan biri olan Simufact Additive kullanmışlardır. Bu çalışmada kullandıkları braket parçasını tezgah tablasına yatay ve dikey olarak yerleştirmişlerdir. Topoloji optimizasyonu sonucu elde edilmiş bu braketin dikey olarak tablaya konulduğunda daha çok çarpıldığı sonucuna varmışlardır. Ayrıca dikey olarak konulan parça yazdırma anında daha fazla destek malzemesi kullanmaktadır. Böylece üretim maliyeti artmaktadır. Kullandıkları braket Şekil 3.14.'de görülmektedir [41].



Şekil 3.14. Simufact Additive programı ile Yatay ve Dikey olarak seçilen braket [41].

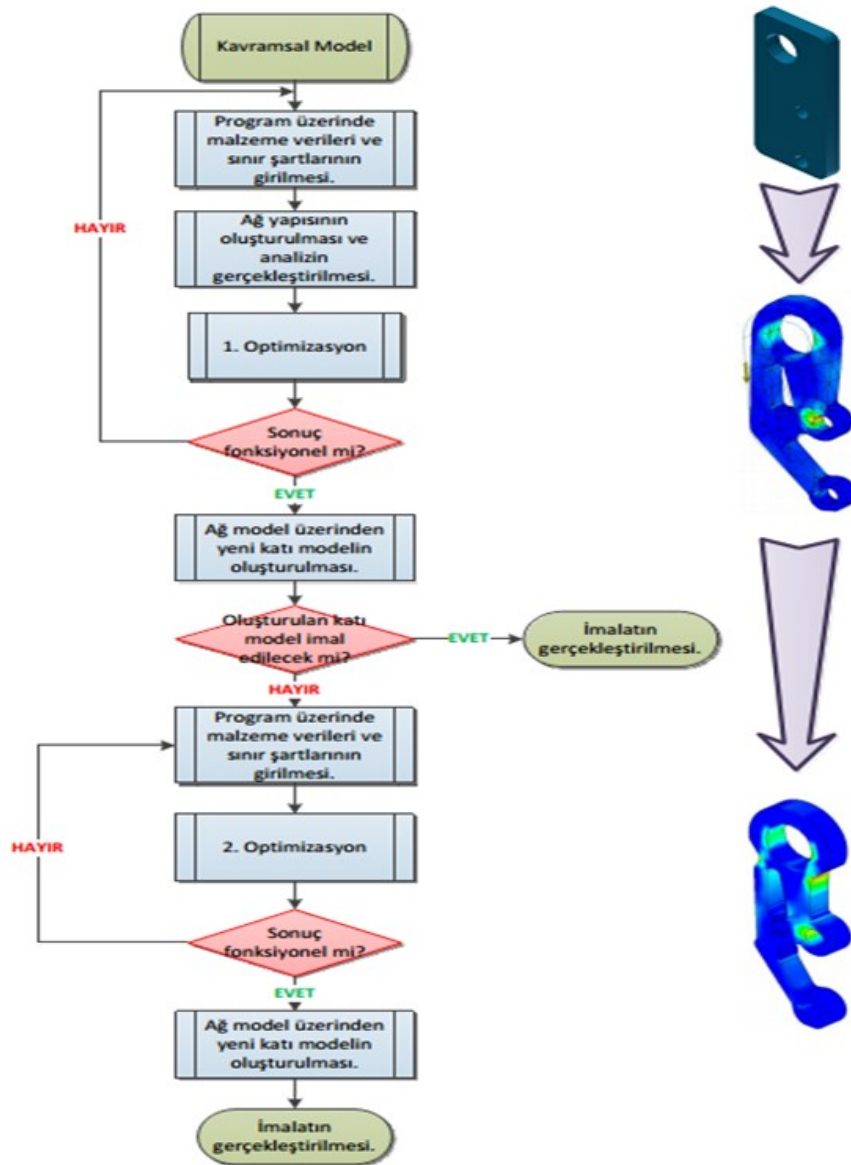
Brackett ve ark. Tosca yazılımını kullanarak değişik yoğunlukta ve farklı izotropik yapılarda iterasyonlar sonucunda elde ettikleri havacılıkta kullanılan bağlantı braketini Şekil 3.15.'te görmektedir [42].



Şekil 3.15. Tosca yazılımı ile havacılıkta kullanılan braketin optimizasyonu [42].

4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Çalışmalara ilk olarak bilgisayar ortamında kavramsal modelin tasarımı ile başlanmıştır. Kavramsal model tasarımı esnasında katmanlı imalat ve talaşlı imalat yöntemleri ile üretim kolaylığı düşünülmüştür. Modele uygulanacak olan testler ve kullanılacak olan malzeme de bu aşamada değerlendirilmiştir. Model; üretim, malzeme ve test aşamaları bakımından bu aşamada sonuçlandırılmıştır. Bilgisayar ortamında malzeme verileri, sınır şartları ve ağ yapısının oluşturulmasından sonra modele uygulanan yükler altında sanki gerçek hayatta çekme testi yapılır gibi optimizasyona uğratılmış ve bu işlem tekrarlı bir şekilde yapılmıştır. Yapılan çalışma için Şekil 4.1.'de görülen iş akış şeması uygulanmıştır.



Şekil 4.1. İş akış şeması

4.1. Kullanılan Malzeme

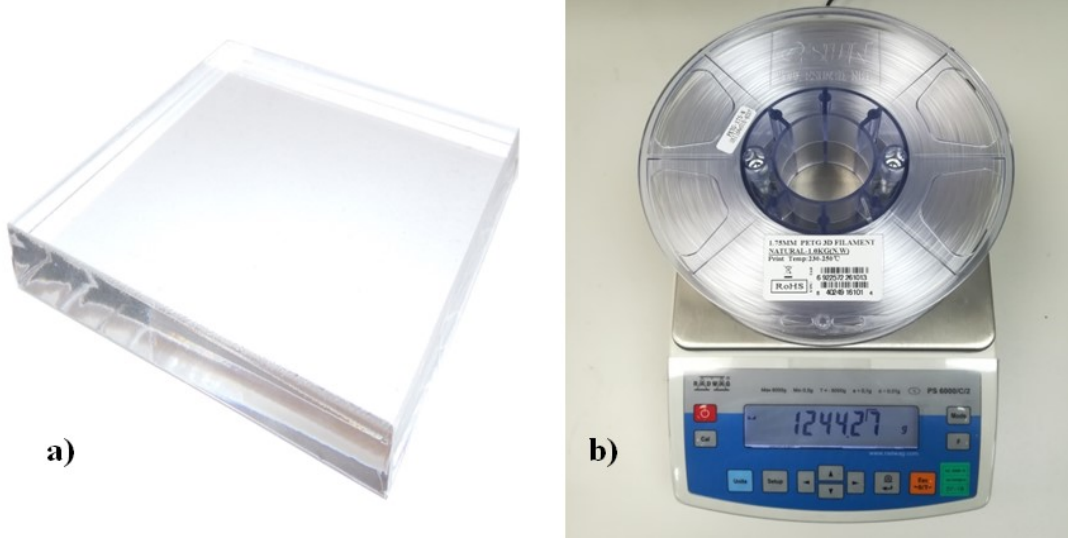
Uzay gemilerinden bilgisayarlara, şişelere ve vücut protezlerine kadar her yerde kullanılan plastik, tarihte insanların yapmış olduğu malzemelerin içinde en çok dikkat çekenlerden biridir. Plastiğe özel kalitesini veren şey, moleküllerinin şeklidir. Pek çok plastik polimer diye bilinen uzun organik moleküllerden yapılıdır. Bugün her biri kendi özelliklerine ve kullanım alanlarına sahip binlerce sentetik plastik vardır. Pek çoğu hala hidrokarbon kökenlidir (yağ ve doğalgaz) fakat geçtiğimiz birkaç yılda Kevlar ve CNRP gibi süper hafif ve süper dayanıklı plastik üretmek için karbon fiber ve başka malzemeler eklenmiştir [43].

Pet (Polietilen Tereftalat) dünyaca kullanılan termoplastik polimerlerden biridir. Yarı kristal ve amorf yapıdadır. Yoğunluğu fazla olduğu için elde edilmesi, düşük ağırlıklı glikol sayesinde sentezlenir. Tereftalik asit ve etilen glikol, bir asit katalizörüyle birlikte ısıtılınca polimerizasyon başlar ve Pet elde edilir. Polietilenin paralel zincirleri arasındaki zayıf Van Der Waals bağları çekme sırasında yüksek oranda uzamayı sağlar [44].

Günlük hayatta en çok kullandığımız su şişelerinde Pet polimeri kullanılmaktadır. Hatta yiyecek ve içecek kaplarında da kullanıldığı görülmektedir. Bu çalışmada endüstride sıklıkla kullanılan malzemelerden birinin Pet kullanımı yerine Pet-G (Polietilen Tereftalat Glikol) kullanılmasının nedeni Pet filamentin piyasada satılmamasıdır. Bu çalışmada Pet yerine Pet-G kullanılmıştır.

Pet'in değiştirilmiş bir sürümü olan Pet-G hammaddesinden üretilen "G" harfi polimerizasyon sırasında malzeme bileşimine eklenen "glikol" anlamına gelir. Pet-G temel Pet formundan daha saydam, daha az kırılabilir ve kullanımı daha kolay olan bir malzemedir. Moleküler yapısı ise düzensizdir; 88°C camsı geçiş sıcaklığına sahip saydam ve amorf yapıdadır [45].

FDM tipi 3B yazıcılarda bu filament sıklıkla kullanılmaktadır. FDM tipi Leapfrog Creatr Hs marka yazıcı ile PLA, ABS, Nylon ve PVA filamentler de kullanılmaktadır. Şekil 4.2.'de talaşlı imalat için kullanılan levha formundaki Pet-G ve katmanlı imalat için 3B yazıcıda kullanılan filament halindeki Pet-G malzeme görülmektedir [46].



Şekil 4.2. Pet-G malzeme a) levha b) filament

Pet-G malzemenin özellikleri;

Pet-G , ABS (Akrilonitril Bütadien Stiren)'den daha güçlü ve daha dayanıklı ve PLA(Polilaktik Asit) gibi yazdırılması kolaydır. Bu iki malzemenin eksi ve artı yönleri bilinerek, tek malzemede birleştirilmiştir. Yazdırma esnasında katmanlar iyi yapışmakta, çarpılma ve büzülme olmamaktadır. Baskı sıcaklığı 240-260°C arasında, tabla sıcaklığı ise 60-80°C arasında seçilmesi önerilmektedir. Bu özellikleri sayesinde Pet-G filament ile yapılan mekanik parçalar, sürekli ve ani gerilmelere karşı kalan parçalar üzerinde daha iyi sonuçlar vermektedir. Bundan ötürü çok ideal bir yazıcı hammaddesidir [47]. Tablo 4.1.'de Pet-G filamentin diğer filamentlere karşı bazı termal ve mekanik özellikleri verilmiştir.

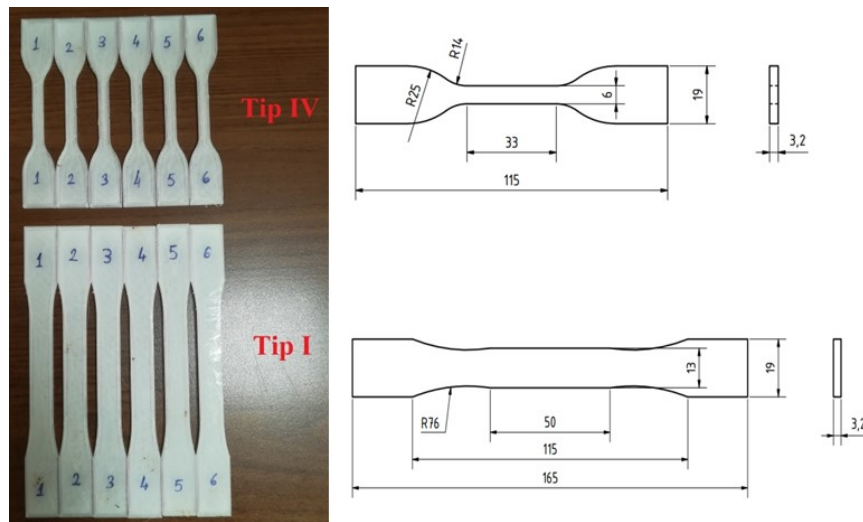
Tablo 4.1. ABS, HIPS, Pet-G ve PLA filamentlerinin bazı termal ve mekanik özellikleri [48].

BAZI TERMAL VE MEKANİK ÖZELLİKLER	ABS	HIPS	Pet-G	PLA
Çekme Dayanımı (Mpa)	40.7	27	29	59
Eğme Dayanımı (Mpa)	13.8	10.9	8.2	19.1
Camsı Geçiş Sıcaklığı (°C)	105	100	80	60-65
Baskı Sıcaklığı (°C)	230-250	220-240	240-260	190-220
Tabla Sıcaklığı (°C)	80-120	90-110	60-80	50-70

4.2. Tasarım Programı İçin Katmanlı İmalatta Kullanılan Malzemenin Çekme Dayanımının Belirlenmesi

Tasarımı gerçekleşen ve malzemesi seçilen model için artık verilerin bilgisayar ortamına girilmesi gerekmektedir. Talaşlı imalat için kullanılacak levha ve filament çekme özelliklerinin bilinmesi gerekmektedir. DIN ISO EN 527 levha ile ilgili bu standart, belirli şartlar altında plâstiklerin ve plâstik kompozitlerin çekme özelliklerinin tayiniyle ilgili genel prensipleri kapsar [49, 50]. Kullanılacak levhanın çekme dayanımı Tablo 4.2.'de firma tarafından verilen teknik bilgi formundan faydalanılarak programa girilmiştir.

Talaşlı imalat için standarda ulaşmak bu kadar kolay iken, katmanlı imalat için kullanılacak filamentin çekme dayanımının tayin edilmesi gerekmektedir. DIN ISO EN 527 talaşlı imalat ya da levha malzeme içerdiği halde, katmanlı imalat için gerekli şartları sağlamadığı ve katmanlı imalat ile ilgili standart bulunmadığı araştırılmıştır. Bu yüzden Pet-G filament mekanik özelliklerinin tayini için ASTM D638 standardı incelenmiş ve bu standart içeriğinde yer alan numune tiplerinden tip I ve tip IV numune ölçülerine uygun olarak 5'er adet çekme test numuneleri hazırlanmıştır [51, 52]. Söz konusu numunelerin yazdırma sonrası görünüşleri ve ölçüleri Şekil 4.3.'de gösterilmektedir. Kullanılan çekme cihazına ait bilgiler bu tezin 4.5.5. konu başlığı altından ulaşılabilir. Sırası ile Tip I ve tip IV çekme sonuçları Tablo 4.3. ve Tablo 4.4.'te verilmektedir. Bu çekme testi sonuçları programa girilerek optimizasyon işlemi gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.3. Astm D638 standardına göre Tip I ve Tip IV çekme numuneleri

Tablo 4.2. Pet-G levhaya ait teknik bilgi formu [53].



Teknik Bilgi Formu
PET-G | Simolux

Güncelleme Tarihi	14.07.2016
Haddelenmiş Kalıplama Karşımı	TP, ET, 07-020
Haddelenmiş Kalıplama Karşımı Standard	ISO 7792
Yoğunluk, g/cm ³ DIN EN ISO 1183	1,27
Gerilme Elastiklik Modülü, MPa DIN EN ISO 527	1900
Akma Gerilimi, MPa DIN EN ISO 527	52
Akma Sınırdaki Uzama, % DIN EN ISO 527	4,5
Darbe Dayanımı, kJ/m ² DIN EN ISO 179	Kırılma Yok
Çentikli Darbe Dayanımı, kJ/m ² DIN EN ISO 1279	10
Bilye Sertlik Dayanımı, MPa DIN EN ISO 2039-1	97
Shore D Sertliği DIN EN ISO 868	78
Lineer Isıl Genleşme Katsayısı, K ⁻¹ ISO 11359-2	0,7x 10 ⁻⁵
Vicat B Testi, °C DIN EN ISO 306	77
Yanma Davranışı	Düşük/ B1 / DIN 4102 (1-8 mm)
Dielektrik Dayanımı, kV/mm DIN IEC 60243-1	16
Yüzey Direnci, Ohm	10 ¹⁶
Uygulama Sıcaklığı, °C	-40 ile + 65
Bf [*] ye Göre Fizyolojik Uygunluk	✓
Proses Sıcaklığı, °C (fırın sıcaklığı)	230-250
FDA' ya Göre Uygunluk	✓
Işık Geçirgenliği, %	90 (3 mm)

Bu formda yer alan tüm veriler, yapılan ölçümlerin ortalaması alınarak belirlenmiştir ve yaklaşık değerleri göstermektedir. Bu değerler rehber niteliği taşıyarak malzeme seçimini kolaylaştırmak için bilgi amaçlı oluşturulmuştur ve hiçbir yasal sorumluluk içermemektedir. Seçilen ürünün spesifik alanlarda kullanım şartlarına uygunluğu son kullanıcı tarafından test edilerek onaylanmalıdır. Ek bir teknik bilgiye ihtiyaç duyulması durumunda bizimle iletişime geçmenizi rica ederiz.

Tablo 4.3. Tip I çekme numunelerinin test sonuçları

ASTM D638 TİP I ÇEKME TESTİ SONUÇLARI	MAKSİMUM GERİLME MPa	MAKSİMUM KUVVET kN	ELASTİKLİK MODÜLÜ Mpa
TYPE I-1	28,095	1,117	1957,210
TYPE I-3	29,597	1,231	2337,740
TYPE I-4	31,701	1,319	1451,660
TYPE I-5	30,574	1,272	1570,040
TYPE I-6	28,921	1,203	1382,340
Ortalama	29,778	1,228	1739,798
Standart Sapma	1,259	0,068	359,004
n=5 için t (%68) dağılım değeri	1,11	1,11	1,11
%95 için k değeri	2	2	2
%95 güvenilirlikte minimum	26,982	1,077	942,809
%95 güvenilirlikte maksimum	32,573	1,379	2536,787

Tablo 4.4. Tip IV çekme numunelerinin test sonuçları

ASTM D638 TİP IV ÇEKME TESTİ SONUÇLARI	MAKSİMUM GERİLME MPa	MAKSİMUM KUVVET kN	ELASTİKLİK MODÜLÜ Mpa
TYPE IV-1	25,879	0,497	1373,300
TYPE IV-2	32,389	0,622	1285,840
TYPE IV-3	35,482	0,681	-
TYPE IV-4	35,645	0,684	1594,620
Ortalama	32,349	0,621	1417,920
Standart Sapma	4,566	0,088	159,152
n=5 için t dağılım değeri	1,14	1,14	1,14
%95 için k değeri	2	2	2
%95 güvenilirlikte minimum	21,939	0,421	1055,053
%95 güvenilirlikte maksimum	42,759	0,821	1780,787

4.3. Tasarım ve Optimizasyonda Kullanılan Yazılımlar

Kavramsal tasarımın oluşturulması ve geometrik çizimler yapmak amacıyla Autodesk Inventor Professional 2019 programı kullanılmıştır. Tezin bu kısmından sonra Autodesk Inventor Professional 2019, program adı ile anılacaktır. Bu program ile parametrik katı model oluşturulmuş ve teknik resimler çizilmiştir. Kavramsal modeli oluşturulan şeklin malzeme mekanik özellikleri belirlendikten sonra, optimizasyon basamakları Şekil 4.1.'de belirtildiği şekilde gerçekleştirilmiştir. Tasarım kısıtlar, malzeme özellikleri ve ürüne gelen yükler programa girilmesi ile optimizasyon süreci başlamaktadır. Tasarımcıya program sayesinde yapılan işlemler sonucunda, malzemenin hafifletilmiş ve en uygun optimize edilmiş hali verilmektedir. Önemli olan dayanım ise ayrı bir optimizasyon, malzeme ve hafiflik ise ayrı bir optimizasyon sunan program sayesinde artık nerede ise optimizasyonu programlar yapmaktadır.

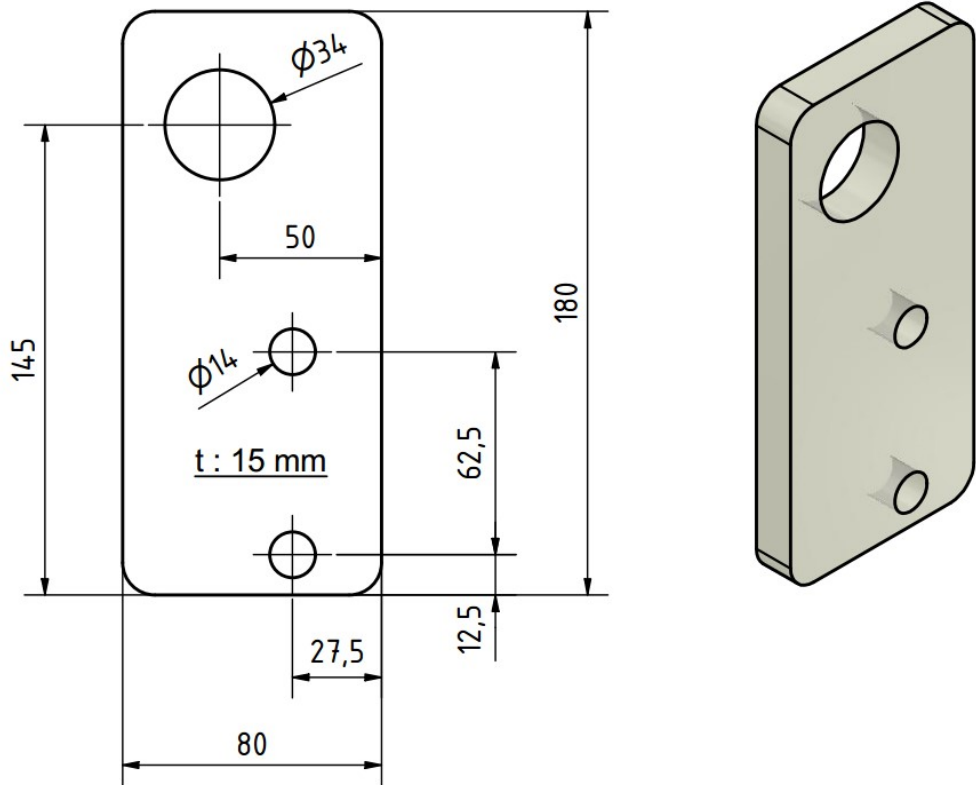
Optimizasyon aşamasında kavramsal model üzerinde taşınması istenen yük (2000N), sabit mesnetlerin olduğu yerler, yer çekimi kuvveti (9810.000 mm/s^2), malzemenin (Pet-G) girilmesi gibi kısıtlardan sonra parça program sayesinde analiz ve optimizasyon yapılmıştır. Tüm bu sınır şartlar ve koşulların programa girilmesi 4.4. Tasarım ve Optimizasyon konusu başlığı altında verilmektedir.

4.4. Tasarım ve Optimizasyon

Tasarım programı ile kavramsal tasarım geometrisi en kaba haliyle Şekil 4.4.'de görülen parça temel alınarak optimizasyon işlemlerine başlanmıştır. Seçilen tasarım hem optimizasyon açısından iyi bir örnek, hem de mekanik olarak sadece statik yüklemelere maruz kalacağı için tercih edilmiştir. Ayrıca piyasada imalatının yapılabilmesi ve yassı bir ürünün optimizasyon sonrası iki imalat yönteminde de üretim kolaylığı sağlaması gibi hususlarda göz önünde bulundurulmuştur. Ayrıca üst delikten çekme test cihazına bağlanacağı göz önünde bulundurularak, kavramsal model oluşturulmuştur. Çekme işlemleri tasarım programında ve çekme test cihazında aynı proses parametreleri kullanarak yapılmıştır. Böylece iki yöntem arasındaki farkların daha net ortaya çıkacağı düşünülmüştür.

Oluşturulan kavramsal model üzerinden statik analizi için sırası ile aşağıdaki işlemler yapılmıştır.

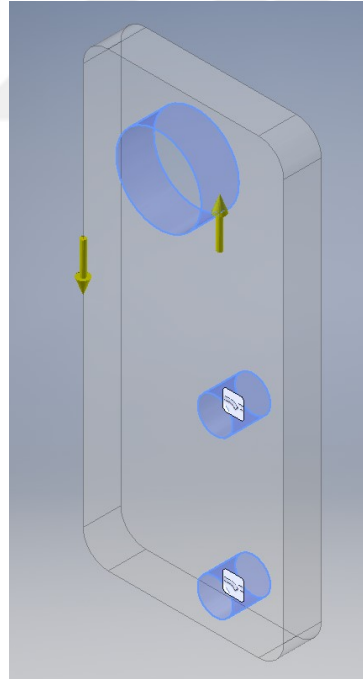
- Kavramsal Modelin oluşturulması
- Oluşturulan modelin analize uygun hale getirilmesi
- Modele malzeme atanması
- Model üzerinde mesnetlerin seçilmesi
- Model üzerinde uygulanacak kuvvetin belirlenmesi
- Yerçekimi kuvvetinin tayin edilmesi
- Modelin sonlu elemanlara ayrılması
- Mesh (ağ örgü) ve lokal mesh
- Sınır şartların girilmesi
- Analiz işlemi
- Sonuçların incelenmesi ve değerlendirilmesi
- İstenilen sonuç elde edilinceye kadar parçayı optimizasyon aşamasından geçirme.



Şekil 4.4. Kavramsal model ve ölçüleri

Programa malzeme özelliklerinin girilmesi aşamasında, talaşlı imalat için firmadan alınan, Tablo 4.2.'de yer alan teknik özelliklerden faydalanılmıştır. Katmanlı imalat için ise filamentü üreten firmanın vermiş olduğu bir teknik özellik formu bulunamamıştır. Katmanlı imalat teknik özelliklerinin tayini için ASTM D638 tip I ve tip IV standardına göre yapılan çekme numunelerinin mekanik özelliklerine ilişkin veriler çekme deneyi sonucunda elde edilmiştir. ASTM D638 tip I elde edilen çekme verileri program ara yüzünden malzeme özellikleri kısmına girilmiştir.

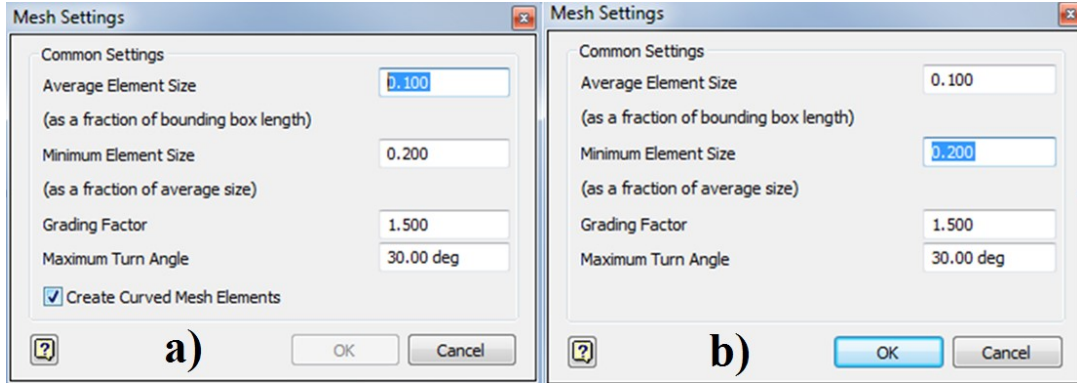
Kavramsal tasarım aşamasında model alt iki delikten sabitlenen, üstteki delikten ise yukarı doğru bir taşıma mapası olarak düşünölmüş ve tasarlanmıştır. Şekil 4.5.'de göröldüğü gibi alt iki delik sabit mesnet olarak işaretlenmiştir. Üst delikten yukarı yönde 2000 N(Newton)'luk bir kuvvet (yukarı sarı ok ile gösterilen) uygulanmaktadır, ayrıca yerçekimi kuvveti düşünölmerek aşağı yönde 9810.000 mm/s² kuvvet (aşağı sarı ok ile gösterilen) uygulanarak optimizasyon basamakları gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.5. Program ara yüzünden seçilen mesnet ve kuvvetlerin gösterimi

Statik analiz ve optimizasyon yaparken program oluşturulan katı modeli en küçük yapı taşları olan ağ örgölere (mesh) ayırarak yapmaktadır. Ağ örgü eleman

boyut ve ayarları Şekil.4.6.'da verilmiştir. Statik analiz ve optimizasyon yapılırken minimum eleman boyutu 0,2 mm, ağ örgü arası açı 30° olarak seçilmiştir.



Şekil 4.6. Program ara yüzünden seçilen ağ örgü(mesh) boyutları
a) Statik analiz b) Optimizasyon

Program tarafından gerçekleşen sonlu elemanlar analizi yönteminde model küçük ağ örgüler şekline dönüşmektedir. Bu küçük elemanlar “nod” adı verilen köşe noktalarında birbirine değmektedir. Ayrıca bu köşe noktalarına düğüm noktası denmektedir. Bu özellikler Tablo 4.5.'de gösterilmektedir. Mühendislik hesaplamalarında bu yöntem ile model en küçük yapıtaşı olan yüzeylere ayrılmaktadır. Bu yüzey değerleri ne kadar küçük seçilirse gerçek hayatta o kadar çözüme yakın sonuçlar elde edilmektedir.

Tablo 4.5. Seçilen ayarlar sonrasında ağ örgü özellikleri

	DÜĞÜM SAYISI (NODES)	ELEMAN SAYISI (ELEMENTS)
Optimizasyon Öncesi	5353	3058
İlk Optimizasyon	5381	3079
İlk Analiz Öncesi	5679	3190
İkinci Optimizasyon	5773	3255
İkinci Analiz Öncesi	8747	5030

İlk olarak kavramsal model programının “Stress Analysis (Stres Analizi)” modülü kullanılarak statik yüklere maruz bırakılmıştır. Program, kavramsal model üzerinde gerçekleştirilen statik analiz sonucunda imalata uygun parça elde

edilememiştir. Farklı birkaç deneme yapılarak optimizasyona uğrıtılacak parça elde edilmiştir. Bu işlem tekrarlı bir şekilde yapılarak, kavramsal model üzerinden ilk optimizasyon ve ikinci optimizasyon sonuçlarında birer tasarım elde edilmiştir. Statik analiz esnasında kavramsal modelin verilen yükleri taşıyıp taşıyamayacağı tasarım programından belirlenebilmektedir. Optimizasyon farklı iterasyonlar sonucunda elde edilmektedir. Kavramsal model üzerinden gerçekleştirilen işlem basamakları;

- optimizasyon öncesi sonlu elemanlar analizi,
- ilk optimizasyon adımı,
- ilk optimizasyon sonrası sonlu elemanlar analizi,
- ikinci optimizasyon adımı,
- ikinci optimizasyon sonrası sonlu elemanlar analizi şeklinde devam etmektedir.

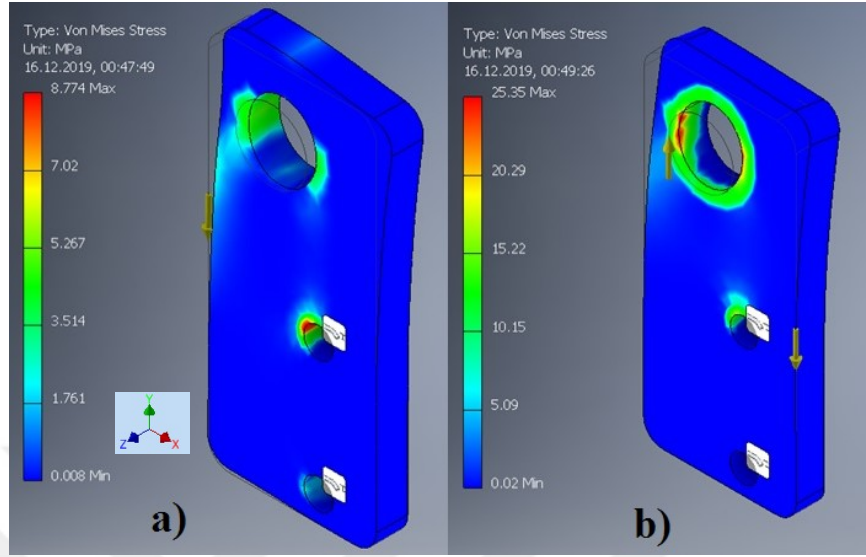
4.4.1. Optimizasyon Öncesi Sonlu Elemanlar Analizi

Tasarım programında, kavramsal model için kullanılacak levha ve filament özellikleri girilmesi ile analiz yapılmaya başlanmıştır. Talaşlı imalat için firmadan alınan malzeme teknik özelliklerin bulunduğu, Tablo 4.2.'den akma dayanım değeri 52 Mpa olarak programa girilmiştir. Katmanlı imalat için ise hazırlanan deney setinden tip1 çekme deneyinden elde edilen sonuçlar 26 -32 Mpa arasında kalmıştır. Katmanlı imalat içinde bu iki değer aritmetik ortalaması olan 29 Mpa değeri seçilmiştir.

Von Mises hipotezi, sünek malzemeler için en iyi sonuç veren ve en yaygın olarak kullanılan hesaplama yöntemidir. Çok eksenli bir gerilme durumunda bunları temsil eden tek bir değer kullanmakta ve bu gerilmeye Von Mises gerilmesi denmektedir. Bu gerilme malzemenin çekme testindeki tek eksenli akma dayanımını aşarsa hasar oluşmaktadır [54]. Şekil 4.7.'de kavramsal model üzerindeki Von Mises gerilimleri görülmektedir.

Kavramsal model (optimizasyon öncesi) üzerinde, program ile yapılan ilk statik analiz sonrasında talaşlı imalat ile üretilecek malzeme üzerinde noktasal olarak en çok 8,77 Mpa, katmanlı imalat ile üretilecek malzeme üzerinde noktasal olarak en

çok 25,35 Mpa gerilime maruz kalan bölgeler olduğu görülmüştür. Bu değerlere Tablo 4.6.'daki Von Mises Gerilmesi satırından minimum ve maksimum olarak ulaşılabilmektedir.



Şekil 4.7. Optimizasyon öncesi sonlu elemanlar analizinde Von Mises gerilmeleri
a) talaşlı imalat b) katmanlı imalat

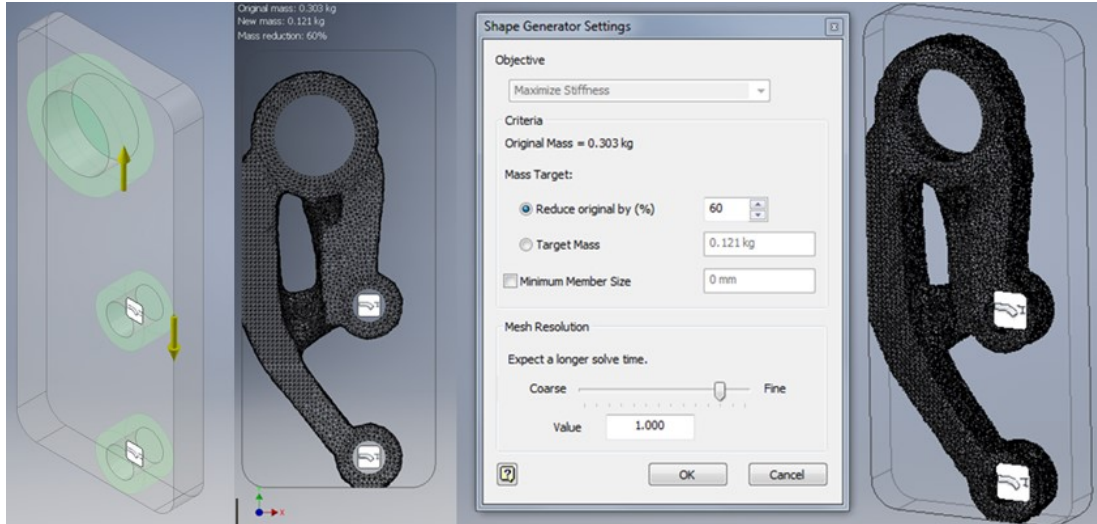
Tablo 4.6. Optimizasyon öncesi yapılan analiz sonuçları

TALAŞLI İMALAT ANALİZ SONUÇLARI			KATMANLI İMALAT ANALİZ SONUÇLARI		
Ad	Minimum	Maximum	Ad	Minimum	Maximum
Hacim	196409 mm ³		Hacim	196409 mm ³	
Kütle	0,303 kg		Kütle	0,303 kg	
Von Mises Gerilmesi	0,008 MPa	8,774 MPa	Von Mises Gerilmesi	0,024 MPa	25,351 MPa
1. Asal Gerilme	-1,217 MPa	9,404 MPa	1. Asal Gerilme	-6,588 MPa	36,626 MPa
3. Asal Gerilme	-5,992 MPa	1,719 MPa	3. Asal Gerilme	-19,148 MPa	12,725 MPa
Sehim/Şekil Değişimi	0,000 mm	0,327 mm	Sehim/Şekil Değişimi	0,000 mm	2,049 mm
Emniyet Katsayısı	5,927 ul	15,000 ul	Emniyet Katsayısı	1,144 ul	15,000 ul
Gerilme XX	-3,491 MPa	3,789 MPa	Gerilme XX	-10,719 MPa	16,798 MPa
Gerilme XY	-4,254 MPa	2,415 MPa	Gerilme XY	-9,846 MPa	10,065 MPa
Gerilme XZ	-0,960 MPa	1,135 MPa	Gerilme XZ	-3,146 MPa	4,461 MPa
Gerilme YY	-5,105 MPa	8,562 MPa	Gerilme YY	-18,817 MPa	32,5529 MPa
Gerilme YZ	-1,725 MPa	1,716 MPa	Gerilme YZ	-8,00235 MPa	8,080 MPa
Gerilme ZZ	-2,667 MPa	4,180 MPa	Gerilme ZZ	-8,659 MPa	20,727 MPa
X Şekil Değişimi	-0,019 mm	0,288 mm	X Şekil Değişimi	-0,031 mm	0,327 mm
Y Şekil Değişimi	-0,033 mm	0,214 mm	Y Şekil Değişimi	-0,227 mm	0,486 mm
Z Şekil Değişimi	-0,009 mm	0,009 mm	Z Şekil Değişimi	-1,986 mm	0,098 mm
Eşdeğer Gerinim	0,000 ul	0,004 ul	Eşdeğer Gerinim	0,000 ul	0,013 ul
1.Asal Gerinim	0,000 ul	0,004 ul	1.Asal Gerinim	0,000 ul	0,013 ul
3.Asal Gerinim	-0,004 ul	-0,000 ul	3.Asal Gerinim	-0,009 ul	-0,000 ul
Gerinim XX	-0,003 ul	0,002 ul	Gerinim XX	-0,005 ul	0,003 ul
Gerinim XY	-0,003 ul	0,002 ul	Gerinim XY	-0,007 ul	0,008 ul
Gerinim XZ	-0,000 ul	0,000 ul	Gerinim XZ	-0,002 ul	0,003 ul
Gerinim YY	-0,002 ul	0,004 ul	Gerinim YY	-0,008 ul	0,011 ul
Gerinim YZ	-0,001 ul	0,001 ul	Gerinim YZ	-0,006 ul	0,006 ul
Gerinim ZZ	-0,001 ul	0,000 ul	Gerinim ZZ	-0,005 ul	0,006 ul

Tablo 4.6.'da sol taraf talaşlı imalat için statik analiz sonuçlarını, sağ taraf ise katmanlı imalat için statik analiz sonuçlarını içermektedir. Asal gerilmeler üç ekseninde gerçekleşmektedir. 1.Asal gerilme en büyük gerilmeyi, 3.Asal gerilme ise en küçük gerilmeyi vermektedir. Bu değerler Tablo 4.6.'da görülmektedir. Programın verdiği analiz sonuçlarına göre talaşlı imalat ile üretilecek parçanın, daha ilk analiz aşamasında katmanlı imalat ile üretilecek parçadan daha dayanıklı ve daha fazla yük taşıyacağı görülmüştür.

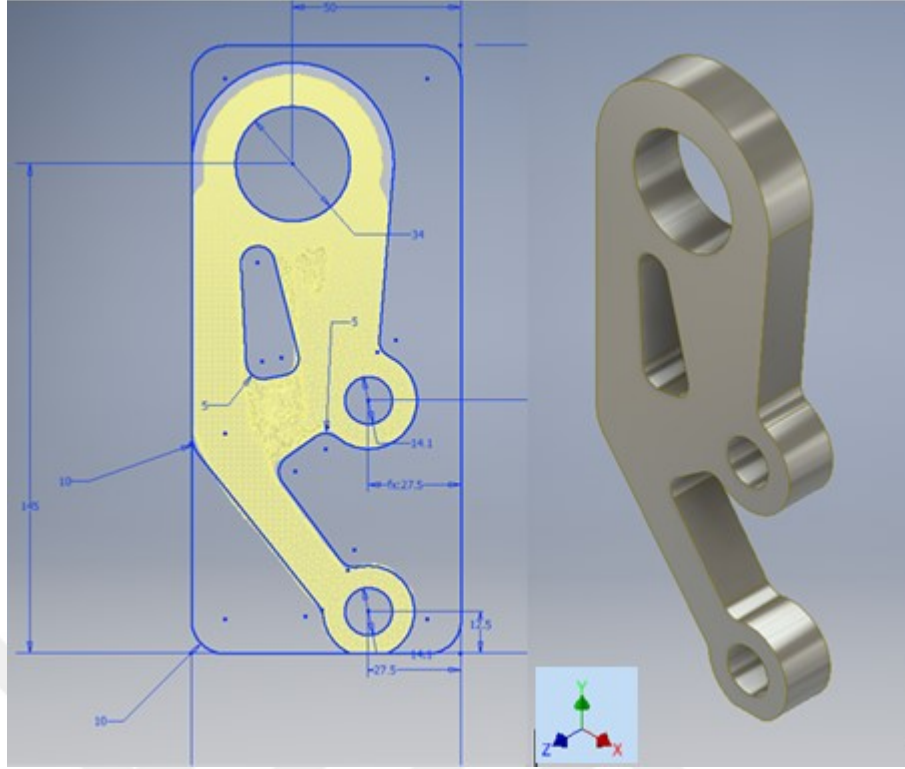
4.4.2. İlk Optimizasyon Adımı

Optimizasyon adımları programın “Shape Generator (Şekil Düzenleme Sihirbazı)” modülü altından yapılmaktadır. Optimizasyonda ilk olarak malzeme tanımlanmakta ve ardından kısıtlar girilmektedir. Program ara yüzünden girilen kısıtlar “alttaki iki deliğe 12,5mm çapından, üstteki deliğe ise 25mm çapından daha fazla yaklaşma” şeklinde belirlenmiştir. Ayrıca programdan parçanın kavramsal tasarım kütlelerinden % 60 daha hafif bir optimizasyon yapması istenmiştir. Bu girilen kısıtlar Şekil 4.8.'de görülmektedir. Programa girilen bu kısıtlardan sonra parça, statik analiz yapılırken kabul edilen mesh boyutlarına göre tekrar mesh atılıp analiz edilmiştir.



Şekil 4.8. Program ara yüzünden ilk optimizasyon için kısıtların girilmesi

Programın vermiş olduğu optimizasyon sonucu üzerinden, sonuç tekrar eskiz ortamına alınıp çizim yapılmıştır. Şekil 4.9.'da sarı renk ile görülen programın vermiş olduğu optimizasyon sonucu üzerinden çizim yapılarak ilk optimizasyon sonucu elde edilmiştir.



Şekil 4.9. İlk optimizasyon sonucu

4.4.3. İlk Optimizasyon Sonrası Sonlu Elemanlar Analizi

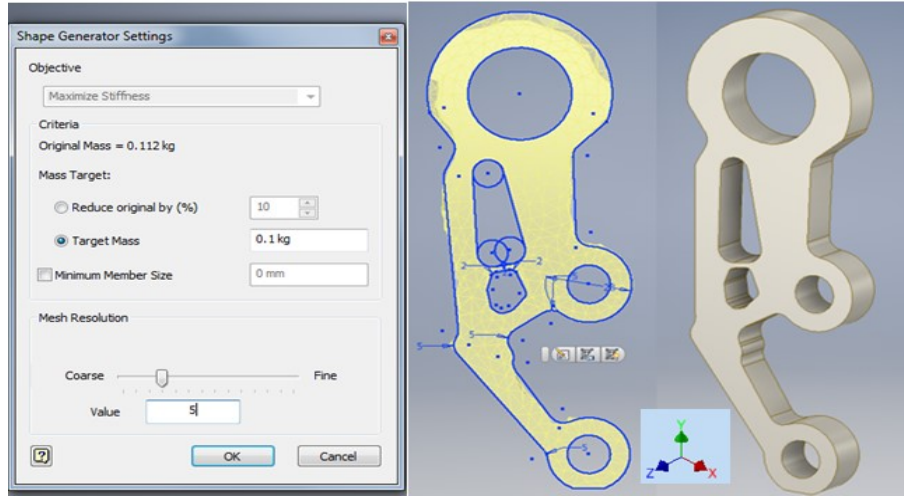
Elde edilen ilk optimizasyon sonucunda programa Tablo 4.2.'deki malzeme bilgileri girilmiştir. Yükler ve mesnetler aynı şekilde belirlendikten sonra programın statik analiz modülünden, numune tekrar bilgisayar ortamında analiz edilmiştir. Bu analiz sonucunda Tablo 4.7.'de görülen sonuçlar elde edilmiştir.

Tablo 4.7. İlk optimizasyon sonrası analiz sonuçları

TALAŞLI İMALAT ANALİZ SONUÇLARI			KATMANLI İMALAT ANALİZ SONUÇLARI		
Ad	Minimum	Maximum	Ad	Minimum	Maximum
Hacim	90612 mm ³		Hacim	90612 mm ³	
Kütle	0,140 kg		Kütle	0,140 kg	
Von Mises Gerilmesi	0,008 MPa	14,120 MPa	Von Mises Gerilmesi	0,011 MPa	14,013 MPa
1. Asal Gerilme	-0,921 MPa	12,916 MPa	1. Asal Gerilme	-1,135 MPa	11,166 MPa
3. Asal Gerilme	-8,246 MPa	3,655 MPa	3. Asal Gerilme	-8,318 MPa	2,333 MPa
Sehim/Şekil Değişimi	0,000 mm	0,446 mm	Sehim/Şekil Değişimi	0,000 mm	0,447 mm
Emniyet Katsayısı	3,683 ul	15,000 ul	Emniyet Katsayısı	3,710 ul	15,000 ul
Gerilme XX	-5,520 MPa	5,702 MPa	Gerilme XX	-5,880 MPa	4,418 MPa
Gerilme XY	-6,322 MPa	3,521 MPa	Gerilme XY	-6,473 MPa	3,454 MPa
Gerilme XZ	-2,240 MPa	1,926 MPa	Gerilme XZ	-1,587 MPa	1,585 MPa
Gerilme YY	-5,166 MPa	12,061 MPa	Gerilme YY	-4,758 MPa	10,867 MPa
Gerilme YZ	-2,339 MPa	2,176 MPa	Gerilme YZ	-1,919 MPa	1,928 MPa
Gerilme ZZ	-2,579 MPa	5,720 MPa	Gerilme ZZ	-2,299 MPa	3,136 MPa
X Şekil Değişimi	-0,019 mm	0,352 mm	X Şekil Değişimi	-0,019 mm	0,352 mm
Y Şekil Değişimi	-0,008 mm	0,307 mm	Y Şekil Değişimi	-0,008 mm	0,308 mm
Z Şekil Değişimi	-0,011 mm	0,011 mm	Z Şekil Değişimi	-0,012 mm	0,012 mm
Eşdeğer Gerinim	0,000 ul	0,007 ul	Eşdeğer Gerinim	0,000 ul	0,007 ul
1. Asal Gerinim	0,000 ul	0,007 ul	1. Asal Gerinim	0,000 ul	0,006 ul
3. Asal Gerinim	-0,006 ul	-0,000 ul	3. Asal Gerinim	-0,006 ul	-0,000 ul
Gerinim XX	-0,005 ul	0,002 ul	Gerinim XX	-0,005 ul	0,002 ul
Gerinim XY	-0,005 ul	0,003 ul	Gerinim XY	-0,005 ul	0,003 ul
Gerinim XZ	-0,002 ul	0,001 ul	Gerinim XZ	-0,001 ul	0,001 ul
Gerinim YY	-0,002 ul	0,006 ul	Gerinim YY	-0,002 ul	0,006 ul
Gerinim YZ	-0,002 ul	0,002 ul	Gerinim YZ	-0,001 ul	0,001 ul
Gerinim ZZ	-0,002 ul	0,001 ul	Gerinim ZZ	-0,002 ul	0,001 ul

4.4.4. İkinci Optimizasyon Adımı

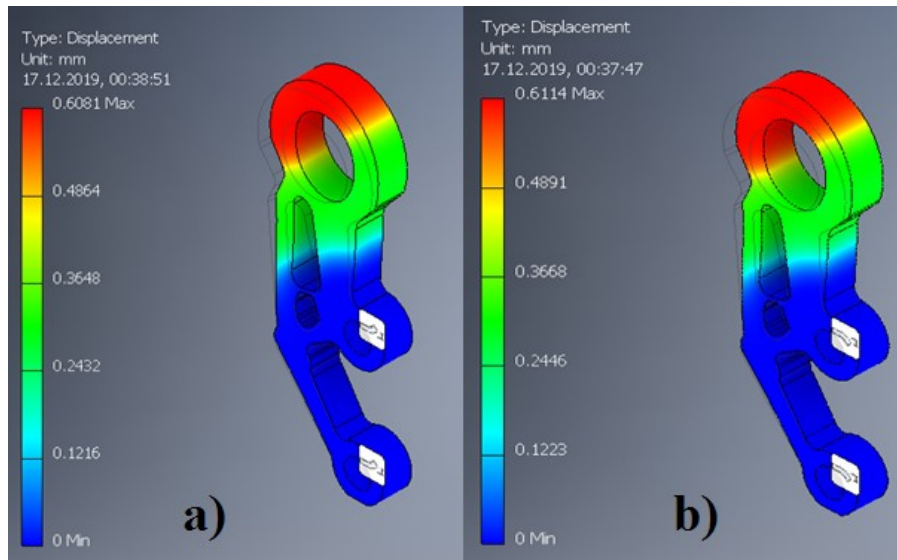
Bu aşamada programa Pet-G malzeme, akma dayanım değeri (52 Mpa) ve kısıtlar girilmiştir. Buradaki en büyük kısıtımız parça malzeme gramını düşürmektir. Bunun için Şekil 4.10.'da görüldüğü gibi, program ara yüzünden “target mass (hedef kütle)” seçeneği üzerinden malzeme kısıtı 0,1kg (100 gram) olarak girilmiştir. Parça istenilen son haline getirilene kadar burada verilmeyen ya da istenilmeyen sonuçlar olmuştur. Dijital ortamda iterasyonlar sonucunda parçanın son haline ulaşılmıştır. Parçanın iterasyonlar sonucunda elde edilen görüntüsü aşağıdaki fotoğrafta sarı renkle gösterilmiştir. Sarı renkli optimizasyon sonucu üzerinden programda çizimler yapılarak, tasarım son halini almıştır.



Şekil 4.10. Optimizasyon sonrası parçanın son hali

4.4.5. İkinci Optimizasyon Sonrası Sonlu Elemanlar Analizi

Kavramsal tasarım üzerinden yapılan iterasyonlar sonucu Şekil 4.11.'de görülen numune şekli elde edilmiştir. Optimizasyonların tekrarları sonucunda elde edilen parçanın son haline ilişkin, bölgesel olarak maksimum ve minimum yer değiştirme miktarları bu şekilde verilmiştir. Milimetre cinsinden verilen bu şekilden de anlaşılacağı gibi en çok yer değiştirme, kuvvetin uygulandığı üst çap etrafında gerçekleşmektedir. Programda yapılan analizler sonucunda, numunelerin de kırıldığı yerlerin bu bölgelerde olacağı öngörülmektedir.



Şekil 4.11. İkinci optimizasyon sonrası sonlu elemanlar analizi ile parça üzerindeki yer değiştirme

a) talaşlı imalat b) katmanlı imalat

Oluşturulan tasarıma ait parça optimizasyonu sonunda elde edilen analiz sonuçları Tablo 4.8.'de görülmektedir. Tablodan da anlaşılacağı üzere optimizasyon sonrasında parça üzerinde maksimum olan gerilme bölgeleri, yapılan optimizasyonlar ile noktasal olmaktan çıkmıştır. Programa göre ilk optimizasyon öncesi sadece birkaç yerde maksimum gerilme değerleri görülmekte iken, optimizasyon sonrasında gerilmeler kuvvet uygulandığı bölgede homojen bir dağılım göstermektedir.

Tablo 4.8. İkinci optimizasyon sonrası analiz sonuçları

TALAŞLI İMALAT ANALİZ SONUÇLARI			KATMANLI İMALAT ANALİZ SONUÇLARI		
Ad	Minimum	Maximum	Ad	Minimum	Maximum
Hacim	72476 mm ³		Hacim	72476 mm ³	
Kütle	0,112 kg		Kütle	0,112 kg	
Von Mises Gerilmesi	0,012 MPa	20,612 MPa	Von Mises Gerilmesi	0,010 MPa	21,297 MPa
1. Asal Gerilme	-2,812 MPa	23,573 MPa	1. Asal Gerilme	-2,457 MPa	23,727 MPa
3. Asal Gerilme	-10,966 MPa	2,782 MPa	3. Asal Gerilme	-10,575 MPa	3,409 MPa
Sehim/Şekil Değişimi	0,000 mm	0,608 mm	Sehim/Şekil Değişimi	0,000 mm	0,608 mm
Emniyet Katsayısı	2,523 ul	15,000 ul	Emniyet Katsayısı	1,361 ul	15,000 ul
Gerilme XX	-10,024 MPa	7,410 MPa	Gerilme XX	-9,973 MPa	7,777 MPa
Gerilme XY	-8,971 MPa	8,118 MPa	Gerilme XY	-8,881 MPa	7,681 MPa
Gerilme XZ	-1,879 MPa	1,419 MPa	Gerilme XZ	-1,546 MPa	1,352 MPa
Gerilme YY	-6,913 MPa	22,394 MPa	Gerilme YY	-6,689 MPa	22,638 MPa
Gerilme YZ	-1,433 MPa	1,380 MPa	Gerilme YZ	-1,481 MPa	1,429 MPa
Gerilme ZZ	-3,986 MPa	5,259 MPa	Gerilme ZZ	-3,650 MPa	5,752 MPa
X Şekil Değişimi	-0,025 mm	0,427 mm	X Şekil Değişimi	-0,026 mm	0,427 mm
Y Şekil Değişimi	-0,010 mm	0,470 mm	Y Şekil Değişimi	-0,010 mm	0,470 mm
Z Şekil Değişimi	-0,023 mm	0,024 mm	Z Şekil Değişimi	-0,023 mm	0,023 mm
Eşdeğer Gerinim	0,000 ul	0,010 ul	Eşdeğer Gerinim	0,000 ul	0,010 ul
1.Asal Gerinim	0,000 ul	0,011 ul	1.Asal Gerinim	0,000 ul	0,011 ul
3.Asal Gerinim	-0,007 ul	-0,000 ul	3.Asal Gerinim	-0,007 ul	-0,000 ul
Gerinim XX	-0,006 ul	0,003 ul	Gerinim XX	-0,006 ul	0,003 ul
Gerinim XY	-0,007 ul	0,006 ul	Gerinim XY	-0,007 ul	0,006 ul
Gerinim XZ	-0,001 ul	0,001 ul	Gerinim XZ	-0,001 ul	0,001 ul
Gerinim YY	-0,004 ul	0,010 ul	Gerinim YY	-0,004 ul	0,010 ul
Gerinim YZ	-0,001 ul	0,001 ul	Gerinim YZ	-0,001 ul	0,001 ul
Gerinim ZZ	-0,004 ul	0,002 ul	Gerinim ZZ	-0,004 ul	0,001 ul

4.5. Kullanılan Cihazlar

4.5.1. 3 Boyutlu Yazıcı




Bu çalışmada Leapfrog marka Creatr Hs model FDM (Fused Deposition Modeling-Ergiterek Biriktirme Yoluyla Modelleme) metodolojisini kullanan 3B yazıcı kullanılmıştır. Genellikle mühendislik çalışmalarında prototip üretmek amacıyla kullanılan bu yazıcının, çift ekstrüderi ve ısıtmalı tablası olup PLA, ABS,

Pet-G, Nylon ve PVA filament ile numune üretilebilmektedir. Şekil 4.12.'de yazıcının görüntüsü ve ayrıca Tablo 4.9.'da yazıcının özellikleri verilmektedir.



Şekil 4.12. Leapfrog marka yazıcının görüntüleri

Tablo 4.9. Leapfrog Creatr HS 3B yazıcının özellikleri [55].

 Leapfrog 3D Printers	 Creatr single / dual	 Creatr HS
Ekstrüder Adedi	Tek / Çift	Çift
Tabla / Ortam tipi	Cam (ısıtmalı)	Cam (ısıtmalı)
Azami Yazdırma Ölçüleri (XYZ)	27 x 23 x 20 cm	29 x 27 x 18 cm
Hız	10 – 60 mm/s	30-300 mm/s
Katman kalınlığı	50 – 350 mikron	20 – 350 mikron
Hassasiyet	XY:16.9 ; Z: 20 mikron	XY:16.9 ; Z: 20 mikron
Yazılım	Repetier (dahil)	Simplify 3D (dahil)
Bağlantı	Seri	Seri, Stand-alone
Gövde	Alüminyum profil/ Sac	Alüminyum profil/ Sac
Ağırlık	32 kg	40 kg
Gövde Ölçüleri	60 x 50 x 50 cm	60 x 50 x 50 cm
Filament Tipi	ABS,PLA, PVA, HIPS, Nylon, Hybrid	ABS,PLA, PVA, HIPS, Nylon, Hybrid

4.5.2. CNC Router

Talaşlı imalat için yapılan piyasa araştırması sonucunda Pet-G malzeme işlenmesi için en uygun tezgâhın CNC Router olduğu belirlenmiştir. CNC dik işlem

tezgâhları daha düşük devir hızlarına sahiptir. Bu tezgâhta talaş takıma yapışarak takımı belli bir zaman sonra kıldığı gözlemlenmiştir. Görüşülen firmalar, talaşlı imalat üretimi için en uygun metot olarak ya su jeti ya da CNC Router ile işlenmesi hakkında görüş bildirmişlerdir. Talaşlı imalat için aşağıdaki Şekil 4.13.'de görülen CNC Router kullanılmıştır.



Şekil 4.13. Eurocnc marka CNC Router

CNC Router tezgâhları x,y,z eksenlerinde hareket edebilen, genelde ahşap, pleksiglass ve alüminyum işleyebilen tezgâhlardır. Kullanılan tezgâhın motorları servo motor olup tezgâh ve talaşlı imalat hakkında detaylı bilgiler Tablo 4.10.'da verilmektedir.

Tablo 4.10. CNC Router teknik özellikleri

CNC Router Teknik Özellikleri	
Net Kesim Alanı	1000x2000 mm
Z Eksen Yüksekliği	250 mm
Kesici Takım Motor Hızı	18000 dev/dak
Kesici Takım Motor Gücü	4 kW HERTZ
Hassaiyet	0.01 mm
Hareket Sistemi	Vidalı Mil
Kesici Takım	ER25
Arayüz	Mach3

CNC Router’da işleme sırasında tezgâh ilerleme hızı 1500 mm/min, kesici takım motoru hızı 10000 dev/dak, Ø3 mm aşağı bastıran (press down) ve düz (flat) çakı kullanılmıştır.

4.5.3. Hassas Terazî

Tüm kütle ölçüm işlemleri ESHOT Genel Müdürlüğü bünyesinde bulunan Şekil 4.14.’de görülen Radwag marka, PS 6000/C/2 model olan aşağıda görülen tartı kullanılmıştır.



Şekil 4.14. Radwag PS 6000/C/2 marka model tartı

4.5.4. Dijital Mikroskop

Talaşlı imalat ile üretilen, 3B yazıcı ile yazdırılan örneklerin mikro yapı inceleme işlemleri dijital mikroskop ile yapılmıştır. İncelemeler yapılırken, Şekil 4.15.’te görülen Dino-Lite dijital mikroskop kullanılmıştır. Görüntülerin daha net ve anlaşılabilir olması için farklı oranlarda büyütme yapılmıştır.



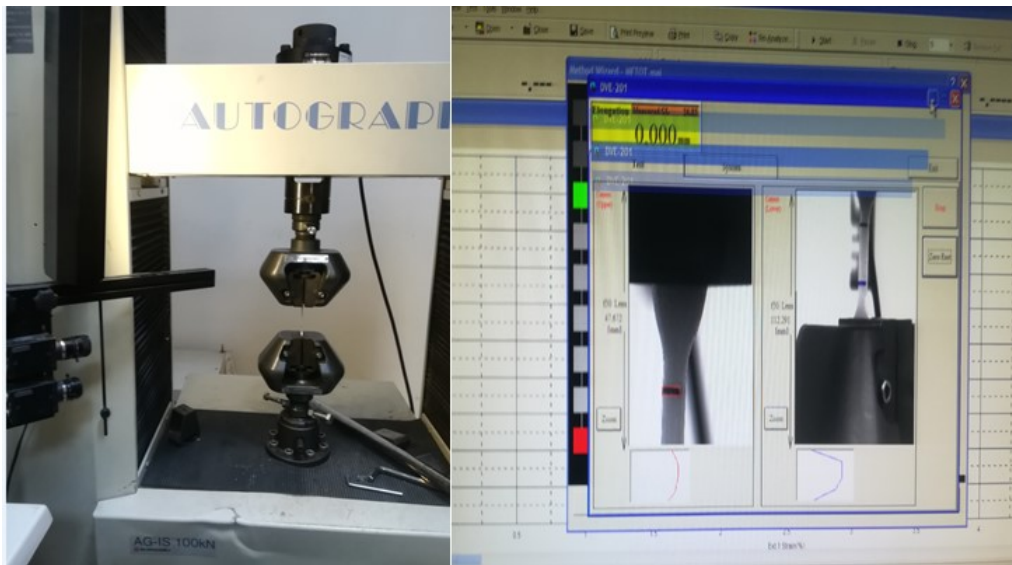
Şekil 4.15. Dijital mikroskop

4.5.5. Çekme Cihazı

Polimer malzemelerin kırılma dayanımı metal ve seramiklere göre oldukça düşüktür. Polimerlerin mekanik özellikleri, metaller için de kullanılan, elastiklik modülü, akma ve çekme dayanımı gibi bazı parametrelerle belirlenmektedir. Polimerlerde gevrek ve sünek kırılmanın ikisi de görülmektedir. Gerilme altındaki bir malzeme ilk olarak kalıcı olmayan(elastik) şekil değişimi gösterir. Akma olayı kalıcı deformasyonun başlamasıyla oluşur. Akma dayanımı plastik deformasyonun başladığı yerde gerçekleşir. Polimerlerde mekanik özellikler deformasyon hızına (birim şekil değişim hızı), sıcaklık ve ortamda organik çözücü(su, oksijen vb.) bulunmasına karşı aşırı hassasiyet göstermektedir. Polimerler için akma noktası olarak, elastik şekil değişiminin sona erdiği en yüksek nokta alınmaktadır. Çekme dayanımı da hasarın meydana geldiği gerilmeye karşılık gelmektedir. Polimerlerde bazı durumda çekme dayanımı, akma dayanımından daha yüksek ve düşük olabilmektedir [56].

Çekme işlemi Manisa Celal Bayar Üniversitesi Mühendislik Fakültesi laboratuvarında bulunan Şekil 4.16.'da görülen AUTOGRAPH marka AG-IS 100KN model çekme cihazında gerçekleştirilmiştir.

Katmanlı imalat ve talaşlı imalat ile üretilen numuneler 5 mm/dk hızla çekme işlemi gerçekleştirilmiştir. Test sonuçlarında maksimum kuvvet cihaz kullanıcı arayüzünden alınmıştır.



Şekil 4.16. Çekme cihazı ve kullanıcı ara yüzü

4.5.6. Sertlik Cihazı

Sertlik, metal malzemelerde olduğu gibi, polimer malzemelerinde mekanik özelliklerinden biridir. Sertlik, malzemenin bölgesel olarak plastik deformasyona karşı gösterdiği bir direncin ölçüsüdür [56]. Bu uygulama için Şekil 4.17.'de görülen DHT-100 marka portatif sertlik ölçüm cihazı kullanılmıştır. İçerisinde tungsten karbür bir bilye olan bu cihazda ölçüm esnasında; bilye örnek yüzeye çarptırılarak geri tepir. Numune yüzeyinden 1mm'lik mesafede örnek yüzeye gelen darbe gövdesinin darbe ve geri tepme hızı ölçülür. Gövdeye yerleştirilmiş bir mıknatıs, bobin tutucusundaki bobinden geçerken bobinde mıknatısın hızlarıyla orantılı bir şekilde bobini tetikleme yöntemi ile ölçüm yapılmakta ve bu ölçüm sonucunda elde edilen sertlik ölçüm birimine de "leeb" denmektedir. Leeb sertlik birimi "HL" ile gösterilmekte ve aşağıdaki formül ile formüle edilmektedir [57].

$$HL = 1000 \times (V_B / V_A)$$

Burada; V_B : Darbe gövdesinin geri tepme hızı

V_A : Darbe gövdesinin darbe hızı



Şekil 4.17. Portatif sertlik ölçüm cihazı

4.5.7. Yüzey Pürüzlülük Cihazı

İmalatı yapılan parçaların kullanılacağı yere göre teknik resimleri oluşturulurken yüzey pürüzlülük değeri önem arz etmektedir. İmalatı yapılan parçanın hiçbir zaman yüzey profili düzgün değildir. Yüzeyde yeryüzü coğrafyasına benzer girinti ve çıkıntılar mevcuttur. Bu girinti ve çıkıntıların çeşitli yöntemlerle ölçüm şekilleri ve hesaplama yöntemleri vardır. Gözle görülmeyen bu küçük girinti

ve çıkıntılar da parça montajları esnasında önem arz etmektedir. Bazen bir rulman yatağında yüzey kalitesinin iyi olması beklenirken, bazen de balata karşı yüzeyinin yüzey kalitesinin iyi olmaması istenebilmektedir.

Yüzey pürüzlülük ölçümleri yapılırken 5 µm uç radyusu olan, 90° uç açısında elmas uca sahip Şekil 4.18.'de görülen Yamer marka PST-200 model yüzey pürüzlülük cihazı kullanılmıştır. Cihazın teknik özellikleri Tablo 4.11.'de görülmektedir [58].



Şekil 4.18. PST-200 yüzey pürüzlülük cihazı

Tablo 4.11. Pürüzlülük cihazı genel özellikleri [58].

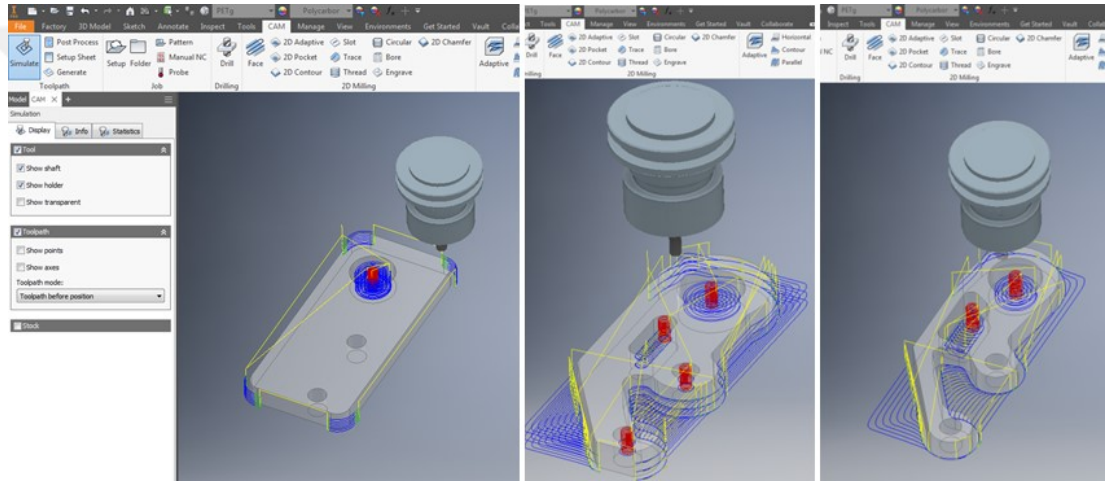
Model	PST-200
Kod No.	1410 200
Maksimum Kumanda Tarama Uzunluğu	17.5 mm/ 0.7 inç
Hata Sınırı	< ± 10 %
Sonuç Değişimi	< 6 %
Ölçüm Profili	Pürüzlülük
Parametreler	Ra (0,005 µm-16 µm) Rz, Rq, R, Rp, Rv, R3z, R3y, Rz, JIS, Rsk, Rku, Rsm, Rmr,
Filtre	RC, PCRC, Gauss, D-T13565
Numune Alma Uzunluğu	0.25 mm, 0.8 mm, 2.5 mm
Değerlendirme Uzunluğu	1-5
Veri Saklama Kapasitesi	2M-2G Byte
İletişim Arayüzü	USB 2.0
Güç	İçinde Lityum İyon batarya,USB şarj
Boyutlar	140x55x47 mm
Ağırlık	400 gram

4.5.8. Kullanılan Diğer Yazılımlar

Geometrik elemanlar üzerinden modelleme yapma amacıyla Autodesk Inventor Professional 2019 programı kullanılmıştır. Kavramsal tasarımın

oluşturulması ve teknik resimlerin çizimleri bu program sayesinde yapılmıştır. Ayrıca optimizasyon “Shape Generator” modülü altından, talaşlı imalat takım yolları “CAM” modülü altından, analizler ise aynı programın “Stress Analysis” modülü içerisindeki komutlar aracılığı ile yapılmıştır.

Autodesk Inventor ile oluşturulan optimizasyon öncesi ve sonrası katı modeller “.stl ” (standart üçgen dili) formatına dönüştürülmüştür. Bu dosyaların CNC tezgâhlarına gönderilmesi için “G” kodlarına dönüştürülmesi gerekmektedir. Inventor programının “CAM” modülünden oluşturulan takım yolları Şekil 4.19.’da görülmektedir.

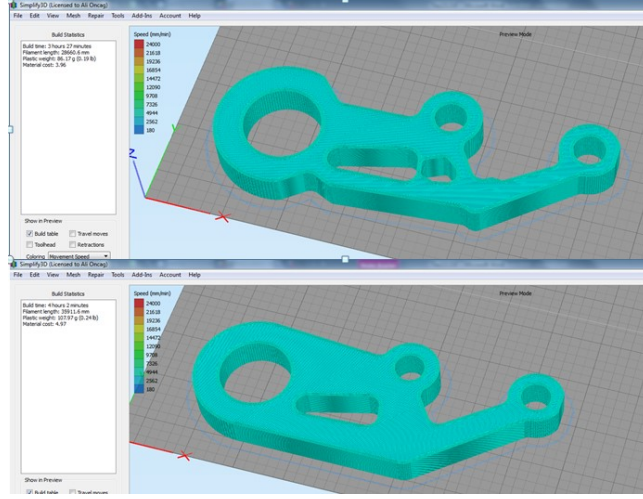


Şekil 4.19. Inventor programı ve oluşturulan takım yolları

Katmanlı imalat ile 3B yazıcıya programdan alınan katı modellerin optimizasyon öncesi ve sonrası hallerinin yazdırılması için takım yolları çıkarılması gerekmektedir. Program tarafından oluşturulan katı model .stl uzantı olarak kaydedilmektedir. Stl uzantılı dosya Simplfy 3D yazılımına çağrılmaktadır. Stl dosyasındaki hataların düzeltilmesi ve yumuşatma gibi işlemlerin yapılması için aşağıdaki programlar kullanılmaktadır;

- Magics,
- Netfabb Studio,
- Marcam Autofab.

3B yazıcı için takım yolunu çıkarmada Simplfy3D yazılımı kullanılmıştır. Şekil 4.20.’de Simplfy programının kullanıcı ara yüzü görülmektedir.

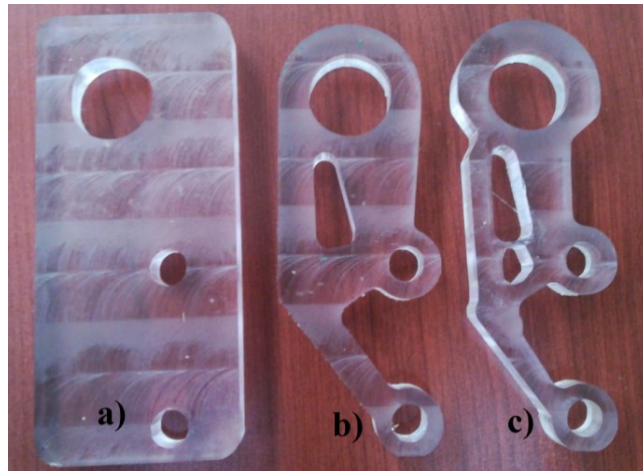


Şekil 4.20. Simplify3d programından bir görünüm

Talaşlı imalatın yapılabilmesi için programdan alınan takım yollarının CNC Router tezgâhında görülebilmesi ve gerekli takım yollarına müdahale için kullanılan program ise Mach3 programıdır. Bu program sayesinde katı modelin tezgâh üzerinde yerleşimi ve gerekli takım ve kesici takım motoru (spindle) hızlarına müdahale için kullanılmıştır. Pet-G malzeme kesim esnasında takıma çok yapışmaktadır. Mach3 arayüzünden kesici takım motoru ve ilerleme hızları ile oynanıp ideal kesme ve ilerleme hızlarına ulaşılmaya çalışılmıştır.

4.6. Numunelerin Hazırlanması

Programda yapılan analiz ve optimizasyonlar sonucunda parçaların imalat aşamasına geçilmiştir. Talaşlı imalat için CNC Router ile üretimi gerçekleştirilen parçalar Şekil 4.21.'de görülmektedir.



Şekil 4.21. CNC Router ile üretilen parçalar
a) Kavramsal model, b) İlk optimizasyon, c) ikinci optimizasyon.

Katmanlı imalat ile üretilen numuneler, tabla 50 °C ısıtılarak, 150 mikron katman kalınlığı, %100 doluluk ve Pet-G filament kullanılarak yapılmıştır. Katmanlı imalat yöntemi ile üretimi gerçekleştirilen numuneler Şekil 4.22.'de görülmektedir.



Şekil 4.22. 3B yazıcı ile üretilen parçalar
a) Kavramsal model, b) İlk optimizasyon, c) ikinci optimizasyon.

4.7. Numunelere Yapılan Testler

4.7.1. Sertlik Testi

Sertlik, malzemenin mekanik özelliklerinden biridir. Sertlik ölçümleri için portatif sertlik ölçüm cihazı kullanılmıştır. Ölçüm sırasında numunenin sert bir zeminde konumlandırılmasına ve zemin ile numuneler arasında hava boşluğu kalmayacak şekilde sabitlenmesine dikkat edilmiştir. Talaşlı imalat için sertlik ölçümlerinde ölçümü yapılacak numuneler üst üste koyulup yapılmıştır. Böylelikle ölçülen parça kalınlığı yeterli hale getirilmiştir. Talaşlı imalat sonrasında elde edilen numunelerin sertlik ölçümleri Tablo 5.1.'de görülmektedir. Ölçümler Leeb skalası cinsinden verilmiştir [59, 60, 61].

Katmanlı imalat için 3 boyutlu yazıcıda basılan malzemelerin mekanik özelliklerinin sertlik değerleri ile bir ilişkisinin olup olmadığı konusunda fikir sahibi olmak için sertlik ölçümleri gerçekleştirilmiştir. 3 boyutlu yazıcı ile yazdırılan parçalarda çarpılmalar olmaktadır. Numunenin her bir yüzünden ölçüm işlemi tekrarlanmış ve her bir ölçüm seti içerisinde üç ölçüm gerçekleştirilerek, bunların ortalamaları alınmıştır. Ölçümler sonucu elde edilen değerler Tablo 5.1.'de gösterilmektedir. Ölçümler Leeb skalası cinsinden verilmiştir.

4.7.2. Kütle Ölçümü

Parçaların üretiminden sonra tahribatsız olan ölçümler yapılmıştır. Bunlardan kütle ölçümü, bir parçanın optimizasyon aşaması için yapılması gereken en önemli ölçümlerden biridir. Hatta üretilen döküm parçalarda kütle miktarı direkt hammadde tedarikini etkilediğinden oldukça önemlidir. Seri üretimde bazen kütle miktarında yapılan minimum bir iyileştirme, ekonomik yönden önemli ölçüde fayda sağlamaktadır. Kütle miktarı, ekonomik açıdan parça imalatını etkilemektedir. İşletme sahipleri bu tarz optimizasyonlarla parça kütlesi ve malzemeye fayda sağlayan tasarımcılar ile çalışmayı tercih etmektedir.

4.7.3. Yüzey Pürüzlülüğü

Yüzey pürüzlülüğü tahribatsız ölçüm yöntemleri arasına girmektedir. Yüzey pürüzlülüğü ölçümleri altı farklı noktadan alınarak yapılmıştır. Talaşlı imalatta, kesici kalem işleme yönüne dik olarak ölçümler yapılmış, katmanlı imalatta ise son katmandaki örüntüye dik olarak ölçüm gerçekleştirilmiştir. Ölçümler esnasında kullanılan ayarlar Tablo 4.12.'de verilmiştir [62].

Tablo 4.12. Pürüzlülük cihazı ara yüzü ayarları

Gösterim Formatı	Pürüzlülük numune uzunluğu (mm)	Pürüzlülük değerlendirme uzunluğu (mm)	Filtre	Standart	Birim
Ra	2,5	2,5x5	Gauss	ISO	Metrik

Kullanılan malzeme aynı olduğundan farklı optimizasyon basamakları için her bir numuneden iki farklı ölçüm yapılmıştır. Yamer marka yüzey pürüzlülük cihazı yapılan ölçüm sonuçları Tablo 5.3.'de verilmiştir. Tablonun son sütununda ise ölçülen bu altı değer aritmetik ortalaması verilmiştir.

4.7.4. Çekme Testi

Çekme testi tahribatlı bir test olduğu için kütle, sertlik ve pürüzlülük testlerinden sonra yapılmıştır. Çekme testi gerilme, kuvvet ve birim şekil değişimi verilerinin elde edilmesi için uygulanmaktadır. Ayrıca malzeme mekanik

özelliklerinin belirlenmesi için en sık başvurulan testlerden biridir [56]. Şekil 4.23.'de üretimi yapılan ve çekme testi uygulanan tüm numuneler görülmektedir.



Şekil 4.23. Çekme testi uygulanan tüm numuneler

Çekme deneyi öncesi farklı malzemelerden yapılan denemeler sonucunda Şekil 4.24.'de görülen çekme çenelerine tutturulabilen sfero dökümden yapılan alt çene ve üst çene aparatları hazırlanmıştır. Alt aparat sayesinde programdaki gibi sabit mesnet oluşturulmuştur. Ayrıca üst çene aparatı sayesinde ise yine programdakine benzer bir şekilde Ø34 mm olan üst delikten çekme kuvveti uygulanabilmiştir.



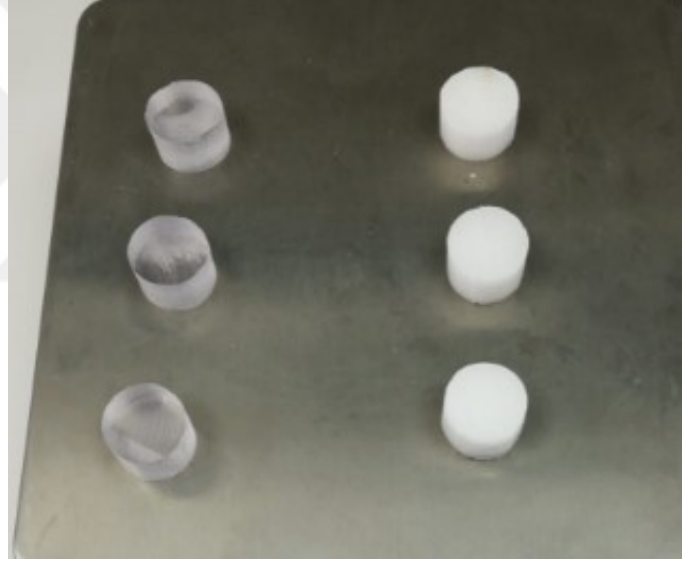
Şekil 4.24. Çekme esnasında kullanılan aparatlar

Çekme testinde katmanlı imalat yöntemi için 3B yazıcı ile yazdırılan numunelerin doluluk oranları önem arz etmektedir. Doluluk oranı arttıkça malzemenin taşıyacağı yük artmaktadır. Ayrıca kullanılan yazıcının kapalı sistem ve

açık sistem olması da numunelerin mekanik özelliklerini arttırmaktadır. Polimerler yapısından dolayı değişken mekanik uzama oranlarına sahiptir. Bir polimer malzemenin çekme testi esnasında eski olması, ortam depolama ve hava şartları gibi etmenlerden dolayı numunelerin mekanik özellikleri değişiklik gösterebilmektedir [63]. Bu çalışmada çekme numuneleri % 100 doluluk ile yazdırılmış ve açık sistem bir yazıcı kullanılmıştır.

4.7.5. Yoğunluk Ölçümü

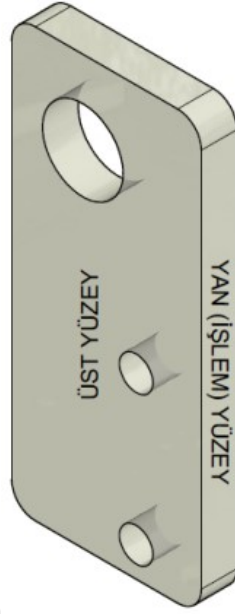
Yoğunluk ölçümleri, her imalat prosesi için CNC Router ile 22 mm çapında kesilen üçer adet numune üzerinde gerçekleştirilmiştir. Kesilen bu parçaların kütle ölçümleri hassas terazi ile yapılmıştır [64]. Kütle ölçümleri yapılan bu parçalar Şekil 4.25.'te görülmektedir.



Şekil 4.25. CNC Router ile elde edilen numuneler

4.7.6. Çekme Testi Sonrası Kırılma Yüzeyi ve Mikro İncelemeler

Çekme testi sonrasında numuneler kırılmaktadır. Çekme testi sonrası kırılan yüzeyler ve numuneler üzerindeki çeşitli yüzeylerden yapılan incelemeler Dino-Lite dijital mikroskop ile gerçekleştirilmiştir. İncelenen bu farklı yüzeylere ait tanımlamalar Şekil 4.26.'da verilmiştir.



Şekil 4.26. Kavramsal tasarım üzerinde yüzeylerin gösterimi

5. DENEYSEL SONUÇLAR

5.1. Sertlik Testi

Talaşlı imalat ve katmanlı imalat için elde edilen numunelerin ayrı ayrı sertlikleri, farklı numune ve farklı bölgelerden ölçümler alınarak yapılmıştır. Üretimi gerçekleştirilen numunelerin optimizasyon öncesi ve optimizasyon sonrası farklı yerlerinden altı adet ölçüm alınarak gerçekleştirilmiştir. Talaşlı imalat ve katmanlı imalat için üretilen numuneler üzerinden yapılan sertlik ölçümleri ve bu sertliklerin ortalamaları Tablo 5.1.'de verilmektedir.

Tablo 5.1. Optimizasyon aşamalarında yapılan sertlik ölçümleri

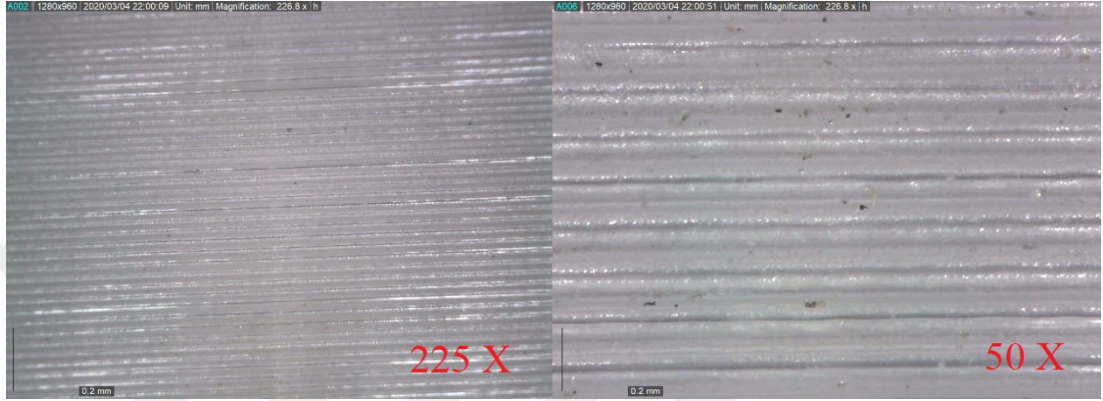
Talaşlı İmalat Sertlik Ölçümleri							
	1.Ölçüm	2.Ölçüm	3.Ölçüm	4.Ölçüm	5.Ölçüm	6.Ölçüm	Ortalama
Üretilen Numuneler	646 HL	605 HL	580 HL	599 HL	620 HL	606 HL	609 HL
Katmanlı İmalat Sertlik Ölçümleri							
	1.Ölçüm	2.Ölçüm	3.Ölçüm	4.Ölçüm	5.Ölçüm	6.Ölçüm	Ortalama
Üretilen Numuneler	579 HL	621 HL	622 HL	612 HL	598 HL	575 HL	601 HL

Talaşlı imalat için elde edilen numunelerin ortalama sertliği 609 leeb ile katmanlı imalata göre çok az bir farkla daha yüksek bir değer elde edilmiştir. Katmanlı imalat ile üretilen numune sertlik ortalamaları da 601 leeb ölçülmüştür.

Özellikle katmanlı imalatta katmanlar arası doluluk oranı ve katman dolgu desenleri sertlik testlerinin sonuçlarını doğrudan etkilemektedir. Yapılan araştırmalarda %100 dolgu ve doğrusal (rectilinear) dolgu deseni sertlik ve mekanik özelliklerin artmasına neden olmaktadır [52]. Plastik malzemelerde, metalik malzemelerdeki gibi çekme dayanımı ve sertlik arasında doğrusal bir ilişki ve orantı yoktur. Ayrıca polimerler, oda sıcaklığı civarındaki sıcaklıklardan bile çok etkilenmektedir. Artan sıcaklık elastiklik modülünü ve çekme dayanımını düşürmekte, süneklik ise artmaktadır. Bir başka deyişle sıcaklığın artması ile sert (gevrek) olan bir polimer malzeme, sıcaklık artması ile sünek hal alabilir [56].

Şekil 5.1.'de katmanlı imalat ile üretilen numunelerin, yazdırma sonrasındaki yan(işlem) yüzeyindeki katmanlar görülmektedir. Katmanlı imalat prosesinin temeli, katmanların üst üste inşa edilmesidir. Katmanlara yazdırılırken oluşan kaymalardan

dolayı, üst katman alt katmana iyi yapışmamaktadır [65, 66]. Dolayısıyla, katmanlı imalat ile üretilen numunelerde, katmanlar arası boşluk ve iyi yapışmama gibi yapısal bozukluklardan dolayı sertlik değerinin talaşlı imalata göre düşük çıktığı söylenilebilir. Ayrıca, talaşlı imalat ile üretimi gerçekleştirilen ölçümlerde sertlik değerinin yüksek çıkma nedenlerinden birinin, ölçüm anında numunelerin daha sabit ve ölçüm yapılan zemine daha iyi oturduğu düşünülmektedir.



Şekil 5.1. Katmanlı imalat yan(işlem) yüzey mikro incelemeleri

Katmanlı imalat üretim yönteminde kütle ve mukavemete etki edecek birçok parametre vardır. Sıcaklık, nem, malzeme ve kalitesi, açık ve kapalı sistem, katman kalınlığı, yazdırma hızı, yan duvar, alt ve üst duvar (katman) sayısı, birbirinden farklı olan iki yüzeyin birbirine yapışması (adhezyon), doluluk oranı ve tipi, tarama açısı, destek ve malzemesi üretim parametrelerinden birkaç tanesidir. Bu parametreler üzerinde yapılan çalışmalar sonucunda katmanlar arasında hava boşluğu kaldığı gözlemlenmiştir. Bu hava boşlukları dayanım, sertlik ve kütle miktarlarında azalmalara neden olmuştur. Bu kadar üretim parametresinin olduğu yöntem için deneysel modeller geliştirilip ve bu modeller üzerinden istatistiksel analizler yapılan çalışmalar sonucunda, kütle ve mukavemet düşüşünün temel nedeninin tabakalar içindeki ve arasındaki bozulmanın sebep olduğunu ortaya koymuşlardır [67, 68, 45]. Bu sebeplerden dolayı katmanlı imalat ile üretilen numunelerin sertlik ve kütle ölçümlerinin düşük çıkmasının nedeni; katmanlar arası boşluklardan kaynaklı olabileceği düşünülmüştür.

5.2. Kütle Ölçümü

Kütle miktarı önemli bir faktör olduğu için ölçümler hassas terazi ile gerçekleştirilmiştir. Tasarım programında kütle Tablo 5.2.'de görüldüğü gibi

optimizasyon öncesinde yaklaşık 303 (0,303 kg) gramdır. Optimizasyon sonunda kütle yaklaşık olarak 112 (0,112 kg) grama düşürülmüştür. Program ile elde edilen katmanlı imalat ve talaşlı imalat kütle değişimleri % 63,09 düşürülmüştür ve tablonun en alt satırında optimizasyon öncesi ve optimizasyon sonrasındaki kütle farkı/yüzde değişim olarak verilmiştir. Programdaki iterasyonlar sonucunda kütle yaklaşık 191 (0,191 kg) gram düşürülmüştür. Programda ayrıca tabloda görüldüğü üzere, katmanlı imalat ve talaşlı imalat optimizasyon öncesi ve sonrası kütle ve hacim değerleri aynıdır. Bunun nedeni ise, programda sadece Pet-G malzeme seçimi yapılmıştır. Dolayısıyla seçilen malzeme üzerinden yapılan kütle hesabında, kütle ve hacim iki üretim yöntemi için değişmemiştir.

Tablo 5.2. Program ve gerçekte ölçülen kütle ve hacim değerleri

		Program Hacim (mm ³)	Program Kütle (kg)	Gerçekte Kütle Ölçümü (kg)
Optimizasyon Öncesi	Talaşlı İmalat	196409	0,303	0,244
	Katmanlı İmalat			0,221
İlk Optimizasyon Sonrası	Talaşlı İmalat	90612	0,140	0,111
	Katmanlı İmalat			0,100
İkinci Optimizasyon Sonrası	Talaşlı İmalat	72476	0,112	0,089
	Katmanlı İmalat			0,079
Değişim Farkı / % Fark	Talaşlı İmalat	- 123933	- 0,191	- 0,155 (- % 67,5)
	Katmanlı İmalat	(- % 63,09)	(- % 63,09)	- 0,142 (- % 64,05)

Talaşlı imalat ve katmanlı imalat ile optimizasyon öncesi ve optimizasyon sonrasında elde edilen numunelerin, hassas terazi ile yapılan kütle ölçüm sonuçları ile programla yapılan kütle ölçüm sonuçları arasında fark olduğu gözlemlenmektedir. Bunun nedeni ise, programdaki yoğunluk değerinin farklı olmasıdır. Programa girilen yoğunluk değeri Tablo 4.2.'deki 1,27 g/cm³ değeridir. Bu yüzden programda optimizasyon öncesi yaklaşık 303 (0,303kg) gram çıkan kütle, gerçekte talaşlı imalat için yapılan kütle ölçümünde yaklaşık 244 (0,244 kg) gram, gerçekte katmanlı imalat için yapılan kütle ölçümlerinde yaklaşık 221 (0,221 kg) gram çıkmaktadır. Bu da program ile gerçekte yapılan üretim arasında yoğunluk farklarının olduğunu göstermektedir. Yoğunluk ölçümleri 5.5. Yoğunluk konu başlığı altında incelenecektir.

Talaşlı imalat yöntemi ile 244 gram olan kütle, optimizasyon sonunda % 67,5 oranında düşürülerek 89 grama, katmanlı imalat üretim yöntemiyle 221 gram olan kütle, optimizasyon sonunda % 64 oranında 79 grama düşürülmüştür. Bu verilere Tablo 5.2.'nin en alt satırından ulaşılabilmektedir.

5.3. Yüzey Pürüzlülüğü

Talaşlı ve katmanlı imalat için üretilen numunelerin yüzey pürüzlülük ölçümleri altı farklı bölgeden gerçekleştirilmiştir. Ayrıca alınan Pet-G levhanın da hiçbir işlem yapmadan altı farklı bölgeden yüzey pürüzlülük ölçümleri yapılmıştır. Yapılan bu ölçümler Tablo 5.3.'te verilmektedir.

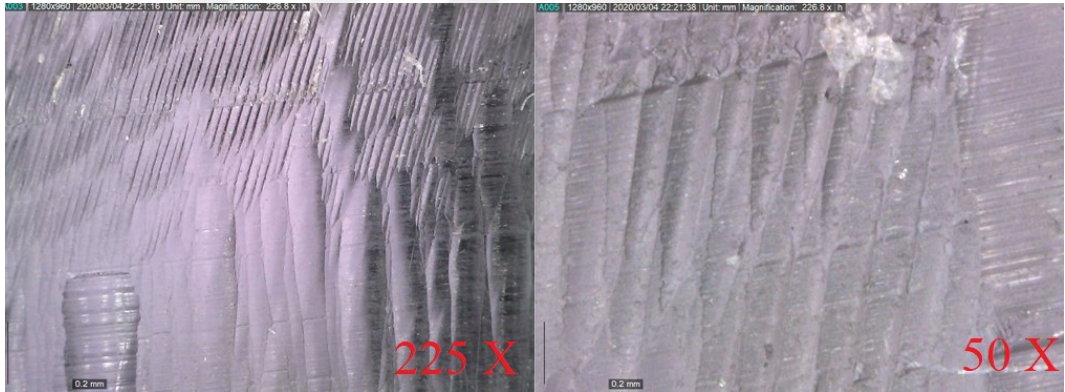
Tablo 5.3. Yüzey pürüzlülük ölçümleri

' Ra' Cinsinden Yüzey Pürüzlülük Ölçümleri							
	1	2	3	4	5	6	Ortalama
400*400*15 Levha	0,001 µm	0,017 µm	0,001 µm	0,016 µm	0,002 µm	0,001 µm	0,006 µm
Talaşlı İmalat	1,629 µm	1,613 µm	1,578 µm	1,526 µm	1,635 µm	1,309 µm	1,548 µm
Katmanlı İmalat	5,174 µm	5,136 µm	6,426 µm	7,484 µm	5,823 µm	7,680 µm	6,287 µm

Yapılan ölçümler sonucunda alınan levha pürüzlülüğü nerede ise sıfıra yakın bir değer çıkmıştır. Talaşlı imalat yüzey pürüzlülük ölçümleri ortalaması yaklaşık 1,5 µm, katmanlı imalat ölçümlerinin ortalaması ise yaklaşık 6 µm çıkmıştır. Katmanlı imalat yüzey pürüzlülük değerinin yüksek çıkmasının nedeni; bu imalat prosesinde alt katmanlardaki bir hatanın üst katmanlara artarak devam etmesidir. Bu da merdiven etkisidir. Merdiven etkisi görülen bir numune yüzey morfolojisinden dolayı montaj yapıldığı yerde büyük önem taşımaktadır. Merdiven etkisinin yorulma ve diğer mekanik özelliklere etkisi de vardır. Merdiven etkisi diğer katmanlı imalat proseslerinde de görülmektedir. Bu durum katmanlar arasında basamak oluşumunu tetiklemektedir. Merdiven etkisine bağlı olarak yüzey kalitesi de bozulmaktadır. Merdiven etkisi inşa yönü, katman kalınlığı ile birlikte yüzey açılarının imalatı proseslerinde bozulmayı tetiklemektedir. Katman kalınlığının bu etkiyi arttırmasının temel sebebi, üretimi yapılan numune katmanlarının inşa yönüne bağlı olarak basamak yüksekliğinin artmasıdır. Yüzey açısı azaldığında, iki basamak arasındaki mesafe artacağından dolayı, yüzey süreksizliklerini oluşturacak olan tepelerin diyagonal mesafeleri de artacaktır. Katmanlı imalat proseslerinde merdiven etkisine

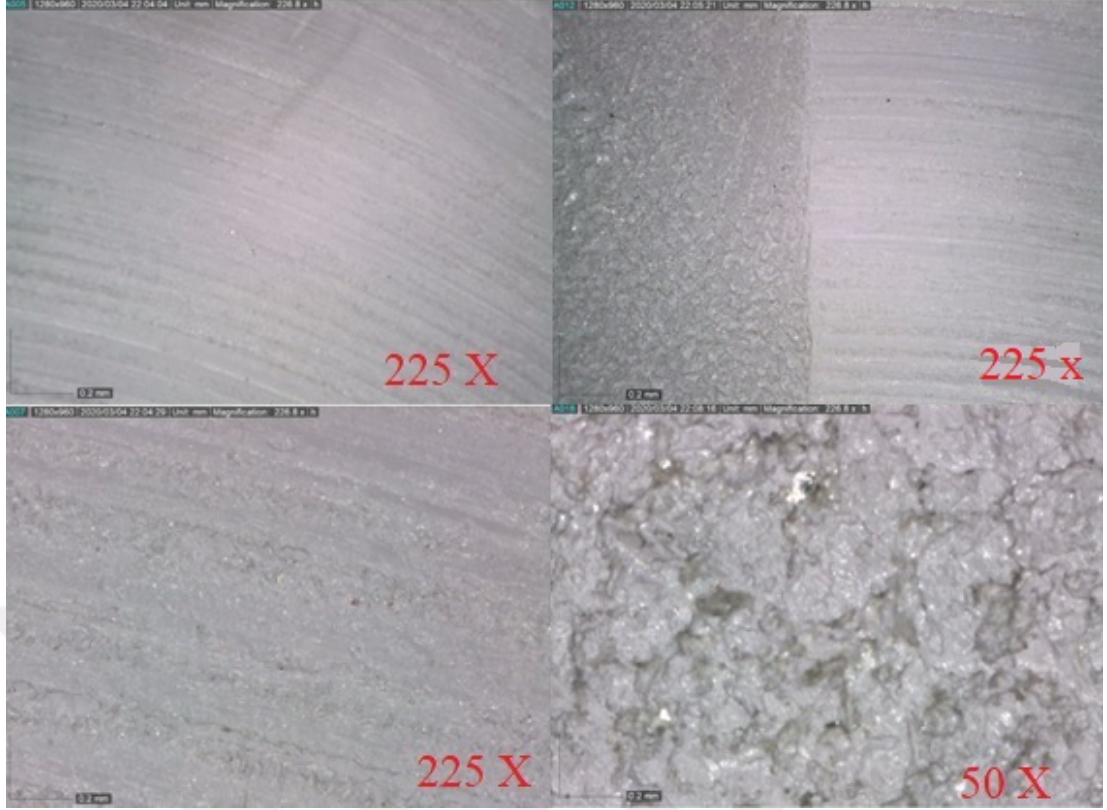
bağlı olarak aynı malzeme ve aynı işlem için bile farklı inşa yönü seçimi ile birlikte yüzey pürüzlülüğü değerleri arasındaki fark, iki kattan fazla olabilmektedir [69]. Katmanlı imalat yöntemi ile üretilen parçaların yüzey pürüzlülüğü ve parçanın boyutsal doğruluğu, talaşlı imalat yöntemi ile üretilen parçalara göre daha fazladır. Pürüzlülük değerinin katmanlı imalat yönteminde fazla çıkmasının nedeni ise, katmanlı imalat prosesinin üretim yönteminden kaynaklanan merdiven etkisinden dolayı oluşan yüzeylerdir. Katmanlı imalat yöntemi ile üretilen numunelerde merdiven etkisine bağlı olarak özellikle açılı yüzeylerde ve eğimli yüzeylerde, yüzey kaliteleri düşmektedir.

Günümüzde kullanılan birçok parça son haline talaşlı imalat yöntemleri sayesinde getirilmektedir. Parçanın işlenmesi için kesme kuvvetleri, takımın aşınması, kaldırılan talaş ve yığıntı talaş oluşumu, işlenebilirliği etkileyen parametrelerdir [70]. Şekil 5.2.'de yan(işlem) yüzeylerinin mikro görüntüleri verilmiştir.



Şekil 5.2. Talaşlı imalat yan(işlem) yüzey mikro incelemeleri

Talaşlı imalat için CNC Router ile kesilen numuneler birkaç farklı parametre denenerek sonuca ulaşılmıştır. Pürüzlülük ölçümleri esnasında talaşlı imalatta kesici ucun fazla ısınması nedeni ile bazı bölgelerde talaş sıkışmasına bağlı olarak işlem yüzey kalitelerinin farklı olduğu gözlemlenmiştir. Bu bölgelerde yapılan ölçümlerde “Ra” cinsinden 6-10 μm arasında değerler ölçülmüştür. Talaşlı imalat sırasında talaş sıkışması ve aşırı ısınma sonucunda elde edilen iki farklı yüzey Şekil 5.3.'de görülmektedir.



Şekil 5.3. Talaşlı imalat üst yüzey mikro incelemeleri

Bu bölgelerde malzeme ve üretim yöntemindeki hatalardan dolayı ölçümler tabloda verilmemiştir. Şekil 5.3’de kavramsal modelin yan(işlem) yüzeyinde yapılan mikro inceleme görülmektedir. Cnc Router ile kesilen Pet-G malzeme yan yüzeylerinde, kesici uç ile talaş sıkışması sonucunda yüzeylerin kesik kesik çıktığı düşünülmektedir.

5.4. Çekme Testi

Malzemenin mekanik davranışlarının belirlenmesi için en çok başvurulan testlerden biri çekme testidir. Çekme testi programda yapılan optimizasyon şartlarına uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Kavramsal modelden bir adet, ilk optimizasyon sonrası numunelerden üç adet ve ikinci optimizasyon sonrası numunelerden üç adet çekme testine tabii tutulmuştur. Talaşlı imalat için yapılan çekme testi sonuçları Tablo 5.4.’te verilmektedir.

Tablo 5.4. Talaşlı imalat çekme numuneleri test sonuçları

	Talaşlı İmalat		
	Kavramsal Model	İlk Optimizasyon Sonrası	İkinci Optimizasyon Sonrası
	Maksimum Kuvvet (kN)	Maksimum Kuvvet (kN)	Maksimum Kuvvet (kN)
1.Numune	14,009	12,169	10,616
2.Numune	X	12,169	10,891
3.Numune	X	12,147	3,656
Ortalama	14,009	12,161	10,753

Talaşlı imalat ikinci optimizasyon üçüncü numune için yapılan test sonucu değerinin diğerlerinden çok farklı çıktığı görülmektedir. Bunun nedeni numunenin çekme çenelerine düzgün olarak bağlanmamasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Optimizasyona uğratılan kavramsal modelin alttaki sabit mesnet delik eksenini ile üstteki çekme çenesi delik eksenini farklıdır. Bu yüzden parça iyi bağlanmaz ise makaslamaya girmektedir. Bu nedenden dolayı çekme testi başlar başlamaz malzeme kırılmış ve diğer çekme sonuçlarından farklı bir sonuç elde edilmiştir. Tablodaki 3,656 kN değeri, alınan ortalama değerler hesaplanırken dâhil edilmemiştir. 3B yazıcı ile üretilen numuneler için de aynı şartlarda çekme testi gerçekleştirilmiştir. Çekme testi sonuçları Tablo 5.5.'de verilmektedir.

Tablo 5.5. Katmanlı imalat çekme numuneleri test sonuçları

	Katmanlı İmalat		
	Kavramsal Model	İlk Optimizasyon Sonrası	İkinci Optimizasyon Sonrası
	Maksimum Kuvvet (kN)	Maksimum Kuvvet (kN)	Maksimum Kuvvet (kN)
1.Numune	8,775	7,806	7,516
2.Numune	X	8,203	6,813
3.Numune	X	8,863	6,231
Ortalama	8,775	8,291	6,853

Katmanlı imalat yöntemi ile üretilen numunelerin çekme testlerinin sonuçları, talaşlı imalat yöntemi ile üretilen numunelerin çekme testlerinden elde edilen sonuçlara göre, maksimum kuvvet değerlerinin daha düşük olduğu görülmektedir. Optimizasyon öncesi ve sonrası maksimum kuvvet değerlerinin karşılaştırılması ve arasındaki değişim fark / % fark değerleri, Tablo 5.6.'da verilmektedir. Tablo 5.6. oluşturulurken çekme testine tabii tutulan numunelerin maksimum kuvvet değerlerinin ortalamaları alınmıştır.

Tablo 5.6. Talaşlı ve Katmanlı imalat çekme numuneleri test sonuçlarının karşılaştırılması

		Maksimum Kuvvet (kN)
Optimizasyon Öncesi	Talaşlı İmalat	14,009
	Katmanlı İmalat	8,775
İlk Optimizasyon Sonrası	Talaşlı İmalat	12,161
	Katmanlı İmalat	8,291
İkinci Optimizasyon Sonrası	Talaşlı İmalat	10,753
	Katmanlı İmalat	6,853
Değişim Farkı / % Fark	Talaşlı İmalat	- 3,256 (- % 23)
	Katmanlı İmalat	- 1.922 (- % 21)

İki imalat yönteminde de kavramsal model (optimizasyon öncesi) çekme testlerinde maksimum kuvvet değerlerinin daha yüksek çıktığı gözlemlenmiştir. Kavramsal model için talaşlı imalat maksimum kuvvet değeri 14,009 kN, ilk optimizasyon sonucunda ortalama 12,161 kN, ikinci optimizasyon sonucunda ise ortalama 10,753 kN olarak elde edilmiştir. Katmanlı imalatta maksimum kuvvet değeri, kavramsal model (optimizasyon öncesi) için 8,775 kN, ilk optimizasyon sonucunda ortalama 8,291 kN, ikinci optimizasyon sonucunda ise ortalama yaklaşık 6,853 kN olarak elde edilmiştir.

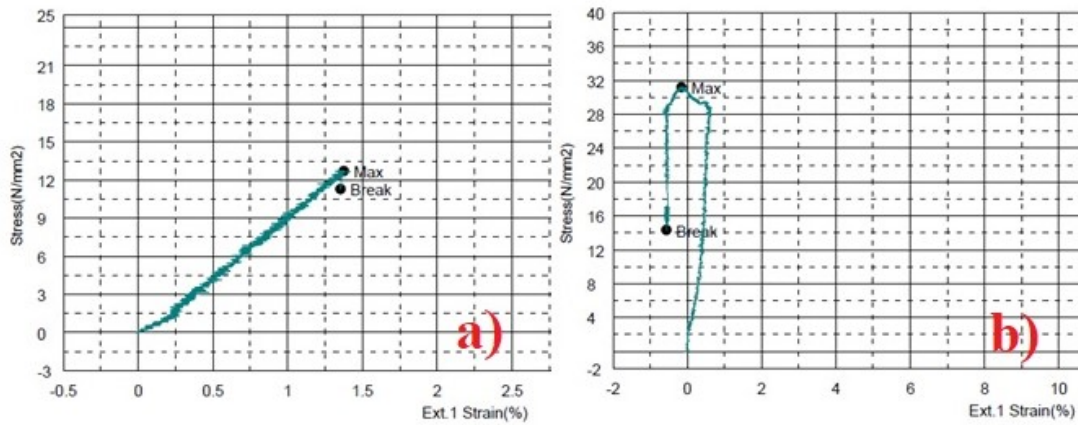
Maksimum kuvvet değeri ilk optimizasyon sonunda iki imalat yönteminde de düşmektedir. Bu da beklenen bir durumdur. Bunun nedeninin ilk optimizasyon sonunda malzeme kesitlerinde daralma olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Numunelerin ilk başlangıçta 2kN yük taşıması istendiği için, bu durum herhangi bir

olumsuzluk yaratmamaktadır. Yapılan optimizasyon ile ağırlık azaltımının ve malzeme tasarrufunun başarılı olduğu görülmüştür.

Çekme testlerinden elde edilen sonuçlara göre optimizasyon öncesi ve sonrası talaşlı imalat ile katmanlı imalat numunelerinin Von Mises gerilmeleri ve yer değiştirme değerleri Tablo 5.7.'de verilmiştir. Optimizasyon öncesi bölgesel olan gerilmeler optimizasyon sonunda artık bölgesel olmaktan çıkmıştır. Ayrıca optimizasyon öncesi katmanlı imalat için maksimum yer değiştirme değeri 2 mm'ye yakın iken optimizasyon sonunda, numune üzerindeki yer değiştirme miktarları düşmüştür. İki imalat yöntemi arasında optimizasyon öncesi yer değiştirme miktarı arasında fark var iken, optimizasyon sonunda birbirine yakın değerler almıştır.

Tablo 5.7. Program üzerinde Von Mises gerilmesi ve yer değiştirme sonuçları

		VON MİSES GERİLMESİ (Mpa)		YER DEĞİŞTİRME (mm)	
		Minumum	Maksimum	Minumum	Maksimum
Optimizasyon Öncesi	Talaşlı İmalat	0,008	8,774	0,000	0,327
	Katmanlı İmalat	0,024	25,351	0,000	2,049
İlk Optimizasyon Sonrası	Talaşlı İmalat	0,008	14,120	0,000	0,446
	Katmanlı İmalat	0,011	14,013	0,000	0,447
İkinci Optimizasyon Sonrası	Talaşlı İmalat	0,012	20,612	0,000	0,608
	Katmanlı İmalat	0,010	21,297	0,000	0,608



Şekil 5.4. Çekme testindeki gerilme-şekil değişimi eğrilerine birer örnek
a) Katmanlı imalat numunesi, b) Talaşlı imalat numunesi.

Şekil 5.4.'de verilen grafikte de görüldüğü gibi, katmanlı imalat çekme testi numuneleri, gevrek kırılma göstermektedir. Çekme testleri 80 ile 136 saniye aralığında sürmüş ve numunenin kırılması ile sonuçlanmıştır. Numune kırıkları çekme testi yapılan laboratuvara saçılmıştır. Fakat talaşlı imalat numuneleri çekme

testi esnasında elastik bir davranış göstermiş ve sünerek kırılmıştır. Çekme testi yapan cihazın, talaşlı imalat numunelerini kırabilmesi için strok değeri yeterli gelmemiştir. Yapılan testlerden birinde numune kırılmadan çekme test cihazı uyarı vermiş ve test sonlandırılmıştır. Talaşlı imalat numunelerinin çekme testleri 270 ile 500 saniye aralığında sürmüştür.

Polimerlerde akma noktası, elastik değişimin son bulunduğu en yüksek nokta olarak alınmaktadır. Dolayısıyla katmanlı imalat numuneleri akma göstermeden kırılmıştır. Polimerlerde alınan bu en yüksek nokta, aynı zamanda akma dayanımı ve çekme dayanımını vermektedir [71]. Grafik ve çekme testi sonuçları da bunu doğrular nitelikte olup, talaşlı imalat numunelerinin taşıyacağı yük daha yüksektir.

Polimer malzemelerin mekanik özellikleri, metaller için yapılan çekme testinde kullanılan akma, çekme dayanımı gibi parametrelerle belirlenmektedir. Yapılan çekme testlerinde polimerlerin birim şekil değişimi, sıcaklık ve çevresel etmenlere karşı aşırı bir hassasiyet göstermektedir. Çekme testlerinde katmanlı imalat ile üretilen numunelerin yüzde uzama değerlerine paralel olarak parçalarda hasarlar oluşmaktadır. 3B yazıcıda doldurma içyapısı ve kesite göre kopma açıları değişiklik göstermektedir. Böylece parçalar uygulanan yükler altında farklı dayanım özelliklerine ve farklı kopma yüzeylerine sahip olmaktadır [72]. Bu tez çalışmasında üretilen numuneler, doğrusal ve düz çizgili olarak imal edilmiştir. Katmanlı ve talaşlı imalat numuneleri, tek yönlü çekme kuvvetine dik olarak kopmuştur.

5.5. Yoğunluk Ölçümü

Yoğunluk ölçümlerinin yapılması için yoğunluğu istenilen numunelerin kütleleri hassas terazi ile ölçülmüştür. Yoğunluk aşağıdaki formül ile hesaplanmaktadır. Bir cismin yoğunluğu (d) ile gösterilir. Kütlenin hacme bölünmesi sonucu bulunur. Formülü;

$$d = \frac{m \text{ (g)}}{V \text{ (mm}^3\text{)}} \text{ 'dir.} \quad (1)$$

ilk olarak kullanılacak Pet-G levhanın kütesinden yola çıkacak olursak;

$d = m / v$ formülünden

$$d = 3112,9 \text{ gram} / (40 \times 40 \times 1,5 \text{ cm}^3) \quad \underline{d = 1,29 \text{ g} / \text{cm}^3}$$

olarak bulunmuştur. Bu değer programa girilen, Tablo 4.2.'deki teknik bilgi formundaki yoğunluk değerinden farklı olarak bulunmuştur.

Yoğunluk için diğer testleri biten numuneler üzerinden 22 mm çapında numuneler kesilmiştir. CNC Router ile 22 mm çapında kesilen parçaların kütleleri Tablo 5.8.'de verilmiştir. Yoğunluk hesabı yapılırken parça kütlelerinin tabloda verilen kütle ortalamaları alınmıştır.

Tablo 5.8. CNC Router ile kesilen parçaların kütle ölçümleri

	Talaşlı İmalat	Katmanlı İmalat
1.Numune	7,09g	6.54g
2.Numune	7,08g	6,53g
3.Numune	7,10g	6,48g
Ortalama	7,09g	6,51g

Yukarıda verilmiş (1) numaralı formül kullanılarak talaşlı imalat ile üretimi yapılan numunelerin yoğunluğu aşağıdaki şekilde hesaplanmıştır.

$$d = \frac{m}{\pi \cdot r^2 \cdot h} = \frac{7,09 \text{ g}}{3,14 \cdot 121 \cdot 15} = \frac{7,09 \text{ g}}{5699,1 \text{ mm}^3} = 0,00124 \text{ g/mm}^3 \quad \underline{d = 1,24 \text{ g/cm}^3}$$

Yine aynı şekilde katmanlı imalat numuneleri için yoğunluk (1) numaralı formül kullanılarak aşağıdaki şekilde hesaplanmıştır.

$$d = \frac{m}{\pi \cdot r^2 \cdot h} = \frac{6,51 \text{ g}}{3,14 \cdot 121 \cdot 15} = \frac{6,51 \text{ g}}{5699,1 \text{ mm}^3} = 0,00114 \text{ g/mm}^3 \quad \underline{d = 1,14 \text{ g/cm}^3}$$

Pet-G malzemenin yoğunluk değeri talaşlı imalat için verilen Tablo 4.2.'deki teknik bilgi formunda 1,27 g/cm³'tür. Bu tabloda verilen değerler belirli bir yöntem ile elde edilmektedir. Talaşlı imalat yoğunluk ölçümü için, gözeneksiz plastiklerin yoğunluk tayini metodu standardı kullanılmaktadır [64].

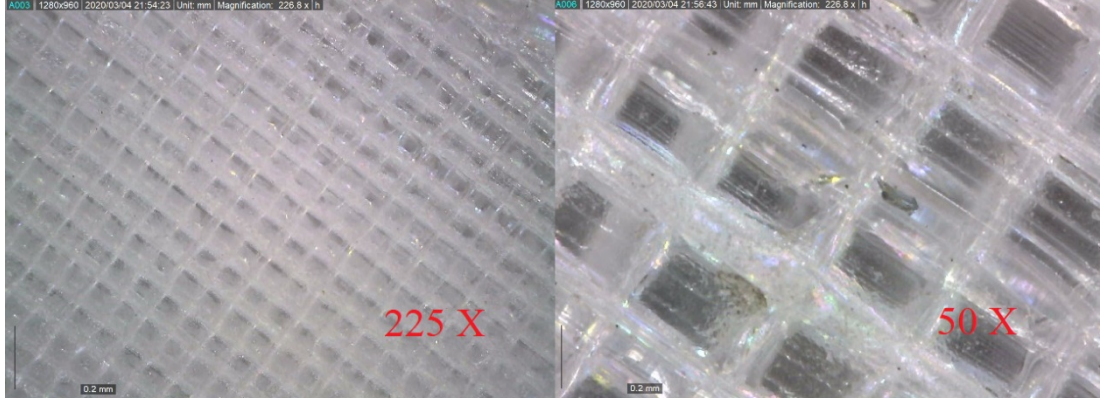
Standarda karşılık tez çalışması kapsamında hesaplanan değerler arasında fark olduğu görülmüştür. Standart olarak verilen yoğunluk $1,27 \text{ g/cm}^3$, Pet-G levha yoğunluğu $1,29 \text{ g/cm}^3$, talaşlı imalat için $1,24 \text{ g/cm}^3$, katmanlı imalat için ise yoğunluk $1,14 \text{ g/cm}^3$ olarak bulunmuştur. Yoğunluk değerinin farklı bulunmasının en büyük nedeni, farklı olan numune kütleleridir. (1) numaralı formülden de anlaşılacağı üzere hacim sabit 22 mm çap için sabit tutulduğundan, kütle arttıkça yoğunlukta artmaktadır.

Dolayısıyla kesilerek elde edilen 22 mm çapındaki numunelerin kütleleri önem arz etmektedir. 22 mm çapında kesilerek elde edilen numune, hesaba 22 mm olarak katılmış fakat gerçekte hiçbir şey tam değildir. Tezgâh hassasiyeti yüzünden çap tam olarak 22 mm çıkmamış olabilir. Buradaki yoğunluk ölçümlerini en çok etkileyen faktörlerden biri kütledir. Bu yoğunluk ölçümleri sonucunda en düşük yoğunluk katmanlı imalat için elde edilmiştir. Ölçülen numunelerin kütlelerinden en hafifi katmanlı imalat ile elde edilen numunelerdir. Ayrıca katmanlı imalatta kütlelerin daha hafif çıkma nedenlerinden birinin de, katmanlar arasında boşluklar olduğu düşünülmektedir.

Polimer malzemelerin artan sıcaklıkla birlikte çekme dayanımı düşmekte ve sünek bir davranış göstermektedir. Ayrıca artan sıcaklık, yoğunluğu da etkilemektedir. Sıcaklık arttıkça moleküller hareket etmeye başlar. Bu moleküller hareketin başladığı sıcaklığa Camsı Geçiş Sıcaklığı (Tg) denmektedir [73]. Camsı Geçiş Sıcaklığı altında polimerler sert ve yoğun bir yapıya sahiptirler.

5.6. Çekme Testi Sonrası Kırılma Yüzeyi ve Mikro İncelemeler

Mikroskop ile yapılan görüntülemelerde 225x ve 50x büyütme yapılmıştır. Talaşlı imalat ve katmanlı imalat için üretilen numunelerin kırılma yüzeyleri ve katmanlı imalat için üst yüzey incelemeleri gerçekleştirilmiştir. Katmanlı imalat üst yüzey mikro incelemeleri Şekil 5.5.'de görülmektedir. Katmanlı imalat prosesinin üretim yöntemi ve imalat prensibinden dolayı aşağıdaki şekilde görülen katmanlar arası boşluklar, hem mukavemeti, hem yoğunluğu, hem de kütleyi etkilemektedir.



Şekil 5.5. Katmanlı imalat üst yüzey mikro incelemeleri

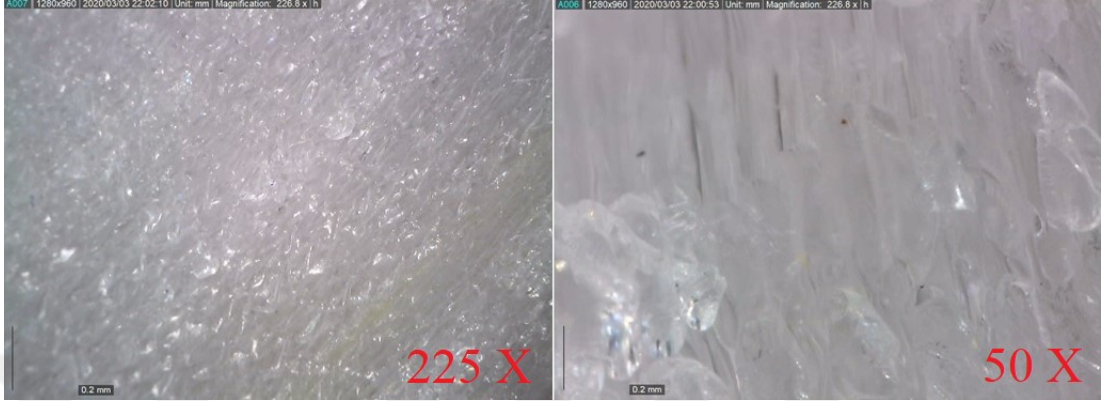
Kırılma, numunelerin iki ya da daha fazla parçaya ayrılmasıdır. Sünek ve gevrek kırılma olarak genelde iki farklı şekilde görülür. Polimerlerin kırılma dayanımları, metal ve seramiklere göre çok düşüktür. Fakat polimerlerin kırılması metallere farklıdır [74]. Metallerdeki kırılma olayı gibi, katmanlı imalat ile üretilen numuneler gevrek kırılmıştır. Katmanlı imalat yöntemi ile üretilen numunelere göre, talaşlı imalat numuneleri çekme testi esnasında daha çok uzadığı ve daha sonra kırıldığı gözlemlenmiştir. Şekil 5.7.'de görüldüğü üzere talaşlı imalat kırılma yüzeylerinin daha iğnemsiz olduğu anlaşılmaktadır.

Polimerler malzemeler için üç değişik gerilme-biçim şekil değişimi davranışı görülmektedir. Tamamen elastik şekil değişimi ile oluşan gevrek kırılma, metaller gibi akma ve sonrasında plastik şekil değişim görülen kırılma, son olarak ise küçük gerilme değerlerinde kauçuk benzeri bir davranış sergileyen elastik kırılma olarak sayılabilir [75, 76].

Çekme testlerine tabii tutulan parçalar, belli bir yüke dayanmaktadır. Polimerlerde genellikle yükün ve gerilmenin çok olduğu yerde, çizik ve çatlak oluşumu ile hasar başlar. Bu yüklerle beraber çeneler ayrıldıkça çekme testine tutulan numuneler kırılmaktadır.

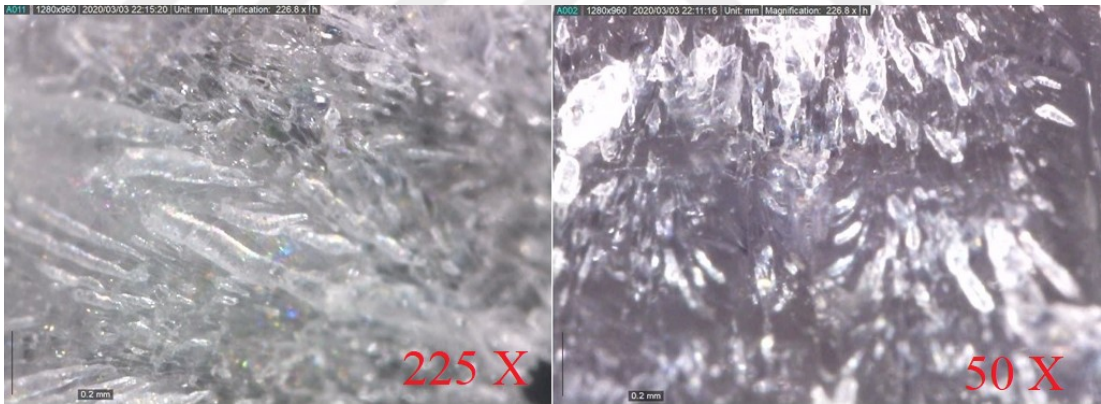
Polimer ve plastik malzemeler içinde kullanılan bileşenlerin, homojen olmayan dağılımdan hasar oluşmaktadır. Bu tür kusurlar ve safsızlıklar genellikle çok küçük olduğundan analiz etmek zordur. Yarı kristal ve amorf yapıya sahip olan Pet-G hasar oluşumu, crazing (kılcal çatlaklar) ve shear yielding (kayma deformasyonu) ile oluşmaktadır. Kılcal çatlaklar, genellikle camsı plastiklerde

görülür [77]. Işığ yansıtıkları için mikro yapıları belirgin bir şekilde görülmemiştir. Bir kılcal çatlak yapısı gereği yüzde elli boşluk içermektedir. Bu da mukavemet, kütle ve yoğunluk değerlerine etki ettiği söylenebilir. Şekil 5.6.'da katmanlı imalat için kırılma yüzeyi incelemeleri görülmektedir.



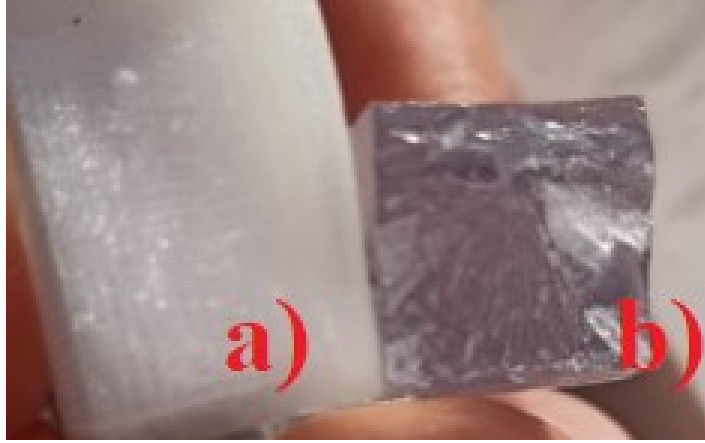
Şekil 5.6. Katmanlı imalat kırılma yüzeyi mikro incelemeleri

Çekme testi sonucunda ise talaşlı imalat için kırılma yüzeyi mikro incelemeleri Şekil 5.7.'de görülmektedir.



Şekil 5.7. Talaşlı imalat kırılma yüzeyi mikro incelemeleri

Gevrek kırılmada plastik deformasyon olmaksızın çatlak ilerler ve hasar oluşur. Çatlağın ilerleme yönü, çekme kuvvetine hemen hemen diktir. Hasar en büyük çekme gerilmesine dik olan düzlemlerde başlar [78]. Katmanlı imalat numuneleri belirtilen bu kırılma tipine benzer bir kırılma tipi gözlenmekte ve ayrıca plastik deformasyon olmadan kırıldığı için gevrek kırılmıştır. Gevrek kırılma, genellikle küçük yüklemelerde oluşmaktadır. Aniden gerçekleştiği için tehlikelidir. Talaşlı imalat numuneleri daha sünek bir davranış göstererek, belki de hasar öncesi müdahale imkânı verebilir.



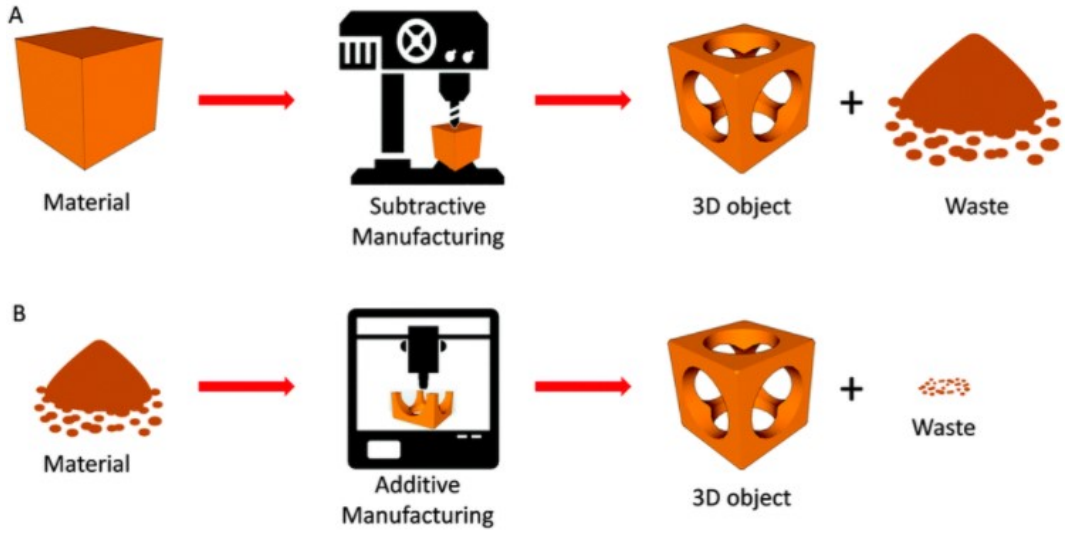
Şekil 5.8. Çekme testi sonrası kırılma yüzeylerine birer örnek
a) Katmanlı imalat numunesi, **b)** Talaşlı imalat numunesi.

Katmanlı imalat ile üretilen numunelerin, kırılma yüzeyi kesitinde hiçbir değişiklik olmamıştır. Parçanın genel görünümüne benzer bir kırılma yüzeyi görüntüsü vardır. Kırılma yüzeyi, Şekil 5.8.a)'da görüldüğü gibi parlaktır. Bu da kırılmanın gevrek olduğunu göstermektedir. Talaşlı imalat ile üretilen numunelerin kırılma yüzeyi, metallerdeki konik-çanak kırılma yüzeyine benzemektedir. Talaşlı imalat kırılma yüzeyleri, Şekil 5.8.b)'de görüldüğü gibidir ve katmanlı imalat kırılma yüzeylerine göre daha mattır. Talaşlı imalat ile üretilen numunelerin kırılma yüzeyi sünek kırılma olduğunu göstermektedir.

5.7. Maliyet ve Zaman Analizi

Yeni bir ürünün piyasa koşullarında kabul görmesi, o ürünün işletmeye ne kadar kar ettireceğidir. Maliyet, o işletme için en önemli kalemlerdendir.

Talaşlı imalat ile katmanlı imalat yöntemlerinin parça imalat prensipleri farklıdır. Talaşlı imalat yöntemi ile dolu veya kütük malzeme eksiltme yapılarak imal edilirken, katmanlı imalat yönteminde ise sadece filament vb. hammaddenin üst üste eklenmesi ile imalat gerçekleştirilmektedir. Dolayısıyla bu iki yöntem arasındaki en büyük maliyet kalemlerinden biri de hurdaya çıkan malzeme oranıdır. Bu iki yöntem arasında hurdaya çıkan malzeme bakımından çok büyük farklar görülmektedir. Şekil 5.9.'de bu iki yöntem arasındaki hurda malzeme karşılaştırılması verilmiştir.



Şekil 5.9. Hurda malzeme karşılaştırılması a) Talaşlı imalat b) Katmanlı [79].

Bu konu başlığı altında Talaşlı imalat ve katmanlı imalat ile üretilmiş olan parçaların hammadde maliyetleri ele alınmıştır. Katmanlı imalat yönteminde kullanılan Pet-G filamentin, Abs ve Pla filament fiyat aralıkları birbirine yakındır. Piyasa da genellikle maliyet Euro üzerinden yapılmaktadır. Maliyetler Euro bazından 15.01.2020 tarihinde aşağıda verilen Türkiye Merkez Bankası efektif satışı döviz kuru esas alınarak TL'ye çevrilerek Tablo 5.9.'da verilmiştir.

$$1 \text{ €} = 6,5622 \text{ TL}$$

Tablo 5.9. Hammadde fiyatları

Hammadde	Fiyat
400*400*15 mm Pet-G Levha (3,11 kg * 9 Euro/kg) + Kdv	216,73 TL
1,75 mm Pet-G Filament (1 kg) + Kdv	119,28 TL

CNC Router ile üretilen tüm test parçaları aynı anda tezgâha bağlanan levha üzerinden işlenmektedir. Dolayısıyla bu da üretim zamanını direkt olarak etkilemektedir. Katmanlı imalatta kullanılan 3B yazıcı ile de böyle bir uygulama yapmak mümkündür. Tablaya sığıdığı kadar test numunesi koyulup, yazdırma işlemi daha kısa zamanda yapılabilir fakat malzeme yazdırma esnasında aşırı derece de çarpılarak tabladan kalkması, yapılan işin başında sürekli bir operatör durmasını gerektirmektedir. Bu yüzden katmanlı imalatta 3B yazıcı için yapılmış programın

çok uzun zaman alması ve tabla yüzeyinin küçük olması nedeniyle tek tek yazdırılmıştır. Talaşlı ve katmanlı imalat için üretim zamanı ve toplam işleme süreleri Tablo 5.10.'da verilmiştir.

Tablo 5.10. Talaşlı imalat ve 3B yazıcı yöntemi üretim-zaman tablosu

İşlem Adı	Talaşlı İmalat	Katmanlı İmalat
İmalat öncesi makine / takım ayarlama	4 saat	30 dakika
Üretim zamanı	45 dakika	41 saat
TOPLAM SÜRE	4,45 Saat	41,5 Saat

Talaşlı imalatta bütün parçalar için yapılan ayarlar ve üretim zamanı 4,45 saat sürer iken 3B yazıcı ile parçaların yazdırma zamanı 41,5 saat sürmektedir. Kavramsal tasarım oluşturulurken, iki yöntem ile de üretim kolaylığı düşünülerek tasarlanmıştır. Kavramsal tasarım üzerinde yapılan bazı iterasyonlar sonucunda elde edilen sonuçların talaşlı imalat yöntemi ile elde edilemeyeceği düşünülüp, bu işlem adımı tekrarlanmıştır. Bu yüzden talaşlı imalatın hızlı bir şekilde yapılması bakımından avantajlıdır. Fakat bu çalışmada olduğu gibi tasarımcıya özgürlük bırakmamaktadır. Talaşlı imalat bu yüzden katmanlı imalata göre neredeyse on kat daha hızlı sonuçlanmıştır.

Katmanlı imalatta elektrik ve filament gideri hariç başka bir gider bulunmamaktadır. Diğer taraftan, talaşlı imalatta operatör, kalem (uç) ve kater gibi birçok sarf malzeme bulunmaktadır. Numuneler üretilirken uç ve kater kırılmadığı için, bu gider kalemleri hesaba dâhil edilmemiştir. Ayrıca en önemli maliyet kalemi ise tezgâh bakım işçilikleri ve maliyetleridir. Bu iki imalat yöntemi arasında da bakım işçilikleri, talaşlı imalatta daha fazla olduğu söylenilebilir.

6. GENEL DEĞERLENDİRME

Günümüz de en az malzeme ve zaman kullanılarak yapılan üretim yöntemleri arasındaki farkları ortaya çıkarmak için yapılmış olan bu tezde, Pet-G malzemenin katmanlı imalat ve talaşlı imalat sonrası mekanik ve fiziksel özelliklerini araştırmak ve hangisinin daha avantajlı olduğunun farkını ortaya koymak amaçlanmıştır.

Her iki üretim yönteminde de statik analiz sonuçlarına bağlı olarak optimizasyonu gerçekleştirilen numuneler üzerinde, aynı yük altında maksimum gerilmenin arttığı görülmektedir. Kısaca optimizasyon basamakları sırasında numuneler üzerinde kesitler düşmekte ve gerilme büyümektedir. Numuneler optimizasyon öncesi verilen yükü optimizasyon sonunda da taşımakta ve çekme testinden elde edilen maksimum kuvvet değerleri de bunu doğrulamaktadır.

Bilgisayar programlarının kullanımı analiz işlemlerinde ve optimizasyon işlemlerinde üretim ve tasarım süresini kısalttığı görülmüştür. Ayrıca tasarlanan kavramsal model istenilen ölçü ve optimizasyon şekillerini vermediği takdirde, program ara yüzünden müdahale etmek henüz tasarım aşamasında kolaylık sağlamaktadır. Optimizasyon ve tasarım işlemlerinde test ve analiz sonuçlarına daha kısa sürede ulaşılmaktadır.

Katmanlı imalat tezgâhları, malzeme üretimi esnasında operatör ihtiyacı duymamaktadır. Bu da işletmeleri büyük bir maliyetten kurtarmaktadır. Talaşlı imalat ise devamlı bir operatör tezgâh başında uç, kater, pens vb ekipmanların sağlamlığını ve körelip körelmediğini kontrol etmek zorundadır. Ayrıca bu tarz sarf malzemeler devamlı zarar görmekte ve bu da üretim maliyetlerini arttırmaktadır.

Katmanlı imalat, karmaşık parçaların üretiminde bilgisayar ortamı ile gerçekte üretim kolaylığı sağlamaktadır. Geleneksel üretim yöntemleri (talaşlı imalat ve döküm yöntemi) ile karmaşık parçalar üretilememektedir. Dolayısıyla çeşitli topoloji optimizasyonu yapan yazılımlar sayesinde parça kütleleri daha fazla düşürülmekte, daha hafif ve daha verimli parçaların tasarımları elde edilebilmektedir. Bu tasarımlar sonucu elde edilen çizimler ancak katmanlı imalat yöntemi ile üretilebilecek karmaşıklıkta olmaktadır. Ayrıca tasarımcı katmanlı imalat yöntemi ile daha özgün tasarımlar gerçekleştirmektedir.

Program sonucunda elde edilen ölçümler ile gerçek yoğunluk ölçümleri birbirinden farklı çıkmıştır. Yoğunluk ölçümleri, programa Tablo 4.2.'deki veriler ışığında girilmiştir. Bu çalışmada 22 mm çapında kesilen numunelerin kütleleri üzerinden yoğunluk hesaplaması yapılmıştır. Katmanlı imalat ile üretilen numunelerin yoğunluk değerinin düşük çıkmasının nedeni, katmanlar arasındaki yapışmayan yüzeyler ve boşluklardan kaynaklandığı düşünülmektedir.

Programda kütle ölçümleri, optimizasyon öncesi ve sonrası için aynı çıkmıştır. Bunun nedeni; programa girilen Tablo 4.2.'deki yoğunluk değerine göre kütle hesabı yapılmış olmasıdır. Gerçekte yapılan üç numunenin optimizasyon sonundaki ortalama kütle ölçümleri, talaşlı imalatla üretilen numunelerin yaklaşık 89 gram, katmanlı imalatla üretilen numunelerin ise yaklaşık 79 gram olarak bulunmuştur. Programda ise bu değer yaklaşık 112 gramdır. Numunelerin program ve gerçekte optimizasyon öncesi/sonrası kütle, maksimum kuvvet, maksimum gerilme, sertlik ve yoğunluk değerleri değişim sonuçları Tablo 6.1.'de görülmektedir.

Tablo 6.1. Optimizasyon öncesi ve sonrası elde edilen değerler

		Optimizasyon Öncesi	İlk Optimizasyon Sonrası	İkinci Optimizasyon Sonrası	Değişim Farkı / % Fark
Kütle (kg)	Program Kütle	0,303	0,140	0,112	- 0,191 (- %63,09)
	Talaşlı İmalat	0,248	0,111	0,089	- 0,155 (- %67,5)
	Katmanlı İmalat	0,221	0,100	0,079	- 0,142 (- %64,05)
Maksimum Kuvvet (kN)	Talaşlı İmalat	14,009	12,161	10,753	- 3,256 (- %23)
	Katmanlı İmalat	8,775	8,291	6,853	- 1.922 (- %21)
Pürüzlülük (Ra)	Talaşlı İmalat	1,548 µm	1,548 µm	1,548 µm	Değişim Yok
	Katmanlı İmalat	6,287 µm	6,287 µm	6,287 µm	Değişim Yok
Sertlik (Leeb)	Talaşlı İmalat	609	609	609	Değişim Yok
	Katmanlı İmalat	601	601	601	Değişim Yok
Yoğunluk (g/cm ³)	Program Yoğunluk	1,27	1,27	1,27	Değişim Yok
	Talaşlı İmalat	1,24	1,24	1,24	Değişim Yok
	Katmanlı İmalat	1,14	1,14	1,14	Değişim Yok

Yapılan optimizasyonlar sonrasında hedeflenen kütle azalımı sağlanmıştır. İkinci optimizasyon sonrası numune, programa göre ilk halinden kütle olarak yaklaşık % 63 oranında hacimsel ve kütleli olarak küçülmüştür. Yaklaşık olarak 300 gram olan numunenin kütlesi, 100 grama düşürülmüştür. Ayrıca parça hacimsel bakımdan da aynı oranda küçülmüştür.

Genel olarak yapılan testler sonucunda, talaşlı imalat ile yapılan numunelerin mukavemet değerlerinin daha yüksek çıktığı gözlemlenmiştir. Dolayısıyla talaşlı imalat ile üretilen bir numunenin daha sağlam ve daha fazla yüke maruz kalabileceği görülmüştür.

Yüzey pürüzlülüğü ölçümleri; alınan levha, katmanlı imalat ve talaşlı imalat numunelerinin altı farklı bölgesinden alınarak gerçekleştirilmiştir. Katmanlı imalat yöntemi ile üretilen numunelerin yüzey pürüzlük değerleri daha yüksek çıkmıştır. Yüzey pürüzlülüğü aşırı istenmeyen ve karşılıklı çalışan yerlerde (örneğin yataklar, miller) talaşlı imalat yönteminin kullanılması daha avantajlı olduğu söylenilebilir.

Bu çalışmada ayrıca tasarımı yapan kişinin belirlediği malzeme boşaltma değerleri, ağ (mesh) yapısının ve malzemenin değiştirilmesi gibi kısıtlar optimizasyon sonunda farklı sonuçlar ve farklı modeller elde edilebileceği görülmüştür. Bu nedenle, tasarımcının belirlediği kısıtlar doğrultusunda farklı yapısal modeller elde edilebilir. Ayrıca ağ yapısındaki eleman ve düğüm nokta sayıları da direkt olarak optimizasyona etki etmektedir.

Yapılan mikro incelemeler ileri de yapılacak olan değişken yükler altında çalışacak Pet-G malzemenin karakteristik özelliklerinin belirlenmesinde bize yardımcı olacağı düşünülmüştür.

Bu tez çalışması gelecekte yapılacak çalışmalara veri tabanı oluşturmaktadır. Bu çalışma sonucunda elde edilen test sonuçları vb. testler yapılarak veri tabanı oluşturulabilir. Ayrıca ashby diyagramları ve çeşitli internet veri tabanları (total materia vb.) tasarlanacak bir program içerisine yerleştirilebilirse bir program sayesinde bir nevi yapay zekâ kullanılarak, malzeme seçimi yaptırılacağı öngörülmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] Erdoğan, E.T. Tasarım Ve Sanat Üzerine Ayrımlayıcı Sorgulamalar. Atatürk Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, Resim Ana Sanat Dalı, Erzurum, 2015, 2-5 s. (Yüksek Lisans Tezi).
- [2] Şekercioğlu, T. Makine Tasarımı Temel İlkeler.Mühendis ve Makine,2018, 60(694) ,67-76 s.
- [3] Optimizasyon Tanımı İnternet Sitesi, <https://www.cevirce.com/turkce-latince-ceviri?text=optimus&lang=la-tr>, Erişim Tarihi : 14.09.2020.
- [4] Kohnke, P. ANSYS. Design Optimization ANSYS Inc, ABD, 1286 s.
- [5] Börklü, H. R. Mühendislik Tasarımı Sistemik Yaklaşım, 1. Baskı, Hatiboğlu Basım ve Yayım, Ankara, 2010, 1-60, 155-432 s.
- [6] Yaban, E. Bir Uçağın Basınç Duvarının Yapısal Optimizasyonu, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim dalı, Ankara, 2012, 6-23 s.(Yüksek Lisans Tezi).
- [7] Sivri, S. Kavramsal Tasarımda Fonksiyonel Model Oluşturma, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim dalı, Ankara, 2013, 1-18 s. (Yüksek Lisans Tezi).
- [8] Pahl, G., Beitz, W. Engineering Design: A Systematic Approach. SpringerVerlag, London, 1988, 25-94 s.
- [9] Wang, Y., Nnaji, B. Functionality-Based Modular Design for Mechanical Product Customization Over the Internet. Journal of Mechanical Design and Manufacturing Automation, 2001.
- [10] Pahl, G., Beitz, W., Feldhusen, J., Grote, K. H. Engineering Design. 3rd Edition, Springer Verlag, London,2007, 294 s.
- [11] Mayda, M. Yeni Bir İnovatif Kavramsal Tasarım İşlem Modeli. Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Eğitimi, Ankara, 2013, 7-41 s.(Doktora Tezi).
- [12] Yıldız, N. Kavramsal Tasarım Yaklaşımlarının İncelenerek Yeni Bir Yaklaşım Gerçekleştirilmesi. Pamukkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Denizli, 2019, 7-31 s. (Yüksek Lisans Tezi).
- [13] VDI (1987) VDI Guidelines 2221:1987: Systematic Approach to the Design of Technical Systems and Products, Düsseldorf: VDI -Verlag..
- [14] Bozbuğa, F. Yaşlı Ve Engelliler İçin Merdiven Asansörü Geliştirme. Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Eğitimi, Ankara, 2019, 17-69 s. (Yüksek Lisans Tezi).
- [15] Kalyon, S. A. Yeni Park Alan Engelleyicileri Geliştirme. Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Endüstriyel Tasarım Mühendisliği Anabilim Dalı, Ankara, 2018, 45-48 s. (Yüksek Lisans Tezi).

- [16] Koyuncu, G. İnsansız Hava Aracı Disiplinler Arası Tasarım Optimizasyonu. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2016, 42-58 s. (Yüksek Lisans Tezi).
- [17] Zhang.S. H.,Topology Optimization with Geometric Primitives. B.E., Xi'an Jiaotong University, 2014, 8-159 s. (Doktora Tezi).
- [18] Kroo, I.,Altus, S., Braun, R., Gage, P., Sobieski, I. Multidisciplinary optimization methods for aircraft preliminary design. Symposium on Multidisciplinary Analysis and Optimization,September 7-9, 2014,5th, Panama City Beach, Florida.
- [19] Erbil, S. H. Makine Parçalarının Şekil Optimizasyonu İle Yeniden Tasarlanması. Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Kayseri, 2006, 5-88 s. (Yüksek Lisans Tezi).
- [20] Lee, S., Lee, D., Lee, J., Han, C., Hedrick, K. Integrated Process For Structural-Topological Configuration Design Of Weight-Reduced Vehicle Components. Finite Elements In Analysis And Design, 1999, 43(1), 620-629 s.
- [21] Poyraz, M. Bir kamyon şasisinin yapısal optimizasyonu. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2004, 70 s.(Yüksek Lisans Tezi).
- [22] Çalışkan, B. Bir Ticari Taşıtın Makas Gözü Bağlantı Parçasının Optimizasyonu Ve Yapısal Analizler İle Tasarımın Doğrulanması, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Konstrüksiyon Programı, İstanbul,, 2018, 48 s. (Yüksek Lisans Tezi) .
- [23] Savaş, E. G. Farklı Geometrik Şekilli Petek Kolonların Optimizasyonu. Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim dalı, Elazığ, 2018, 1-73 s. (Yüksek Lisans Tezi).
- [24] Enginar, H. E. Ağır Taşıt Jantının Topoloji Optimizasyonu Yardımıyla Optimum Tasarımı. Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makina Mühendisliği Anabilim Dalı, Konstrüksiyon – İmalat Programı, İzmir, 2014, 33-45 s. (Yüksek Lisans Tezi).
- [25] Kahraman, F., Küçük, M. Otomotiv Endüstrisinde Topoloji Optimizasyonu ile Ağırlık Azaltma Uygulaması Üzerine Bir Araştırma. Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi. 2020, 20, 623-631 s.
- [26] Işık, E. Topoloji Optimizasyonu Çatallı Flanş Uygulaması. Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makina Mühendisliği Bölümü, Konstrüksiyon - İmalat Anabilim Dalı, 2009, 15-23 s. (Yüksek Lisans Tezi).
- [27] Howard, A.M. Computational Design of Shape Changing Structures via Topology Optimization. University of Colorado. 2007, 1-45 s. (Yüksek Lisans Tezi).

- [28] Yıldız, B. S. Otomotiv Sektöründe Yenilikçi Ürün Tasarımı İçin Yeni Nesil Bütünleşik Tekniklerin Geliştirilmesi. Bursa Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Bursa, 2016, 29-56 s. (Doktora Tezi).
- [29] Aydın, Ş. S. Yolcu Koltuğu Ayağının Sonlu Elemanlar Yöntemi İle Optimizasyonu. Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Otomotiv Mühendisliği Anabilim Dalı, 2018, 14-38 s. (Yüksek Lisans Tezi)..
- [30] Badır, M. E. Uydu Ekipmanlarına Yönelik Topoloji Optimizasyon Metodu İle Parça Geometrisi Tasarımı, Modellenmesi, Seçici Lazerle Ergitme Yöntemi İle Üretimi Ve Analizi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makina Mühendisliği Anabilim Dalı, 2019, 5-56 s. (Yüksek Lisans Tezi).
- [31] Beker, S. Topoloji Optimizasyonu Yaklaşımı ile Ürün Geliştirme. <https://www.poligonmuhendislik.com/blog/urun-gelistirme/topoloji-optimizasyonu-yaklasimi-ile-urun-gelistirme> Erişim 06.12.2020.
- [32] Top. N., Gökçe. H., Şahin. İ. Eklemeli İmalat İçin Topoloji Optimizasyonu: El Freni Mekanizması Uygulaması. Journal Of Selcuk-Technic. 2019, 18(1).
- [33] Savaş, S., Ülker, M. İki Boyutlu Sistemlerin Evrimsel Topolojik Dizaynı.Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi,2005, 1 (1), 1-12.
- [34] Yıldız, A. R., Kaya, N., Öztürk, F. Taşıt Elemanlarının Optimum Topoloji Yaklaşımı İle Tasarımı. Mühendis Makine Dergisi, 2003, 44(516), 23-28.
- [35] Zhang, Y., Bernard, A., Gupta, R. K., Harik, R. Evaluating The Design For Additive Manufacturing: A Process Planning Perspective. Procedia CIRP, 2014, 21, 144-150.
- [36] Topaç, M. M., Bahar, E., Kaplan, A., Sarıkaya, E. Z. Topoloji optimizasyonu yardımıyla, askeri taşıt bağımsız ön süspansiyonu için alt salıncak tasarımı. IDEFIS 2017: 2nd International Defence Industry Symposium, Kırıkkale, 2017, 333-342.
- [37] Airbus Defence And Space Optimizing Components Using 3D Printing For New Eurostar E3000 Satellite Platforms. Retrieved September 21, 121 2015. Erişim tarihi 08.12.2020, <https://www.airbus.com/newsroom/press-releases/en/2015/03/airbus-defence-and-space-optimising-components-using-3d-printing-for-new-eurostar-e3000-satellite-platforms.html>.
- [38] Uzun, Y.H.İ., Farklı Geometrik Şekilli Petek Kolonların Optimizasyonu. Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim dalı, İstanbul, 2006, 24-86 s. (Yüksek Lisans Tezi).
- [39] Roozenburg, N., EEKELS, J. Product Design :Fundemantals and Methods. John Wiley & Sons Inc., Chichester, New York, 1995, 946.

- [40] Reddy K, S. N., Ferguson, I., Frecker, M., Simpson, T. W., Dickman, C. J. Topology optimization software for additive manufacturing: A review of current capabilities and a real-world example, In International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference (Vol. 50107, p. V02AT03A029). American Society of Mechanical Engineers, Ağustos 2016, 50107(V02AT03A029), 1-29.
- [41] Çelebi, A., Seziş, G. Katmanlı imalatta destek yapısının ve konumlandırmanın çarpılma üzerine etkisinin Simufact Additive yazılımı ile simülasyonu. International Journal Of 3d Printing Technologies And Digital Industry. 2019, 3(2), 182-188.
- [42] Brackett D, Ashcroft I, Hague R. Topology Optimization For Additive Manufacturing, 22nd Annual Solid Freeform Fabrication Symposium, 2011, 348-362 s.
- [43] Bilim Tarihi Dergisi, Alfa Basım Yayım Dağıtım, İstanbul, 2014, 82 s.
- [44] Özyurt, E. Plastiklerin Yorulma Davranışına Kristalinite Derecesinin Etkisi. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği, İstanbul, 2003, 82 s.
- [45] Çava K. Fdm Tipi 3 Boyutlu Yazıcı İle Termoplastik Petek/Öksetik Çekirdek Malzeme Tasarımı, Üretimi Ve Sandviç Kompozitlerde Kullanım Özelliklerinin Araştırılması. Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji Ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, Trabzon, 2019, 17-45 s. (Yüksek Lisans Tezi).
- [46] Önçağ, A.Ç. Toplu Taşıma Araçlarının Bakım Onarım Ve Kalite Kontrol Faaliyetlerinde Tersine Mühendislik Yöntemlerinin Uygulanması. Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, İzmir, 2017, 24-50 (Doktora Tezi).
- [47] Pet-G Filament Hakkında Bilgi. Esun, <http://www.esun3d.net/> , Erişim tarihi: 27 Mayıs 2020.
- [48] Filament Teknik ve Mekanik Özellikleri. Colorfabb, <https://colorfabb.com/filaments> , Erişim tarihi: 05 Mart 2020.
- [49] TSE, 2012, TS EN ISO 527-1, Plastikler - Çekme Özelliklerinin Tayini – Bölüm 1: Genel Prensipler, 21 s.
- [50] TSE, 2012, TS EN ISO 527-2, Plastikler - Çekme Özelliklerinin Tayini - Bölüm 2 -Kalıplama ve Ekstrüzyon Plastikleri İçin Deney Şartları, 11 s.
- [51] ASTM D 638, Designation: D638–14, Standardtest Method For Tensile Properties Of Plastics (Plastiklerde Çekme Özellikleri İçin Standart Test Metodu).
- [52] EFE, S. Fdm Tipi 3 Boyutlu Yazıcılardaki Örgü Parametrelerinin Ürün Dayanımına Etkisi. Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği, Makine Tasarım Ve İmalat. Sakarya, 2020, 85 s. (Yüksek Lisans Tezi).

- [53] Filiz Plastik, Teknik Özellikler, Pet-G Levha https://filizplastik.com.tr/_userfiles/dosyalar/urun/pet-g-simolux-levhalar/pet-g.pdf, Erişim tarihi : 10.02.2020.
- [54] Von Mises Gerilmesi, <http://www2.isikun.edu.tr/personel/ahmet.aran/>, Erişim tarihi : 10.12.2020.
- [55] Voksel, Teknik Özellikler, <http://www.voksel.com.tr/markalar/karsilastirmatablosu/75> , Erişim tarihi:05.12.2019.
- [56] Callister, W.D., Rethwisch, D.G. Materials Science and Engineering. Ed.: Prof. Dr. Kenan Genel, Nobel, Ankara, 2014, 974 s.
- [57] Leeb, Portatif Sertlik Ölçme Cihazı, <http://www.dgcndt.com.cn/en/product12/73.html>, Erişim tarihi: 08.12.2019..
- [58] Yamer, Ölçü Aletleri Ürün Kataloğu, http://dosya.yamer.com.tr/urun_katalogu_2019.pdf Erişim tarihi: 05.12.2020.
- [59] ASTM D 785 , Plastik Malzemelerin Rockwell Sertlik Ölçümü Deney Metodu.
- [60] ASTM D 2240, Durometre İle Kauçuk Malzemelerin Standart Deney Metodu.
- [61] ASTM D 2583,Barkol Yöntemiyle Rijit Plastiklerin Batmalı Sertlik Ölçümü İçin Standart Deney Metodu.
- [62] TSE, 1988, TS 971, Yüzey Pürüzlülüğü-Parametreler ve Pürüzlülük Tespiti Kuralları, Ankara, 6 s.
- [63] Evlen, H., Erel, G., Yılmaz, E. Açık Ve Kapalı Sistemlerde Doluluk Oranının Parça Mukavemetine Etkisinin İncelenmesi(Araştırma Makalesi). Politeknik Dergisi. 2018, 21(3), 651-662.
- [64] DIN EN ISO 1183, Plastikler - Gözeneksiz Plastiklerin Yoğunluk Tayin Yöntemleri.
- [65] Vetterli, M., Schmid, M., Wegener, K. Comprehensive Investigation of Surface Characterization Methods for Laser Sintered Parts. Fraunhofer Direct Digital Manufacturing Conference, Berlin,2014.
- [66] Subramanian, K. Surface Engineering , ASM Handbook, Vol. 5, Ohio, ABD, 1994.
- [67] Pollard, D., Ward, C., Herrmann, G., Etches, J. The Manufacture Of Honeycomb Cores Using Fused Deposition Modeling, Advanced Manufacturing: Polymer & Composites Science, 2017, 3 (1), 21-31.
- [68] Frederic, R., Krawczak, P. (2015). 3D-Printing Of Thermoplastic Structures By FDM Using Heterogeneous Infill And Multi-Materials: An Integrated Design-Advanced Manufacturing Approach For Factories Of The Future, 22 Ème Congrès Français De Mécanique, 24 Au 28 Août, 2015, Lyon.
- [69] Poyraz, Ö., Solakoğlu, U. E., Ören, S., Tüzemen C., Akbulut, G. Surface Texture And Form Characterization For Powder Bed Additive Manufacturing. Journal Of The Faculty Of Engineering And Architecture Of Gazi University. 2019, 34(3), 1653-1664.

- [70] Groover, M. P., Fundamentals of Modern Manufacturing, 4. baskı, Hoboken-New Jersey, USA: Prentice-Hall Inc., 1996, 251-639 s.
- [71] ASM Metals HandBook Vol. 8. Mechanical Testing and Evaluation. ASM Pub., Ohio, USA,ASM Intentional, 2002, 2235 s.
- [72] Kam, M., Saruhan, H., İpekçi. A. Farklı Doldurma Şekillerinin Üç Boyutlu Yazıcılarda Üretilen Ürünlerin Mukavemetine Etkisi. Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi.2019, 7, 951-960.
- [73] Callister, W., D. Materials Science And Engineering: An Introduction, John Wiley Ve Sons. Inc. Singapore, 1985.
- [74] Yılmaz, S. Çok Yüksek Molekül Ağırlıklı Polietilenin Hidrotermal Yaşlandırma Etkisi Altındaki Kırılma Davranışı. Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makina Mühendisliği, Kocaeli, 2010, 109 s. (Yüksek Lisans Tezi).
- [75] Demirer, H., Büyükkaya, K. Polimer Malzemelerin Kırılma Davranışları ve Lineer Elastik Kırılma Mekaniği. Plastik ve Ambalaj Teknolojisi. 2004.
- [76] Callister, W.D., Rethwisch, D.G. Materials Science and Engineering. Ed.: Prof. Dr. Kenan Genel, Nobel, Ankara, 2014, 974 s.
- [77] Askeland, D., R. The Science and Engineering of Materials. Pws Publishing Company. Boston, 1994.
- [78] Kültür, S., E. Kalsit Dolgulu Polipropilenin Yorulma Davranışlarının İncelenmesi. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2005, 152 S. (Yüksek Lisans Tezi).
- [79] NX programının eklemeli imalat alanındaki kabiliyetleri, <https://www.bct-technology.com/en/support/tips-tricks/nx-1102-additive-manufacturing.html> Erişim tarihi: 07.12.2020.
- [80] Vetterli, M., Schmid, M., Wegener, K. 2014. “Comprehensive Investigation of Surface Characterization Methods for Laser Sintered Parts”, Fraunhofer Direct Digital Manufacturing Conference, Berlin.
- [81] Özyurt, E. Plastiklerin Yorulma Davranışına Kristalinite Derecesinin Etkisi. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği, İstanbul, 2003, 82 s.

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Halil TOSUN
Doğum Yeri ve Yılı : İzmir, 1980
Yabancı Dili : İngilizce
Medeni Hali : Evli (3 Çocuklu)
E-posta : haliltosun80@gmail.com



Eğitim Durumu

- 2017-(halen) Celal Bayar Üniversitesi, (Yüksek Lisans)
Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Ana Bilim Dalı,
Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bilim Dalı
- 2014-2017 Celal Bayar Üniversitesi, (Lisans)
Mühendislik Fakültesi,
Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü (Dip. Notu : 3,24 / 4)
- 2009-2012 Anadolu Üniversitesi, (Lisans)
İşletme Fakültesi,
İşletme Bölümü (Dip. Notu : 2,5 / 4)
- 1999-2001 Dokuz Eylül Üniversitesi, (Önlisans)
İzmir Meslek Yüksek Okulu,
Makine-Resim Konstrüksiyon Bölümü (Dip. Notu : 2,61 / 4)

Mesleki Deneyim:

- 04.11-Halen İzmir Büyükşehir Belediyesi - ESHOT Gen. Müd. - İzelman A.Ş
Kalite ve Kurumsal Gelişim Dairesi Başkanlığı, Tekniker
-Şehir İçi Ulaşımında Kullanılan Araçların Yedek Parçalarının Teknik Resimleri ve Üretimi Yapılacak Olan Parçaların İmalat Resimlerinin Hazırlanması
- 02.10-01.11 Lazer Mikron Markalama Kaynak San. Ve Tic. Şirketi, Tekniker
-İmalatı yapılan makinaların montajı ve imalat resimlerinin hazırlanması
- 04.06-10.08 Ektam Mak. San. Ve Tic. Şirketi, Tekniker
-İmalatı yapılan makinaların imalat resimlerinin hazırlanması
- 10.03-04.06 Lazer Metal Ltd. Şti, Tekniker
-Piyasadan gelen numunelerin teknik resimleri çizilerek, CAM programlarının hazırlanması

Ulusal ve Uluslararası Alanda Yayınlanan Makaleler:

Çelebi A., Tosun H., Önçağ A.Ç. " An Investigation of the Deformation Patterns due to the high speed Micro-Laser Drilling Process for Ti6Al4V used in Aerospace applications", Akademik Platform Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi". 8 (2), 316-325 s. (2020).

Çelebi, A., Korkmaz, A., Yılmaz, T., Tosun, H. Design And Production Of 6 Axis Robot Arm By 3d Printer. International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry, 3 (3) , 269- 278 s. (2019).

Önçağ A.Ç., Tosun H., İzmir Univesiade Oyunları Maskot Heykelinin Tersine Mühendislek Yöntemleri İle Dijitalleştirilmesi ve Küçük Ölçekli Olarak Üç Boyutlu Yazıcı İle İmalatı, Soma Meslek Yüksekokulu Teknik Bilimler Dergisi 2 (26), 1-10 s.(2018).

Çelebi A., Tosun H., Önçağ A.Ç., "Hasarlı Bir Kafatasının Üç Boyutlu Yazıcı İle İmalatı ve İmplant Tasarımı", International Journal Of 3d Printing Technologies And Digital Industry, 1(1), 27-35 s. (2017)

Ulusal ve Uluslararası Bilimsel Toplantılarda Sunulan Bildiri ve Poster Türünden Yayınlar:

Çelebi A., Tosun H. "Polylaktikasit Pla Numunelerde 3 Boyutlu Yazıcı Parametrelerinin Mekanik Özelliklere Etkisi," presented at the 3rd International Congress on 3D Printing (Additive Manufacturing) Technologies and Digital Industry , 2018.

Önçağ A.Ç., Tosun H., "Redesign Of A Damaged Bus Part With Reverse Engineering And Manufacturing of Its Casting Model With 3d Printer", 1. Uluslararası Üniversite-Sanayi İşbirliği, Ar-Ge ve İnovasyon Kongresi, 18-19 Aralık 2017

Çelebi A., Tosun H. 'Application Of 3D Printing İn The Design Of Personal Implants' International Biotechnology Congress, 2017.

Önçağ A.Ç., Tosun H., "Digitalization Of The Sculpture Of Izmir Univesiade Mascot With Reverse Engineering Methods And Small-Scale Manufacturing With 3d Printer", 1. Uluslararası Üniversite-Sanayi İşbirliği, Ar-Ge ve İnovasyon Kongresi, 19 Aralık 2017.

Çelebi A., Çetin S., Tosun H., Önçağ A.Ç., "Kişiyeye Özel İmplant Tasarımında 3 Boyutlu Yazıcıların Kullanımı" Eskişehir Osmangazi Ünivesitesi 19. Uluslararası Katılımlı Ulusal Biyoteknoloji Kongresi, 2017.

Çelebi A., Tosun H. 'Influence of Fill Rates on The Mechanical Properties of Poly Lactic Acid (Pla) Specimen Produced by 3D Printing' The 2nd International Symposium on 3D Printing Technologies, 2017.