

T.C.
PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MEKATRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

TOPOLOJİ OPTİMİZASYONU VE ÜRETKEN TASARIM
YAKLAŞIMLARININ UÇAK YOLCU KOLTUKLARI
ÜZERİNDE UYGULANMASI VE ANALİZLERİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

DİDEM TEMEL

DENİZLİ, AĞUSTOS - 2024

**T.C.
PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MEKATRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**



**TOPOLOJİ OPTİMİZASYONU VE ÜRETKEN TASARIM
YAKLAŞIMLARININ UÇAK YOLCU KOLTUKLARI
ÜZERİNDE UYGULANMASI VE ANALİZLERİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

DİDEM TEMEL

DENİZLİ, AĞUSTOS - 2024

Bu tezin tasarımı, hazırlanması, yürütülmesi, araştırmalarının yapılması ve bulgularının analizlerinde bilimsel etiğe ve akademik kurallara özenle riayet edildiğini; bu çalışmanın doğrudan birincil ürünü olmayan bulguların, verilerin ve materyallerin bilimsel etiğe uygun olarak kaynak gösterildiğini ve alıntı yapılan çalışmalara atfedildiğine beyan ederim.

DİDEM TEMEL

ÖZET

**TOPOLOJİ OPTİMİZASYONU VE ÜRETKEN TASARIM
YAKLAŞIMLARININ UÇAK YOLCU KOLTUKLARI ÜZERİNDE
UYGULANMASI VE ANALİZLERİ
YÜKSEK LİSANS TEZİ
DİDEM TEMEL
PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MEKATRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
(TEZ DANIŞMANI: PROF. DR. HASAN ÇALLIOĞLU)**

DENİZLİ, AĞUSTOS - 2024

Teknolojinin her geçen gün hızla gelişmesiyle birlikte, var olan sistemlerin performans gereksinimleri de doğru orantılı olarak artmaktadır. Bu bağlamda, her üretimin temel başlangıcı olan tasarım aşaması da bu gereklilikler doğrultusunda değişip gelişmektedir. Yeni gelişmeler, tasarım aşamalarını iyileştirmekte ve mühendis odağını bir sonraki üretim aşamasına daha hızlı aktarmalarını sağlamaktadır. Bu tez çalışmasında, bu gelişmelerin ilk denemelerinden olan topoloji optimizasyonu ve yapay zekâ ile daha gelişmiş bir versiyonu olan üretken tasarım yaklaşımları üzerinde çalışılmıştır. Topoloji optimizasyonu ve üretken tasarım yaklaşımlarının temel amacı, performans gerekliliklerini karşılayan daha hafif yapılar oluşturmaktır. Bu sayede malzemeden tasarruf edilebilmekte, çevresel etkiler azaltılmakta ve eklemeli imalat gibi gelişmiş üretim teknikleri ile üretilebilen, çoklu parçalı yapılar tek bir yapı halinde sunulabilmektedir. Ağırlıktan tasarruf sağlamak, havacılık ve uzay sanayisinde büyük öneme sahiptir. Bu sebepten dolayı, bu tez çalışmasında uçaklarda çok sayıda bulunan yolcu koltukları üzerinde topoloji optimizasyonu ve üretken tasarım yaklaşımları incelenmiştir. Üretken tasarım sonucu oluşturulan 34 tasarım alternatifi arasından seçilen yapıda %36,2 ağırlıktan tasarruf sağlanmıştır. Üretken model, havacılık ve uzay sanayisinde çokça tercih edilen Al 6061 alaşımı kullanılarak tasarlanmıştır. Topoloji optimizasyonu tasarım kriterleri doğrultusunda, hedef gövde koltuk ayakları ve kol ile ayak arasındaki bağlayıcı gövde olarak belirlenmiştir. Sonucunda %67 ağırlık tasarrufu elde edilmiştir. Gerilme dayanımı, maksimum yer değiştirme ve güvenlik faktörü ele alındığında, yapılan analizler sonucu üretilen iki farklı yenilikçi model de güvenlik kriterlerini karşılamaktadır.

ANAHTAR KELİMELELER: Üretken Tasarım, Topoloji Optimizasyonu, Eklemeli İmalat, Uçak Yapıları, Koltuk Tasarımları, Ağırlık Tasarrufu

ABSTRACT

APPLICATION AND ANALYSIS OF TOPOLOGY OPTIMIZATION AND GENERATIVE DESIGN ON AIRPLANE PASSENGER SEATS

MSC THESIS

DİDEM TEMEL

PAMUKKALE UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE
DEPARTMENT OF MECHATRONICS ENGINEERING
(SUPERVISOR:PROF. DR. HASAN ÇALLIOĞLU)

DENİZLİ, AUGUST 2024

With the rapid development of technology, the performance requirements of existing systems are also increasing proportionally. In this context, the design phase, which is the fundamental starting point of any production, is evolving and adapting to meet these requirements. New advancements are improving design stages and enabling engineers to move on to the next production phase more quickly. This thesis focuses on topology optimization, one of the initial attempts at these advancements, and generative design approaches, a more advanced version enhanced by artificial intelligence. The primary objective of topology optimization and generative design approaches is to create lighter structures that meet performance requirements. This not only saves material but also reduces environmental impacts and allows for the production of complex multi-part structures as a single unit using advanced manufacturing techniques such as additive manufacturing. Weight savings are of great importance in the aerospace industry. Therefore, this thesis examines topology optimization and generative design approaches applied to passenger seats, which are numerous in aircraft. Among the 34 design alternatives generated through generative design, the selected structure achieved a 36.2% weight reduction. The generative model was designed using the Al 6061 alloy, which is widely used in the aerospace industry. Based on the design criteria for topology optimization, the target structure was identified as the seat legs and the connecting body between the leg and the arm. This resulted in a 67% weight reduction. Considering stress resistance, maximum displacement, and safety factor, the analyses conducted indicate that both innovative models produced meet the safety criteria.

KEYWORDS: Generative Design, Topology Optimization, Additive Manufacturing, Aircraft Structures, Seat Designs, Weight Savings

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET.....	i
ABSTRACT	ii
İÇİNDEKİLER	iii
ŞEKİL LİSTESİ	v
TABLO LİSTESİ	vii
SEMBOL LİSTESİ	viii
ÖNSÖZ.....	ix
1. GİRİŞ.....	1
1.1 Çalışmanın Amacı ve Motivasyonu	4
2. KAFES SİSTEMİNİN YAPISAL OPTİMİZASYONUNUN TÜRLERİ 5	5
2.1 Boyut Optimizasyonu	6
2.2 Malzeme Optimizasyonu	7
2.3 Şekil Optimizasyonu	8
2.4 Topoloji Optimizasyonu	8
3. ÜRETKEN TASARIM	11
3.1 Üretken Tasarım Yazılımları	13
4. ÜRETİM YÖNTEMLERİ.....	17
4.1 Eklemeli İmalat	17
4.1.1 Eklemeli İmalatta Kullanılan Teknolojiler	18
4.1.2 Eklemeli İmalatta Kullanılan Malzeme Türleri	19
4.2 Döküm	20
4.3 Frezeleme	22
4.3.1 3 Eksenli Frezeleme	23
4.3.2 5 Eksenli Frezeleme	23
5. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI.....	25
5.1 Topoloji Optimizasyonu Yaklaşımı Çalışmaları	25
5.2 Üretken Tasarım Yaklaşımı Çalışmaları	28
5.3 Geleneksel Yöntemle Üretilmiş Uçak Koltuklarının Dayanımları Üzerine Yapılmış Çalışmalar	31
5.4 Eklemeli İmalat Üzerine Yapılmış Çalışmalar	32
6. MATERYAL ve METOD.....	35
6.1 AUTODESK FUSION 360	35
6.2 ÜRETKEN TASARIM	36
6.2.1 Korunan Geometri	36
6.2.2 Engel Geometrisi	37
6.2.3 Yapısal Kısıtlamalar	38
6.2.4 Yapısal Yükler	38
6.2.5 Başlangıç Şekli	38
6.3 TOPOLOJİ OPTİMİZASYONU.....	40
6.4 MALZEME	41
6.4.1 Malzemelerin Kimyasal İçeriği	42
6.5 ÜRETİM YÖNTEMİ	44
6.6 ANALİZ YÖNTEMİ.....	44
6.7 TEORİK HESAPLAMALAR.....	46
6.8 ÇALIŞMA VERİLERİ.....	47

6.8.1	Üretken Tasarım	50
6.8.2	Topoloji Optimizasyonu	55
7.	SONUÇ ve ÖNERİLER.....	61
8.	KAYNAKLAR.....	64
9.	ÖZGEÇMİŞ.....	69

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2. 1: Yapısal Optimizasyon Örneği (Persson 2004)	5
Şekil 2. 2: Boyut, Şekil ve Topoloji Optimizasyonunun Karşılaştırılması (Chau, 2015)	6
Şekil 2. 3: Boyut, Şekil ve Topoloji Optimizasyonu Olası Permütasyonları (Kawamura 2002).....	7
Şekil 2. 4: Topoloji Optimizasyonu (Okudan 2018).....	9
Şekil 3. 1: General Motors Çoklu Braket Tasarımı (Sher 2020).....	11
Şekil 3. 2: General Motors Koltuk Braketi Tasarım Sonuçları (Sher 2020).....	12
Şekil 3. 3: Fusion 360 Üretken Tasarım Modülü (Autodesk 2021).....	13
Şekil 3. 4: CATIA Üretken Tasarım Modülü (Renishaw 2024)	14
Şekil 3. 5: Siemens NX Üretken Tasarım Modülü (Siemens 2023)	15
Şekil 3. 6: Siemens NX Üretken Tasarım Çalışması Örneği (Siemens 2017)..	15
Şekil 3. 7: SolidWorks Üretken Tasarım Modülü (Goengineer 2024)	16
Şekil 3. 8: SolidWorks Üretken Tasarım Alternatif Tasarım Çıktıları (Goengineer 2024)	16
Şekil 4. 1: Döküm Teknolojisi (Hamit Arslan 2017).....	21
Şekil 4. 2: 5 Eksenli Frezeleme Teknolojisi (Hidkom 2023).....	24
Şekil 6. 1: Üretken Tasarım Modülü Arayüzü	36
Şekil 6. 2: Korunan Geometri (Autodesk 2024)	37
Şekil 6. 3: Engel Geometrisi (Autodesk 2024)	37
Şekil 6. 4: Başlangıç Şekli (Autodesk 2024)	39
Şekil 6. 5: Topoloji Optimizasyonu Modülü Arayüzü.....	40
Şekil 6. 6: Topoloji Optimizasyonu Prosesi (Gebisa 2017).....	41
Şekil 6. 7: Fusion 360 Simülasyon Modülü	45
Şekil 6. 8: Üretken Tasarım Analizi Arttırılmış Deformasyon Seçenekleri	46
Şekil 6. 9: Optimize Edilmemiş Modelin Fiziksel Özellikleri	48
Şekil 6. 10: Optimize Edilmemiş Modelin Von Mises Gerilme Analizi	48
Şekil 6. 11: Optimize Edilmemiş Modelin Yer Değiştirme Analizi	49
Şekil 6. 12: Optimize Edilmemiş Modelin Güvenlik Faktörü Analizi.....	49
Şekil 6. 13: Üretken Tasarım Modülünün Sunduğu Tasarım Alternatifleri.....	50
Şekil 6. 14: Seçilen Üretken Modelin Tasarım Özellikleri	51
Şekil 6. 15: Üretken Modelin Von Mises Gerilme Analizi.....	52
Şekil 6. 16: Üretken Modelin Yer Değiştirme Analizi	52
Şekil 6. 17: Üretken Modelin Güvenlik Faktörü Analizi	53
Şekil 6. 18: Üretken Tasarım Modelinin Fiziksel Özellikleri	54
Şekil 6. 19: Analizin Gerçek Deformasyon Görüntüsü	55
Şekil 6. 20: Analizin 5x İle Arttırılmış Simülasyon Görüntüsü.....	55
Şekil 6. 21: Topoloji Optimizasyonu Sonucu	56
Şekil 6. 22: Topoloji Optimizasyonu Sonucuna Göre Düzenlenen Koltuk Gövdesi	57
Şekil 6. 23: Topoloji Optimizasyonu Oluşturulan Modelin Von Mises Gerilme Analizi	57
Şekil 6. 24: Topoloji Optimizasyonu Oluşturulan Modelin Yer Değiştirme Analizi	58

Şekil 6. 25: Topoloji Optimizasyonu Oluşturulan Modelin Güvenlik Faktörü Analizi	58
Şekil 6. 26: Topoloji Optimizasyonu Tasarımının Özellikleri.....	59

TABLO LİSTESİ

Sayfa

Tablo 6. 1: Alüminyum 6061 Kimyasal Bileşimi (Seykoç 2017).....	42
Tablo 6. 2: Alüminyum 6061 Mekanik Özellikleri (Seykoç 2017)	42
Tablo 6. 3: Alüminyum 7075 Kimyasal Bileşimi (Seykoç 2017).....	43
Tablo 6. 4: Alüminyum 7075 Mekanik Özellikleri (Seykoç 2017)	43
Tablo 6. 5: Titanyum 6Al-4V Kimyasal Bileşimi (Birçelik 2015)	43
Tablo 6. 6: Titanyum 6Al-4V Mekanik Özellikleri (Birçelik 2015).....	43

SEMBOL LİSTESİ

Eİ	:	Eklemeli İmalat
GM	:	General Motors
CAD	:	Bilgisayar Destekli Tasarım
CAM	:	Bilgisayar Destekli Üretim
CAE	:	Bilgisayar Destekli Mühendislik
EYM	:	Eriyik Yığıma Modelleme
SLA	:	Sterolitografi
PJM	:	Polijet Modelleme
SLS	:	Seçici Lazer Sinterleme
SLE	:	Seçici Lazer Ergitme
EIE	:	Elektron Işın Ergitme
LMS	:	Lazer Metal Biriktirme
DMLS	:	Doğrudan Metal Lazer Sinterleme
SLE	:	Seçici Lazer Eritme
DLP	:	Dijital Işık İşleme
PLA	:	Polilaktik Asit
ABS	:	Akrilonitril Bütadiyen Stiren
PETG	:	Polietilen Teraftalat Glikol
CNC	:	Bilgisayarlı Sayısal Kontrol
FEA	:	Sonlu Elemanlar Analizi
FEM	:	Sonlu Elemanlar Metodu
TO	:	Topoloji Optimizasyonu
DHM	:	DELMIA Human
İHA	:	İnsansız Hava Aracı
Ti	:	Titanyum
Al	:	Alüminyum
Mg	:	Magnezyum
Si	:	Silisyum
V	:	Vanadyum
MPa	:	Megapascal
g	:	Gram
kg	:	Kilogram
mm	:	milimetre
m	:	metre
km	:	kilometre
sa	:	saat

ÖNSÖZ

Eğitim hayatım boyunca emeği geçen tđm hocalarıma minnettirim. Lisans eğitimimde mesleğime hazırlanmamda bđyđk katkıları olan saygıdeğer hocalarıma; lisansüstđ eğitimimde alanımda gelişmeme destek olan kıymetli hocalarıma teřekkđr ederim. Bu sđre boyunca desteğini hiçbir zaman esirgemeyen danışmanım Sayın Prof. Dr. Hasan ÇALLIOĞLU'na özel bir teřekkđr borçluyum.

Hayatım boyunca beni her zaman destekleyen, doğru insan olma yolunda yetiştiren, vatana ve millete hayırlı bir evlat olma gayesiyle bđyđten sevgili annem, babam ve abim başta olmak üzere, eğitim hayatım boyunca bana rehberlik eden, oğretici ve yol gđsterici saygıdeğer Prof. Dr. Metin SAYER, Doç. Dr. Ersin DEMİR, Dr. Oğr. Üyesi Sadık ÖZDEMİR ve Arş. Gör. Said MÜFTÜ hocalarıma da ayrıca teřekkđr ederim. Destekleri, sabırları ve bilgileri ile bana her zaman ilham kaynağı oldular.

Tđm bu sđre boyunca beni destekleyen, teşvik eden ve başarılı olmam için yanımda olan arkadaşlarıma ve aileme de sonsuz teřekkđrlerimi sunarım. Bu tez, onların katkıları ve desteği olmadan mđmkđn olmazdı. Her birine ayrı ayrı řđkranlarımı sunuyorum.

1. GİRİŞ

Tasarım bir araştırma sürecidir. Mühendisler veya tasarımcılar, amaca ve konuma uygun çeşitli tasarımlar oluştururlar. Bu tasarımlar geleneksel üretim yöntemleri başta olmak üzere çeşitli üretim yöntemleri için tasarlanabilir ve oluşturulabilir. Tasarım oluşturulurken parametrelerin sayısının artması oluşturulacak tasarım hatlarının belirginleşmesi açısından önemlidir. İstenilen parametrelere uygun çeşitli tasarım seçenekleri oluşturabilmek zorlu ve uzun bir süreçtir. Gelişen teknoloji; bir çözümün olası permütasyonlarını araştırarak hızlıca tasarım seçenekleri oluşturan çeşitli tasarım yazılımları sunmaktadır. Bu sayede yazılım, mühendislerin düşünebileceğinden çok daha fazla alternatifi çok kısa bir süre içerisinde sunarak süreci hızlandırır ve mühendis odağını üretimin bir sonrası adımına aktarır. Böylece tasarım sürecinden edilen tasarruf sayesinde oluşturulacak tasarımın verimlilik ve performans çalışmaları için zaman artışı sağlanır.

Üretken tasarım ve topoloji optimizasyonu, mühendislik ve tasarım alanlarında önemli bir rol oynayan yenilikçi yaklaşımlardır. Bu konsept, tasarım süreçlerini daha etkili ve verimli hale getirerek ürünlerin performansını artırmayı amaçlar. Özellikle otomotiv, havacılık, yapısal tasarım ve elektronik gibi endüstrilerde kullanılan bu yöntemler, malzeme kullanımını optimize ederek maliyetleri düşürmeye ve enerji verimliliğini artırmaya yardımcı olur. Ayrıca, üretken tasarım ve topoloji optimizasyonu, sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmak ve çevresel etkileri minimize etmek için önemli bir araçtır. Bu alandaki teknolojik gelişmeler, mühendislik disiplinlerinde daha hafif, dayanıklı ve çevre dostu ürünlerin ortaya çıkmasına olanak tanımıştır. Topoloji optimizasyonu ve üretken tasarım, karmaşık parçaların daha etkin ve hafif olacak şekilde tasarlanmasını sağlayan mühendislik araçlarıdır. Tasarlanan karmaşık parçaların üretimi için çeşitli yöntemler kullanılabilir. Bunlar arasında 3D baskı, döküm, dövme, CNC (Computer Numerical Control) işleme ve enjeksiyon kalıplama gibi geleneksel ve modern üretim teknikleri bulunmaktadır. Örneğin, 3D baskı yöntemi, karmaşık geometrili parçaların tek parça halinde üretilmesine imkân tanır ve malzeme israfını minimize eder. Döküm ve dövme ise metal parçaların üretiminde yaygın olarak kullanılan yöntemlerdir ve

sağlam, dayanıklı parçaların üretilmesine olanak sağlar. CNC işleme, hassas ve karmaşık parçaların üretiminde etkili bir yöntemdir ve genellikle metal veya plastik parçaların üretiminde tercih edilir. Enjeksiyon kalıplama ise büyük miktarlarda plastik parça üretimi için idealdir ve karmaşık geometrili plastik parçaların seri üretimini sağlar. Bu üretim yöntemlerinin kombinasyonu, topoloji optimizasyonu ve üretken tasarım ile tasarlanan parçaların verimli bir şekilde üretilmesini sağlar, böylece maliyetler düşürülür ve ürün geliştirme süreci hızlandırılır. Bu pozitif getiriler havacılık ve uzay sanayisinde oldukça büyük gelişmeleri de beraberinde getirebilmektedir. Uçaklarda ağırlık kavramı, havacılık mühendisliğinde ve uçuş operasyonlarında merkezi bir öneme sahiptir. Uçağın toplam ağırlığı, yakıt verimliliğinden performansına, menziline taşıma kapasitesine kadar birçok faktörü doğrudan etkiler. Ağırlık tasarrufu, yük kapasitesinin artması veya uçuş performansının artması şeklinde avantajlar getirir; yani uçak menzili, irtifası, dayanıklılığı, uçuş hızı gibi özellikler artar ve dolayısıyla yakıt tüketimi ve emisyonlar azalır (Hub 2019). Daha hafif bir uçak, daha az yakıt tüketir, bu da hem operasyonel maliyetleri düşürür hem de çevresel etkiyi azaltır. Havayolu şirketleri için yakıt maliyetleri, toplam işletme giderlerinin büyük bir kısmını oluşturduğundan, ağırlığın optimize edilmesi büyük maliyet tasarrufları sağlar. Ayrıca, ağırlığın azaltılması, uçağın taşıyabileceği yük miktarını artırır, böylece ticari uçuşlarda karlılığı maksimize eder. Ağırlığın düzgün yönetilmesi, uçağın aerodinamik performansını ve manevra kabiliyetini de iyileştirir, bu da güvenlik ve etkinlik açısından büyük bir avantaj sağlar. Örneğin, daha hafif uçaklar daha kısa pistlerden kalkış yapabilir ve daha hızlı tırmanış gerçekleştirebilir, bu da özellikle yoğun hava trafiği olan havalimanlarında operasyonel esneklik sunar. Ayrıca, uçuş sırasında ağırlığın azaltılması, yolcu konforunu ve güvenliğini de olumlu yönde etkiler. Daha düşük ağırlık, türbülans gibi dış etkenlere karşı uçağın daha stabil bir şekilde tepki vermesini sağlar, bu da yolcuların daha az sarsıntı hissetmesi anlamına gelir. Güvenlik açısından ise, daha hafif uçaklar acil durumlarda daha kısa mesafede iniş yapabilir ve daha hızlı durabilir, bu da olası tehlikeleri minimize eder. Bu şekilde, ağırlık azaltımı sadece ekonomik faydalar sağlamakla kalmaz, aynı zamanda yolcu güvenliği ve konforunu da artırır.

Ağırlık tasarrufu sağlamak için kullanılan yeni malzemeler ve üretim teknikleri, havacılık endüstrisinin sürekli olarak gelişmesine katkıda bulunur.

Yenilikçi malzemelerin ve teknolojilerin kullanımı, uçakların daha hafif olmasını sağlar ve böylece daha verimli ve çevre dostu uçaklar üretmek mümkün olur. Bu, havacılık endüstrisinin sürdürülebilirlik çabalarına da katkıda bulunurken, aynı zamanda sektördeki rekabeti artırarak daha ileri teknolojiye dayalı çözümleri teşvik eder. Bu bağlamda, ağırlık azaltımı ve verimliliği artırma çabaları, havacılık endüstrisinin gelecekteki büyümesi ve gelişimi için kritik bir rol oynar. Sonuç olarak, uçak tasarımında ağırlığın azaltılması, havacılık endüstrisi için sürekli bir hedef ve önemli bir mühendislik meydan okumasıdır. Bu çaba, ekonomik, çevresel, güvenlik ve teknolojik açılardan havacılık endüstrisinin daha sürdürülebilir ve rekabetçi olmasını sağlar.

Uçaklarda genellikle dört ana yolcu kategorisi bulunur. Bunlar, ekonomi sınıfı, premium ekonomi sınıfı, iş sınıfı ve birinci sınıftır. Bu sınıflar arasındaki en belirgin farklardan biri, koltukların tasarımı ve özellikleridir. Ekonomi sınıfı, standart koltuk düzenlemesi ve hizmetleri sunan temel bir sınıftır. Koltuklar genellikle daha dar ve daha az aralıklıdır. Yolcular arasındaki mesafe daha azdır ve koltuklar genellikle temel ve basit bir yapıya sahiptir. Premium ekonomi sınıfı, biraz daha fazla konfor ve ek hizmetler sunar. Koltuklar genellikle ekonomi sınıfına göre daha geniş ve daha fazla aralıklıdır. İş sınıfı, daha geniş koltuklar bulunur ve lüks bir tasarıma sahiptir, tam yatar pozisyona dönüştürülebilir ve daha fazla özellik sunar. Ayrıca daha fazla ayak alanı ve daha iyi yiyecek içecek seçenekleri de sunar. Birinci sınıfı ise en üst düzeyde konfor sağlar, en lüks tasarıma sahiptir, yolcular arasındaki mesafe çok fazladır ve koltuklar genellikle kişisel odalara benzer bir düzenleme ile sunulur. Her havayolu şirketi ve uçak tipi farklı özelliklere ve kategorilere sahip olabilir, ancak genellikle bu dört kategoriye dayanır. Ekonomi sınıfı koltuklar endüstriyel anlamda en yaygın kullanılan ve pazarda en büyük paya sahip olanlardır (Erden ve Yayla 2021).

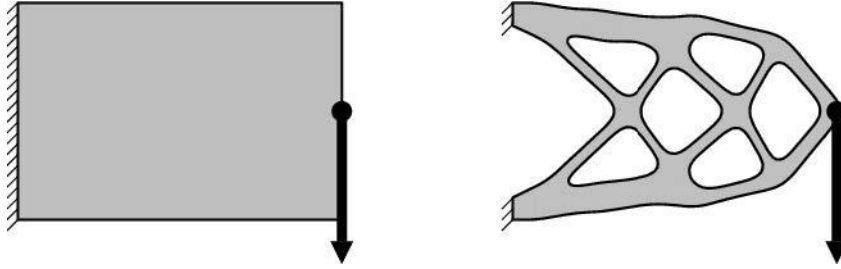
Yeni araçların geliştirilmesinde, artan müşteri konfor gereksinimleri ve artan güvenlik düzenlemeleri genellikle bir ağırlık artışına neden olur. Bununla birlikte, azalan yakıt tüketimi talebini karşılayabilmek için ürün geliştirme sürecinde karmaşık ve ince hafif yapıların uygulanması gerekmektedir (Junk ve Rothe 2022).

1.1 Çalışmanın Amacı ve Motivasyonu

Pazardaki en büyük paya sahip olan ekonomi sınıfı uçak koltuklarında, yenilikçi tasarım yöntemleri kullanılarak farklı tasarım seçenekleri elde etmek ve ağırlığı azaltılmış yolcu koltuklarını üretmek hedeflenmektedir. Bu tasarım çalışmaları, yapılan analizler sonucunda üretilebilir ve uçuş güvenliğini sağlayacak seçeneklerin belirlenmesini amaçlamaktadır. Üretken tasarım ve topoloji optimizasyonu gibi gelişmiş yöntemler kullanılarak, koltuk tasarımlarının performansını ve konforunu artırmak hedeflenmektedir. Bu yenilikçi yaklaşımlar sayesinde, uçak koltuklarının daha hafif, dayanıklı ve ergonomik olması sağlanacak, böylece hem maliyetler düşürülecek hem de yolcu konforu artırılabilecektir. Ayrıca, güvenlik standartlarına uyum sağlanarak, uçuş sırasında oluşabilecek olumsuz etkilere karşı dirençli koltuklar tasarlanacaktır. Bu çalışma, endüstrideki tasarım yaklaşımlarına önemli katkılarda bulunarak hem çevresel hem de ekonomik açıdan sürdürülebilir çözümler sunmayı amaçlamaktadır.

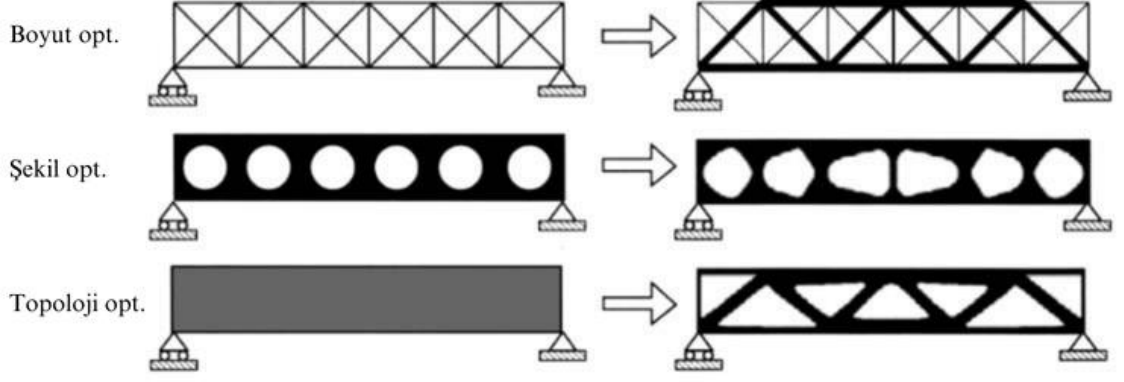
2. KAFES SİSTEMİNİN YAPISAL OPTİMİZASYONUNUN TÜRLERİ

Kafes sisteminin yapısal optimizasyonu, kafes yapılarının tasarımında ve analizinde kullanılan yöntemlerin bir bütünüdür. Bu optimizasyon, kafes yapılarının mukavemetini, dayanıklılığını ve performansını artırmak için yapısal özelliklerin en uygun şekilde belirlenmesini sağlar. Bu optimizasyon yöntemi genellikle boyut optimizasyonu, şekil optimizasyonu, malzeme optimizasyonu ve topoloji optimizasyonu gibi alt kategorilere ayrılır (Brackett ve diğ. 2011; Liu ve diğ. 2018). Yapısal optimizasyonun amacı, bir yapının performansını maksimize ederken malzeme ve üretim maliyetlerini minimize etmek için optimal şekli, boyutu ve yapılandırmayı bulmaktır (Özkara 2023). Hangi optimizasyon türünün kullanılacağı, yapı elemanının tasarım hedeflerine, uygulama alanına ve kısıtlarına bağlı olarak belirlenir. Her bir optimizasyon türü, farklı mühendislik problemlerine uygun çözümler sunabilir.



Şekil 2. 1: Yapısal Optimizasyon Örneği (Persson 2004)

Şekil 2.1'de, bir kafes yapısının yapısal optimizasyonunun modellenmesi gösterilmektedir.



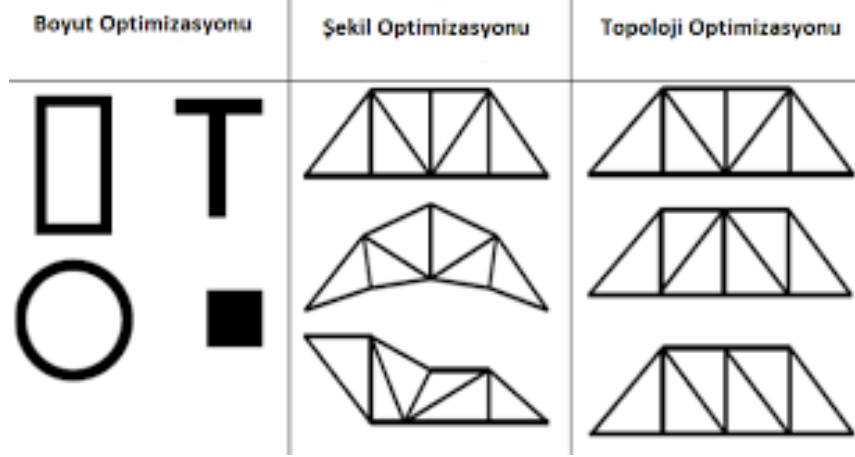
Şekil 2. 2: Boyut, Şekil ve Topoloji Optimizasyonunun Karşılaştırılması (Chau 2015)

Şekil 2.2'de, bir kafes yapısının boyut, şekil ve topoloji optimizasyonu seçeneklerine göre üretim alternatifleri gösterilmektedir (Sigmund 2020).

2.1 Boyut Optimizasyonu

Boyut optimizasyonu, yapısal bir sistemin boyutlarının en uygun şekilde belirlenmesini amaçlayan bir optimizasyon yöntemidir. Bu yöntem, belirli bir yapısal performans kriteri altında sistemdeki malzeme miktarını minimize ederek veya belirli bir malzeme miktarı altında yapısal performansı maksimize ederek gerçekleştirilir. Bu optimizasyon türünde, objenin şekil yapısına ya da malzeme dağılımına dokunulmadan kesit alanı, uzunluk gibi boyut ve ölçüleri optimize edilir (Erol 2019). Genellikle bir yapı elemanının boyutlarının belirlenmesinde kullanılır. Örneğin, bir çelik çerçevenin çubuklarının çaplarının veya bir kirişin kesit alanının belirlenmesi gibi durumlarda boyut optimizasyonu uygulanabilir. Boyut optimizasyonu genellikle bir dögüsel süreç olarak gerçekleştirilir. Başlangıçta, yapısal modelde belirli bir boyutlandırma varsayılır ve bu model analiz edilir. Ardından, yapısal performans kriterlerine göre modeldeki boyutlar ayarlanır ve süreç tekrarlanarak en uygun boyutlar belirlenir. Bu optimizasyon türü, malzeme ve maliyet tasarrufu sağlamak için yaygın olarak kullanılır. Ayrıca, yapısal sistemlerin performansını artırmak ve ağırlığı azaltmak amacıyla da kullanılabilir.

Boyut, şekil ve topoloji optimizasyonu yöntemlerinin grafiksel gösterimi Şekil 2.3'te belirtilmiştir (Top ve diğ. 2019).



Şekil 2. 3: Boyut, Şekil ve Topoloji Optimizasyonu Olası Permütasyonları (Kawamura 2002)

2.2 Malzeme Optimizasyonu

Malzeme optimizasyonu, yapısal mühendislik projelerinde malzeme seçimi ve kullanımını optimize etmek için önemli bir araçtır. Bu optimizasyon süreci, bir yapıda kullanılacak malzemenin en uygun şekilde belirlenmesini ve yapısal performansı artırmayı amaçlar. İlk adımda, yapı için uygun malzemenin seçimi yapılır, bu seçim uygulanacak yükler ve çevresel koşullar gibi faktörlere bağlı olarak gerçekleşir. Ardından, seçilen malzemenin mekanik, termal, elektriksel ve diğer özellikleri belirlenir. Bu özellikler, malzemenin gerçek davranışını ve performansını belirleyen önemli parametrelerdir. Daha sonra, malzemenin özellikleri deneysel testler veya literatürde bulunan veriler kullanılarak karakterize edilir. Yapısal analizler yapılarak, seçilen malzemenin mukavemeti, gerilme dayanımı ve deformasyonları değerlendirilir. Analiz sonuçlarına dayanarak, yapı için en uygun malzeme seçilir ve malzemenin yapı içindeki konumu ve dağılımı optimize edilir. Bu süreç, yapısal performansı artırmak, maliyeti azaltmak veya ağırlığı minimize etmek gibi farklı hedeflere yönelik olarak gerçekleştirilir. Sonuç olarak, malzeme optimizasyonu, yapısal mühendislik projelerinde malzeme seçimi ve kullanımını optimize etmek için etkili bir araçtır. Doğru malzeme seçimi ve yapı içinde etkin bir şekilde kullanılması yapısal performansı artırabilir ve maliyetleri düşürebilir.

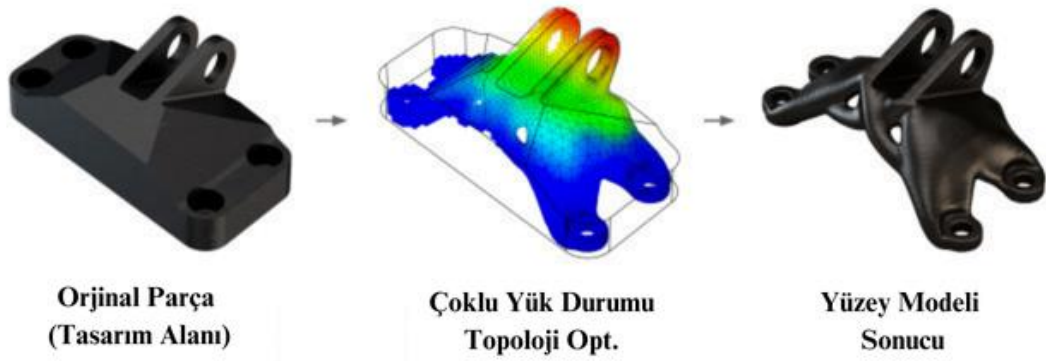
2.3 Şekil Optimizasyonu

Şekil optimizasyonu, yapısal mühendislikte önemli bir optimizasyon yöntemidir ve bir yapı elemanının geometrik şeklini optimize etmeyi amaçlar. Yapının dış sınırlarını ve deliklerinin geometrilerinin değiştirilmesi yani şekil yönünden optimize edilmesidir. Yapının delik görünüşleri değişse de topolojisi değişmez (Erol 2019). Bu yöntem, yapı elemanının geometrik şeklini değiştirerek belirli bir yapısal performansı sağlamak için kullanılır. Şekil optimizasyonu genellikle bir yapı elemanının verimli kullanılması, ağırlığının azaltılması veya dayanıklılığının artırılması gibi hedeflerle uygulanır. Süreç, belirli adımları içerir. Öncelikle, problem tanımlanır ve yapı elemanının mevcut geometrisi oluşturulur veya içeri alınır. Daha sonra, yapı elemanının üzerindeki yükler ve sınırlamalar belirlenir ve analiz yapılır. Analiz sonuçlarına göre, bir optimizasyon algoritması kullanılarak yapı elemanının geometrisi iteratif olarak değiştirilir ve en uygun geometrik şekil bulunmaya çalışılır. Son olarak, elde edilen sonuçlar değerlendirilir ve optimize edilmiş geometrik şekil incelenir. Şekil optimizasyonu, mühendislerin yapı elemanlarını en etkili şekilde tasarlamalarına ve performans hedeflerini karşılamalarına yardımcı olur, böylece yapısal mühendislik projelerinde verimliliği artırır.

2.4 Topoloji Optimizasyonu

Kafes yapıları üretmek için kullanılan yöntemlerden biri olan topoloji optimizasyonu, optimal formlar elde etmek için etkili bir araç olarak belirtilmiştir (Top ve diğ. 2019). Bir yapı elemanının en etkin şekilde yerleştirilmesini ve malzemenin en verimli şekilde kullanılmasını sağlayan bir yapısal optimizasyon yöntemidir. Bu yöntem, bir yapı elemanının iç geometrisini değiştirerek belirli bir yapısal performansı elde etmeyi amaçlar. Genellikle, bir yapı elemanının ağırlığını azaltmak veya dayanıklılığını artırmak için kullanılır. Topoloji optimizasyonu süreci, belirli adımları içerir. Öncelikle, problem tanımlanır ve yapı elemanının dış sınırları belirlenir. Daha sonra, yükler, sınırlamalar ve diğer tasarım gereksinimleri belirlenir ve analiz yapılır. Analiz sonuçlarına dayanarak, bir optimizasyon algoritması kullanılarak malzeme dağılımı veya yapı elemanının iç geometrisi iteratif olarak

değiştirilir ve en uygun yerleşim ve malzeme dağılımı bulunmaya çalışılır. Son olarak, elde edilen sonuçlar değerlendirilir ve optimize edilmiş yapı elemanı incelenir. Topoloji optimizasyonu, mühendislerin malzeme kullanımını optimize etmelerine ve yapı elemanlarını en verimli şekilde tasarlamalarına yardımcı olur, böylece ağırlık azaltma, dayanıklılık artırma ve maliyet tasarrufu gibi hedefleri başarıyla gerçekleştirir. Bu yöntem, yapısal mühendislik projelerinde önemli bir rol oynar ve yenilikçi tasarım çözümleri sunar.



Şekil 2. 4: Topoloji Optimizasyonu (Okudan 2018)

Bu optimizasyon türleri arasında topoloji optimizasyonu, mühendisler ve tasarımcılar için ön tasarım gerektirmeden yeni tasarım fikirleri sunduğundan en kapsamlı yöntemdir (Liu ve diğ. 2019).

Şekil optimizasyonu ve topoloji optimizasyonu arasındaki fark, tasarım problemini çözme yaklaşımları ve hedefleriyle ilgilidir. Şekil optimizasyonu, mevcut bir tasarımın geometrisinin yüzey veya sınırlarını optimize ederek performansını artırmayı amaçlar. Topoloji optimizasyonu ise bir bileşenin veya yapının içindeki malzeme dağılımını optimize eder. Tasarım alanı içinde malzemenin nerede bulunması veya çıkarılması gerektiğini belirleyerek, yapının en verimli formunu bulur. Şekil optimizasyonu, ağırlığı azaltmak veya gerilme konsantrasyonlarını minimize etmek için mevcut bir yapının kenarlarını veya yüzeylerini yeniden şekillendirmek için kullanılır. Topoloji optimizasyonu ise genellikle bir tasarımın en başında kullanılır ve yapı tamamen yeniden oluşturulabilir. Tasarım alanı içinde hangi bölgelerin malzemeyle doldurulması gerektiğini, hangilerinin boş

bırakılacağını belirlemek için kullanılır. Şekil optimizasyonu sonucunda, orijinal tasarımın genel formu korunur, ancak şekli iyileştirilmiş bir versiyon elde edilir. Topoloji optimizasyonu sonucunda ise genellikle geleneksel tasarım yöntemlerine göre daha karmaşık ve organik formlar ortaya çıkarır ve bu formlar, genellikle üretken tasarım süreçlerinin bir parçası olarak kullanılır. Yani şekil optimizasyonu, var olan bir tasarımın ince ayarını yaparken, topoloji optimizasyonu genellikle yeni ve inovatif formlar yaratır.

3. ÜRETKEN TASARIM

Üretken tasarım (ÜT), geleneksel tasarım metodolojilerinden ayrılarak bilgisayar destekli tasarım (CAD), simülasyonlar ve optimizasyon araçlarının bütünleşmiş kullanımını içeren bir yaklaşımdır. Bu yöntem, tasarım parametreleri ve kısıtları belirlendikten sonra bilgisayar algoritmaları ve yapay zekâ kullanılarak otomatik olarak çok çeşitli tasarım seçenekleri üretir. Üretken tasarımın kullanılabileceği alanlar oldukça geniştir. Mühendislik, endüstriyel tasarım, mimarlık ve imalat sektörlerinde yaygın olarak kullanılır. Ulaşım araçları, özellikle uçaklar gibi havacılık sektöründe, üretken tasarımın önemi büyüktür. Bu alanda üretken tasarım, aerodinamik performansı artırmak, ağırlığı azaltmak ve yakıt tüketimini düşürmek gibi önemli hedefleri gerçekleştirmeye yardımcı olabilir. Örneğin, uçak parçalarının hafifletilmesi ve mukavemetlerinin artırılması gibi karmaşık yapısal problemler, üretken tasarım ile çözülebilir.



Şekil 3. 1: General Motors Çoklu Braket Tasarımı (Sher 2020)

2018 yılında General Motors (GM) ve Autodesk iş birliği kapsamında üretken tasarım kullanılarak bir koltuk braketini üretilmiştir. Bu bileşen, bir aracın koltukları ve emniyet kemeri tokaları için sağlam bir temel sağlar ve genellikle yaklaşık sekiz ayrı

parçadan oluşur, bu parçalar birkaç farklı otomotiv tedarikçisinden temin edilir. Üretken tasarım ile tasarlanan ve eklemeli imalat ile üretilen braket, standart parçadan %40 daha hafif ve %20 daha güçlüdür. GM, bu tür parçaların üretiminde eklemeli imalat (Eİ) ile maliyet avantajı sağlayabileceği öngörmektedir (Voxel matters 2020).



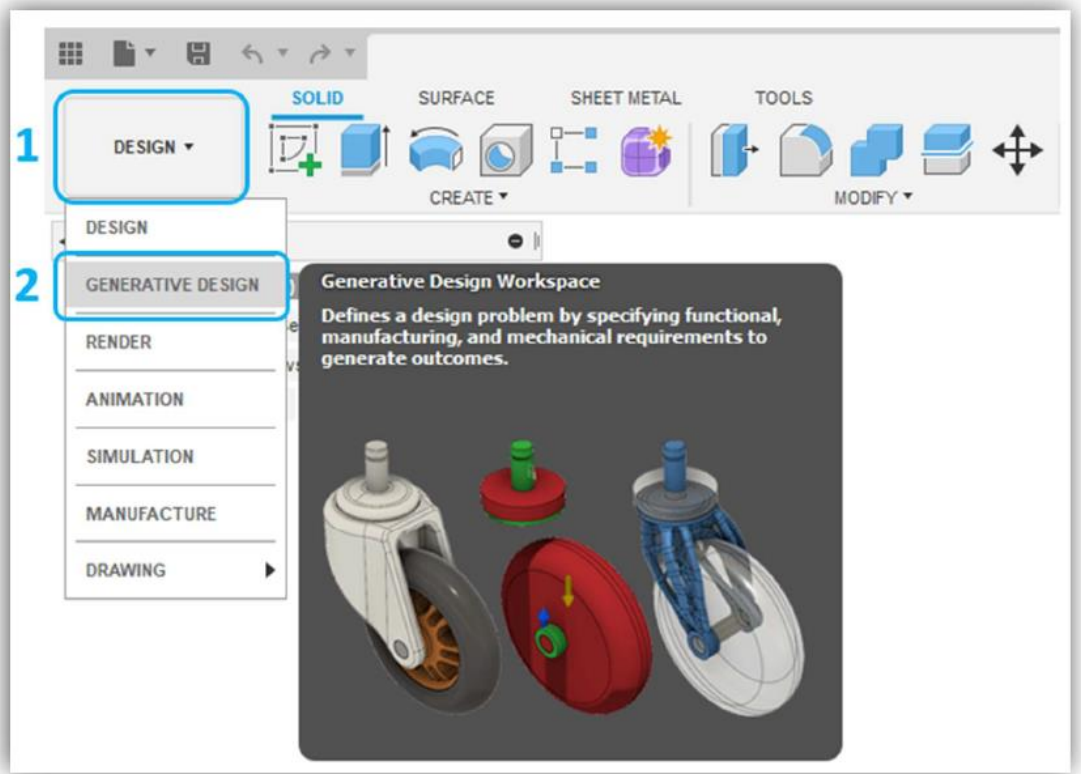
Şekil 3. 2: General Motors Koltuk Braketi Tasarım Sonuçları (Sher 2020)

Geleneksel tasarıma kıyasla üretken tasarımın önemli avantajları vardır. Öncelikle, çok çeşitli tasarım seçeneklerinin otomatik olarak üretilmesi, tasarım sürecini hızlandırır ve tasarımcının yaratıcılığına geniş bir alan sunar. Ayrıca, üretken tasarım genellikle daha optimize ve verimli sonuçlar elde etmeye yardımcı olur, çünkü tasarım parametreleri ve kısıtları doğrudan algoritma tarafından değerlendirilir ve optimize edilir. Bu da daha iyi performans, daha düşük maliyet ve daha sürdürülebilir tasarımların elde edilmesini sağlar. Aynı zamanda üretken tasarım, çevreci açıdan da önemli avantajlar sunar. Bu metodoloji, malzeme ve enerji kullanımını optimize ederek atıkları azaltmaya ve çevresel etkiyi en aza indirmeye yardımcı olabilir. Özellikle ulaşım araçları gibi büyük ölçekli ürünlerin tasarımında, hafifletilmiş ve daha verimli parçalar üreterek yakıt tüketimini düşürebilir, emisyonları azaltabilir ve kaynakların daha verimli kullanılmasını sağlayabilir. Ayrıca, üretken tasarımın optimize edilmiş yapısal çözümler üretmesi sayesinde, ürünlerin daha uzun ömürlü olması ve bakım gereksinimlerinin azalması gibi faktörler de çevresel sürdürülebilirlik açısından önemlidir. Bu nedenle, üretken

tasarım çevresel etkiyi azaltmak ve sürdürülebilir üretim ve tüketim uygulamalarını teşvik etmek için güçlü bir araç olabilir.

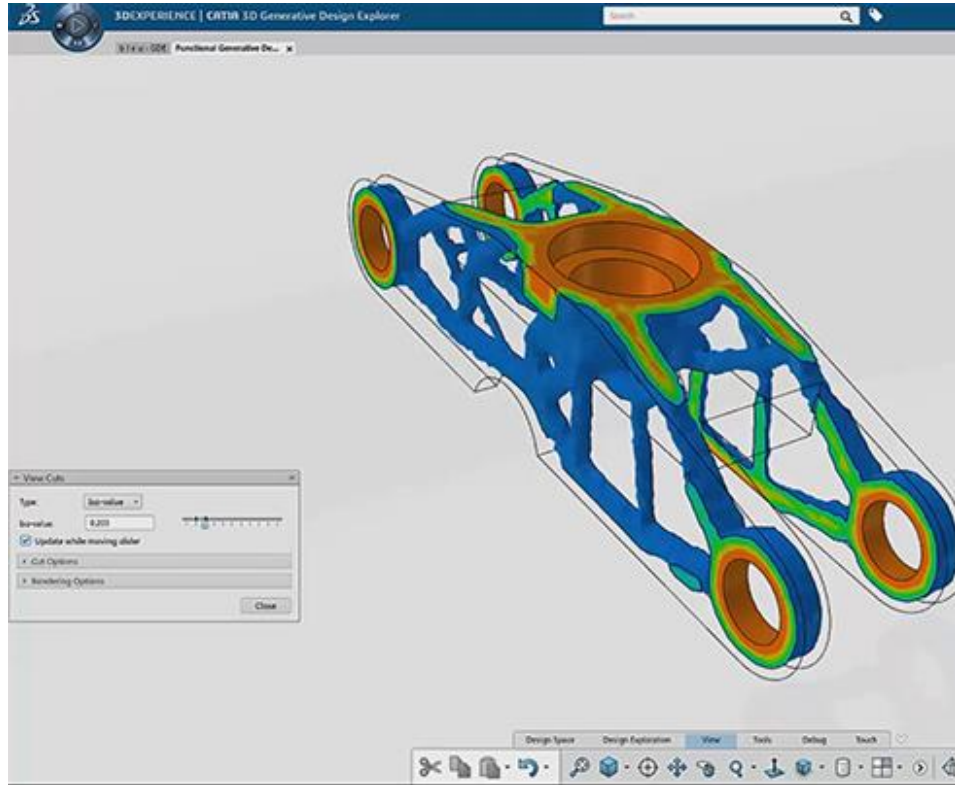
3.1 Üretken Tasarım Yazılımları

Üretken tasarım genellikle bilgisayar destekli tasarım yazılımlarıyla gerçekleştirilir. Bu yazılımlar arasında SolidWorks, CATIA, Autodesk, Siemens NX, gibi popüler platformlar bulunur. Bu yazılımlardan birisi olan Autodesk Fusion 360, belirli kısıtlamalar ve hedefler doğrultusunda çeşitli tasarım seçeneklerini keşfetmeyi sağlayan güçlü bir üretken tasarım modülüne sahiptir. Fusion 360'ta ki üretken tasarım araçları, kullanıcıların belirli kısıtlamalar ve performans kriterleri doğrultusunda optimize edilmiş tasarım alternatifleri oluşturmasına olanak tanır. Bu süreç, tasarımcıların daha hafif, daha güçlü ve daha verimli ürünler üretmesini sağlayarak, yenilikçi çözümler sunar.



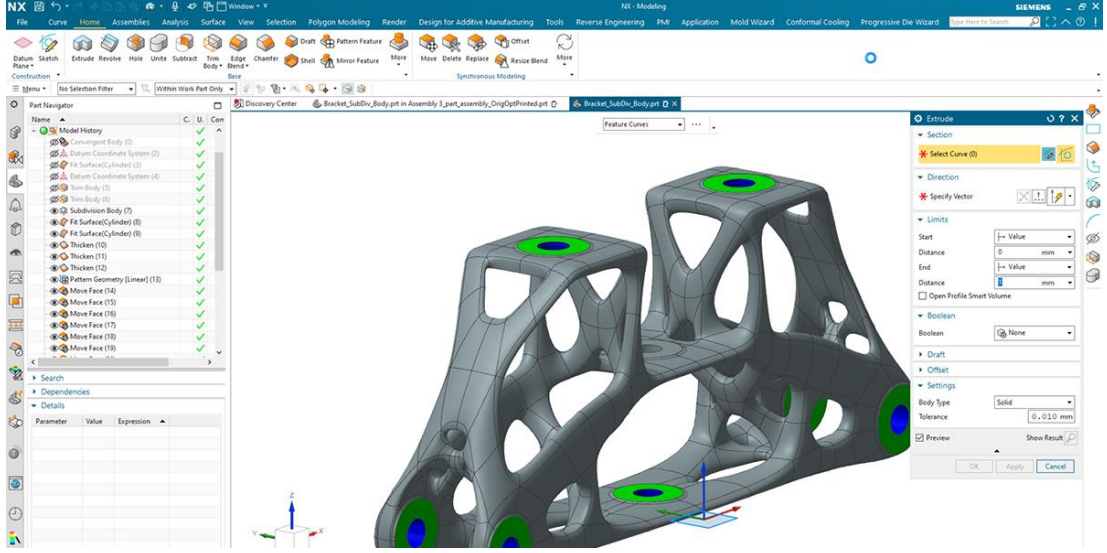
Şekil 3. 3: Fusion 360 Üretken Tasarım Modülü (Autodesk 2021)

CATIA, mühendislik ve tasarım araçlarının kapsamlı bir paketinin bir parçası olarak üretken tasarım yetenekleri sunar ve kullanıcıların ağırlık, dayanıklılık ve imalat kısıtlamaları gibi çeşitli parametreler için tasarımları optimize etmelerine olanak tanır. CATIA Üretken Tasarım Mühendisliği, uzman olmayanların bir işlevsel spesifikasyondan optimize edilmiş kavramsal parçaları tek bir tuşa basarak otomatik olarak oluşturmalarını sağlar. Girdileri değiştirerek, tasarımcılar birden fazla varyasyon oluşturup karşılaştırabilir ve analiz edebilir (Dassault Systemes 2024).

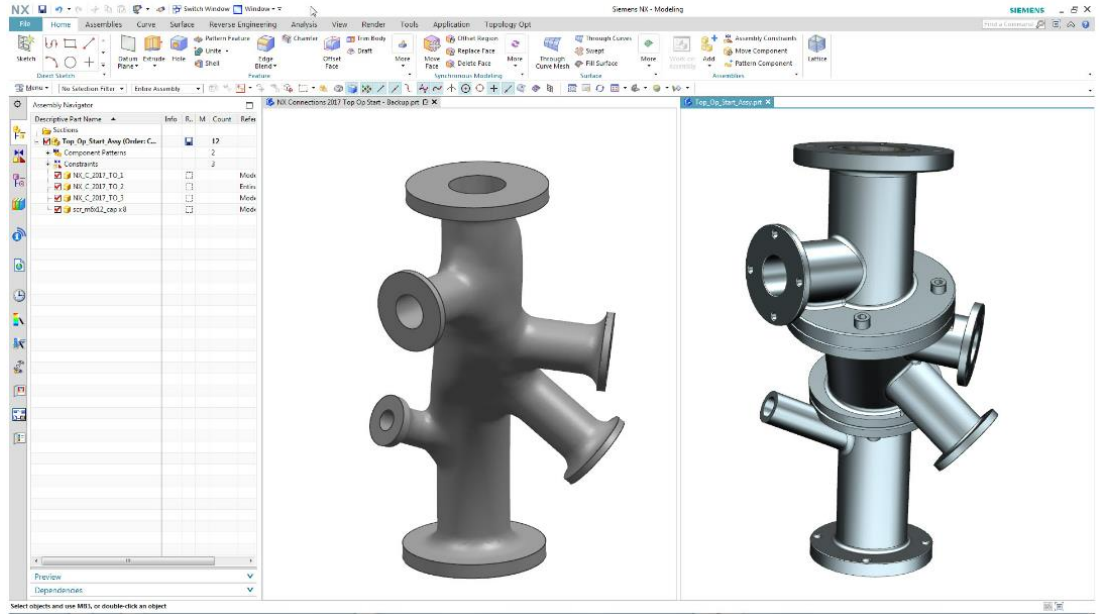


Şekil 3. 4: CATIA Üretken Tasarım Modülü (Renishaw 2024)

Siemens NX, bilgisayar destekli tasarım (CAD), bilgisayar destekli mühendislik (CAM) ve bilgisayar destekli imalat (CAE) yazılım paketi içinde üretken tasarım işlevselliği sunar ve kullanıcıların performans, imalat ve maliyet açısından tasarımları optimize etmelerine olanak tanır (Siemens NX 20232).

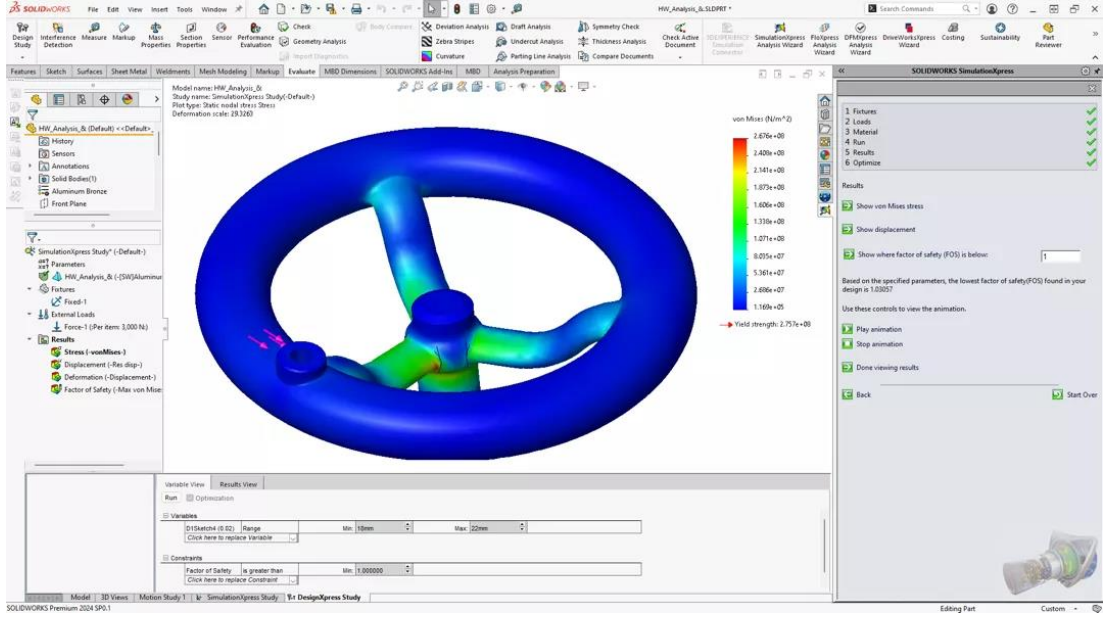


Şekil 3. 5: Siemens NX Üretken Tasarım Modülü (Siemens 2023)

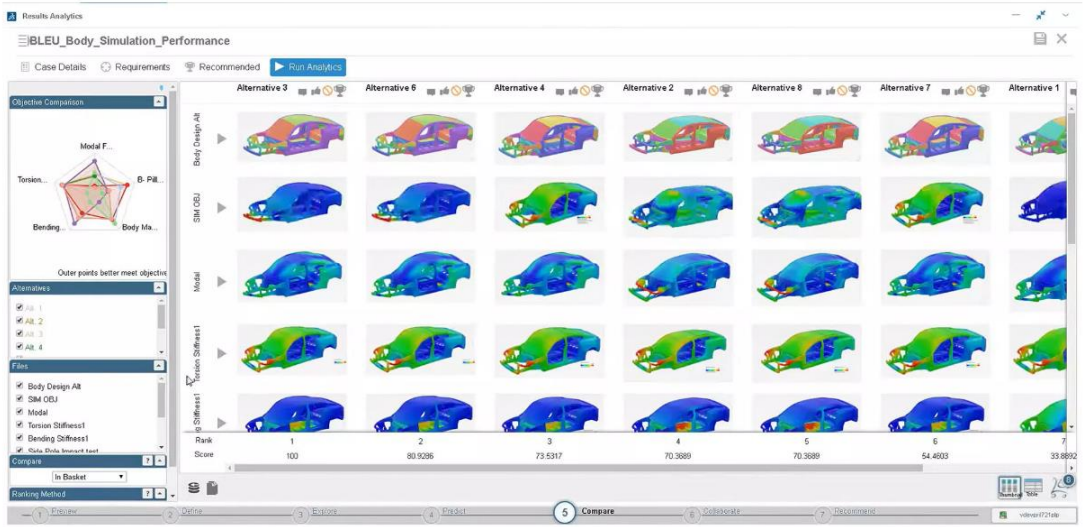


Şekil 3. 6: Siemens NX Üretken Tasarım Çalışması Örneği (Siemens 2017)

SolidWorks, belirli kriterler ve kısıtlamalar doğrultusunda tasarımları keşfetme ve optimize etme imkânı sunan üretken tasarım araçlarına sahiptir. Bu da tasarım sürecini optimize etmeye ve genel verimliliği artırmaya yardımcı olur. Bunlar dışında diğer yazılım uygulamaları da üretken tasarım yetenekleri sunar veya özel üretken tasarım platformlarıyla entegre olabilir.



Şekil 3. 7: SolidWorks Üretken Tasarım Modülü (Goengineer 2024)



Şekil 3. 8: SolidWorks Üretken Tasarım Alternatif Tasarım Çıktıları (Goengineer 2024)

4. ÜRETİM YÖNTEMLERİ

Üretken tasarım ve topoloji optimizasyonu ile tasarlanan parçalar, genellikle karmaşık geometrilere ve özgün yapı şekillerine sahip olur. Bu tür karmaşık tasarımlar, geleneksel üretim yöntemleriyle üretilebilme olasılığını önemli ölçüde azaltır. Geleneksel üretim yöntemleri, döküm, dövme ve CNC işleme gibi teknikler, genellikle daha basit ve tekrarlanabilir şekiller üretmek için uygundur. Ancak, üretken tasarım ve topoloji optimizasyonu ile elde edilen parçalar, organik formlar, içi boş yapılar ve detaylı iç geometriler içerebilir. Bu nedenle, bu tür parçaların üretimi için genellikle eklemeli imalat gibi ileri üretim teknolojilerine ihtiyaç duyulur. Eklemeli imalat, malzemenin katman katman eklenerek şekillendirilmesi prensibine dayandığından, karmaşık ve detaylı tasarımların yüksek hassasiyetle üretilmesine olanak tanır ve bu sayede geleneksel yöntemlerle üretimi zor veya imkânsız olan parçalar başarıyla üretilebilir. Ayrıca talaş, soğutucu sıvılar gibi çevreye zarar verici atıkların çıkmıyor olması bu üretim yöntemini avantajlı kılan özelliklerdendir (Dedeakayoğulları ve Kaçal 2020).

4.1 Eklemeli İmalat

Eklemeli imalat, malzemenin katman katman eklenerek istenilen parçanın oluşturulduğu bir üretim yöntemidir. 1980'lerdeki ilk adımlarından bu yana teknoloji, yıllar içinde birçok yenilik ve ilerleme ile önemli bir gelişim göstermiştir ve çeşitli eklemeli üretim süreçlerinin gelişimine yol açmıştır (Haines 2022). Bu süreç, genellikle bir dijital 3D modelden yola çıkarak gerçekleştirilir ve birçok farklı teknoloji ve malzeme kullanılarak uygulanabilir. Eklemeli imalat, 3D baskı olarak da bilinir ve prototip üretiminden son ürün üretimine kadar geniş bir yelpazede kullanılır.

Eklemeli imalat, geleneksel yöntemlerle üretimi zor veya imkânsız olan karmaşık iç yapılar ve geometriler oluşturabilir. Malzeme israfını minimize eder, çünkü sadece gerekli olan malzeme kullanılır. Tasarım değişiklikleri hızlı bir şekilde uygulanabilir ve yeni prototipler hızlıca üretilebilir. Ek olarak üretim hattı kurulumu

ve kalıp tasarımı gibi ek operasyonlar gerektirmeyen bir yöntem olduğu için yapılan tasarım hemen üretime alınabilir (Özer 2020). Özelleştirilmiş parçalar ve düşük hacimli üretimler için idealdir. Ayrıca, çok parçalı montajlar yerine tek parça halinde üretim yaparak montaj süreçlerini basitleştirir.

Eklemeli imalatın kullanım alanları oldukça geniştir. Özellikle tıp, uzay, havacılık, otomotiv, gıda, eğitim, biyomedikal ve eğlence gibi daha birçok sektörde eklemeli imalatın kullanımı giderek yaygınlaşmaktadır (Özsolak 2019). Tıp alanında, kişiye özel protezler, implantlar ve cerrahi rehberler üretmek için kullanılır. Havacılık ve uzay sektöründe, hafif ve güçlü uçak parçaları ile roket motor bileşenleri üretiminde önemli bir rol oynar. Otomotiv sektöründe ise konsept modeller, nihai kullanım parçaları ve yedek parçalar üretmek için tercih edilir. Ayrıca, tüketici ürünleri alanında özel tasarım ürünler ve elektronik cihazlar gibi çeşitli uygulamalarda da eklemeli imalatın avantajlarından yararlanılmaktadır. Havacılık ve uzay endüstrisi için küçük miktarlarda iyi mekanik özelliklere sahip, hafif ve karmaşık geometrili parçaların sürekli olarak üretebilmesi önemli gereksinimlerdir. Bu gereksinimler, eklemeli üretimi havacılık uygulamaları için çok önemli bir üretim yöntemi haline getirmektedir (Özer 2020).

Eklemeli imalatın sunduğu bu avantajlar, üretken tasarım ve topoloji optimizasyonu ile üretilmek istenilen parçaların gerçek dünyada hayata geçirilmesini mümkün kılar. Bu sayede, mühendisler ve tasarımcılar, daha verimli, hafif ve dayanıklı ürünler geliştirebilirler.

4.1.1 Eklemeli İmalatta Kullanılan Teknolojiler

Eklemeli imalat teknolojileri, malzemelerin katman katman eklenerek nesnelerin üretilmesi esasına dayanır ve bu alanda çeşitli yöntemler kullanılmaktadır. Eriyik Yığılma Modelleme (EYM), Sterolitografi (SLA), Polijet Modelleme (PJM), Seçici Lazer Sinterleme (SLS), Seçici Lazer Ergitme (SLE), Elektron Işın Ergitme (EIE), Lazer Metal Biriktirme (LMB) gibi yöntemler ticari açıdan en önemli eklemeli imalat teknolojileri arasındadır (Sürmen, 2019).

Eriyik Yığıma Modelleme (EYM), termoplastik malzemelerin ısıtılarak eritilmesi ve ince bir nozuldan çıkarılması ile katman katman birleştirilmesini sağlar. Bu yöntem, prototipleme ve küçük ölçekli üretim için yaygın olarak kullanılır ve Polilaktik Asit (PLA) ve Akrilonitril Bütadiyen Stiren (ABS) gibi malzemelerle çalışır. Sterolitografi (SLA), sıvı fotopolimer reçinelerin lazerle sertleştirilmesiyle çalışır ve yüksek hassasiyet ile pürüzsüz yüzey kalitesi sunar, dişçilik ve mücevherat gibi alanlarda tercih edilir. Seçici Lazer Sinterleme (SLS), polimer tozlarının lazerle sinterlenmesiyle fonksiyonel prototipler ve düşük hacimli üretimlerde kullanılır, naylon ve kompozit malzemelerle çalışır. Doğrudan Metal Lazer Sinterleme (DMLS) ve Seçici Lazer Eritme (SLE), metal tozlarının lazerle sinterlenmesi veya eritilmesiyle güçlü ve dayanıklı metal parçalar üretir, havacılık ve medikal implantlarda yaygındır. Elektron Işın Ergitme (EIE), metal tozlarının yüksek enerjili bir elektron ışınıyla eritilmesini içerir ve titanyum gibi yüksek mukavemetli malzemelerle çalışır. Bağlayıcı püskürtme yöntemi, toz malzemeler üzerine bağlayıcı bir sıvı püskürtülerek ve ardından sertleştirilerek yapı oluşturur, kum kalıplama ve metal döküm kalıplarında kullanılır. Malzeme püskürtme yöntemi, foto polimer damlacıklarının baskı kafasıyla püskürtülmesi ve UV ışığıyla sertleştirilmesiyle çalışır, yüksek detay hassasiyeti ve çok malzemeli baskılar sunar, prototipler ve dişçilik gibi alanlarda yaygındır.

Bu teknolojiler, farklı malzeme özellikleri ve üretim gereksinimlerine göre seçilerek, endüstriyel uygulamalarda, prototipleme süreçlerinde ve nihai ürün üretiminde kullanılır. Havacılık endüstrisinde kullanılan en yaygın eklemeli üretim yöntemleri EIE, SLS ve EYM'dir (Özer 2020). Eklemeli imalat, özellikle karmaşık geometrilere sahip parçaların üretilmesi ve tasarım esnekliği açısından büyük avantajlar sunar.

4.1.2 Eklemeli İmalatta Kullanılan Malzeme Türleri

Eklemeli imalatta kullanılan malzemeler, çeşitli sektörlerin ihtiyaçlarına yönelik geniş bir yelpazede sunulmaktadır. Termoplastikler, eklemeli imalatın en yaygın malzemelerinden biridir ve Eriyik Yığıma Modelleme (EYM) yöntemiyle sıklıkla kullanılır. PLA, ABS, Polietilen Tereftalat Glikol (PETG) gibi

termoplastikler, prototipleme, eğitim, hobi ve tüketici ürünleri üretiminde tercih edilir. Foto polimer reçineler, Sterolitografi (SLA) ve Dijital Işık İşleme (DLP) teknolojilerinde kullanılır ve dişçilik, mücevherat ve yüksek hassasiyet gerektiren tıbbi uygulamalarda yaygın olarak kullanılır. Metal tozları, Doğrudan Metal Lazer Sinterleme (DMLS), Seçici Lazer Eritme (SLE) ve Elektron Işın Ergitme (EIE) teknolojilerinde kullanılır ve havacılık, otomotiv, medikal implantlar ve enerji sektöründe dayanıklı ve yüksek performanslı parçalar üretmek için tercih edilir.

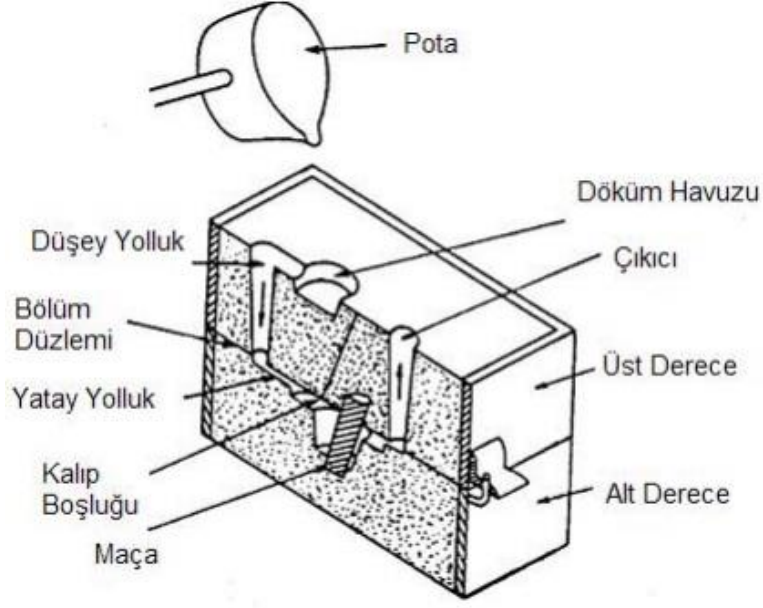
Titanyum, paslanmaz çelik, alüminyum ve kobalt-krom alaşımları gibi metaller, bu uygulamalar için idealdir. Ti ve Ti alaşımları eklemeli imalat yöntemi için son derece ilgi çekicidir. Titanyum, yüksek performans gerektiren parçalarda endüstriyel olarak kullanılır, ancak yüksek işleme maliyetleri ve geleneksel işleme yöntemlerinde uzun teslim süreleri nedeniyle dezavantajları vardır (Özsolak 2019). Ulaşım, havacılık ve uzay sektörlerinde, alüminyum ve titanyum alaşımları, hafif ve yüksek mukavemetli yapılar oluşturmak için sıkça kullanılır.

Kompozit malzemeler, polimer matrislerine karbon fiber veya cam fiber gibi güçlendirici malzemelerin eklenmesiyle üretilir ve otomotiv, spor ekipmanları ve havacılık sektörlerinde hafif ve güçlü yapılar elde etmek için kullanılır. Ayrıca, seramikler ve biyouyumlu malzemeler, medikal uygulamalar ve dental protezlerde kullanılırken, gıda ve moda endüstrisi için uygun gıda sınıfı malzemeler ve tekstil filamentleri de mevcuttur. Bu geniş malzeme çeşitliliği, eklemeli imalatın çok çeşitli endüstriyel ve ticari uygulamalarda kullanılmasını mümkün kılar, tasarım esnekliği ve özelleştirme olanakları sunar.

4.2 Döküm

Döküm, metal veya plastik gibi malzemelerin ergitilip, sıvı haldeyken bir kalıba dökülerek istenilen şeklin elde edilmesi işlemidir. Bu üretim tekniği, özellikle karmaşık ve büyük parça üretiminde yaygın olarak kullanılır. Döküm süreci, genellikle birkaç temel aşamadan oluşur: kalıp hazırlama, ergitme, dökme, soğutma ve sonrasında kalıbın kırılarak parçanın çıkarılması. Kalıplar, kum, seramik, metal veya diğer malzemelerden yapılabilir ve tek kullanımlık veya tekrar kullanılabilir olabilir. Döküm işlemi sonrası genellikle ısıl işlem ve mekanik işlem gibi ek süreçler

gerekebilir, bu da dökümle üretilen parçaların istenen mekanik özelliklere ve yüzey kalitesine ulaşmasını sağlar.



Şekil 4. 1: Döküm Teknolojisi (Hamit Arslan 2017)

Döküm işlemi, otomotiv, havacılık, makine imalatı, inşaat ve enerji sektörleri gibi geniş bir yelpazede uygulama alanı bulur. Özellikle motor blokları, şasi parçaları, türbin kanatları ve yapı elemanları gibi yüksek dayanıklılık ve karmaşık geometrik şekiller gerektiren parçaların üretiminde tercih edilir. Döküm, malzeme tasarrufu sağlayarak ve israfı minimize ederek büyük ölçekli üretimde maliyet etkin bir çözüm sunar.

Üretken tasarım ve topoloji optimizasyonu, döküm yöntemiyle birleştirildiğinde, karmaşık ve optimize edilmiş parçaların üretimini sağlar. Bu ileri tasarım teknikleri, parçaların sadece gerekli malzemeleri kullanarak üretildiği ve gereksiz ağırlıkların ortadan kaldırıldığı yapılar oluşturur. Geleneksel yöntemlere göre, döküm yöntemiyle karmaşık iç yapılar ve organik geometriler daha kolay üretilebilir. Üretken tasarım ve topoloji optimizasyonu ile tasarlanan parçalar, döküm kalıplarına aktarılarak malzeme akışının optimize edilmesi ve çekme gerilmelerinin minimize edilmesi sağlanır. Böylece hem malzeme tasarrufu sağlanır hem de üretim maliyetleri düşer. Döküm süreci, optimize edilmiş tasarımların seri üretimini

kolaylaştırırken, dayanıklı ve hafif parçaların üretimine de imkân tanır. Bu yöntemlerin birleşimi, havacılık ve otomotiv gibi yüksek performans gerektiren sektörlerde yenilikçi ve yüksek mukavemetli bileşenlerin üretimini destekler.

4.3 Frezeleme

Frezeleme, bir kesici takımın döner hareketi ile malzemeyi kaldırarak şekil verme işlemini içeren bir talaşlı imalat yöntemidir. Bu işlem, freze makinelerinde gerçekleştirilir ve çeşitli malzemeler üzerinde karmaşık ve hassas şekiller oluşturmak için kullanılır. Frezeleme, düz, eğimli, kanal, dişli gibi farklı geometrik yüzeylerin yanı sıra, hassas toleranslar ve yüksek yüzey kalitesi gerektiren parçaların üretiminde de oldukça etkilidir. Freze makineleri genellikle üç eksenli (X, Y, Z) hareket kabiliyetine sahiptir, ancak daha karmaşık şekillerin işlenmesi için beş eksenli makineler de kullanılabilir. Kesici takımın dönme hareketi ve tabla üzerindeki parçanın hareketi sayesinde istenen şekil elde edilir. Frezeleme işlemi, yüzey frezeleme, profil frezeleme, kanal açma, diş açma ve delik delme gibi çeşitli uygulamalar için uygundur.

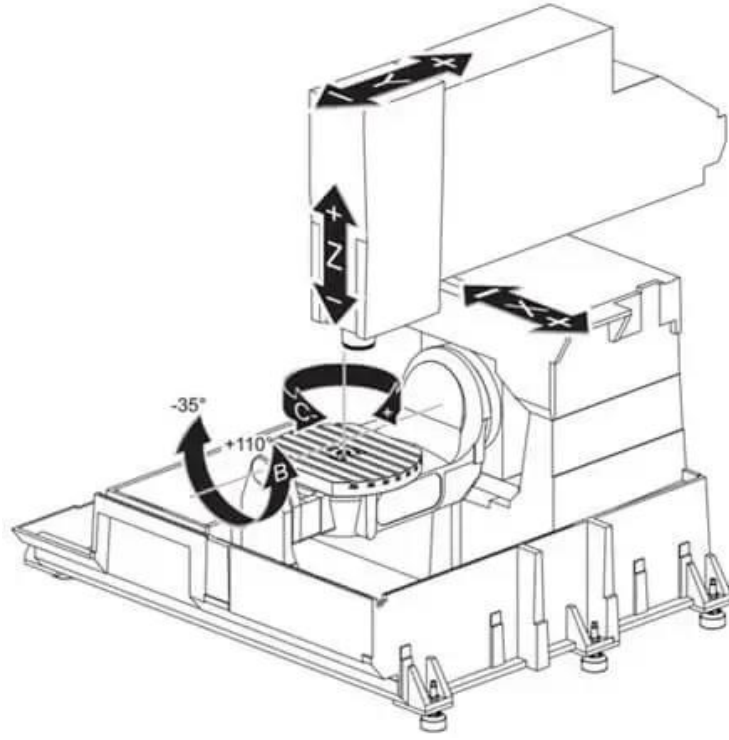
Frezeleme işlemi, otomotiv, havacılık, savunma sanayi, medikal cihazlar ve enerji sektörleri gibi pek çok alanda yaygın olarak kullanılır. Özellikle yüksek hassasiyet ve yüzey kalitesi gerektiren parçalarda tercih edilir. Ayrıca, prototip üretiminde ve küçük seri üretimlerde de yaygın bir şekilde kullanılır. Frezeleme hem geleneksel hem de CNC makineleri ile yapılabilir, bu da işlemin esnekliğini ve verimliliğini artırır. CNC freze makineleri, bilgisayar kontrolü ile yüksek hassasiyet ve tekrarlanabilirlik sağlar. Bu makineler, CAD yazılımlarında tasarlanan modellerin doğruluğuyla üretim yapma imkânı sunar. Bu sayede, karmaşık geometrik şekiller ve detaylı işleme süreçleri hızlı ve hatasız bir şekilde gerçekleştirilebilir. Frezeleme, yüksek hassasiyet, tekrarlanabilirlik ve geniş uygulama yelpazesi ile modern imalatın sıklıkla kullandığı yöntemlerinden biridir.

4.3.1 3 Eksenli Frezeleme

3 eksenli frezeleme, modern imalat sanayisinde yaygın olarak kullanılan bir talaş kaldırma yöntemidir. Bu teknikte, bir kesici takım üç farklı eksende (X, Y ve Z) hareket ederek malzemeyi işleyip istenilen şekli verir. X ve Y eksenleri yatay düzlemde hareket sağlarken, Z eksenini dikey hareketi sağlar. Bu aksinel hareketler sayesinde, düz yüzeyler, kanallar, cepler ve delikler gibi karmaşık geometriler işlenebilir. Bu yöntem, genellikle alüminyum, çelik, pirinç ve plastik gibi malzemelerin işlenmesinde kullanılır. Malzeme seçimi, üretilecek parçanın gereksinimlerine ve kullanım alanına bağlı olarak değişir. 3 eksenli frezeleme, hızlı ve verimli üretim süreçleri sağlarken, aynı zamanda karmaşık parçaların üretiminde de esneklik sunar. Bu da hem küçük ölçekli prototipleme hem de büyük ölçekli seri üretim için uygun bir yöntem haline getirir.

4.3.2 5 Eksenli Frezeleme

5 eksenli frezeleme, modern imalat endüstrisindeki en gelişmiş talaş kaldırma tekniklerinden biridir. Bu yöntemde, kesici takım 5 farklı eksen etrafında hareket ederek malzemeyi işler ve çok çeşitli geometrilerde parçalar üretebilir. Bu akseni eklemek, kesici takımın malzeme üzerinde daha fazla kontrol sağlamasına ve daha karmaşık parçaların üretilmesine olanak tanır. 5 eksenli frezeleme, havacılık, otomotiv, tıbbi cihazlar, kalıp yapımı ve savunma endüstrisi gibi alanlarda yaygın olarak kullanılır. Hassas işleme, karmaşık şekillerin üretimi ve verimlilik artışı gibi avantajları nedeniyle tercih edilir. Bu teknoloji, parçaların üretim süreçlerini optimize etmek ve maliyetleri düşürmek için önemli bir araçtır.



Şekil 4. 2: 5 Eksenli Frezeleme Teknolojisi (Hidkom 2023)

5. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Topoloji optimizasyonu ve üretken tasarım, son yıllarda üretim endüstrisinde giderek artan bir ilgi görmektedir. Bu teknikler, mühendislik tasarımında devrim niteliğinde değişiklikler yapmıştır. Topoloji optimizasyonu, tasarımın hedeflenen performans kriterlerini karşılamak için malzeme dağılımını optimize etmeye odaklanırken, üretken tasarım ise tasarım hedeflerini karşılayan en iyi parça geometrilerini bulmayı amaçlar. Bu tekniklerin kullanımı, malzeme israfını azaltma, parça ağırlığını azaltma, mukavemeti artırma ve üretim süreçlerini optimize etme gibi bir dizi avantaj sunar. Son yıllarda, otomotiv, havacılık, tıp, savunma ve tüketici ürünleri gibi çeşitli endüstrilerde bu tekniklerle ilgili çalışmalar artmıştır. Araştırmacılar, parça maliyetlerini düşürmek, üretim süreçlerini hızlandırmak ve ürün performansını artırmak için bu tekniklerin potansiyelini araştırmaktadır.

5.1 Topoloji Optimizasyonu Yaklaşımı Çalışmaları

Hub (2019) tarafından yapılan çalışmada, uçaklardaki hava freninin destek kirişi topoloji optimizasyonu ile incelenmiş ve %31 oranında ağırlık azaltma sağlanmıştır. ANSYS tarafından hesaplanan ağırlık muhafazası %50 olarak belirlenmiş ve manuel geometri değişiklikleri ile destek kirişi 1.27 kg'a düşürülmüştür. Optimize edilmiş destek kirişi, orijinaline göre daha düşük gerilme-şekil değiştirme değerleri göstermiş ve akma gerilmesi sınırlarına uygun bulunmuştur. En yüksek Von Mises Eşdeğer Gerilmesi 319 MPa olarak tespit edilmiştir. Y eksenini boyunca deformasyon sınırı karşılanamamıştır; ancak X ve Z eksenlerindeki deformasyonlar orijinal kirişle karşılaştırılabilir düzeyde sonuçlar elde edilmiştir. Çalışma, havacılık tasarımında ağırlık azaltmanın önemini vurgulamakta ve destek kirişinin eklemeli imalat veya 3D baskı teknolojisi ile üretilebileceğini önermektedir.

Toropov ve arkadaşları (2009) tarafından yapılan çalışmada, QinetiQ Ltd. tarafından sağlanan birleşik kanat gövdesi yapılandırmasına sahip kavramsal bir

insansız hava aracı (İHA) tasarımında topoloji optimizasyonu uygulanmıştır. İHA'nın merkezi bölümü çıkarılarak optimizasyon sadece kanat üzerinde gerçekleştirilmiştir. 3.5 g'lık yük durumu kullanılarak kanadın bükülmesi ve dönmesi sağlanmıştır. Kanadın sonlu eleman modeli, alüminyum malzeme ile tasarlanmış kabuk elemanlarla kaplanmıştır. Burkulma ile başa çıkmak için iki yöntem önerilmiştir: birinci yöntemde topoloji optimizasyonu ve ardından şekil optimizasyonu, ikinci yöntemde ise önce şekil optimizasyonu ve ardından topoloji optimizasyonu yapılmıştır. Her iki yöntem de temel tasarıma kıyasla ağırlığın azalmasını sağlamış olup, 1. yöntem %6 ve 2. yöntem %10 ağırlık azalması göstermiştir. Çalışma, burkulmanın tasarım sürecinin erken aşamalarında dikkate alınmasının önemini vurgulamaktadır.

Sigmund (2000), tarafından yapılan bir çalışmada, topoloji optimizasyonu farklı mühendislik problemlerine uygulanmıştır. İlk olarak, bir uçak zemin desteği kirişinin tasarımı incelenmiş ve bu süreçte yük ve destek koşulları belirlenmiştir. Yapısal tepki analizi yapılarak optimal yapı tekrar eden bir prosedürle elde edilmiştir. İkinci olarak, küçük bir uydu yapısının tasarımında topoloji optimizasyonu kullanılmıştır. Uydu, fırlatma sırasında aletleri taşıyabilecek kadar güçlü fakat 12 kg'dan daha hafif bir destek yapısına sahip olacak şekilde tasarlanmıştır. Tasarım alanı 288.000 kübik sonlu elemanla ayrıştırılmış ve hesaplama güçlü bir iş istasyonunda iki gün sürmüştür. Üçüncü olarak, malzeme mikroyapılarının topoloji optimizasyonu ile yeni ve geliştirilmiş özelliklere sahip malzemeler üretilmiştir. Uçak zemin destek kirişinde her bir elemandaki malzeme mikroyapısı bir tasarım değişkeni olarak optimize edilmiştir, ancak bu işlem imalatı pahalı hale getirmiştir. Sonuç olarak, topoloji optimizasyonu kullanılarak tasarlanan kiriş, %10 daha hafif olmasına rağmen, imalat zorlukları ve maliyet artışına neden olmuştur.

Sha ve meslektaşları (2020), robotların endüstriyel ve tıbbi ortamlarda insanlarla etkileşimde bulunabileceğini belirtmiştir. Hafif tasarım, iş birlikçi robotlar için önemlidir ve araştırmacılar genellikle iki yöntem kullanır: yeni malzemeler ve parça yapısının optimizasyonu. Hafif malzemelerin maliyeti ve üretim zorlukları nedeniyle, yapısal topoloji optimizasyonu sıklıkla tercih edilir. Bu yöntem, montaj modelinin sonlu eleman analiziyle parçaların yapılarını ve ağırlığın en aza

indirilmesini sağlar. Bu çalışma, basit bir robotun hafifletilmiş tasarımıyla daha iyi hafifletirmenin mümkün olduğunu göstermektedir. Sonuçlar, ağırlığın %10,4 oranında azaldığını göstermektedir. Bu yöntem, farklı robot türlerinde uygulanabilir ve ANSYS Workbench yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Jie Liu ve arkadaşları (2019) çalışmasında, 3D kafes yapılarının sandviç uçak spoileri için çekirdek malzeme olarak kullanıldığı belirtiliyor. Titanyum ve alüminyum alaşımlarıyla yüksek sertlik-ağırlık oranına sahip bir yapı elde etmek için topoloji optimizasyonu kullanılmıştır. Bu optimizasyon sonucunda iç destek malzemeleri kaldırılmış ve yerine 3D kafes örgü yapıları getirilmiştir. Ana taşıma bileşen bağlantılarında titanyum, diğer parçalarda ise alüminyum alaşımı kullanılarak spoilerin dayanıklılığı artırılmış ve ağırlığı azaltılmıştır. Sonuçlar, tasarlanan spoilerin hacminin %81,35 ve ağırlığının %80,76 oranında azaldığını göstermektedir. Ayrıca, spoilerin maksimum gerilmesinin 523,1 MPa ve maksimum deplasmanının ise 10,19 mm olduğu belirlenmiş, bu değerlerin hizmet ortamına uygun olduğu vurgulanmıştır. Son olarak, yeni tasarlanan spoiler için 3D baskı kullanılarak gerçek bir model üretilmiştir.

Özkara (2023) bu çalışmasında, eklemeli imalat kısıtlamalarının topoloji optimizasyonuna entegrasyonunu ve bir hava aracı yapısal parçasının optimizasyon analizlerini kapsamaktadır. Çalışmada, Al 7050 alüminyum alaşımı, Ti6Al4V titanyum alaşımı ve AlSi10Mg alüminyum alaşımı kullanılarak yapılan optimizasyon analizleri ele alınmıştır. Al 7050 ile yapılan optimizasyonlarda, nihai parça ağırlığı 1.157 kg olarak bulunmuş ve 0.550 kg'lık bir ağırlık azaltımı sağlanmıştır. Ti6Al4V kullanıldığında, nihai parça ağırlığı 1.375 kg olarak belirlenmiş ve 0.337 kg'lık bir ağırlık azaltımı sağlanmıştır. AlSi10Mg ile yapılan analizlerde ise nihai parça ağırlığı 1.058 kg olarak bulunmuş, bu da %40 oranında bir ağırlık azaltımı anlamına gelmiştir. Sonuçlar, alüminyum bazlı malzemelerin titanyum bazlı malzemelere göre ağırlık avantajı sağladığını ve AlSi10Mg'nin maliyet etkinliğini artırdığını göstermektedir.

5.2 Üretken Tasarım Yaklaşımı Çalışmaları

Junk ve Burkart (2021) yaptıkları bir çalışmada, CAD sistemlerindeki üretken tasarım uygulamalarının değerlendirilmesini hedeflemiştir. Üç temsilci CAD sistemi seçilerek kapsamlı bir ağırlık azaltma örneği üzerinden analiz edilmiştir. Solid Edge'de çalışma alanının geometrisinin tanımlanması yeterli iken, CogniCAD'de geometrileri korunması gereken kısımlar tanımlanmalıdır. Fusion 360'ta ise sınırlar ve engeller de tanımlanması gereken unsurlardandır. Fusion 360'ta önceden tanımlanmış malzemelerin bulunabilirliği en geniş olsa da, Solid Edge de farklı kategorilerde birçok malzeme sunmaktadır. CogniCAD ise en az sayıda olan 41 önceden tanımlanmış malzeme ile sınırlıdır, ancak diğer iki CAD sistemi gibi, bunlar kullanıcı tarafından genişletilebilir. Fusion 360, kullanıcının dört farklı işlem arasından seçim yapmasına ve her biri için bireysel parametreler belirlemesine olanak tanıyarak üretim sürecini tanımlamada en fazla özgürlüğü sunar. Fusion 360 aynı anda birkaç sonuç üretebilir. Solid Edge ve CogniCAD her biri yalnızca bir sonuç üretir. Üretilen modellerin karşılaştırılması sonucunda CAD sistemlerinin farklılıkları belirlenerek olası uygulama alanları sunulmuştur.

Noronha ve meslektaşları (2021) çalışmasında, uçak koltuğunun tasarımında yapısal analiz ve optimizasyon sürecini ele almaktadır. Ayağın üzerindeki yüklerin analiz edilmesiyle başlayan çalışmada, iki ana kuvvet tespit edilmiştir: yolcu ağırlığı ve uçağın ivmelenmesi nedeniyle bacağa etki eden atalet kuvveti. Malzeme seçimi ve tasarım optimizasyonu için farklı alüminyum sınıfları kullanılmış ve sonuçlar topoloji optimizasyonu ile elde edilmiştir. Optimal tasarım, 3D baskı kullanılarak üretilmiş ve sonuçlar Ansys ve Fusion 360 yazılımlarında analiz edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, standart uçak koltuklarının ağırlığında önemli bir azalmaya işaret etmektedir. El ve kol dayama, destekleyici ayak, alt yastık gibi bileşenlerde 4.4 kg'a kadar bir ağırlık azaltımı sağlamıştır. Bu çalışma, uçak koltuğunun tasarımında alüminyum bileşenlerin ağırlığında önemli bir azalma sağlayarak yapısal dayanıklılığı ve mukavemeti koruyan optimize bir tasarım sunmaktadır.

Gupta ve arkadaşları (2023) çalışmasında, sabit kanatlı İHA'ların iniş takımı tasarımını optimize etmek için topoloji optimizasyonu ve üretken tasarım yöntemlerini kullanılmıştır. İniş takımının kritik öneme sahip olduğu ve yüksek

darbelere dayanması gerektiği belirtilmiştir. Al 6061 T6 malzemesi, hafifliği ve dayanıklılığı nedeniyle tercih edilmiştir. Yapılan topoloji optimizasyonu, geleneksel modele göre %40 daha hafif bir tasarım sunduğunu göstermiştir. Ancak, üretken tasarımın karmaşıklığı ve yüksek maliyeti göz önüne alındığında, topoloji optimizasyonunun daha uygun bir seçenek olduğu belirtilmiştir. Son tasarım, konvansiyonel modele göre yaklaşık %30 ağırlık azalması sağlamıştır. Güvenlik faktörü ile ağırlık arasındaki dengeyi anlamak için en iyi tasarımın seçilmesinin önemli olduğu vurgulanmıştır.

Srivastava ve Kawakami (2023) çalışmasında, jet motoru bağlantı parçası için topoloji optimizasyonu ve üretken tasarım yöntemlerini değerlendirmiştir. Bu teknikler, gerilme dağılım simülasyonları için Sonlu Eleman Analizi (FEA) yazılımı aracılığıyla uygulanmıştır. Topoloji optimizasyonunun şekil ve boyut optimizasyonunu içerdiği ve elde edilen sonuçların tek başına boyut veya şekil optimizasyonundan daha iyi olduğu belirtilmiştir. Sonuçlar, başlangıçta %65 ağırlık azalması olan nihai bir tasarımın elde edildiğini göstermiştir. Ayrıca, Autodesk üretken tasarım kullanılarak yapılan tasarımların topoloji optimizasyonuna göre daha uygun olduğu ve farklı malzemelerin kullanıldığı altmış sonuç elde edildiği belirtilmiştir. Üretken tasarımın sonucu oluşturulan her çalışmanın farklı bir tasarım sonucu verebileceği vurgulanmıştır.

Stefan Junk ve Nils Rothe (2022) bu çalışmada, yüksek hafiflik potansiyeline sahip bireyselleştirilmiş yüksek performanslı bileşenlerin önemi vurgulanmıştır. Uygulama örneği, yarış aracının arka aksının A-koludur. A-kol, arka aksın kontrol kollarına yapıştırılacaktır ve bu kollar şasiye bağlıdır. Ayrıca, A-kolun arka aksın tekerlek taşıyıcısına bağlanması nedeniyle, kontrol kolları ile tekerlek taşıyıcısının dikey yönlendirilmesini sağlar ve tekerlek taşıyıcısından kaynaklanan gerilme ve basınç kuvvetlerini sağlar. Bileşenlerin üretken gelişimi için Siemens NX yazılımı kullanılmıştır. Çalışma, A-koluna etki eden maksimum çekme kuvvetinin test edilmesine odaklanmış ve bu bağlamda bileşenin montajı ve malzeme seçimi üzerinde durulmuştur. Özellikle, A-kolunun montajında kullanılan pimler ve sıkma cıvatası gibi detaylar belirtilmiştir. Ayrıca, fiber hacminin artmasıyla güvenlik faktörünün nasıl etkilendiği üzerinde durulmuştur. Üretken tasarımın geometrik karmaşıklığı arttığında maliyetlerin artmadığı gözlemlenmiştir. Ancak, geleneksel

imalat yöntemlerinin bazı durumlarda avantajlı olduğu ve fiber takviyeli eklemeli imalatın tasarım sürecinde umut vadeden bir yaklaşım olduğu bulunmuştur. Çekme testi sonuçlarına göre, yalnızca %1,44 güvenlik faktörü gösterilebilmiştir. Bu nedenle, gelecekte bileşende lif içeriğinin daha da artırılması gerektiği vurgulanmıştır.

Airbus A320 motor kapağı menteşe braketinin üretim yöntemi, eklemeli imalat ve topoloji optimizasyonu kullanılarak değiştirilmiş ve yeniden tasarlanmıştır. Malzeme değişikliği ve ürün tasarımının güncellenmesi sonucunda, parça ağırlığı 918 g'dan %64 oranında azaltılarak 326 g'a düşürülmüştür (Tomlin ve Meyer 2011).

Airbus A320 bölme panellerini, üretken tasarım teknikleri kullanılarak yeniden tasarlanmıştır. Geleneksel panellere kıyasla %45 daha hafif olan biyonic tasarımlı panelin ağırlığı 30 kilogramdır. Bu yenilikçi tasarım hem yakıt tüketimini hem de karbon ayak izini önemli ölçüde azaltarak büyük bir tasarruf sağlamıştır (Goldstein ve diğerleri, 2021).

Junk ve Rothe (2021), otomobil üretiminde ağırlık azaltılmasını amaçlayan ve fiber ile güçlendirilmiş eklemeli imalat yöntemini ele almıştır. Bu yöntem, 3D yazıcılar gibi cihazlar kullanarak malzemeyi katman katman yerleştirerek üretim yapmayı sağlar. Bu yöntem, otomobil parçalarını hafifletme imkânı sunarken aynı zamanda parçaların mukavemetini ve dayanıklılığını da arttırabilir. Bir yarış arabasının yüksek gerilme altında olan ve güvenlik açısından önemli bir şasi parçası üretken model olarak tasarlandıktan sonra fiber ile güçlendirilmiş eklemeli imalat yöntemiyle üretilmiştir. Kısa elyaf takviyeli bir matris ve ek olarak uzun karbon elyaf takviyesi uygulanmıştır. Son olarak, parçaların mekanik özelliklerini kontrol etmek için çekme testleri yapılmıştır. Sonrasında ağırlık ve maliyet gibi önemli özellikler de elde edilerek, konvansiyonel olarak tasarım ve üretilen parçalarla karşılaştırılmıştır.

5.3 Geleneksel Yöntemle Üretilmiş Uçak Koltuklarının Dayanımları Üzerine Yapılmış Çalışmalar

Pilot koltuklarındaki rahatsızlık ve bel ağrısı, özellikle uzun süreli uçuşlarda trafik pilotları arasında yaygın bir şikayettir. Bu rahatsızlıkların kökenlerini anlamak için mevcut pilot koltuklarının antropometrik ve biyomekanik özelliklerini incelenmiştir. Önceki araştırmalar, pilot koltuklarının konforunu artırmak amacıyla çeşitli ayar seçeneklerinin sunulduğunu, ancak bu değişikliklerin rahatsızlıkları ortadan kaldırmada yeterli olmadığını göstermiştir (Lusted ve diğ. 1994).

Goossens ve arkadaşları (2000) Boeing 747-400, Boeing 747-300, McDonnell Douglas DC10-30, Airbus A310 ve Boeing 737-300 gibi modern orta ve uzun menzilli uçaklardaki pilot koltuklarını değerlendirerek, bu koltukların mevcut biyomekanik ve antropometrik kriterlere ne ölçüde uyduğunu araştırmıştır. Elde edilen bulgular, pilot koltuklarının çoğunun belirlenen biyomekanik tasarım kriterlerini karşılamadığını ve mevcut ayar seçeneklerinin özellikle uzun boylu pilotlar için yetersiz kaldığını göstermektedir. Bu bulgular, pilot koltuklarının tasarımında önemli iyileştirmelere ihtiyaç duyulduğunu ve bu alandaki standartların, pilotların farklı fiziksel özelliklerine uyum sağlamakta yetersiz olduğunu vurgulamaktadır.

Son yıllarda, pilot koltuğu tasarımı üzerine yapılan araştırmalar, ergonomik tasarımın ve insan faktörlerinin önemini vurgulamaktadır. Gupta ve arkadaşlarının çalışması, Hindistan'ın antropometrik verilerini kullanarak DELMIA Human (DHM) yazılımı aracılığıyla sivil hava araçları pilot koltuklarının değerlendirilmesini yapmıştır. Bu çalışma, koltuk yüksekliği ve sırt yaslama açısının, farklı persentil gruplarında (5. persentil, 50. persentil ve 95. persentil) pilotların konforunu nasıl etkilediğini incelemiştir. Araştırmanın bulguları, sırt kompresyon kuvvetlerinin 90° sırt açısında diğer açılardan daha yüksek olduğunu, ancak 105° ve 120° açılarının daha düşük kompresyon kuvvetleri sağladığını göstermiştir. 5th persentil grubu için optimum değerler 330 mm koltuk yüksekliği ve 90° sırt açısı olarak belirlenirken, 95th persentil grubu için 440 mm koltuk yüksekliği ve 105° sırt açısı en uygun bulunmuştur. Bu sonuçlar, DHM teknolojisinin ergonomik tasarım sürecinde ne denli etkili bir araç olabileceğini ve pilot koltuğu tasarımında daha iyi insan-makine

uyumu sağlamak için kritik bilgiler sunduğunu ortaya koymaktadır. Ayrıca, ergonomik iyileştirmeler ile pilot konforunun artırılması ve iş ile ilgili kas-iskelet bozukluklarının riskinin azaltılması amacıyla gelecekteki araştırmalarda bu tür simülasyon bazlı analizlerin önemine dikkat çekilmektedir (Gupta ve diğ. 2024).

Son yıllarda, uçak koltuklarının tasarımı ve analizi hem güvenlik hem de konfor standartlarını karşılamak için önem kazanmaktadır. Erden ve Yayla'nın çalışması, bir ekonomik sınıf koltuğunun sonlu elemanlar yöntemi (FEM) ile statik gerilme analizini ve topoloji optimizasyonunu gerçekleştirmiştir. Çalışma, TSI Aviation Seats Şirketi tarafından sağlanan CAD modelinin FEM statik analizini yaparak, koltuk yapısındaki gerilme ve deformasyon değerlerini belirlemiştir. Elde edilen sonuçlar, genel olarak 30-60 MPa arasında değişen gerilme değerleri ve maksimum Von Mises gerilmesinin yaklaşık 290 MPa olduğunu göstermiştir. Bu gerilme, koltuk yapısının yayılma noktalarındaki birleşim yerlerinde görülmüştür. Statik analiz sonuçları, tasarlanan koltuğun beklenen performans sınırları içinde olduğunu ve statik testleri geçme potansiyeline sahip olduğunu ortaya koymuştur. Ayrıca, topoloji optimizasyonu çalışmaları, koltuk arka bacağı için %30 oranında malzeme ve ağırlık tasarrufu sağlayabilecek potansiyel tasarımları ortaya koymuştur. Bu çalışma, FEM ve CAE tasarım araçlarının, kritik mühendislik yapılarının tasarımında etkin kullanımının önemini ve bu araçların, ürün geliştirme sürecinde sağladığı zaman tasarrufunu vurgulamaktadır (Erden ve Yayla 2024).

5.4 Eklemeli İmalat Üzerine Yapılmış Çalışmalar

Elektron Işını Ergitme (EIE) süreci, metal tozunu eriterek parça kesitlerini oluşturan bir eklemeli imalat sürecidir ve yakın zamanda Ti6Al4V metal tozu ile kafes yapılar oluşturmak için uygulanmıştır. Ancak, eklemeli süreçleri, tasarlanan şekil ve boyutlara kıyasla geometrik sapmalar veya hatalar getirebilir. EIE sürecinin kafes yapılar üzerindeki geometrik ve mekanik etkilerini araştıran Park, Rosen ve Duty, konformal kafes yaklaşımının daha dayanıklı yapılar tasarlamak için daha fazla tasarım olanağı sağladığını, ancak uygun olmayan birim hücre seçiminin yapının dayanımını zayıflatabileceğini belirtmişlerdir. Ayrıca, geometrik ve mekanik sapmaları temsil etmek için iki farklı eşdeğer çubuk çapının kullanılabilceği

bulunmuştur. Bu bulgular, eklemeli imalat süreçleri ile üretilen kafes yapıların mekanik performansını optimize etmek için önemli tasarım parametrelerinin dikkate alınması gerektiğini göstermektedir (Park ve diğ. 2021).

Eklemeli imalat, tasarımın iyileştirilmesini ve karmaşık parçaların hızlı üretimini sağlayarak üretim süreçlerinde devrim yaratmıştır. Özellikle endüstriyel gaz türbinlerinin onarımında yüksek hassasiyet ve performans sunmuş, bu teknoloji çeşitli endüstrilerde (uzay, havacılık, otomotiv, biyomedikal, savunma, enerji) kullanılmaktadır. Araştırma, eklemeli imalat yöntemlerinin tasarım esnekliği sunduğunu, kullanılan metal malzemelerin nihai parça özelliklerini etkilediğini ve malzemelerin termofiziksel özelliklerinin önemini vurgulamıştır (Özsolak 2019).

Eklemeli üretim, geleneksel talaşlı yöntemlerden farklı olarak katmanları üst üste ekleyerek istenilen şekilleri üretir ve hem prototip hem de final ürün üretiminde kullanılabilir. Sanayi 4.0 çağında, bu teknoloji üretim süreçlerini büyük tesislerden daha geniş coğrafyalara yayarak kişiye özel üretim ve organ basımı gibi yenilikler sunacak, hatta herkesin evde kendi ihtiyaçlarına uygun parçaları basabileceği bir gelecek vaat edecektir. Ancak, bu teknolojinin etik sorunlar ve patent hakları gibi zorluklarla karşılaşabileceği de unutulmamalıdır (Özer 2020).

Eklemeli imalat, konvansiyonel talaşlı yöntemlerden farklı olarak katman katman malzeme ekleyerek fiziksel parçaların üretimini sağlar, bu da tasarım esnekliği ve üretim maliyetlerinde azalma sağlar. Eklemeli imalatın bir türü olan Eriyik Yığılma Modelleme (EYM) teknolojisi, polimerik filamentlerin sıcaklık altında ekstrüze edilerek parça üretimini gerçekleştirir ve özellikle otomotiv, havacılık, tıp ve eğitim gibi alanlarda kullanılır. EYM teknolojisi, yüksek sıcaklık dayanımlı malzemeler ve kompozit filamentlerle daha yüksek mukavemetli parçaların üretilmesini sağlar. Ayrıca, ev kullanımı için uygun ucuz EYM yazıcıların piyasaya sürülmesi, teknolojinin yaygınlaşmasını hızlandırmıştır. EYM teknolojisinin gelecekte otomasyonla uyumlu hale gelmesi, akıllı fabrikalarda önemli bir rol oynayarak seri üretim süreçlerini dönüştürme potansiyeline sahiptir (Başcı ve Yamanoglu 2021).

Bugüne kadar gerçekleştirilen üretken tasarım ve topoloji optimizasyonu çalışmaları kapsamlı bir şekilde incelenmiş ve bu teknolojilere ihtiyaç duyan

havacılık sektörüne yönelik olarak uçak koltukları tasarım parçası olarak seçilmiştir. Uçak koltuklarının yapıları, tasarım kriterleri ve özellikleri çeşitli literatür kaynaklarından detaylı olarak araştırılmıştır. Yenilikçi tasarımların oluşturulmasını sağlayan üretim teknikleri analiz edilmiş ve bu literatür bilgisine dayanarak uygun üretim teknikleri belirlenmiştir. Bu tez çalışmasında, uçak yolcu koltuklarında ağırlık tasarrufu sağlamak amacıyla üretken tasarım ve topoloji optimizasyonu yaklaşımları ele alınmıştır.

6. MATERYAL ve METOD

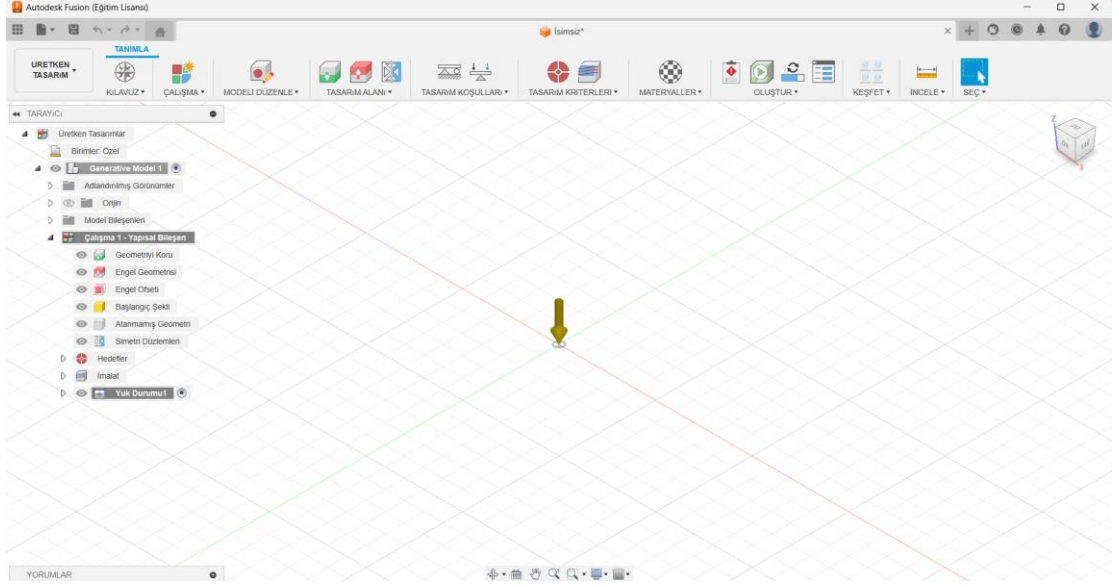
Uçak yolcu koltuklarının 3D tasarımı, üretken tasarımı, topoloji optimizasyonu ve tasarım analizleri aşamalarında Autodesk Fusion 360 yazılımı kullanılmıştır. Üretken tasarım modülünün, hızlı prototipleme ve simülasyon olanakları sağlaması, analiz modülünün sonlu elemanlar analizi gibi güçlü simülasyon araçları sunuyor olması ve bulut tabanlı yapısı sayesinde projelere dünyanın her yerinden erişim sağlanabiliyor olması projenin yapımı ve devamlılığı için tercih sebepleri arasında bulunmaktadır. Fusion 360 yazılımı bu tez çalışması için gerekli olan bütün modülleri içerisinde bulundurduğu ve birbirine geçişi sırasında entegreli şekilde çalıştığı için tercih edilmiştir.

6.1 AUTODESK FUSION 360

Fusion 360, Autodesk tarafından geliştirilen bulut tabanlı bir CAD ve CAM yazılımıdır. Bu yazılım, mühendislik, tasarım ve üretim süreçlerini entegre ederek kullanıcıların ürün geliştirme sürecini daha hızlı ve etkili bir şekilde yönetmelerine olanak tanır. Bulut tabanlı olması, kullanıcıların projelerine her yerden erişim sağlamasını ve takım çalışmasını kolaylaştırır. Ayrıca, güçlü modelleme araçları sayesinde karmaşık geometriler ve parametrik tasarımlar oluşturmak mümkündür. Fusion 360, kullanıcı dostu arayüzü ve kapsamlı özellikleri ile hem profesyoneller hem de hobi amaçlı kullanıcılar için idealdir. İçerisinde bulunan çeşitli modüller ile bir tasarım oluşturulabilir, tasarım üretken model haline getirilebilir ve analizleri yine program içindeki bir diğer modülde tamamlanabilir. Topoloji optimizasyonunu da “simülasyon” modülünün içerisinde sunduğu için ve bu tez çalışması için kullanılması gereken modülleri içerdiğinden dolayı Fusion 360, çalışma için uygun bulunmuş ve kullanılmıştır.

6.2 ÜRETKEN TASARIM

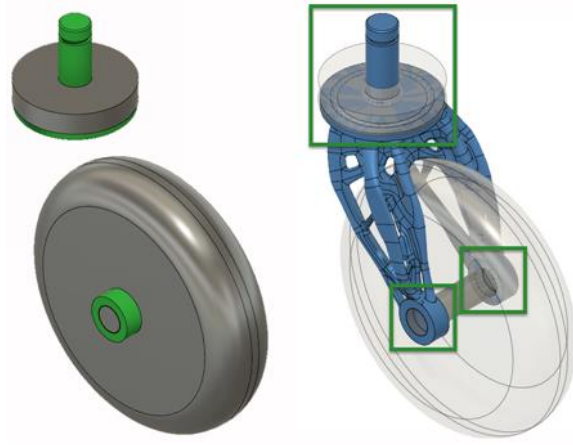
Bu tez çalışmasının odak noktası olan üretken tasarım modülü birkaç aşamada tanımlanır ve geometri bu parametrelere göre oluşturulur.



Şekil 6. 1: Üretken Tasarım Modülü Arayüzü

6.2.1 Korunan Geometri

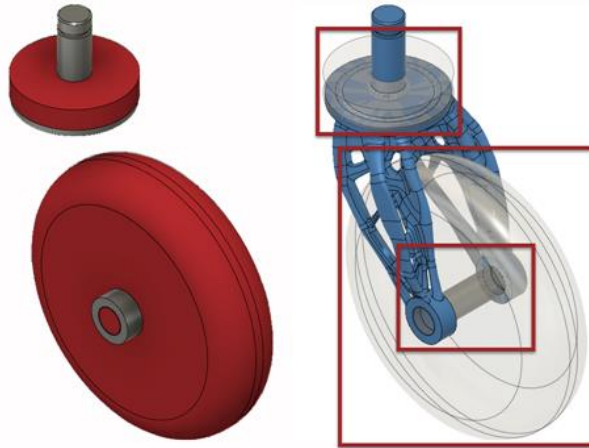
Korunan geometriler, bir tasarımın belirli bölümlerinin veya özelliklerinin değiştirilemez veya optimize edilemez olarak tanımlandığı bölümlerdir. Üretken tasarım ve topoloji optimizasyonu süreçlerinde, kullanıcılar belirli geometrilerin korunmasını isteyebilirler, çünkü bu bölgeler kritik işlevler üstlenir veya belirli mekanik bağlantılar gerektirir. Korunan geometriler, tasarımın bütünlüğünü ve işlevselliğini sağlamak amacıyla tanımlanır ve bu bölgelerde herhangi bir değişiklik yapılması engellenir. Bu geometriler, kullanıcı tarafından manuel olarak belirlenir ve optimizasyon süreci boyunca sabit kalır. Bu sayede, tasarımın optimize edilmiş diğer bölümleriyle birlikte çalışabilir ve tüm sistemin gereksinimlerini karşılayabilir.



Şekil 6. 2: Korunan Geometri (Autodesk 2024)

6.2.2 Engel Geometrisi

Engel geometrileri, üretken tasarım ve topoloji optimizasyonu süreçlerinde belirli alanların veya bölgelerin tasarımın bir parçası olmasını veya bu alanlarda malzeme yerleştirilmesini engelleyen tanımlamalardır. Bu geometriler, tasarımın belirli bölgelerinde mevcut olan diğer bileşenler, montaj noktaları veya hareketli parçalar gibi faktörler nedeniyle belirlenir. Kullanıcılar, bu bölgeleri manuel olarak tanımlar ve bu alanların boş bırakılması veya malzeme eklenmemesi gerektiğini belirtir. Engel geometrileri, tasarımın işlevselliğini ve montaj kolaylığını koruyarak, optimize edilen tasarımın diğer bileşenlerle uyumlu olmasını sağlar. Bu şekilde, tasarım süreci boyunca gereksiz çatışmaların ve tasarım hatalarının önüne geçilmiş olur.



Şekil 6. 3: Engel Geometrisi (Autodesk 2024)

6.2.3 Yapısal Kısıtlamalar

Yapısal kısıtlamalar, bir tasarımın belirli bölgelerindeki mekanik veya yapısal sınırlamaları tanımlayan kurallardır. Bu kısıtlamalar, parçanın işlevselliğini, dayanıklılığını ve güvenilirliğini sağlamak amacıyla belirlenir. Tasarım sürecinde, kullanıcılar veya mühendisler, yükleme noktaları, destek elemanları veya bağlantı noktaları gibi kritik bölgelerde yapısal kısıtlamaları tanımlar. Bu kısıtlamalar, tasarımın bu bölgelerde belirli bir kuvvet veya gerilme kapasitesine sahip olmasını ve belirli mekanik özellikleri karşılmasını garanti eder. Yapısal kısıtlamalar, genellikle mühendislik standartlarına ve tasarım gereksinimlerine göre belirlenir, böylece tasarımın performansı ve güvenilirliği artırılır. Bu kısıtlamalar, tasarım optimizasyonu sırasında da göz önünde bulundurularak, gerekli mühendislik koşullarını karşılayan sonuçlar elde edilir.

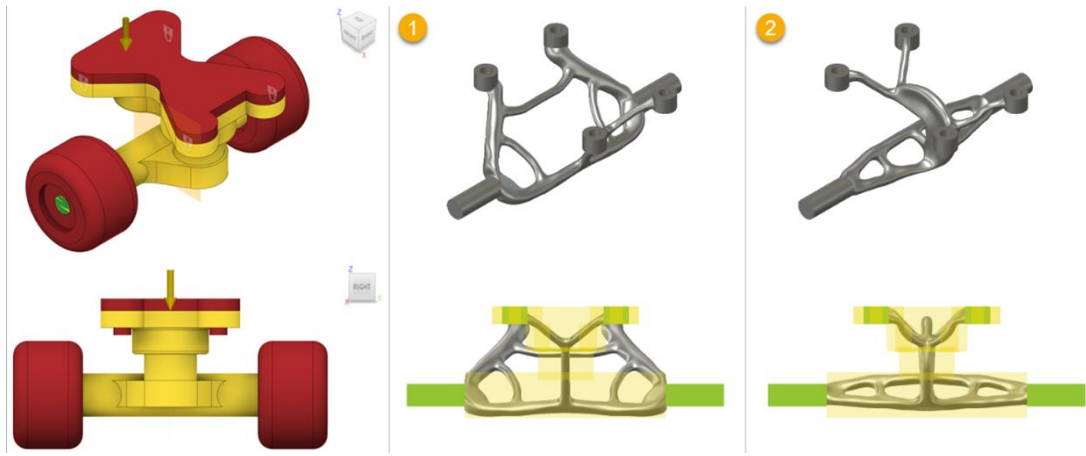
6.2.4 Yapısal Yükler

Yapısal yükler, bir yapının veya bileşenin üzerine etki eden fiziksel kuvvetlerdir ve bu kuvvetler yapının performansını ve güvenliğini doğrudan etkiler. Yapısal yükler, genellikle uygulanan yüklerin türüne ve büyüklüğüne göre tanımlanır, bunlar arasında statik yükler (sabit kuvvetler), dinamik yükler (zamanla değişen kuvvetler), termal yükler (ısı değişimlerinden kaynaklanan kuvvetler) ve rüzgâr veya sismik yükler gibi çevresel etkenler bulunur. Tasarım sürecinde, bu yükler yapının veya bileşenin çalışma koşullarına göre belirlenir ve simülasyonlar ile analizler sırasında dikkate alınarak yapının dayanıklılığı, stabilitesi ve güvenilirliği değerlendirilir. Yapısal yüklerin doğru bir şekilde tanımlanması, yapının istenen performansı göstermesi ve güvenli bir şekilde çalışabilmesi için kritik öneme sahiptir.

6.2.5 Başlangıç Şekli

Başlangıç şekli, bir tasarım sürecinde kullanılan ve genellikle tasarımın optimize edilmeden önceki ilk versiyonunu temsil eden geometridir. Bu şekil, tasarımın temel yapı taşlarını belirler ve optimize edilmeden önce mevcut olan

fiziksel özellikleri içerir. Başlangıç şekli, genellikle tasarım gereksinimlerine, işlevsel hedeflere ve mühendislik standartlarına göre tanımlanır. Tasarımcılar, mevcut mühendislik bilgilerinden ve tasarım ihtiyaçlarından hareketle bu şekli oluşturur ve optimize etme sürecinde bu temel yapı üzerinden geliştirme yaparlar. Başlangıç şekli, optimizasyon ve iyileştirme süreçlerinde referans noktası olarak kullanılır, böylece tasarımın nasıl bir temel üzerinde geliştirildiği ve hangi iyileştirmelerin yapıldığı daha iyi anlaşılabilir.

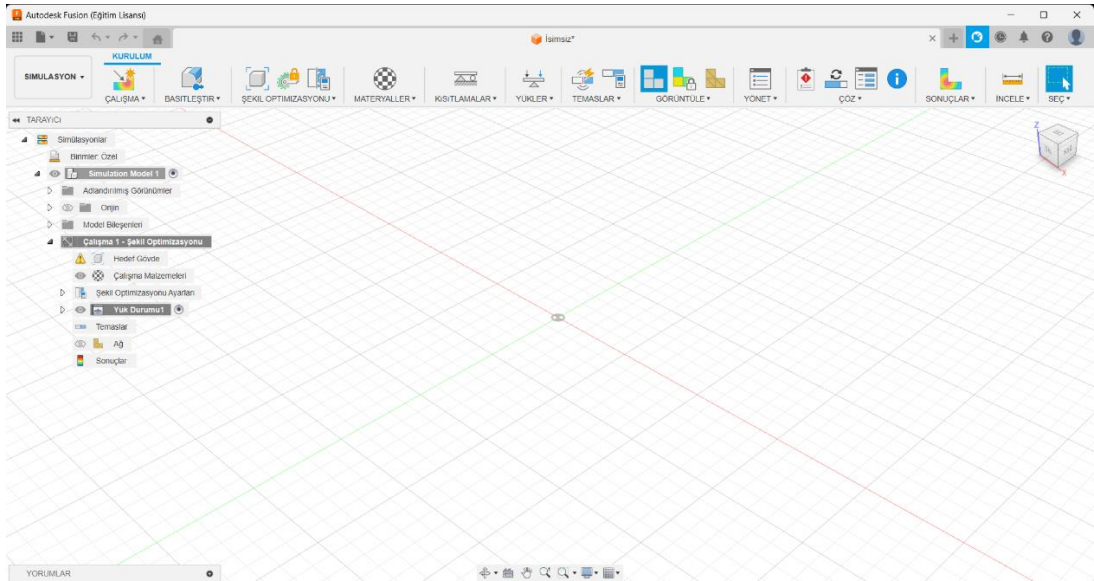


Şekil 6. 4: Başlangıç Şekli (Autodesk 2024)

Bu ana başlıkların dışında geometriye tanımlanan ve tasarımın oluşmasına zemin hazırlayan birkaç parametre daha vardır. İlk parametre olan simetri düzlemi, bir tasarımın iki tarafının veya bölgesinin birbirine simetrik olduğu çizgi veya yüzeyi ifade eder. Tasarımda simetri düzlemi, genellikle estetik ve işlevsel nedenlerle tanımlanır; bu düzlem, tasarımın her iki tarafının eşit olmasını ve dengesini sağlar. Bir diğer parametre ise tasarım hedefleridir. Tasarım hedefleri belirli bir ürünün veya bileşenin gerçekleştirilmesi gereken performans, işlevsellik ve kalite standartlarını belirler. Bu hedefler, kullanıcı gereksinimleri, işlevsel performans kriterleri ve mühendislik standartlarına dayanır.

6.3 TOPOLOJİ OPTİMİZASYONU

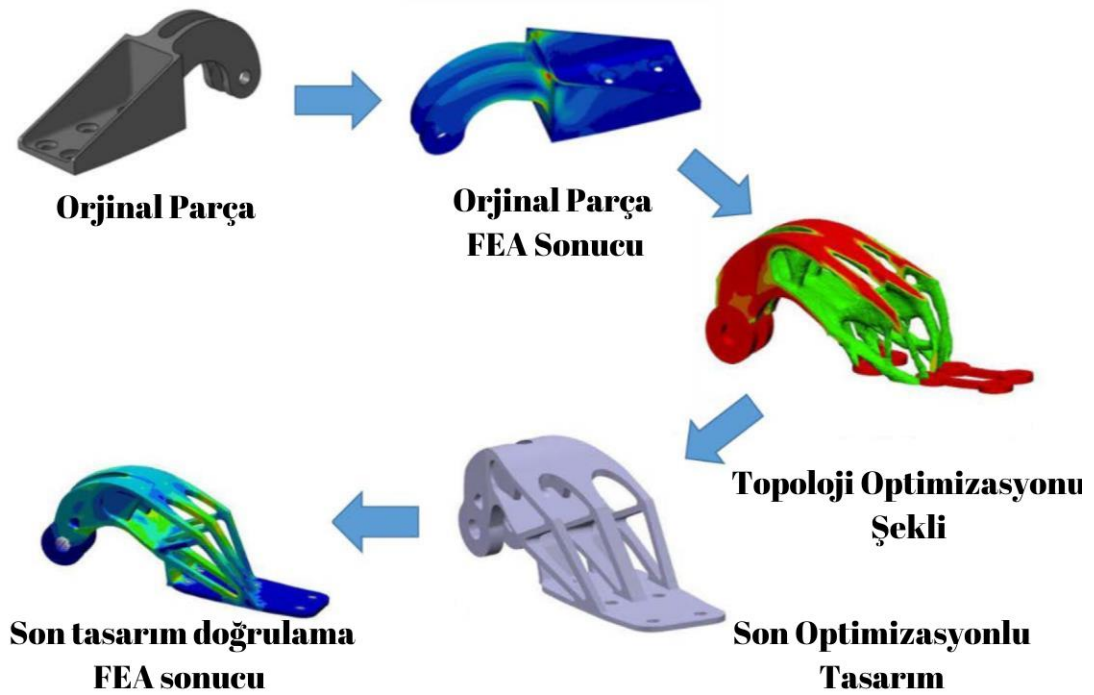
Fusion 360'nın topoloji optimizasyonu özelliği, yapısal performansı en üst düzeye çıkarmak için tasarımları dönüştürmeye olanak tanır. Bu araç, belirlenen yükler, kısıtlamalar ve malzeme parametrelerine göre tasarım alanında en verimli malzeme dağılımını hesaplar, böylece malzeme israfını minimize ederken performansı artırır. Topoloji optimizasyonu, tasarım alanını analiz eder ve malzeme miktarını azaltarak hafif, dayanıklı ve güçlü yapılar oluşturmaya yardımcı olur. Bu işlem, genellikle ağırlığı azaltmak veya yapısal dayanıklılığı artırmak için kullanılır ve özellikle mühendislik ve ürün tasarımı süreçlerinde karmaşık geometriler ve yüksek performans gereksinimleri olan projeler için etkilidir. Topoloji optimizasyonu, özellikle havacılık ve uzay mühendisliği alanlarında hafif ve yüksek performanslı tasarımlar elde etmek için faydalı bir teknik olduğunu kanıtlamıştır (Zhu ve diğ. 2016). Fusion 360, tasarımcıların inovatif ve verimli çözümler geliştirmesine olanak tanır.



Şekil 6. 5: Topoloji Optimizasyonu Modülü Arayüzü

Fusion 360'ta ki topoloji optimizasyonu süreci, kullanıcı dostu arayüzü sayesinde karmaşık optimizasyon görevlerini kolaylıkla yönetmeyi sağlar. Tasarımcılar, belirli bir hedef gövdeyi seçtikten sonra, optimizasyon parametrelerini ve kısıtlamalarını tanımlayarak sürece başlayabilir. Bu parametreler arasında yük

taşıma kapasiteleri, sabitleme noktaları ve üretim yöntemleri gibi kritik unsurlar yer alır. Fusion 360, bu verileri kullanarak, belirli bir yapı için en uygun malzeme dağılımını iteratif bir şekilde hesaplar. Ayrıca, tasarımcılar sonuçları görsel olarak inceleyebilir ve gerekirse tasarımlarını yeniden optimize edebilirler. Bu esneklik, mühendislerin ve tasarımcıların, prototip üretimi öncesinde sanal olarak çeşitli tasarım senaryolarını test etmelerine ve en iyi performans gösteren tasarımı seçmelerine olanak tanır. Fusion 360'ın topoloji optimizasyonu aracı, daha hızlı, daha hafif ve daha dayanıklı ürünler geliştirmek için yenilikçi ve verimli bir yaklaşım sunar.



Şekil 6. 6: Topoloji Optimizasyonu Prosesi (Gebisa 2017)

6.4 MALZEME

Materyal seçimi, tasarımın fiziksel ve kimyasal özelliklerini belirleyen malzeme türlerinin seçilmesini içerir; bu seçim, tasarımın dayanıklılığını, hafifliğini ve maliyetini etkiler. Materyaller genellikle mukavemet, esneklik, sıcaklık dayanıklılığı ve maliyet gibi kriterlere göre seçilir.

Yapılan araştırmalar doğrultusunda, havacılık ve uzay sanayisinde alüminyum alaşımların oldukça tercih edildiği görülmüştür. Bazı benzer çalışmalarda

Al 7075-T6511, Al 7050-T7651, Al 6061-T6, Al 2024-T861, Al 6082-T651 gibi alüminyum alaşımlarına ve Ti-6Al-4V titanyum alaşımına rastlanmıştır. Bu tez çalışmasında tasarım seçenekleri oluşturmak için Alüminyum 6061, Alüminyum 7075 ve Titanyum 6Al-4V malzemeleri kullanılmıştır.

6.4.1 Malzemelerin Kimyasal İçeriği

Alüminyum 6061, yüksek mukavemeti ve hafif yapısıyla öne çıkan bir alüminyum alaşımıdır. Bu alaşım, %95 ila %98,7 arasında alüminyum, %0,8 ila %1,2 magnezyum ve %0,4 ila %0,8 silisyum içerir. Ayrıca, küçük miktarlarda demir, bakır, mangan ve krom gibi diğer elementler bulunabilir. Alüminyum 6061, uçak ve uzay sanayisinden otomotiv endüstrisine, yapısal uygulamalardan spor ekipmanlarına kadar geniş bir kullanım yelpazesine sahiptir. Mukavemeti, işlenebilirliği ve korozyon direnci sayesinde yapısal bileşenlerde ve mekanik parçalarda tercih edilir. Ayrıca, hafifliği ve iyi termal ile elektriksel iletkenlik özellikleri, elektronik cihazlardan ısı transfer sistemlerine kadar birçok farklı uygulama için uygun olmasını sağlar.

Tablo 6. 1: Alüminyum 6061 Kimyasal Bileşimi (Seykoç 2017)

Fe	Si	Cu	Mn	Mg	Zn	Cr	Ti	Diğer	Al
0,7	0,40-0,8	0,15-0,40	0,15	0,8-1,2	0,25	0,04-0,35	0,15	0,15	Kalan

Tablo 6. 2: Alüminyum 6061 Mekanik Özellikleri (Seykoç 2017)

Temper	Akma Mukavemeti (Mpa)	Çekme Mukavemeti (Mpa)	Uzama (%50) min-max	Sertlik (brinel) min-max
-				
0	103-228	55-124	26	30
T4	110-140	180-230	24	65
T60	240-270	260-310	20	95

Alüminyum 7075, yüksek mukavemeti ve dayanıklılığı ile tanınan bir alüminyum alaşımıdır. Bu alaşımın kimyasal içeriği genellikle %87.1 ila %91.4 alüminyum, %5.1 ila %6.1 çinko, %1.2 ila %2.0 bakır, %2.1 ila %2.9 magnezyum ve %0.18 ila %0.28 krom içerir. Alüminyum 7075, özellikle havacılık ve uzay sanayisinde, otomotiv endüstrisinde ve yüksek performanslı spor ekipmanlarında

kullanılır. Bu alaşımın avantajları arasında yüksek çekme mukavemeti, iyi yorulma direnci ve korozyon dayanıklılığı bulunur. Alüminyum 7075, hafifliği ve yüksek performans özellikleri nedeniyle, yapısal uygulamalarda ve dayanıklılığı kritik olan durumlarda tercih edilir.

Tablo 6. 3: Alüminyum 7075 Kimyasal Bileşimi (Seykoç 2017)

Fe	Si	Cu	Mn	Mg	Zn	Cr	Ti	Diğer	Al
0,5	0,4	1,2-2,0	0,3	2,1-2,9	5,1-6,1	0,18-0,28	0,2	0,15	Kalan

Tablo 6. 4: Alüminyum 7075 Mekanik Özellikleri (Seykoç 2017)

Temper	Akma Mukavemeti (Mpa) min-max	Çekme Mukavemeti (Mpa) min-max	Uzama (%50) min-max	Sertlik (brinel) min-max
-				
0	105	225	17	60
T4	460-505	530-570	10	140-160
T6	435	505	12	140

Titanyum 6Al-4V, titanyum, alüminyum ve vanadyumdan oluşan bir alaşımdır ve kimyasal içeriği genellikle %90 ila %94 titanyum, %5.5 ila %6.5 alüminyum ve %3.5 ila %4.5 vanadyum içerir. Bu alaşım, havacılık ve uzay sanayi, tıbbi implantlar, denizaltı ve petrol endüstrisi gibi yüksek performanslı ve zorlu uygulamalarda kullanılır. Titanyum 6Al-4V'in avantajları arasında yüksek çekme mukavemeti, düşük ağırlık ve mükemmel korozyon direnci bulunur. Ayrıca, bu alaşım, yüksek sıcaklık dayanıklılığı ve iyi yorulma direnci özellikleri sayesinde hem hafif hem de dayanıklı bileşenler gerektiren uygulamalarda tercih edilir.

Tablo 6. 5: Titanyum 6Al-4V Kimyasal Bileşimi (Birçelik 2015)

C	V	N	Ti	Al	Fe	O	H
≤ 0,08	3,5-4,5	≤ 0,05	Kalan	5,5-6,75	≤ 0,2	≤ 0,015	≤ 0,015

Tablo 6. 6: Titanyum 6Al-4V Mekanik Özellikleri (Birçelik 2015)

Sertlik HB	Akma Dayanımı (N/mm ²)	Çekme Dayanımı (N/mm ²)	Uzama %	Esneklik Modülü (kN/mm ²)
≤ 310	≥ 830	≥ 895	≥ 10	114

6.5 ÜRETİM YÖNTEMİ

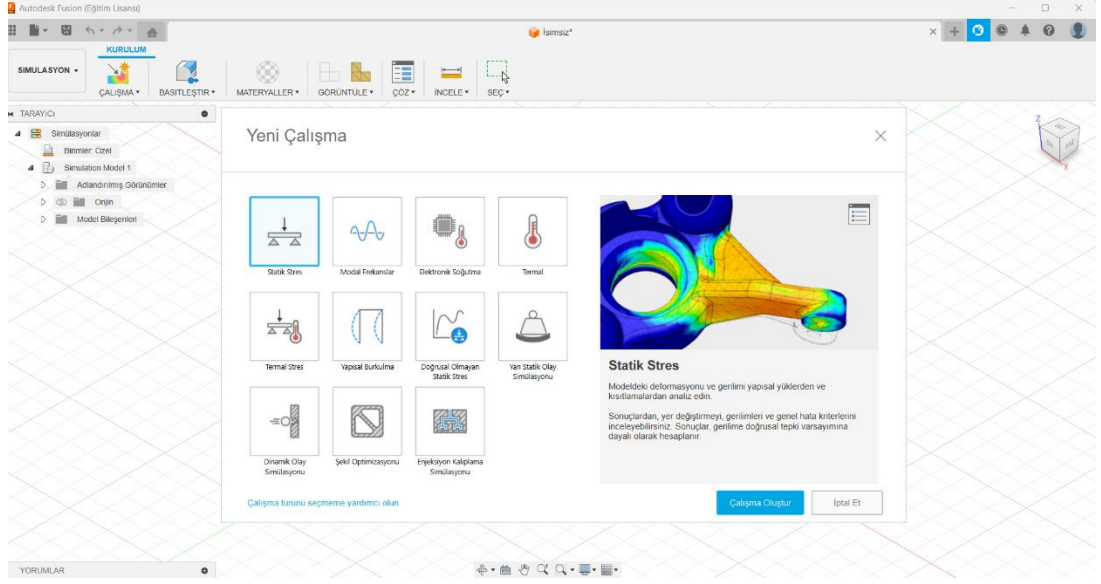
Üretim yöntemleri, tasarımın üretim sürecinde kullanılan teknikleri ve süreçleri ifade eder; bunlar arasında enjeksiyon kalıplama, 3D baskı veya CNC işleme gibi yöntemler bulunur. Her üretim yöntemi, tasarımın işlenebilirliğini, maliyetini ve kaliteyi etkiler. Optimizasyon bilgisayar teknolojisiyle geliştirilmiş olsa da üretim sınırlamaları optimizasyonun maksimum faydalarını elde etmeyi engellemektedir (Jankovics 2019).

Fusion 360, çeşitli üretim yöntemlerini destekleyerek tasarım sürecinde geniş bir uygulama yelpazesi sunar. CNC frezeleme, karmaşık 3D geometrilerin yüksek hassasiyetle işlenmesini sağlar ve delikler, oluklar gibi detaylı özelliklerin işlenmesinde kullanılır. 3D baskı, eklemeli üretim yöntemiyle prototiplerin hızlıca üretilmesini mümkün kılar ve karmaşık iç yapıları olan parçalar için idealdir. Lazer kesim, 2D vektör dosyaları ile metal, akrilik ve ahşap gibi malzemelerin hassas kesimlerini sağlar ve düz yüzeyli geometrilerde kullanılır. Döküm işlemi ise kalıp tasarımı ile metal veya plastik parçaların kalıplar içinde eritilerek dökülmesini mümkün kılar, bu yöntem büyük ve kompleks geometrilerde seri üretim için tercih edilir. Fusion 360, bu üretim yöntemleri ile tasarımcıların farklı geometriler ve malzemeler için uygun üretim çözümleri seçmelerine olanak tanır. Bu tez çalışmasında üretken modelin karmaşık tasarımından dolayı eklemeli imalat, 3 eksenli ve 5 eksenli frezeleme üretim yöntemleri alternatifleri olarak belirlenmiştir.

6.6 ANALİZ YÖNTEMİ

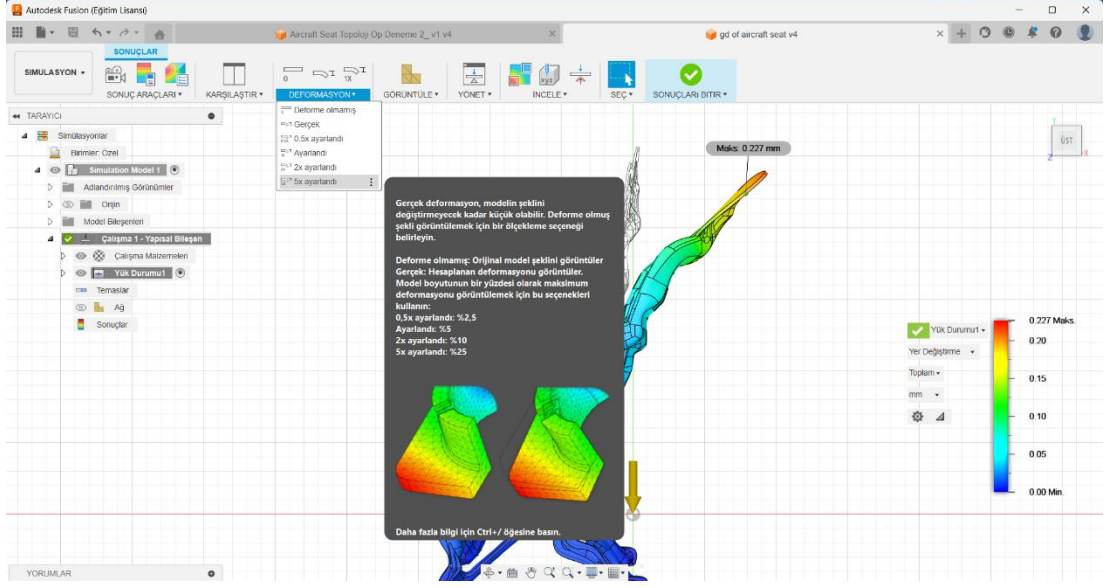
Fusion 360'ın analiz modülü, tasarımları derinlemesine inceleyebilmeyi ve performansını değerlendirebilmeyi sağlayan güçlü araçlar sunar. Bu modül, yapısal analizin yanı sıra akışkanlar, termal ve modal analizleri gerçekleştirme imkânı tanır. Yapısal analizler, malzemenizin altında yatan gerilme ve deformasyonları belirleyerek tasarımın dayanıklılığını test ederken; akışkanlar analizi, hava veya sıvı akışının tasarım üzerindeki etkilerini incelemeye olanak sağlar. Termal analiz, ısı dağılımını ve sıcaklık değişimlerinin etkilerini değerlendirir. Modal analiz ise yapıların titreşim özelliklerini ve rezonans noktalarını belirler. Bu analizler, tasarım sürecinde potansiyel zayıf noktaları tespit etmek, performansı optimize etmek ve

ürünün gerçek dünya koşullarında nasıl davranacağını öngörmek için kullanılır. Fusion 360'ın analiz modülü, tasarım kararlarınızı veri ve simülasyonlarla destekleyerek daha güvenilir ve verimli ürünler geliştirilmesine yardımcı olur.



Şekil 6. 7: Fusion 360 Simülasyon Modülü

Ayrıca, üretken tasarım analiz sonuçlarında deformasyon modülünde modele ait deformasyonun daha net görülebilmesi için çeşitli artırılmış simülasyonlar bulunmaktadır. Bu simülasyonlar, yük altındaki parçaların nasıl davranacağını detaylı bir şekilde gösterir. Örneğin, uygulanan kuvvetlerin, momentlerin ve basınçların model üzerinde yaratacağı deformasyonları artırılmış ölçeklerde görselleştirerek, zayıf noktaları ve potansiyel arızaları belirlemeye yardımcı olur. Bu sayede, tasarımın gerçek dünya koşullarında nasıl performans göstereceği daha iyi anlaşılır ve gerekli iyileştirmeler yapılabilir. Özellikle karmaşık yapılar ve kritik yük taşıyan elemanlar için bu tür simülasyonlar, güvenlik ve dayanıklılık açısından büyük önem taşır.



Şekil 6. 8: Üretken Tasarım Analizi Arttırılmış Deformasyon Seçenekleri

6.7 TEORİK HESAPLAMALAR

Koltuğun yapısal analizi yapılmadan önce, üzerinde etki eden kuvvetler analiz edilmiştir. Serbest cisim diyagramı oluşturulmuş ve ardından üzerine etki eden iki kuvvetin aşağıdaki gibi olduğu sonucuna varılmıştır:

- 1- Yolcunun ağırlığı ve koltuğun bileşenlerinin dikey olarak aşağıya doğru kuvvet uygulayan ağırlığı: Eşitlik (6.1) yolcunun ağırlığı 85 kg olarak belirlenmiş ve Eşitlik (6.2) koltuğun ağırlığı 40 kg olarak değerlendirilmiştir. Yer çekimi ivmesi $9,81 \text{ m/s}^2$ 'dir. Eşitlik (6.4) toplam ağırlık hesaplanmış ve 125 kg olduğu kanıtlanmıştır. Eşitlik (6.5) toplam ağırlık ve yer çekimi ivmesi çarpılarak dikey yöndeki kuvvet hesabı yapılmış ve 1226 N olarak bulunmuştur.

$$W_{insan} = \text{insan ağırlığı} = 85 \text{ kg} \quad (6.1)$$

$$W_{koltuk} = \text{koltuk ağırlığı} = 40 \text{ kg} \quad (6.2)$$

$$g = \text{yer çekimi ivmesi} = 9,81 \text{ m/s}^2 \quad (6.3)$$

$$W_{toplam} = W_{insan} + W_{koltuk} = 85 + 40 = 125 \text{ kg} \quad (6.4)$$

$$F_{dikey} = W_{toplam} \times g = 125 \times 9,81 = 1226 \text{ N} \quad (6.5)$$

2- Hareket halindeki bir uçak sabit bir hızda ilerlemez, bu nedenle uçağın yatay olarak geriye doğru etki eden kuvveti de dikkate alınmalıdır. Bir uçağın ortalama maksimum hızınının 285 km/sa olduğu bir araştırma çalışmasında birçok uçuş hızı analiz edilerek belirlenmiştir. Aynı araştırma çalışmasına dayanarak, kalkış öncesi yerde kayma mesafesi 2314 ft olarak alınmıştır (Noronha ve diğ. 2021). Eşitlik (6.6) hareket denklemi olarak kullanılmıştır. Hesaplamalar, literatür çalışmaları baz alınarak maksimum ortalama hıza göre yapılmıştır. Hesaplamalar sonucu ivme 4.424 m/s^2 olarak bulunmuştur. Eşitlik (6.11) toplam ağırlık ile ivmeyi çarparak yataydaki toplam kuvvet hesaplanmıştır.

$$v^2 - u^2 = 2 \times a \times s \quad (6.6)$$

$$v = \text{son hız} = 285 \frac{\text{km}}{\text{sa}} = 79 \text{ ms}^{-1} \quad (6.7)$$

$$u = \text{başlangıç hızı} = 0 \text{ ms}^{-1} \quad (6.8)$$

$$s = \text{yerde yuvarlanma mesafesi} = 2314 \text{ ft} = 705.3072 \text{ m} \quad (6.9)$$

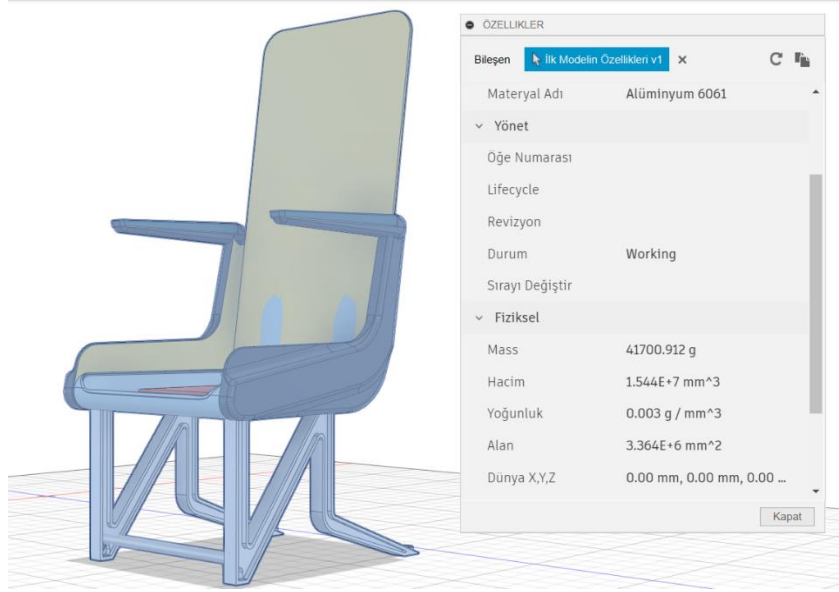
$$a = \text{ivme} = 4.424 \text{ ms}^{-2} \quad (6.10)$$

$$\begin{aligned} F_{\text{toplam}} &= \text{Toplam Yatak Kuvvet} = m \times a \\ &= 125 \times 4.424 = 553,03 \text{ N} \sim 550 \text{ N} \end{aligned} \quad (6.11)$$

6.8 ÇALIŞMA VERİLERİ

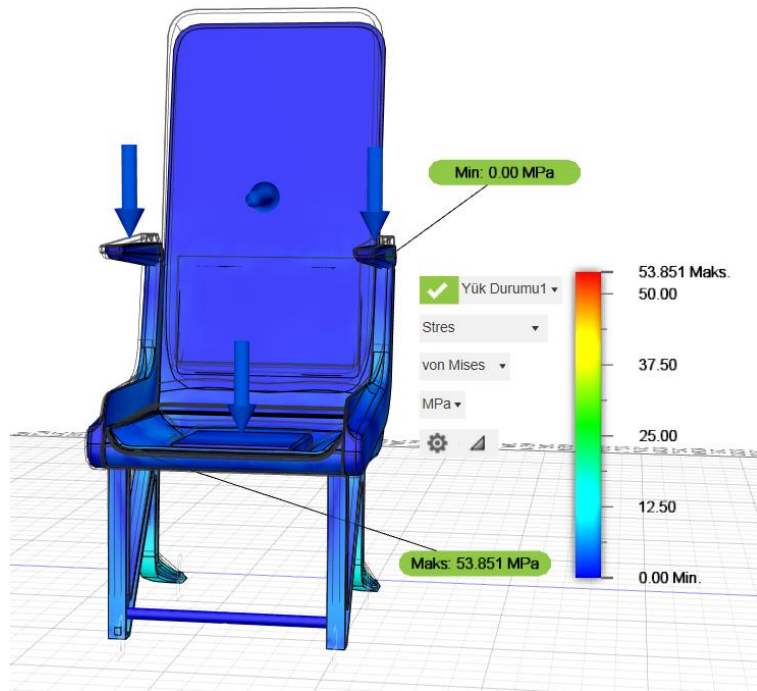
Bu çalışma kapsamında, bir uçak koltuğu tasarımı için Fusion 360'ın üretken tasarım ve topoloji optimizasyonu özellikleri kullanılarak çeşitli analizler gerçekleştirilmiştir. Belirlenen yükler ve kısıtlamalar altında en uygun malzeme dağılımı ve tasarımın yapısal performansı analiz edilmiştir. Kullanılan malzeme olarak, havacılık ve uzay sanayinde yaygın olarak kullanılan Alüminyum 6061 alaşımı seçilmiştir. Bu alaşım, yüksek mukavemet-ağırlık oranı ve korozyon direnci gibi özellikleri nedeniyle tercih edilmiştir.

Henüz optimize edilmemiş modelin ağırlığı 41.700 kg olarak belirlenmiştir.

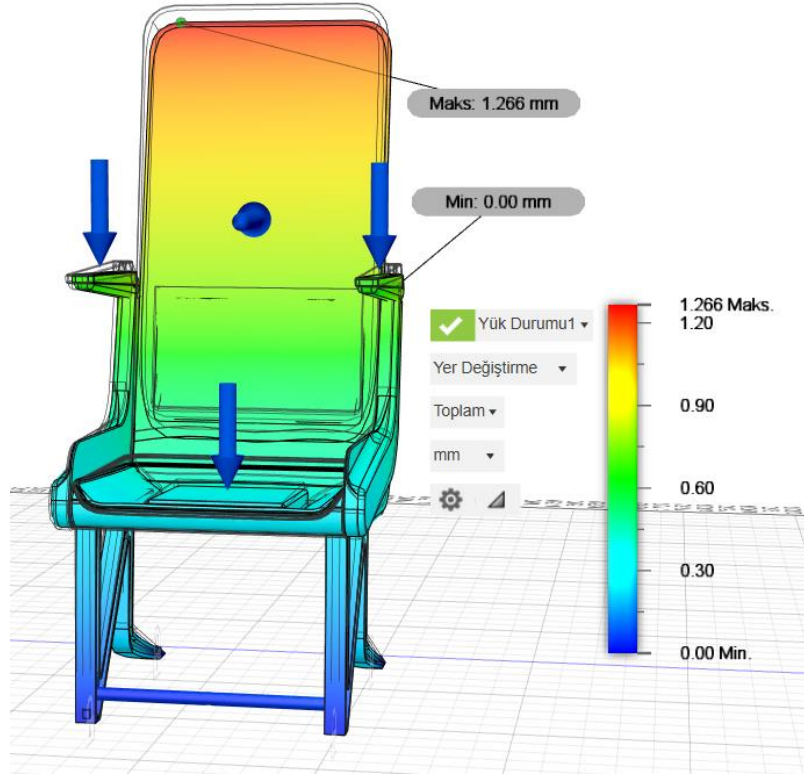


Şekil 6. 9: Optimize Edilmemiş Modelin Fiziksel Özellikleri

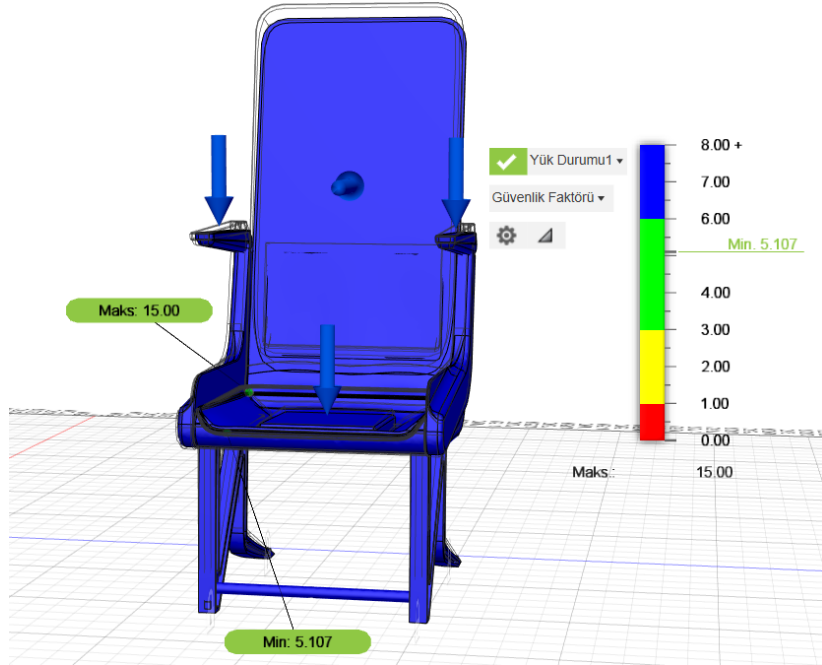
Optimize edilmemiş modelin optimize edilmiş modeller ile kıyası yapılabilmesi için statik analizleri yapılmıştır. Maksimum Von Mises gerilmesi 53,851 MPa, maksimum yer değiştirme 1,266 mm ve minimum emniyet faktörü 5,107 olarak bulunmuştur.



Şekil 6. 10: Optimize Edilmemiş Modelin Von Mises Gerilme Analizi



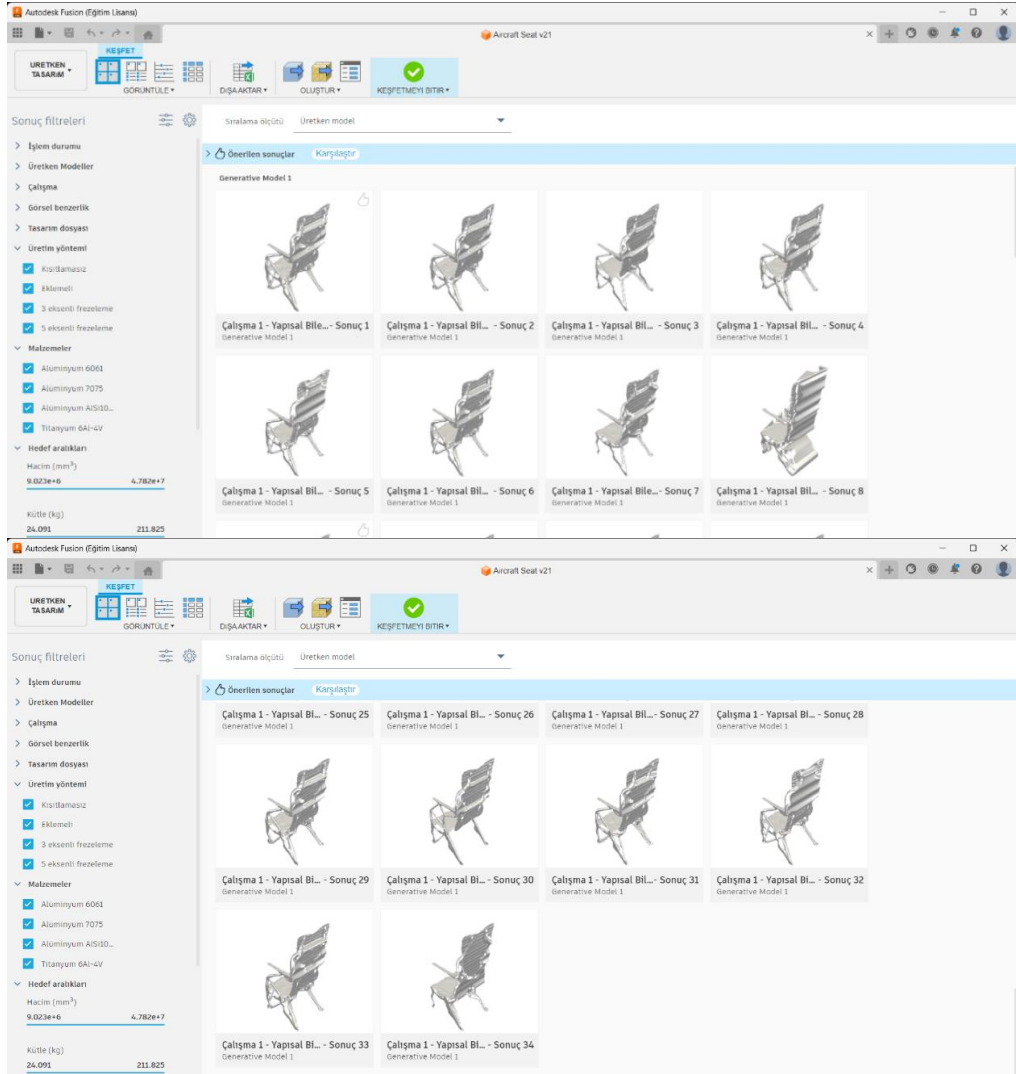
Şekil 6. 11: Optimize Edilmemiş Modelin Yer Değiştirme Analizi



Şekil 6. 12: Optimize Edilmemiş Modelin Güvenlik Faktörü Analizi

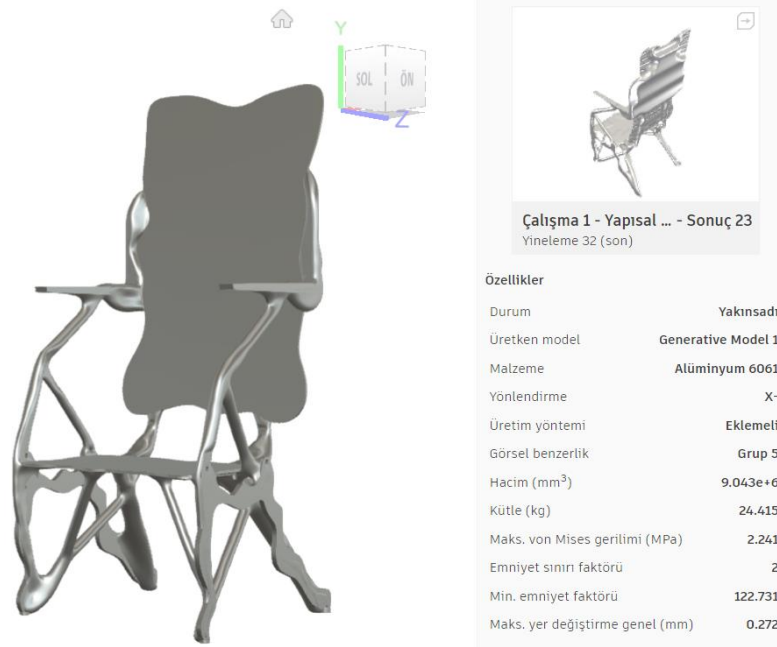
6.8.1 Üretken Tasarım

Üretken tasarım süreci tamamlandığında yazılım 34 adet tasarım alternatifi sunmuştur. Bu tasarım alternatifleri girilen malzeme çeşitleri ve farklı üretim yöntemleri kombinasyonlarından oluşmaktadır. Bu tasarım seçeneklerinin her biri detaylı incelenebilir ve sağ tarafında modele ait özellikler kısmında modelin malzemesi, üretim yöntemi, ağırlığı görünmektedir. Buna ek olarak analiz parametreleri hakkında da bilgi vermektedir. Maksimum Von Mises gerilmesi, minimum emniyet faktörü ve maksimum yer değiştirme bu özellikler sekmesinde sunulmaktadır. Modelin seçimi sırasında bu özellikler arasından amaca uygun sınırlar belirlenerek en olası model seçilebilir.



Şekil 6. 13: Üretken Tasarım Modülünün Sunduğu Tasarım Alternatifleri

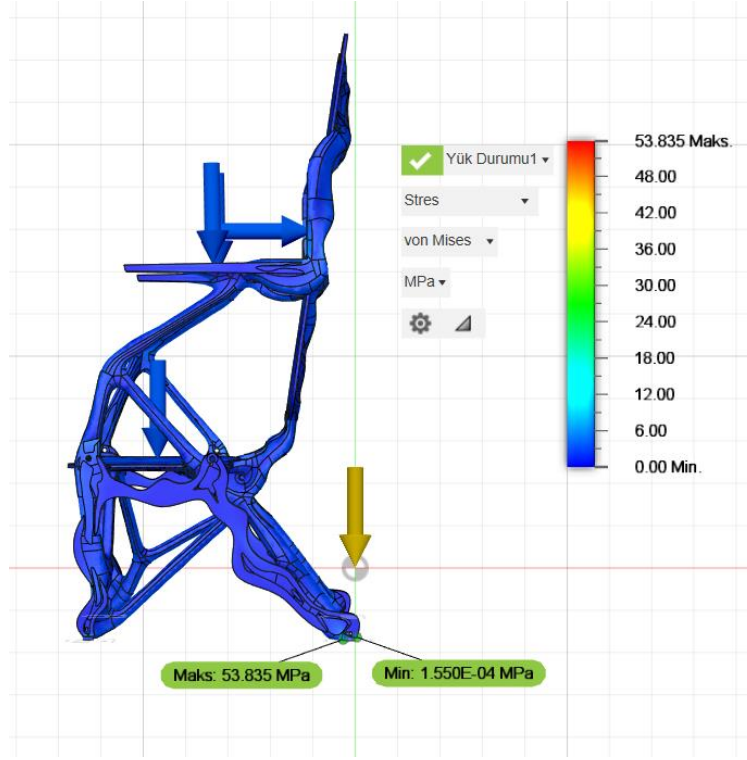
Seçilen model maksimum Von Mises gerilmesinin düşük, maksimum yer değiştirmenin az ve minimum emniyet faktörünün diğer tasarım seçeneklerine göre yüksek olması ile dikkate alınmıştır.



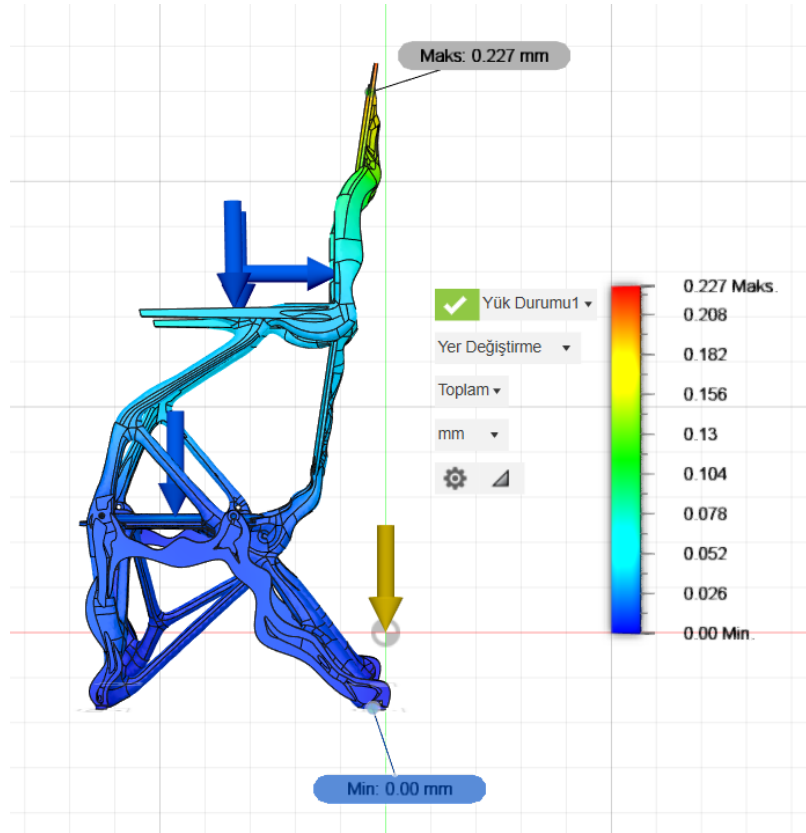
Şekil 6. 14: Seçilen Üretken Modelin Tasarım Özellikleri

Maksimum Von Mises gerilmesi 2,241 MPa, maksimum yer değiştirme 0,272 mm ve minimum emniyet faktörü 122,731 olarak belirlenmiştir.

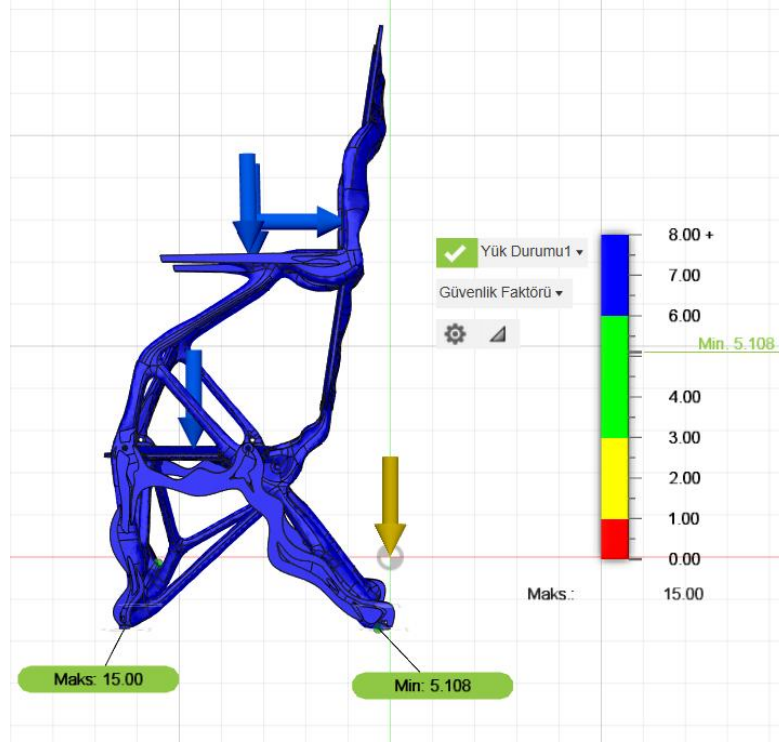
Üretken model analiz edildikten sonra Von Mises gerilmesinin, yer değiştirmenin ve güvenlik faktörünün model üzerindeki maksimum ve minimum olduğu yerler belirlenmiştir.



Şekil 6. 15: Üretken Modelin Von Mises Gerilme Analizi



Şekil 6. 16: Üretken Modelin Yer Değiştirme Analizi



Şekil 6. 17: Üretken Modelin Güvenlik Faktörü Analizi

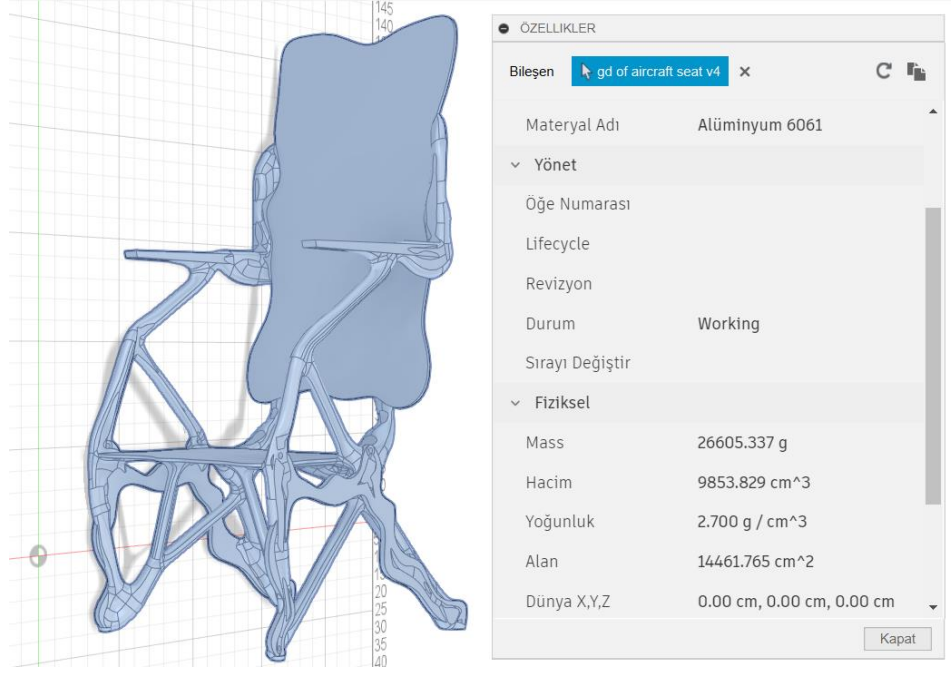
Üretken tasarım süreci sonucunda, bu ağırlık 26.605 kg'a düşürülmüştür. Bu optimizasyon sonucu ağırlıktan yüzdesel olarak ne kadar azalma gerçekleştiğini bulmak için aşağıdaki işlemler gerçekleştirilmiştir. Eşitlik (6.12), optimize edilmemiş modelden optimize edilmiş modelin ağırlığını çıkartarak kaç kilogram ağırlık azaltıldığını bulmak içindir. Eşitlik (6.13), bu azalan ağırlık miktarının yüzdesel hesabı için kurulan denklemdir. Eşitlik (6.15), azalma miktarı yüzdesel olarak yaklaşık %36,2 olarak bulunmuştur.

$$\text{Ağırlık Azalma Miktarı} = 41700 - 26605 = 15095 \text{ g} \quad (6.12)$$

$$\text{Yüzde Azalma} = \left(\frac{\text{azalma miktarı}}{\text{başlangıç miktarı kütle}} \right) \times 100 \quad (6.13)$$

$$\text{Yüzde Azalma} = \left(\frac{15095}{41700} \right) \times 100 \quad (6.14)$$

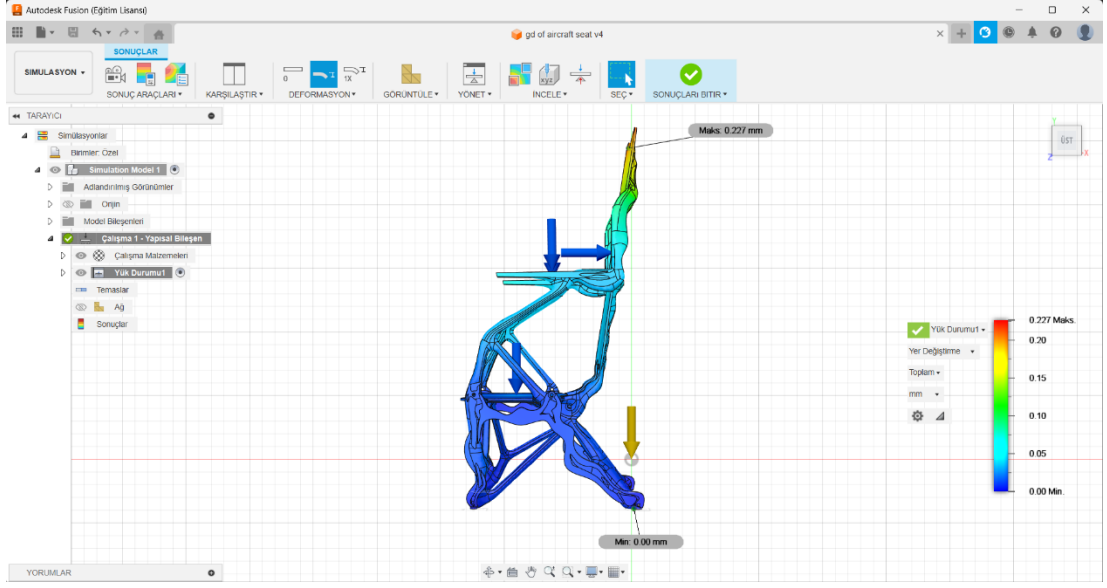
$$\text{Yüzde Azalma} = (0,362) \times 100 = \%36,2 \quad (6.15)$$



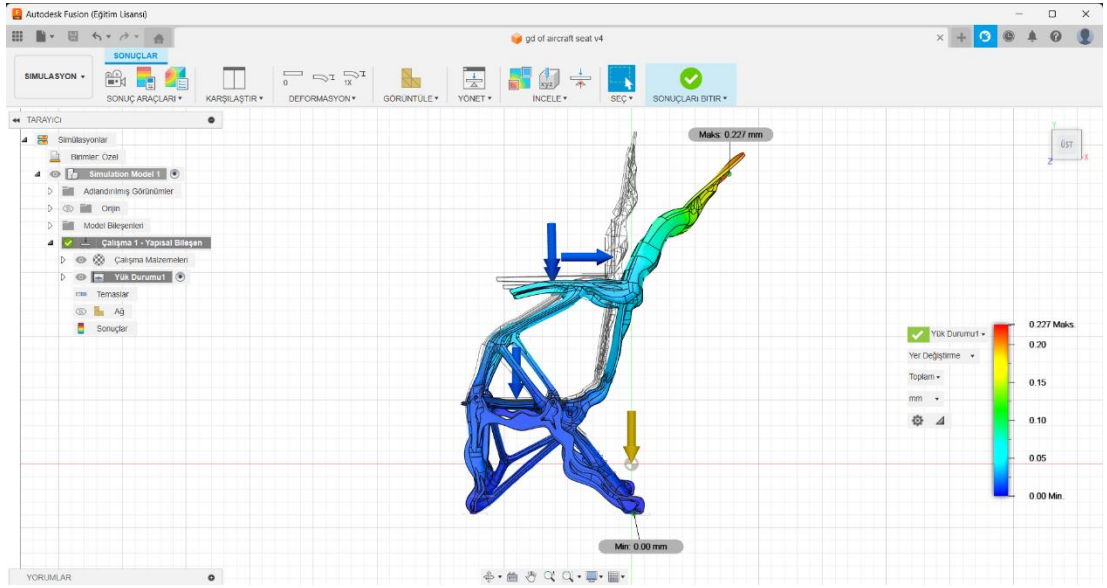
Şekil 6. 18: Üretken Tasarım Modelinin Fiziksel Özellikleri

Bu veriler, optimize edilen tasarımın yük taşıma kapasitesini artırdığını ve kritik bölgelerdeki gerilme yoğunluğunun azaldığını göstermektedir. Bu da tasarımın dayanıklılığını ve güvenilirliğini artırmıştır.

Üretken tasarım analiz sonuçlarında deformasyon modülünde modele ait deformasyonun daha net görülebilmesi için çeşitli artırılmış simülasyonlar kullanılmıştır. Bu simülasyonlar, tasarımın zayıf noktalarının ve potansiyel sorunlarının belirlenmesine yardımcı olmuştur. Üretken tasarım sonucu oluşan modele kuvvetler 5x ile uygulanmış gibi simülasyona alınarak deformasyonun daha net görünmesi sağlanmıştır.



Şekil 6. 19: Analizin Gerçek Deformasyon Görüntüsü

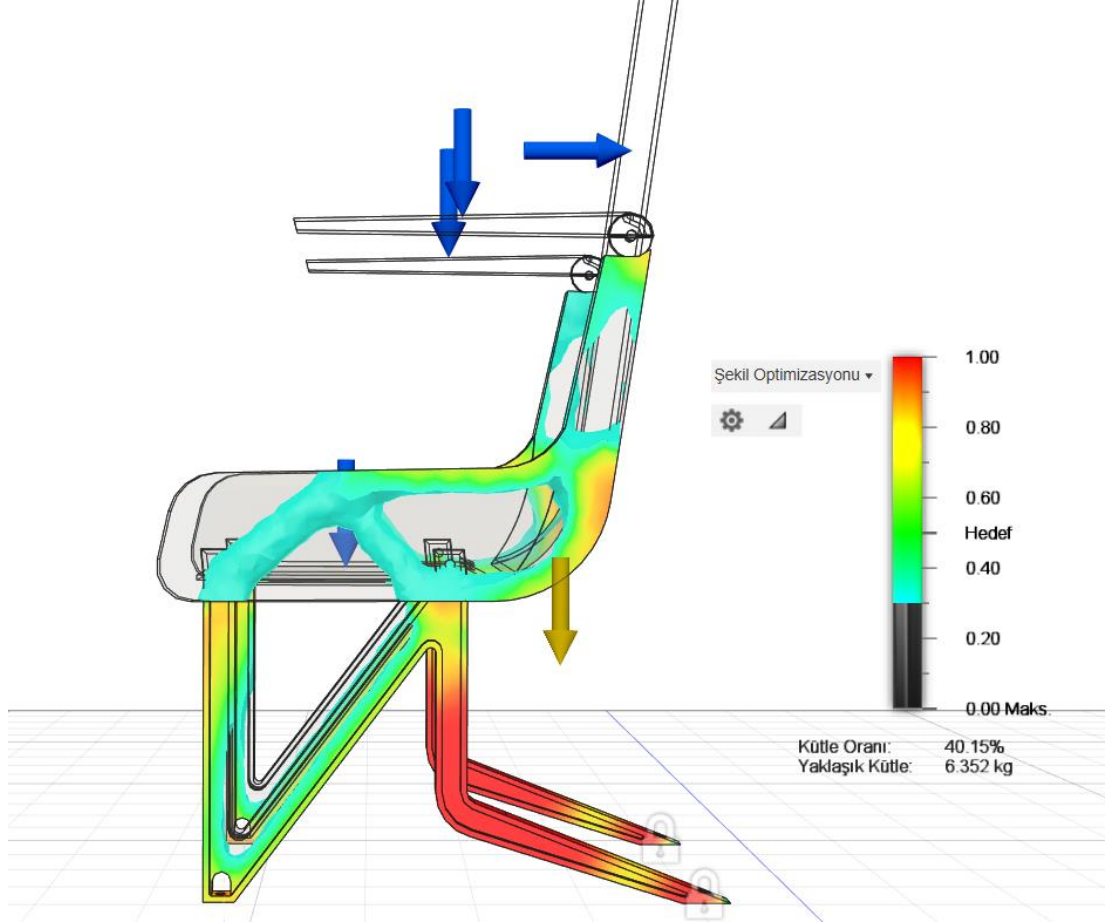


Şekil 6. 20: Analizin 5x İle Arttırılmış Simülasyon Görüntüsü

6.8.2 Topoloji Optimizasyonu

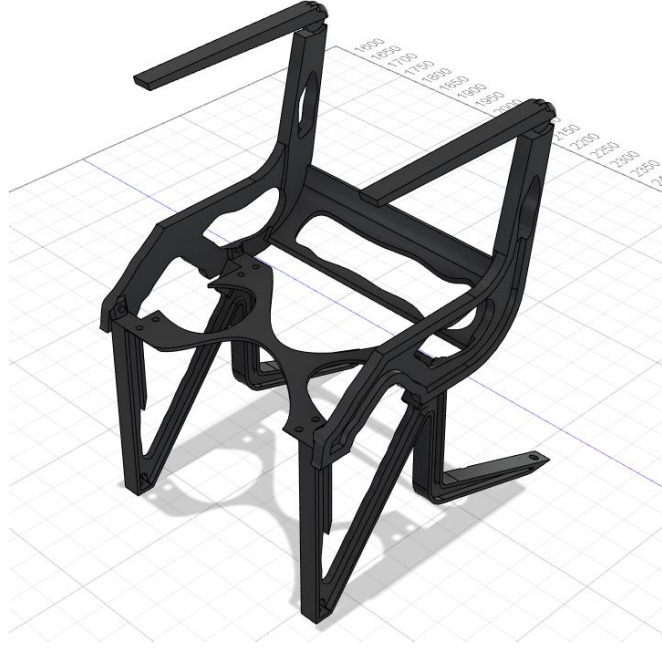
Bir sonraki aşama topoloji optimizasyonu modülünde koltuğu tasarlamak ve analiz etmektir. Optimize edilmemiş koltuk tasarımı Fusion 360'ın simülasyon bölümünde yer alan topoloji optimizasyonu modülüne aktarılmıştır. Tasarım modülünde bulunan tasarım gereklilikleri programa tanımlandıktan sonra hedef

gövdeden en güvenli ve en güvensiz sınırlar arasından amaca uygun ağırlık azaltılması seçilerek form tasarım kısmına referans olarak aktarılmıştır.



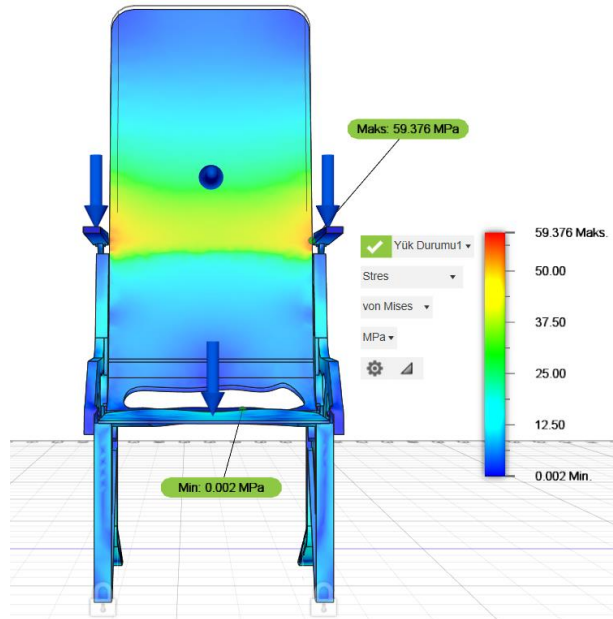
Şekil 6. 21: Topoloji Optimizasyonu Sonucu

Topoloji optimizasyonu sonucunu referans alarak mevcut gövde üzerinden yeni yapılar atayarak serbest çizim komutuyla belirlenen yerlerden ağırlık çıkartılmıştır.

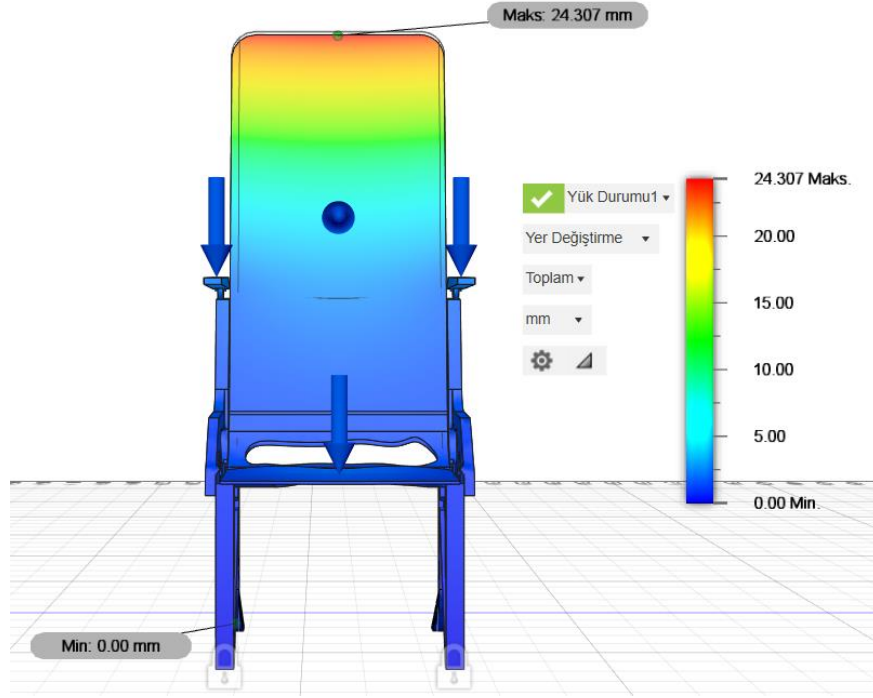


Şekil 6. 22: Topoloji Optimizasyonu Sonucuna Göre Düzenlenen Koltuk Gövdesi

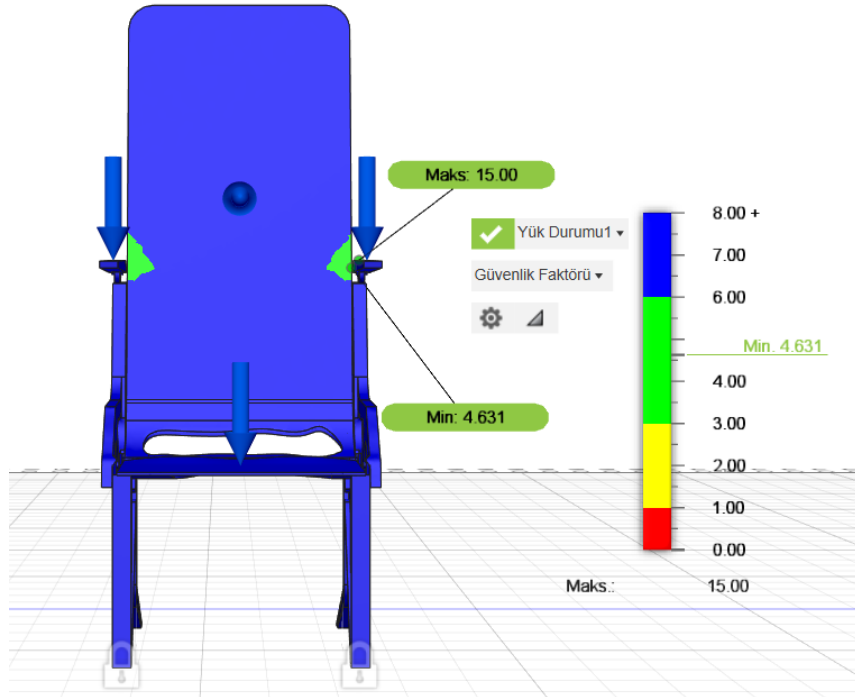
Topoloji optimizasyonu oluşturulan model analiz edildikten sonra Von Mises gerilmesinin, yer değıştirmenin ve güvenlik faktörünün model üzerindeki maksimum ve minimum olduğu yerler belirlenmiştir. Maksimum Von Mises gerilmesi 59,376 MPa, maksimum yer değıştirme 24,307 mm ve minimum emniyet faktörü 4,631 olarak belirlenmiştir.



Şekil 6. 23: Topoloji Optimizasyonu Oluşturulan Modelin Von Mises Gerilme Analizi

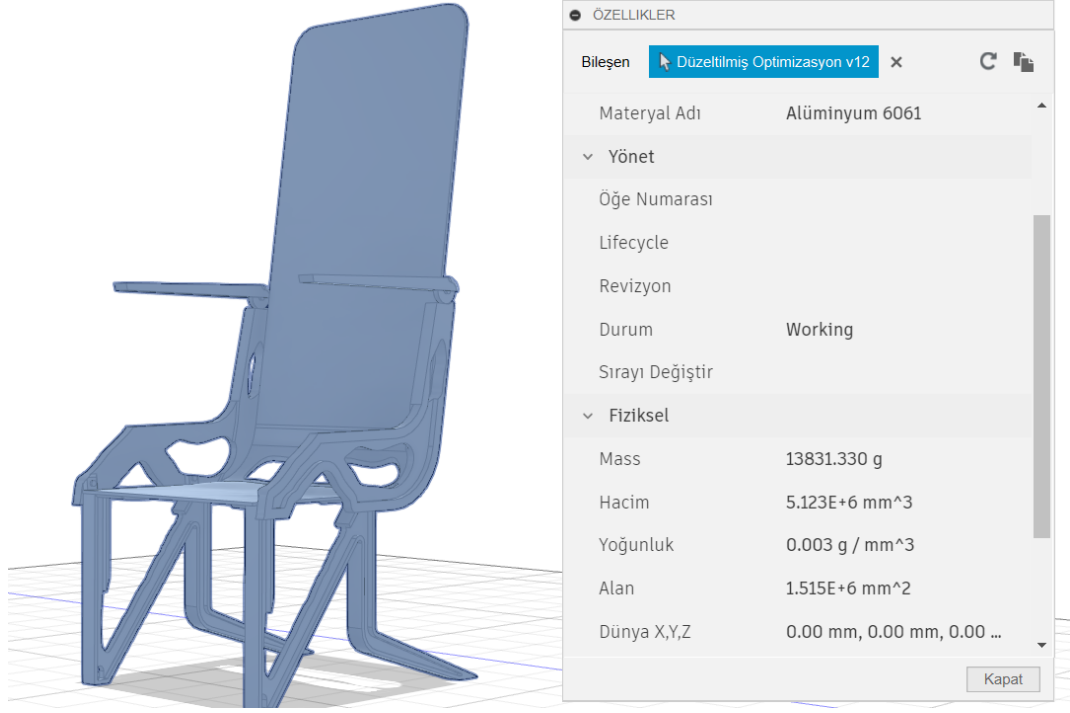


Şekil 6. 24: Topoloji Optimizasyonu Oluşturulan Modelin Yer Değişirme Analizi



Şekil 6. 25: Topoloji Optimizasyonu Oluşturulan Modelin Güvenlik Faktörü Analizi

Üretken tasarımda kullanılan aynı koltuk tasarımı topoloji optimizasyonu sonucunda 13.831 kg'a kadar ağırlığı azaltılabilmektedir.



Şekil 6. 26: Topoloji Optimizasyonu Tasarımının Özellikleri

41.700 kg'dan 13.831 kg'a düşürülmüştür. Bu optimizasyon sonucu ağırlıktan yüzdesel olarak ne kadar azalma gerçekleştiğini bulmak için aşağıdaki işlemler gerçekleştirilmiştir. Eşitlik (6.16), optimize edilmemiş modelden optimize edilmiş modelin ağırlığını çıkartarak kaç kilogram ağırlık azaltıldığını bulmak içindir. Eşitlik (6.17), bu azalan ağırlık miktarının yüzdesel hesabı için kurulan denklemdir. Eşitlik (6.19), azalma miktarı yüzdesel olarak yaklaşık %67 olarak bulunmuştur.

$$\text{Ağırlık Azalma Miktarı} = 41700 - 13831 = 27869 \text{ g} \quad (6.16)$$

$$\text{Yüzde Azalma} = \left(\frac{\text{azalma miktarı}}{\text{başlangıç miktarı kütle}} \right) \times 100 \quad (6.17)$$

$$\text{Yüzde Azalma} = \left(\frac{27869}{41700} \right) \times 100 \quad (6.18)$$

$$\text{Yüzde Azalma} = (0,668) \times 100 \cong \%67 \quad (6.19)$$

Bu veriler, optimize edilen tasarımın ağırlığının çok yüksek oranda azaltıldığını göstermektedir. Yapılan analizler sonucunda en yüksek gerilme sırt destek kısmının orta kenarlarında 59,376 MPa olarak bulunmuştur. En fazla yer değiştirme sırt destek kısmının gövdeye en uzak kenarında 24,307 mm olarak bulunmuştur. Min. Güvenlik faktörü gerilmenin maksimum Olduğu yerde 4.631 olarak bulunmuş ve kriter güvenlik faktörü 2 olarak alındığı için modelin güvenli olduğuna karar verilmiştir.

Bu sonuçlar, üretken tasarım ve topoloji optimizasyonu tekniklerinin, tasarımın yapısal performansını artırırken malzeme israfını ve toplam ağırlığı önemli ölçüde azaltabileceğini göstermektedir.

7. SONUÇ ve ÖNERİLER

Bu çalışma kapsamında, uçak koltuğu tasarımı için Fusion 360'ın üretken tasarım ve topoloji optimizasyonu özellikleri kullanılarak kapsamlı analizler gerçekleştirilmiştir. Belirlenen yükler ve kısıtlamalar altında en uygun malzeme dağılımı ve tasarımın yapısal performansı değerlendirilmiştir. Malzeme olarak havacılık ve uzay sanayinde yaygın olarak kullanılan alüminyum 6061 alaşımı seçilmiştir. Bu alaşım, yüksek mukavemet-ağırlık oranı ve korozyon direnci gibi üstün özellikleri nedeniyle tercih edilmiştir.

Başlangıçta optimize edilmemiş modelin ağırlığı 41.700 kg olarak belirlenmiştir. Maksimum Von Mises gerilmesi 53,851 MPa, maksimum yer değiştirme 1,266 mm ve minimum emniyet faktörü 5,107 olarak bulunmuştur. Üretken tasarım süreci tamamlandığında, Fusion 360 yazılımı 34 adet tasarım alternatifi sunmuştur. Bu tasarım alternatifleri, girilen malzeme çeşitleri ve farklı üretim yöntemleri kombinasyonlarından oluşmaktadır. Seçilen model, maksimum Von Mises gerilmesinin düşük, maksimum yer değiştirmenin az ve minimum emniyet faktörünün diğer tasarım seçeneklerine göre yüksek olması ile dikkate alınmıştır. Maksimum Von Mises gerilmesi 2,241 MPa, maksimum yer değiştirme 0,272 mm ve minimum emniyet faktörü 122,731 olarak belirlenmiştir. Bu analizler sonucunda, optimize edilen modelin yük taşıma kapasitesinin arttığı ve kritik bölgelerdeki gerilme yoğunluğunun azaldığı görülmüştür. Bu da tasarımın dayanıklılığını ve güvenilirliğini önemli ölçüde artırmıştır. Üretken model analiz edildikten sonra Von Mises gerilmesinin, yer değiştirmenin ve güvenlik faktörünün model üzerindeki maksimum ve minimum olduğu yerler belirlenmiştir. Üretken tasarım süreci sonucunda, başlangıç ağırlığı 41.700 kg olan model 26.605 kg'a düşürülmüştür. Hesaplamalar sonucunda, yaklaşık %36,2 oranında bir ağırlık azaldığı tespit edilmiştir.

Üretken tasarım analiz sonuçlarında, deformasyon modülünde modele ait deformasyonun daha net görülebilmesi için çeşitli artırılmış simülasyonlar kullanılmıştır. Bu simülasyonlar, tasarımın zayıf noktalarının ve potansiyel sorunlarının belirlenmesine yardımcı olmuştur. Üretken tasarım sonucu oluşan

modele kuvvetler 5x ile uygulanmış gibi simülasyona alınarak deformasyonun daha net görünmesi sağlanmıştır.

Bir sonraki aşama, topoloji optimizasyonu modülünde koltuğu tasarlamak ve analiz etmektir. Optimize edilmemiş koltuk tasarımı, Fusion 360'ın simülasyon bölümünde yer alan topoloji optimizasyonu modülüne aktarılmıştır. Tasarım modülünde bulunan tasarım gereklilikleri programa tanımlandıktan sonra, hedef gövdeden en güvenli ve en güvensiz sınırlar arasından amaca uygun ağırlık azaltılması seçilerek form tasarım kısmına referans olarak aktarılmıştır. Topoloji optimizasyonu sonucunda referans alınarak mevcut gövde üzerinden yeni yapılar atayarak, serbest çizim komutuyla belirlenen yerlerden ağırlık çıkartılmıştır. Topoloji optimizasyonu sonucu oluşturulan model analiz edildikten sonra, Von Mises gerilmesinin, yer değiştirmenin ve güvenlik faktörünün model üzerindeki maksimum ve minimum olduğu yerler belirlenmiştir. Üretken tasarımda kullanılan aynı koltuk tasarımı, topoloji optimizasyonu sonucunda 13.831 kg'a kadar ağırlığı azaltılmıştır. 41.700 kg'dan 13.831 kg'a düşürülen koltuk gövdesinde, yaklaşık %67 oranında bir ağırlık azaltılması gerçekleşmiştir.

Analizler sonucunda, en yüksek gerilmenin sırt destek kısmının orta kenarlarında 59,376 MPa olduğu bulunmuştur. En büyük yer değiştirme, sırt destek kısmının gövdeye en uzak kenarında 24,307 mm olarak tespit edilmiştir. Minimum güvenlik faktörü, gerilmenin maksimum olduğu noktada 4.631 olarak bulunmuştur. Bu veriler, optimize edilen tasarımın ağırlığının önemli ölçüde azaldığını ve gerilme yoğunluğunun, minimum güvenlik faktörünün tehlike yaratmadığı değerlerde olduğunu fakat yer değiştirmenin diğer modellere göre yüksek olduğunu göstermektedir.

Gelecekte yapılacak çalışmalar için öncelikle, kritik bölgelerdeki gerilme yoğunluğunu azaltmak ve emniyet katsayısını artırmak amacıyla destek elemanları eklenmelidir. Özellikle sırt desteği ile ara desteğin birleşim yerlerinde ekstra takviyeler yapılmalıdır. Bu, tasarımın güvenilirliğini artıracak ve uzun vadede performansını iyileştirecektir. Kullanılan alüminyum 6061 alaşımının özellikleri göz önünde bulundurularak, gerekirse farklı alaşımlar veya kompozit malzemeler ile karşılaştırmalı analizler yapılmalıdır. Havacılık ve uzay sanayinde kullanılan diğer yüksek mukavemetli ve hafif malzemeler incelenerek, en uygun malzeme seçimi

sağlanmalıdır. Üretken tasarım sürecinde kullanılan üretim yöntemlerinin optimize edilmesi, üretim maliyetlerini düşürebilir ve üretim sürecini daha verimli hale getirebilir. Eklemeli imalat teknolojileri veya ileri üretim teknikleri gibi yöntemlerin tamamı değerlendirilmelidir. Analiz sonuçlarının doğruluğunu teyit etmek için prototip üretimi ve yapısal testler gerçekleştirilmelidir. Gerçek dünya koşullarında yapılan testler, tasarımın performansını ve dayanıklılığını daha iyi değerlendirmeyi sağlar. Mevcut tasarımın daha da optimize edilmesi için ek simülasyon çalışmaları yapılmalıdır. Bu çalışmalar, tasarımın zayıf noktalarının belirlenmesine ve iyileştirme alanlarının tespit edilmesine yardımcı olacaktır. Hem üretken tasarımda hem topoloji optimizasyonunda sırt ve oturma kısımları tasarıma dahil edilmemiştir. İlerleyen çalışmalarda bu destek kısımlarında da optimizasyon yapılması denenebilir. Bu öneriler doğrultusunda yapılacak çalışmalar, uçak koltuğu tasarımının daha da iyileştirilmesine ve havacılık sanayisinde daha güvenli, dayanıklı ve hafif tasarımların geliştirilmesine katkı sağlayacaktır.

8. KAYNAKLAR

Autodesk, “Experimental Solvers: New Capabilities in Fusion 360 Generative Design [online]”, (2024), <https://www.autodesk.com/autodesk-university/article/Experimental-Solvers-New-Capabilities-Fusion-360-Generative-Design-2021>, (2021).

Autodesk, “Generative design for Architecture, Engineering & Construction [online]”, (2024), <https://www.autodesk.com/solutions/generative-design/architecture-engineering-construction> , (2024).

Autodesk, “Product Documentation [online]”, (2024), <https://help.autodesk.com/view/fusion360/ENU/?guid=GD-DESIGN-SPACE> , (2024).

Başçı, Ü. G., Yamaoğlu, R., “New generation production technology: additive manufacturing via FDM”, *International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry*, 5(2), 339-352, (2021).

Birçelik. “Ti6Al4V Eli Titanyum Grade 5 Eli (Grade 23) [online]”, (2024), <https://bircelik.com/tr/kategori/ti6al4v-eli-titanyum> , (2015).

Brackett, D., Ashcroft, I., Hague, R., “Topology optimization for additive manufacturing”, *22nd Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium*, Texas USA, (2011).

Dassault Systemes, “GENERATIVE DESIGN ENGINEERING [online]”, (2024), <https://events.3ds.com/generative-design-engineering> , (2024).

Dedeakayoğulları, H., Kaçal, A., “Eklemeli imalat teknolojileri ve kullanılan talaşlı imalat yöntemleri üzerine yapılan çalışmaların değerlendirilmesi”, *İmalat teknolojileri ve uygulamaları*, 1(1), 1-12, (2020).

Dynamobim, “Generative Design v22.3.10 for Revit 2022 Released [online]”, (2024), <https://dynamobim.org/generative-design-v22-3-10-for-revit-2022-released/> ,(2022).

Erden, S., Yayla, P., “Finite Element Stress Analysis of Airplane Seat”, *European Mechanical Science*, 5(1), 6-13, (2021).

Erol, B., “Uçak Komponentlerinin Bilgisayar Destekli Malzeme Seçimi ve Topoloji Optimizasyonu ile Tasarımı”, Yüksek Lisans Tezi, *Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Malzeme Bilimi ve Mühendisliği AD*, İzmir, 163-169, (2019).

Eves, J., Toropov, V. V., Thompson, H. M., Gaskell, P. H., Doherty, J. J., Harris, J. “Topology optimization of aircraft with non-conventional configurations”, *8th World Congress on Structural and Multidisciplinary Optimization*, Portugal ,(2009).

Gebisa, A. W., Lemu, H. G., “A case study on topology optimized design for additive manufacturing”, *In IOP conference series: materials science and engineering*, 276 No. 1, p. 012026, IOP Publishing, (2017).

Goengineer, “What Is Generative Design To The SolidWorks Cad User [online]”, (2024), <https://www.goengineer.com/blog/what-is-generative-design-to-the-solidworks-cad-user> , (2024).

Goldstein, M. H., Sommer, J., Buswell, N. T., Li, X., Sha, Z., Demirel, H. O.” Uncovering generative design rationale in the undergraduate classroom”, *In 2021 IEEE Frontiers in Education Conference (FIE)*, 1-6. USA, (2021).

Goossens, R. H. M., Snijders, C. J., Fransen, T., “Biomechanical analysis of the dimensions of pilot seats in civil aircraft”, *Applied ergonomics*, 31(1), The Netherlands, 9-14, (2000).

Gupta, A., Soni, V., Shah, D., Lakdawala, A., “Generative design of main landing gear for a remote-controlled aircraft”, *Materials Today: Proceedings*, (2023).

Gupta, I., Kalra, P., Chawla, P., Singh, J., “Evaluation of pilot’s seat design of civil aircraft for Indian anthropometric data by using Delmia human software”, *Procedia Manufacturing*, 26,USA, 70-75, (2018).

HAINES, “History of 3D Printing: When Was 3D Printing Invented? [online]”, (2024) <https://all3dp.com/2/history-of-3d-printing-when-was-3d-printing-invented/> , (2022)

Hamit Arslan, “Dökümcülük [online]”, (2024), <https://www.hamitarslan.com/dokumculuk> , (2017).

Hidkom, “5 Eksenli CNC İşleme Nedir [online]”, (2024), <https://www.hidkom.com/5-eksenli-cnc-isleme-nedir/> , (2023).

Hub, J., “A study on topology optimization of airplane air brake bracing beam”, *International Conference on Military Technologies (ICMT)*, Czech Republic, pp. 1-4, (2019).

Jankovics, D., “Customized topology optimization for additive manufacturing”, *University of Ontario Institute of Technology*, (2019).

Junk, S., Burkart, L., “Comparison of CAD systems for generative design for use with additive manufacturing” *Procedia CIRP*, 100, Germany, 577-582, (2021).

Junk, S., Rothe, N., “Lightweight design of automotive components using generative design with fiber-reinforced additive manufacturing”, *Procedia CIRP*, 109, Germany, 119-124, (2022).

Kawamura, H., Ohmori, H., Kito, N., “Truss topology optimization by a modified genetic algorithm”, *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 23, 467-473, (2002).

Liu, J., Ou, H., He, J., Wen, G., “Topological design of a lightweight sandwich aircraft spoiler”, *Materials*, 12(19), 3225, (2019).

Liu, S., Li, Q., Liu, J., Chen, W., Zhang, Y., “A realization method for transforming a topology optimization design into additive manufacturing structures. *Engineering*”, 4(2), 277-285, (2018).

Lusted, M., Healey, S., Mandryk, J. A., “Evaluation of the seating of Qantas flight deck crew”, *Applied ergonomics*, 25(5), 275-282, (1994).

Noronha, W., Joshi, V., Jeyanthi, S., “Design of 3D printed aircraft seat structure using latticing in combination with topology optimization and generative design”, *In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1128, 012008, IOP Publishing, (2021).

Okudan A., “Topoloji Optimizasyonu – 101 [online]”, (2024), <https://www.linkedin.com/pulse/topoloji-optimizasyonu-101-ahmet-okudan/>, (2018)

Özer, G., “Eklemeli Üretim Teknolojileri Üzerine Bir Derleme”, *Niğde Ömer Halisdemir University Journal of Engineering Sciences*, 606-621, (2020).

Özkara, M., “Topology optimization of an aircraft structural part for additive manufacturing”, Master's thesis, Graduate School Of Natural and Applied Sciences, Çankaya, (2023).

Özsolak, O., “Eklemeli imalat yöntemleri ve kullanılan malzemeler”, *International Journal of Innovative Engineering Applications*, 3(1), 9-14, (2019).

Park, S. I., Rosen, D. W., Duty, C. E., “Comparing mechanical and geometrical properties of lattice structure fabricated using Electron Beam Melting”, ResearchGate, Atlanta, (2014).

PERSSON, “Structural Design Optimization [online]”, (2024)<http://persson.berkeley.edu/thesis/structoptim/> , (2004).

Renishaw, “Enhancing the additive manufacturing process chain [online]”, (2024), <https://www.renishaw.com/tr/enhancing-the-additive-manufacturing-process-chain--42104> , (2024).

Seykoç Alüminyum, “Alaşımalar [online]”, (2024), <https://seykoc.com.tr/icerik/6061?dil=tr> , (2017).

Sha, L., Lin, A., Zhao, X., Kuang, S., “A topology optimization method of robot lightweight design based on the finite element model of assembly and its applications”, *Science Progress*, 103(3), 0036850420936482, (2020).

Sher, D., “How major automakers use AM for production today, part 2: General Motors additive manufacturing [online]”, (2024), <https://www.voxelmatters.com/general-motors-additive-manufacturing/> , (2020).

Siemens NX, “A Next Generation Tool: Generative Design”, (2024), <https://blogs.sw.siemens.com/nx-design/a-next-generation-tool-generative-design/> , (2017)

Siemens, “Design for additive manufacturing [online]”, (2024), <https://plm.sw.siemens.com/en-US/nx/manufacturing/additive-manufacturing/am-design/> , (2024).

Sigmund, O., “Topology optimization: a tool for the tailoring of structures and materials”, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 358(1765), 211-227, (2000).

Srivastava, J., “Systematic Review of Difference Between Topology Optimization and Generative Design”, *IFAC-PapersOnLine*, 56(2), Japan, 6561-6568, (2023).

Sürmen, H. K., “Eklemeli İmalat (3B baskı): Teknolojiler ve Uygulamalar”, *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 373-392, (2019).

Tomlin, M., Meyer, J., “Topology optimization of an additive layer manufactured (ALM) aerospace part”, *In Proceeding of the 7th Altair CAE technology conference*, 1-9, (2011).

Top, N., Gökçe, H., Şahin, İ., “Topology optimization for additive manufacturing: an application on handbrake mechanism”, *Journal of Selcuk-Technic*, 18(1), 1-13, (2019).

Zhu, J. H., Zhang, W. H., Xia, L., “Topology optimization in aircraft and aerospace structures design. Archives of computational methods in engineering”, *Arch Computat Methods Eng*, 23, 595-622, (2016).