

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MOTOR BRAKETİNİN TOPOLOJİ OPTİMİZASYONU
VE EKLEMELİ İMALAT SÜREÇLERİNİN
İNCELENMESİ

Kazım ÖZEK

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

İmal Usulleri Yüksek Lisans Programı

Danışman

Doç. Dr. Binnur SAĞBAŞ

Ocak, 2025

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**MOTOR BRAKETİNİN TOPOLOJİ OPTİMİZASYONU VE
EKLEMELİ İMALAT SÜREÇLERİNİN İNCELENMESİ**

Kazım ÖZEK tarafından hazırlanan tez çalışması 06.01.2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, İmal Usulleri Yüksek Lisans Programı **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Doç. Dr. Binnur SAĞBAŞ
Yıldız Teknik Üniversitesi
Danışman

Jüri Üyeleri

Doç. Dr. Binnur SAĞBAŞ, Danışman
Yıldız Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Birgül AŞÇIOĞLU TEMİZTAŞ, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Doruk GÜRKAN, Üye
Gedik Üniversitesi

Danışmanım Doç. Dr. Binnur SAĞBAŞ sorumluluğunda tarafımca hazırlanan “Motor Braketinin Topoloji Optimizasyonu ve Eklemeli İmalat Süreçlerinin İncelenmesi” başlıklı çalışmada veri toplama ve veri kullanımında gerekli yasal izinleri aldığımı, diğer kaynaklardan aldığım bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya sahtecilik yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı halinde her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Kazım ÖZEK

İmza

*Çalışmamı, cennet vatanımız uğruna canlarını feda eden
aziz ve kahraman şehitlerimize ithaf ediyorum.*

TEŞEKKÜR

Tamamlamış olduğum yüksek lisans tezimde, kıymetli desteklerini sunan danışman hocam Sayın Doç. Dr. Binnur SAĞBAŞ'a teşekkür ediyorum. Kendisi, sahip olduğu akademik bilgi, tecrübe ve motive edici tutumuyla bana her zaman yol göstermiştir.

Yüksek lisans tez çalışmamın tamamlanmasına olanak tanıyan ve destek veren BMC POWER firmasına ve çalışmamı çok daha profesyonel bir duruma getirmek için bilgi birikimlerinden istifade ettiğim, destekleriyle bana ilham kaynağı olan çalışma arkadaşlarıma tüm içtenliğimle teşekkür ediyorum. Çalışmamın tamamlanmasında emeği bulunan BMC POWER montaj ve test ekibine katkılarından dolayı teşekkür ediyorum.

Akademik kariyerim süresince manevi desteklerini hiç eksik etmeyen, her daim yanımda olan kıymetli aileme teşekkürü bir borç bilirim.

Kazım ÖZEK

İÇİNDEKİLER

KISALTMA LİSTESİ	vii
ŞEKİL LİSTESİ	viii
TABLO LİSTESİ	x
ÖZET	xi
ABSTRACT	xiii
1 GİRİŞ	1
1.1 Tezin Amacı ve Önemi	1
1.2 Tezin Kapsamı	2
2 LİTERATÜR TARAMASI	3
2.1 Geleneksel İmalat Yöntemleri	3
2.1.1 Döküm	4
2.1.2 Talaşlı İmalat	5
2.2 Eklemeli İmalat Teknolojileri	5
2.2.1 Eklemeli İmalatın Tarihçesi.....	6
2.2.2 Eklemeli İmalat İşlem Adımları	7
2.2.3 Eklemeli İmalat Yöntemleri	8
2.2.4 Eklemeli İmalata Etki Eden Parametreler	17
2.3 Topoloji Optimizasyonu	18
2.3.1 Topoloji Optimizasyonu İle Parça Ağırlık Azaltım Metodolojisi	19
2.3.2 Topoloji Optimizasyonu Uygulanmış Örnek Parçalar	21
3 MALZEME VE METOD	22
3.1 Sistem ve Parça Tanımlamaları.....	22
3.1.1 Motor Kayış-Kasnak Sistemi (FEAD)	22
3.1.2 FEAD Sistemi Bileşenleri	23
3.2 Gergi Braketi.....	26
3.2.1 Gergi Braketinin Tanımı ve Fonksiyonu	26
3.2.2 Gergi Braketinin Geometrisi ve Bağlantı Arayüzleri	27
3.2.3 Gergi Braketinin Kullanıldığı Layout	29
3.3 Orjinal Gergi Braketi Yapısal Sonlu Elemanlar Analizi.....	30
3.3.1 Kayış Kuvveti Etkisi Altında Gerilim Sonuçları	34
3.3.2 +Z/-Z Gerilim Sonuçları	34
3.3.3 +Y/-Y Gerilim Sonuçları	35

3.3.4 +X/-X Gerilim Sonuçları	35
4 GERGİ BRAKETİNİN OPTİMİZE EDİLMESİ VE ÜRETİMİ	36
4.1 Gergi Braketine Topoloji Optimizasyonu Uygulanması	36
4.2 Optimize Gergi Braketinin Yapısal Sonlu Elemanlar Analizi	38
4.2.1 Kayış Yüklerinin Uygulanması	43
4.2.2 Ağırlık (-Z Yönü 1G) Uygulanması	43
4.2.3 +X 10G Uygulanması.....	44
4.2.4 -X 10G Uygulanması.....	44
4.2.5 +Y 10G Uygulanması.....	44
4.2.6 -Y 10G Uygulanması.....	45
4.2.7 +Z 10G Uygulanması	45
4.2.8 -Z 10 G Uygulanması	45
4.3 Optimize Gergi Braketi Yorulma Analizi	46
4.4 Optimize Gergi Braketi Modal Analizi.....	46
4.5 Optimize Gergi Braketinin Et Kalınlığı Analizi	50
4.6 Optimize Gergi Braketinin Üretimi	52
4.6.1 Optimize Gergi Braketi Geometrik Ölçüm Analizi.....	55
4.7 Optimize Gergi Braketinin Montajı ve Test Edilmesi	57
4.7.1 Optimize Gergi Braketinin Montajı.....	57
4.7.2 Optimize Gergi Braketinin Test Edilmesi	58
4.7.3 Optimize Gergi Braketi ve Orjinal Gergi Braketi Maliyet Hesabı...	61
5 SONUÇ	64
KAYNAKÇA	66
TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR	70

KISALTMA LİSTESİ

AM	Additive Manufacturing
CAD	Computer Aided Design
DMD	Direct Metal Deposition
DMLS	Direct Metal Laser Sintering
DMLM	Direct Metal Laser Melting
DOF	Degree of Freedom
EBM	Electron Beam Melting
Eİ	Eklemeli İmalat
FDM	Fused Deposition Modelling
FEA	Finite Element Analysis
FEAD	Front End Accessory Drive
HCF	High Cycle Fatigue
LOM	Laminated Object Manufacturing
LTYF	Lazer Toz Yatak Füzyonu
RBE2	Rigid Body Element Type 2
RBE3	Rigid Body Element Type 3
RPM	Revolution Per Minute
SGC	Solid Ground Curing
SLA	Stereolitografi
SLM	Selective Laser Melting
SLS	Selective Laser Sintering
STL	Standart Template Library

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1 Talaşlı imalat ve eklemeli imalat teknolojileri	6
Şekil 2.2 Eklemeli imalat işlem adımları.....	8
Şekil 2.3 Eklemeli imalat yöntemlerinin sınıflandırılması	8
Şekil 2.4 Seçici lazer sinterleme şematik gösterimi	10
Şekil 2.5 Sinterleme işleminin şematik diagramı	11
Şekil 2.6 Direkt metal lazer sinterleme şematik gösterimi	12
Şekil 2.7 Seçici lazer ergitme şematik gösterimi.....	13
Şekil 2.8 Katmanların birbirine bağlanmasının şematik gösterimi	14
Şekil 2.9 Ergiyik havuzu oluşumu şematik gösterimi	15
Şekil 2.10 Elektron ışını ergitme şematik gösterimi.....	16
Şekil 2.11 Elektron ışını ve lazer enerji transferi karşılaştırması	16
Şekil 2.12 Eklemeli imalat proses parametrelerinin sınıflandırılması.....	18
Şekil 2.13 Topoloji optimizasyonu uygulanmış parça geometrisi	19
Şekil 2.14 Topoloji optimizasyonu ile ağırlık azaltım metodolojisi	20
Şekil 2.15 Topoloji optimizasyonu uygulanmış havacılık braketı	21
Şekil 2.16 Topoloji optimizasyonu uygulanmış alternatör braketı.....	21
Şekil 3.1 Örnek FEAD sistemi	23
Şekil 3.2 V kayış iç yapısı	24
Şekil 3.3 Örnek gergi modeli.....	25
Şekil 3.4 Gergi iç mekanizması.....	25
Şekil 3.5 Gergi braketinin motor üzerindeki konumu	27
Şekil 3.6 Orjinal gergi braketı blok ve civata bağlantı arayüzü	28
Şekil 3.7 Orjinal gergi braketı gergi bağlantı arayüzü.....	28
Şekil 3.8 Gergi hareket mekanizması	29
Şekil 3.9 Gergi braketinin kullanıldığı layout	30
Şekil 3.10 Kayış kuvvetinin şematik gösterimi	31
Şekil 3.11 Orjinal gergi braketı montaj noktaları	31
Şekil 3.12 Kayış kuvveti etkisinde Von-Mises gerilim sonuçları	34
Şekil 3.13 +Z/-Z Von-Mises gerilim sonuçları	34
Şekil 3.14 +Y/-Y Von-Mises gerilim sonuçları.....	35
Şekil 3.15 +X/-X Von-Mises gerilim sonuçları.....	35
Şekil 4.1 Gergi braketı modeline mesh atılması.....	36

Şekil 4.2	Gergi braketine 6G, 8G ve 10G kuvvetlerinin uygulanması.....	37
Şekil 4.3	6G, 8G ve 10G kuvvetlerinin tanımlanması.....	37
Şekil 4.4	Topoloji optimizasyonu işlem parametreleri.....	38
Şekil 4.5	Optimize edilmiş yeni modelin oluşturulması.....	38
Şekil 4.6	Yapısal sonlu elemanlar analiz modeli.....	39
Şekil 4.7	Model sayısal ağ detayı	41
Şekil 4.8	Kuvvet girdileri	41
Şekil 4.9	Kayış yükleri analiz sonucu	43
Şekil 4.10	Ağırlık (-Z yönü 1G) analiz sonucu	43
Şekil 4.11	+X 10G analiz sonucu	44
Şekil 4.12	-X 10G analiz sonucu	44
Şekil 4.13	+Y 10G analiz sonucu	44
Şekil 4.14	-Y 10G analiz sonucu	45
Şekil 4.15	+Z 10G analiz sonucu.....	45
Şekil 4.16	-Z 10G analiz sonucu	45
Şekil 4.17	Optimize gergi braketi yorulma analizi sonucu	46
Şekil 4.18	Modal analiz modeli.....	47
Şekil 4.19	Gergi modal analiz sonucu (izometrik görünüş)	48
Şekil 4.20	Gergi modal analiz sonucu (yan görünüş).....	49
Şekil 4.21	Gergi ve gergi braketi modal analiz sonucu (izometrik görünüş)	49
Şekil 4.22	Gergi ve gergi braketi modal analiz sonucu (yan görünüş).....	50
Şekil 4.23	Gergi braketi et kalınlığı analizi	51
Şekil 4.24	Et kalınlığı analizi renk skalası	51
Şekil 4.25	Üretim öncesi destek yapı ve baskı hazırlığı aşaması	53
Şekil 4.26	Optimize gergi braketinin üretimi	53
Şekil 4.27	Ardıl işlemleri tamamlanan optimize gergi braketi.....	54
Şekil 4.28	Orjinal gergi braketi ve optimize gergi braketi ağırlık karşılaştırması	55
Şekil 4.29	Optimize gergi braketi GOM ölçümü	56
Şekil 4.30	Optimize gergi braketi GOM ölçüm sonuçları.....	56
Şekil 4.31	Optimize gergi braketinin montajı	58
Şekil 4.32	Dinamometre test düzeneği	59
Şekil 4.33	Optimize gergi braketi test sonrası görselleri.....	60
Şekil 4.34	Döküm ve eklemeli imalat toplam maliyet hesabı	63

TABLO LİSTESİ

Tablo 2.1 Eklemeli imalat yöntemlerinin karşılaştırılması	9
Tablo 3.1 Yapısal sonlu elemanlar analizi girdi verileri	32
Tablo 3.2 GJL-300 dökme demir malzeme özellikleri	32
Tablo 3.3 GJL-300 dökme demir kimyasal kompozisyon değerleri.....	32
Tablo 4.1 Malzeme tablosu	39
Tablo 4.2 17-4PH paslanmaz çelik malzeme özellikleri.....	40
Tablo 4.3 17-4PH kimyasal kompozisyon değerleri.....	40
Tablo 4.4 Sayısal ağ istatistikleri	41
Tablo 4.5 Analiz yükleme adımları.....	42
Tablo 4.6 Et kalınlığı analiz sonuçları	51
Tablo 4.7 Optimize gergi braketleri üretim parametreleri	52
Tablo 4.8 Döküm yöntemi maliyet hesabı	61
Tablo 4.9 Eklemeli imalat maliyet hesabı.....	62

Motor Braketinin Topoloji Optimizasyonu ve Eklemeli İmalat Süreçlerinin İncelenmesi

Kazım ÖZEK

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

İmal Usulleri Yüksek Lisans Programı

Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Doç. Dr. Binnur SAĞBAŞ

Eklemeli imalat (Eİ), karmaşık geometrilerin doğrudan dijital modellerden katman katman oluşturulmasına olanak tanıyan, emsalsiz tasarım özgürlüğü ve özgünleştirmeyi mümkün kılan bir teknolojidir. Topoloji optimizasyonu ile birleştirildiğinde, belirli bir tasarım alanı içinde optimum performans için en iyi malzeme dağılımını belirlemek amacıyla kullanılan üstün bir imalat yöntemidir. Bu sinerji, mühendislik ve üretimde yeni imkânlar yaratmaktadır. Bu çalışma, dayanım özelliklerinden ödün vermeden, ağırlığı azaltmak üzere topoloji optimizasyonu aracılığıyla tasarımı optimize edilmiş fonksiyonel bir parçanın imalat süreçlerinin geliştirilmesine odaklanmıştır. GJL-300 dökme demir malzemeden, döküm yöntemi ile üretilen, dört silindirli sıralı dizel içten yanmalı motorun motor braketi topoloji optimizasyonu ile optimize edilip bu geometrinin 17-4PH paslanmaz çelik ile lazer toz yatak füzyonu yöntemiyle üretilebilirliği incelenmiştir. Optimize edilmiş motor braketi için yapısal sonlu elemanlar analizi, modal analiz ve yorulma analizi çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Sonrasında, optimize motor braketi için

toplam 40 saat süren motor dinamometre testleri gerçekleştirilmiş olup optimize motor braketini başarılı bir şekilde testleri geçmiştir. Elde edilen sonuçlar, malzeme kullanımı, mekanik dayanım, üretim süresi, maliyet ve parçanın ağırlığı açısından konvansiyonel imalat yöntemleri ile karşılaştırılmıştır. Çalışmanın bulgularına göre topoloji optimizasyonu ve eklemeli imalat, daha hafif, daha uygun maliyetli, üretim süresi azaltılmış ve fonksiyonelliğini koruyan muadil bir parça geliştirmek için umut vaat eden teknolojilerdir. Daha hafif parça imalatı sayesinde elde edilen malzeme tasarrufu, enerji maliyetlerinde iyileşme ve çevreye olan olumlu etkileri bakımından sürdürülebilirliğe çok kıymetli katkılar sunacaktır.

Anahtar Kelimeler: Eklemeli imalat, topoloji optimizasyonu, ağırlık azaltımı, lazer toz yatak füzyonu



Investigation of Topology Optimization and Additive Manufacturing Processes of Engine Bracket

Kazım ÖZEK

Department of Mechanical Engineering

Master of Science Thesis

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Binnur SAĞBAŞ

Additive manufacturing (AM) is a transformative technology that provides opportunity to build complex geometries layer by layer directly from digital models, enabling unprecedented design freedom and customization. It is a superior production method that when combined with topology optimization, used to determine the best material distribution within a given design space for optimal performance. This synergy opens new possibilities in engineering and manufacturing. This study focused on developing manufacturing processes for a functional part whose design is optimized through topology optimization to reduced weight without compromising strength properties. The engine bracket of a four-cylinder in-line diesel internal combustion engine produced from GJL-300 cast iron material by casting method was optimized by topology optimization and the feasibility of producing this geometry with 17-4PH stainless steel by laser powder bed fusion technique was investigated. Structural finite element analysis, modal analysis and fatigue analysis studies were carried out for the optimized engine bracket. Afterwards, a total of 40 hours of engine dynamometer tests were carried out for the optimized engine bracket, and the optimized engine bracket successfully completed the tests. Obtained results were compared with conventional manufacturing methods in terms of material usage, mechanical strength, production

time, cost and weight of the part. According to findings of our study, topology optimization and AM were promising technologies to develop an equivalent part with lighter, more cost-effective, reduced production time, and maintains its functionality. The material savings achieved through the production of lighter parts will provide invaluable contributions to sustainability in terms of improvement in energy costs and positive effects on the environment.

Keywords: Additive manufacturing, topology optimization, weight reduction, laser powder bed fusion



1.1 Tezin Amacı ve Önemi

Günümüz endüstriyel imalat sektörü, teknolojinin hızlı bir değişim ve kayda değer bir mesafe aldığı bu dönemde büyük bir gelişim süreci yaşamaktadır. Geleneksel imalat yöntemleri, uzun imalat süreçleri, yüksek maliyetler ve tasarımda kısıtlı esneklik gibi alanlarda zorluklarla karşılaşmaktadır. Geleneksel imalat yöntemlerinin günümüz modern endüstrisinin ihtiyaç duyduğu sorun ve bu sorunların çözümlerine yeterli imkânları sunmakta zorlanması, yenilikçi üretim yöntemlerinin ortaya çıkmasına altyapı oluşturmaktadır. Bu gelişmeler, tasarım ve üretim süreçlerinde verimliliğin güçlendirilmesi, maliyet etkinliğinin artırılması ve sürdürülebilir çözümlerin ortaya çıkarılmasını isteyen günümüz endüstrisi için oldukça önem arz etmektedir.

“Motor Braketinin Topoloji Optimizasyonu ve Eklemeli İmalat Süreçlerinin İncelenmesi” adlı yüksek lisans tezi, endüstriyel imalatın yaşamış olduğu bu büyük dönüşümü ele almaktadır.

Bu çalışmanın temel amacı, geleneksel imalat yöntemlerinin mevcut sınırlarının üstüne çıkarak çok daha yenilikçi bir üretim metodu olan eklemeli imalat teknolojilerinin ürün tasarımı ve üretim proseslerine katkı sunacak bir perspektifle planlanmasıdır. İlave olarak, bu çalışma teknolojik gelişmeler ve endüstriyel imalat arasında güçlü bir bağ kurup gelecekteki imalat süreçlerinin yapısal dönüşümüne katkı sağlamayı da amaçlamaktadır. Tez çalışmasında üretim süreçlerinin verimliliğinin artırılması, tasarım iyileştirme, parça ağırlık azaltımı, fonksiyonellik korunumu, çevresel etki ve sürdürülebilirlik kavramları temel hedef kriterler olarak ele alınmıştır.

Bu tezin amacı, sıralı dört silindirli dizel içten yanmalı bir motorun kayış kasnak paketi içerisinde yer alan, GJL-300 dökme demir malzemeye sahip, döküm yöntemi ile üretilip sonrasında talaşlı imalat ile işlenen gergi braketinin topoloji optimizasyonu uygulanarak 17-4PH paslanmaz çelik malzemedan eklemeli imalat toz yatak füzyon teknolojisi kullanılarak üretim süreçlerinin geliştirilmesidir. Bu doğrultuda aynı çalışma koşullarında daha hafif, prototip parça üretiminde maliyet

etkin, üretim süresi kısaltılmış ve fonksiyonelliğini koruyan muadil bir parça üretiminin gerçekleştirilmesi hedeflenmektedir.

Bu çalışmanın önemi, gelecekte ihtiyaç duyulması muhtemel ürünlerin ortaya çıkarılmasında etkin bir pozisyona sahip olacak mühendisler, araştırmacılar ve sanayiciler için önemli bir argüman olma niteliği taşımasıdır. Eklemeli imalat gibi tasarımda optimizasyon imkanı tanıyan, daha modern ve yenilikçi bir teknolojinin geleneksel imalat yöntemleri ile üretilen parçaları hedeflemesi, yüksek performanslı, maliyet etkin ve çevresel sürdürülebilirliğe katkı sunan ürünlerin ortaya çıkarılmasına stratejik bir katkı sağlayacaktır. Sürdürülebilirlik, ekonomik ve çevresel açıdan oldukça değerlidir. Eklemeli imalat teknolojileri ve kaynakların verimli bir şekilde kullanılması, sürdürülebilirliği önemli ölçüde desteklemektedir.

1.2 Tezin Kapsamı

Parça imalat süreçlerinde geleneksel imalat yöntemlerinin tercih edilmesi tasarım esnekliği, malzemeden tasarruf, zaman, maliyet vb. konularda kısıtlama ve dezavantajlar ile sonuçlanabilmektedir. Bu durumun varlığı, geleneksel imalat yöntemlerinin düzenlenme ve geliştirilme ihtiyacını tetiklemiştir. İmalat proseslerinin geliştirilmesi için üretim ve tasarım süreçlerini kritik seviyede etkileyebilecek olan topoloji optimizasyonu ve eklemeli imalat birlikte ele alınmalıdır. Topoloji optimizasyonu, belirlenen sınır koşullarında parça tasarımlarının optimize edilerek parçadan en iyi performansın alınmasını hedefler. Eklemeli imalat, tasarlanan geometrinin katmanlı bir şekilde biriktirilerek üretilmesidir. Geleneksel imalat yöntemleri ile kıyaslandığında üretim prosesinin çok daha verimli ve esnek olduğu gözlemlenmektedir.

Bu çalışma, geleneksel imalat yöntemi ile üretilen fonksiyonel bir parçanın topoloji optimizasyonu uygulanıp eklemeli imalat ile üretilerek üretim süreçlerinin geliştirilmesini içermektedir. Tez kapsamında, öncelikle geleneksel imalat yöntemleri ve metal eklemeli imalat yöntemleri ele alınacak olup sonrasında topoloji optimizasyonun temel prensipleri incelenecektir. Bu çalışmanın birincil hedefi, tasarım ve üretim süreçlerinde yapılan iyileştirmelerin öneminin anlaşılması, sürdürülebilir bir imalat yöntemi ile verimliliğin artırılması ve gelecekteki potansiyel mühendislik uygulamalarına katkı sağlamasıdır.

Bu bölüm içerisinde geleneksel imalat yöntemleri, eklemeli imalat yöntemleri, eklemeli imalat işlem adımları, eklemeli imalata etki eden parametreler ve topoloji optimizasyonu hakkında literatür taraması sonucunda elde edilen bilgiler verilmiştir.

2.1 Geleneksel İmalat Yöntemleri

Geleneksel imalat yöntemleri iki başlık altında incelenebilir. Bunlardan birincisi alışılmış imalat yöntemleri iken bir diğeri alışılmamış imalat yöntemleridir. Alışılmış imalat yöntemleri içerisinde talaşlı imalat ve talaşsız imalat yöntemleri yer almaktadır. Talaşlı imalat yönteminin çeşitli dezavantaj ve kısıtlamaları bulunmaktadır. Bu dezavantajlardan en kritik iki tanesi atık malzeme oranının son derece fazla olması ve bazı malzemelerin talaşlı imalat yöntemi ile üretiminin mümkün olmamasıdır. Talaşsız imalat yöntemleri arasında döküm, dövme, kaynaklı üretim ve plastik şekil verme bulunmaktadır. Talaşsız imalat yöntemlerinde sıcaklık değişimleri oldukça dalgalıdır. Bu şartlar altında üretilen parçalarda iç gerilmeler ortaya çıkabilmektedir. İç gerilmeler, çatlak başlangıcı ve çatlakların büyümesini ilerleterek mekanik dayanımı düşürebilmektedir. Alışılmamış imalat yöntemlerinden birisi olan eklemeli imalat ise sanayide oluşan talep ve ihtiyaçlara tatmin edici cevapları verebilecek yetkinliklere sahip yenilikçi bir üretim yöntemidir. Küçük ölçekli parçaların üretimi, karmaşık geometriye sahip parçaların üretimi, malzemenin verimli kullanılması, hızlı prototipleme ve çevreye duyarlı olması eklemeli imalatın avantajları arasında yer almaktadır. Uzay, savunma, otomotiv, havacılık vb. sektörlerde oldukça yaygın olarak tercih edilmektedir [1].

Bu bölüm içerisinde geleneksel imalat yöntemlerinden döküm ve talaşlı imalat yöntemleri açıklanmaktadır. Çalışma içerisinde bu iki geleneksel imalat yönteminin detaylı açıklanmasının nedeni, topoloji optimizasyonu uygulanarak eklemeli imalat süreçleri incelenecek parçanın döküm ile üretilip bağlantı arayüzlerinin talaşlı imalat yöntemi kullanılarak işlenmesi adımlarını içermesidir.

2.1.1 Döküm

Döküm, ergiyik hale getirilen metalin parça geometrisine sahip boşluklu kalıplara dökülmesi ile belirlenen geometriye ulaşılmasına olanak sağlayan bir üretim yöntemidir [2], [3]. İmalat sektöründe çok önemli bir yere sahip olan döküm yöntemi otomotiv sektöründe motor bloklarında ve savunma sektöründe birçok uygulama alanına sahiptir [3].

Döküm prosesine başlamadan önce tercih edilen malzeme ergitilerek döküm sıcaklığına erişilmiş olur. Eritme ocakları vasıtasıyla metalin döküm sıcaklığına erişimi sağlanır. Döküm işlemi öncesinde eritme ocaklarında alaşımlama, malzeme bileşenlerinin ayarlanması ve döküm esnasında oluşabilecek gazların kontrol edilebilmesi için gaz giderme prosesleri tamamlanmaktadır. Ergiyik hale gelen malzeme kalıp içerisine dökülür ve kalıp şeklini alan malzeme soğumaya bırakılır. Malzeme, belirli bir sıcaklık değerine eriştikten sonra katılaşma süreci başlamış olur. Sonrasında, parça belirli bir süre oda sıcaklığı seviyesinde soğumaya bırakılır. Soğuma süreci tamamlandıktan sonra, katılaşan parça kalıptan ayrılarak bir dizi ardıl işlemlere maruz kalır. Ardıl işlemler nihai geometriye dahil olmayan bölümlerin parçadan atılması/işlenmesi, yüzey temizliği ve ihtiyaç duyulması halinde ısıtma işlemi olup ardıl işlemler gereksinimlere göre çoğaltılabilir. Tamamlanan ardıl işlemlerin devamında parça için kontroller yapılır. Döküm prosesi sonrasında elde edilen geometrinin kalıptan çıkarılabilmesi için kalıbın bozulması gerekmektedir. Kalıbın bozulduğu döküm yöntemlerinde kalıplar sadece bir defa kullanılabilir. Kum kalıp bu yöntemde örnek olarak verilebilir. Bu yöntemin aksine kalıpların kalıcı olarak birden fazla kullanılabilirdiği yöntemler de vardır. Kokil kalıp bu duruma örnek olarak verilebilir [4].

Döküm yönteminin diğer geleneksel imalat yöntemlerine göre avantajları aşağıdaki gibi olup maddeler [4] numaralı kaynaktan derlenmiştir.

- Yüksek ağırlığa sahip parçaların üretimine olanak sağlamaktadır.
- Kompleks geometriye sahip, içi boş parçaların imalatı kolaylıkla gerçekleştirilebilir.
- Çoğu metal alaşımları döküm yöntemine uygundur.
- Seri üretim için elverişli bir imalat yöntemidir.

Döküm yönteminin diğer geleneksel imalat yöntemlerine göre dezavantajları aşağıdaki gibi olup maddeler [4] numaralı kaynaktan derlenmiştir.

- Düşük et kalınlığına sahip parçaların üretilmesi oldukça zordur.
- Kalıp gereksinimi sebebiyle prototip parça üretimi için uygun bir imalat yöntemi değildir.
- Boyut hassasiyeti yüksek olan parçalar için uygun değildir.
- Çevreye duyarlı bir üretim yöntemi değildir.

2.1.2 Talaşlı İmalat

Talaşlı imalat, malzemenin istenilen geometri ve boyutlara getirilmesi için dolu malzemeden talaş kaldırılması prensibine dayanan bir üretim yöntemidir. İçi dolu blok veya kütüğe şekil verilebilmesi için freze makinesi, matkap, torna, farklı kesici takımlardan faydalanılmaktadır. Talaşlı imalat prosesinde, ilk olarak işlenecek parça tezgaha sabitlenir ve kesici takım, tercih edilen malzemeye göre belirlenen hız ve besleme oranında parçayı işler [5], [6].

Talaşlı imalatın diğer geleneksel imalat yöntemlerine göre avantajları şöyledir:

- Üretimi yapılacak parçanın geometrik boyut ve toleranslarında hassas ve kaliteli bir üretim sağlanabilmektedir.
- Metal, plastik, kompozit ve seramik gibi çok çeşitli malzemeler için tercih edilebilmekte olup malzeme portföyü geniştir.
- Seri üretimlerde maliyet etkinliği sağlamaktadır.

Talaşlı imalatın diğer geleneksel imalat yöntemlerine göre dezavantajları şöyledir:

- Dolu bir bloktan talaş kaldırıldığı için malzeme sarfıyatı fazladır.
- Kesici takımların zamanla aşınması ek maliyet çıkartabilmektedir.
- Kompleks geometriye sahip parçaların üretimi uzun sürmektedir.
- İç boşluğa sahip veya karmaşık bir iç geometrisi olan parçaların üretiminin zaman alması sebebiyle bu tarz parçalarda çok fazla tercih edilmez.

2.2 Eklemeli İmalat Teknolojileri

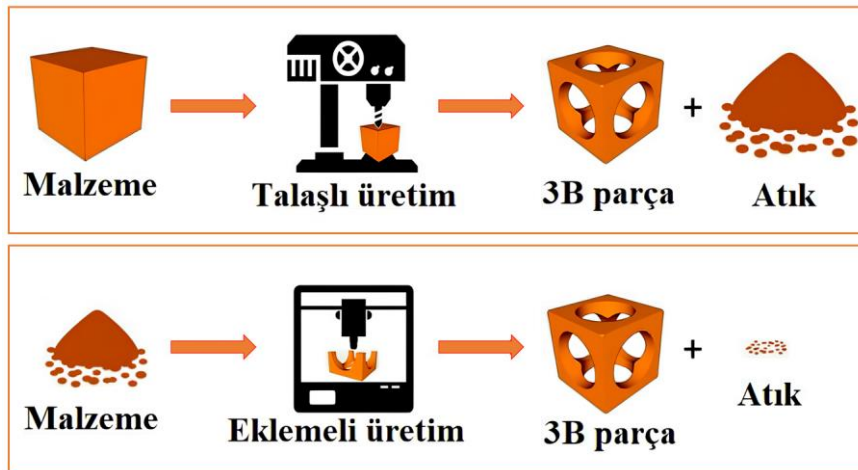
Eklemeli imalat, 3D model üzerinden alınan geometrik veriler ile mikron boyutundaki toz materyalin birbirlerine eklenerek üç boyutlu nihai modelin istenilen geometrik boyut ve toleranslarda üretilmesine olanak sağlayan modern bir

imalat yöntemidir. Kompleks geometriye sahip parçaların üretilmesi, kalıp ve işleme fikstirü gibi ilave maliyet çıkaran proseslere ihtiyaç duyulmadan üretimin uygulamaya geçirilmesi en kritik özelliklerindendir. Parça imalatının konvansiyonel imalat yöntemlerine kıyasla çok daha hızlı bir şekilde gerçekleştirilebilmesi, prototip parça imalatında sıklıkla tercih edilmesini tetiklemektedir [7], [8].

Günümüz eklemeli imalat teknolojilerinde kullanılan malzeme çeşitliliği geçmiş dönemlere kıyasla çok daha iyi bir düzeye ulaşmıştır. Metal, polimer, seramik ve kompozit gibi malzemeler eklemeli imalat yöntemlerinde tercih edilebilmektedir. Sahip olduğu bu malzeme çeşitliliği sayesinde özellikle havacılık ve biyomedikal başta olmak üzere birçok sektöre hizmet etmektedir [9].

Çevresel sürdürülebilirlik açısından değerlendirildiğinde eklemeli imalat yöntemleri konvansiyonel imalat yöntemlerine göre daha çevreci bir imalat yöntemidir. Talaşlı imalat sonrası ortaya çıkan atık malzeme miktarı eklemeli imalata göre çok daha fazladır [10], [11].

Şekil 2.1’de eklemeli imalat ve talaşlı imalatın atık malzeme miktarı şematize edilmiştir [10].



Şekil 2.1 Talaşlı imalat ve eklemeli imalat teknolojileri [10]

2.2.1 Eklemeli İmalatın Tarihçesi

Stereolitografi (SLA) yönteminin 1987 yılında ilk olarak ortaya çıkması, eklemeli imalat alanında gerçekleştirilen ilk çalışma olarak bilinmektedir. SLA, ortam sıcaklığında bekletilen ışığa duyarlı polimer reçine katmanının lazer ışını kullanılarak kürleştirilmesi prensibi ile temellendirilmiştir. SLA yöntemi, dünya

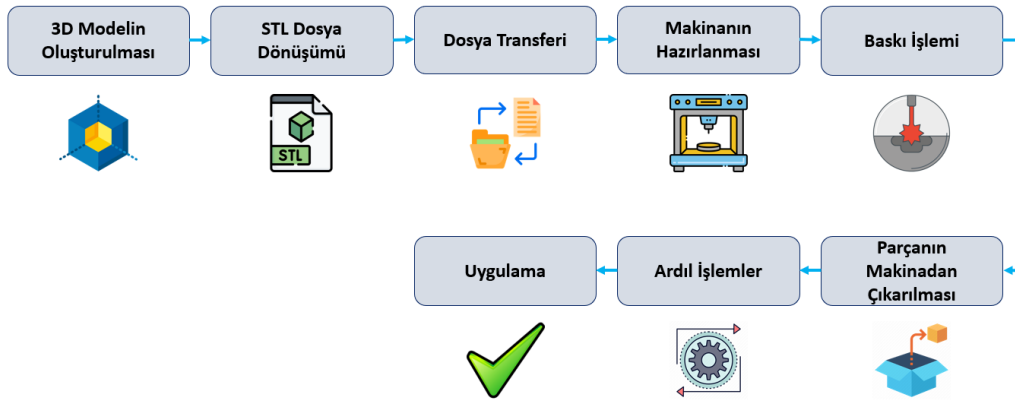
tarihinde ticari amaçla geliştirilen öncü bir teknolojidir. 1990'lı yıllarda FDM (Fused Deposition Modelling), LOM (Laminated Object Manufacturing) ve SGC (Solid Ground Curing) yöntemleri geliştirilerek ticari hayata entegrasyonu sağlanmıştır. Sonrasında ise SLS (Selective Laser Sintering) yöntemi, yeni bir teknoloji olarak yerini almıştır. 1994 ve 1995 yıllarında EOS firması tarafından DMLS (Direct Metal Laser Sintering) yöntemi ile üretim yapabilen makinelerinin üretimi gerçekleştirmiştir. Son 25 yıl içerisinde eklemeli imalat teknolojileri alanında çok hızlı bir dönüşüm ve gelişim meydana gelmiştir. Var olan teknolojilerin gelişerek kullanılması ile birlikte DMLM (Direct Metal Laser Melting) ve DMD (Direct Metal Deposition) gibi modern teknolojiler tasarlanıp piyasaya sunulmuştur. Gelişim sürecinde, bu sistemlerin güvenilirliğinin ve verimliliğinin artırılması ile malzeme çeşitliliği de oldukça çoğaltılmıştır [10].

2.2.2 Eklemeli İmalat İşlem Adımları

Eklemeli imalat ile üretimi hedeflenen parçaların kalitesi, birçok parametrenin eş zamanlı kontrol edilerek sürecin profesyonelce yönetilmesine bağlıdır. Eklemeli imalat işlem adımları bir bütün olarak ele alınıp yüksek hassasiyet ile değerlendirilmelidir. İşlem adımları parçayı doğrudan etkileyip parçanın mikroyapı, mekanik davranış ve son ürün kalitesini etkileyebilmektedir [12].

Eklemeli imalat ile üretimde ilk aşama 3D modelin oluşturulması ile başlamaktadır. Bu süreçte, bilgisayar destekli tasarım (CAD) programları aracılığıyla 3D model oluşturulur. Tasarım aşaması, 3D modelin optimizasyonu ve elde edilen geometri için gerekli analiz çalışmalarını içermektedir. Analiz çıktılarına göre nihai geometri elde edilene kadar bu aşamadaki prosesler iteratif olarak devam ettirilir. Elde edilen son geometri modeli, STL dosya formatına dönüştürülüp üretimin başlatılabilmesi için makineye transfer edilir. Baskı işlemi öncesinde makine ayarları (katman kalınlığı, baskı hızı, ortam sıcaklığı, malzeme besleme hızı, parça oryantasyonu vb.) kontrol edilerek makine üretime hazır hale getirilir. Baskı işlemi tamamlandıktan sonra üretilen parça makineden çıkartılır. Elde edilen parça için birtakım ardıl işlemler uygulanabilmektedir. Ardıl işlemler destek yapıların temizlenmesi, gerekiyorsa ısıl işlem uygulamaları, taşlama vb. prosesleri içermektedir [13].

Şekil 2.2'de eklemeli imalat işlem adımları verilmiştir [14].

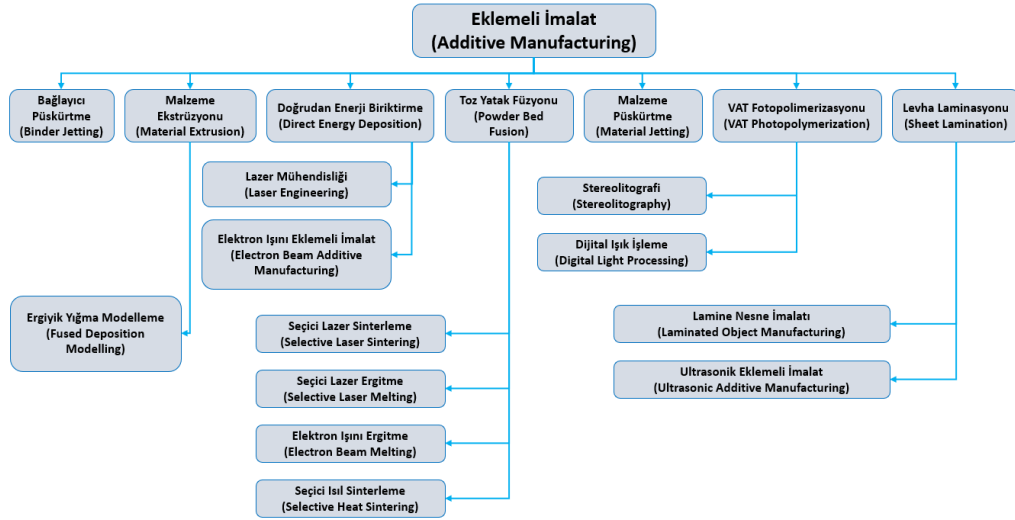


Şekil 2.2 Eklemeli imalat işlem adımları [14]

2.2.3 Eklemeli İmalat Yöntemleri

Teknolojik gelişmelerin süratle devam ettiği imalat endüstrisi, performans ve inovasyon merkezli imalat metodlarına yoğunlaşmaktadır. Bu çerçevede, eklemeli imalat teknolojileri, konvansiyonel imalat yöntemlerine göre çok çeşitli avantajlar sunmaktadır [15].

Şekil 2.3'te eklemeli imalat yöntemlerini içeren görsel verilmiştir. Şekil 2.3, [16] numaralı kaynaktaki görselden uyarlanmış ve değiştirilmiştir.



Şekil 2.3 Eklemeli imalat yöntemlerinin sınıflandırılması [16]

Eklemeli imalat, üç boyutlu tasarımları fiziksel yapılara dönüştürmemize olanak tanıyan yenilikçi bir üretim teknolojisidir. Bu üretim yönteminin konvansiyonel imalat yöntemlerine göre hızlı prototipleme, kompleks geometrilerin üretimi vb.

avantajları bulunmaktadır. Eklemeli imalat teknolojileri kendi içerisinde farklılıklar, avantajlar ve dezavantajlar barındırmaktadır [17].

Tablo 2.1’de eklemeli imalat yöntemlerinin çalışma prensibi, örnek teknoloji, avantaj, dezavantaj, kullanılan malzemeler ve inşa hacminin detaylı karşılaştırılmasını içeren tablo verilmiştir. Tablo 2.1, [17] numaralı kaynaktaki tablodan uyarlanmış ve değiştirilmiştir.

Tablo 2.1 Eklemeli imalat yöntemlerinin karşılaştırılması [17]

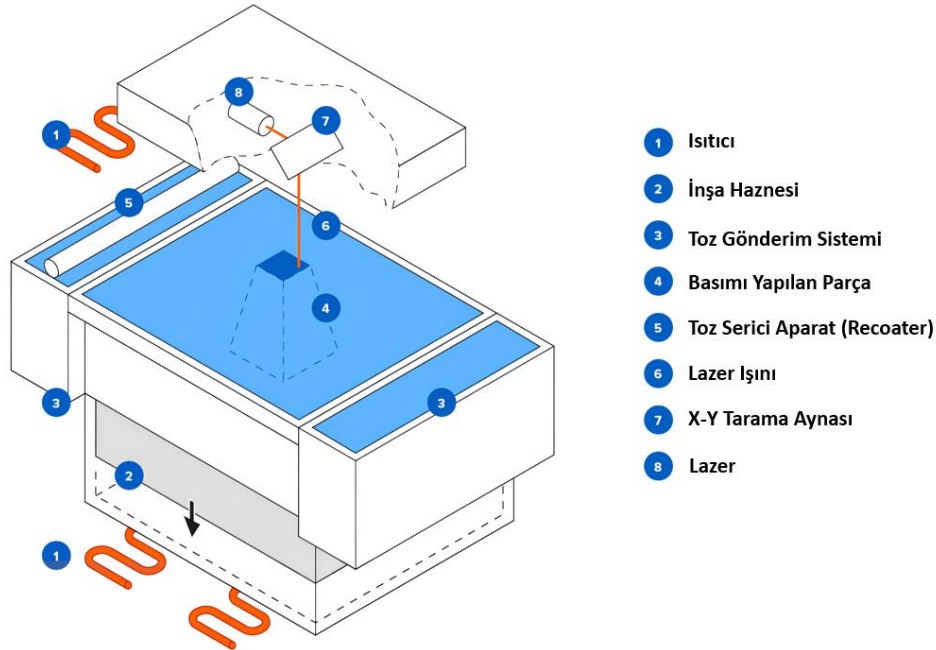
ASTM Kategorisi	Çalışma Prensibi	Örnek Teknoloji	Avantajları	Dezavantajları	Malzemeler
Bağlayıcı Püskürtme	Toz parçacıkları birbirine yapıştırılarak katmanlı bir üretim gerçekleştirilir.	Üç boyutlu mürekkep püskürtme teknolojisi	Destek gerektirmez, tasarım özgürlüğü, büyük inşa hacmi, düşük maliyet	Kırılgan parçalar sınırlı mekanik özelliklere sahip olabilir, ardıl işlemler gerekebilir	Polimer, kompozit, seramik, metal, hibrit malzemeler
Direkt Enerji Biriktirme	Odaklanmış termal enerji biriktirme sırasında malzemeleri ergitir.	Lazer biriktirme, elektron ışıını, plazma ark ergitme	Yüksek kalite, tane yapısının yüksek derecede kontrolü	Metallerle sınırlıdır	Metal, hibrit malzemeler
Malzeme Ekstrüzyonu	Malzeme, nozül veya orifisten dışarı itilir.	Ergiyik yığma modelleme, ergiyik katman modelleme	Düşük maliyet, ölçeklenebilir, tamamen fonksiyonel parça oluşturma	Dikey anizotropi, ince detaylar için uygun değil	Polimer, kompozit
Malzeme Püskürtme	İnşa edilen malzemenin damlacıkları biriktirilir.	Üç boyutlu mürekkep püskürtme teknolojisi, direkt mürekkep yazdırma	Az atık miktarı, çoklu malzeme parça üretimi, çok renkli parça üretimi	Destek malzeme ihtiyacı, fotopolimer ve termoset reçine gereklidir	Polimer, kompozit, seramik, metal, hibrit malzemeler
Toz Yataklı Birleştirme	Termal enerji, inşa edilecek malzemenin küçük bir bölgesini birleştirir.	Elektron ışıını ergitme, direkt metal lazer sinterleme, seçici lazer sinterleme/ergitme	Nispeten düşük maliyet, geniş malzeme portföyü	Nispeten yavaş, boyut sınırlaması mevcut, yüksek güç gereksinimi	Polimer, kompozit, seramik, metal, hibrit malzemeler
Levha Laminasyonu	Malzemenin tabakaları yapıştırılır.	Lamine nesne imalatı, ultrason eklemeli imalat	Yüksek hız, düşük maliyet	Son işlem gerekebilir, sınırlı malzeme kullanımı, parça sağlamlığı yapıştırıcıya bağlı	Polimer, kompozit, seramik, metal, hibrit malzemeler
VAT Fotopolimerizasyon	Bir havuzdaki sıvı, polimer ışık ile sertleştirilir.	Dijital ışık işleme	Büyük boyutlu parça, boyutsal hassasiyet, mükemmel yüzey	Sadece fotopolimer ile sınırlı, yavaş, pahalı	Polimer, seramik

2.2.3.1 Seçici Lazer Sinterleme (SLS)

Seçici lazer sinterleme, eklemeli imalat teknolojilerinin bir alt kategorisi olup çoğunlukla toz malzemenin kullanılarak parça üretimi gerçekleştirilen bir eklemeli imalat teknolojisidir. Toz malzemeler lazer ışını kullanılarak sinterlenir ve bu işlem nihai geometri oluşana kadar katman katman gerçekleştirilmektedir [18].

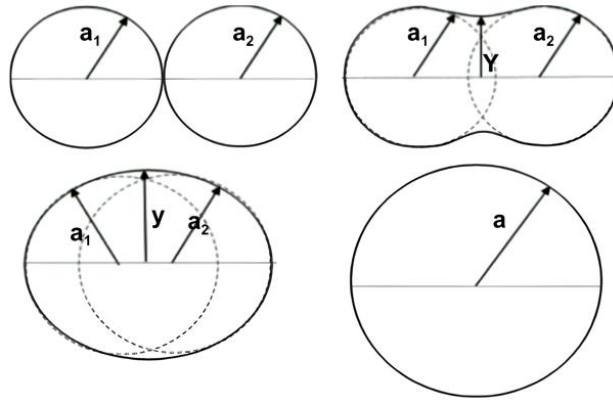
Seçici lazer sinterleme yönteminde ilk olarak tercih edilen malzeme makine haznesine yerleştirilir. Parçanın baskı işlemlerinin gerçekleşeceği inşa haznesinin üzerine toz serici merdane (recoater) yardımı ile tek katman bir toz serme işlemi gerçekleştirilir. Üç boyutlu modelin geometrisine göre lazer ışını tozları tanımlanan enerji ile tarar ve sinterleme işlemi gerçekleşir. Bu aşamada meydana gelen işlem, sinterlenen malzemenin belirli bir sıcaklığa erişmesi ile birlikte toz parçacıkların birbirine yapışarak katman oluşturmalarıdır. İlk katmanın oluşturulmasından sonra inşa haznesi belirlenen oranda aşağı iner ve bir sonraki katman için toz serici merdane ikinci toz katmanını inşa alanına sermiş olur. Bu işlem adımları parça geometrisi tamamlanana kadar devam eder. Üretim sonrası parça bir süre soğumaya bırakılır ve ihtiyaç duyulan ardıl işlemler uygulanır [19].

Şekil 2.4’de SLS yönteminin şematize edilmiş hali verilmiştir. Şekil 2.4, [20] numaralı kaynaktaki görselden uyarlanmış ve değiştirilmiştir.



Şekil 2.4 Seçici lazer sinterleme şematik gösterimi [20]

Seçici lazer sinterleme yönteminde, lazer kullanılarak toz partikülleri ısıtılır ve ilk sinterleme işlemi başlamış olur. Sinterleme sırasında erişilen sıcaklık toz malzemenin ergime sıcaklığının altındadır. Sonrasında, toz parçacıkları ısınır ve yüzeyleri yumuşayarak toz parçacıkları birbirine bağlanıp tek bir bütün haline gelir. Ardından, oluşturulan katman bir sonraki sinterleme işlemine kadar soğur. Soğuma ile toz partikülleri birbirine güçlü bir şekilde bağlanmış olur. Böylelikle elde edilen katman daha sağlam bir hale gelir. Şekil 2.5'te sinterleme işleminin şematik diagramı verilmiştir [19].



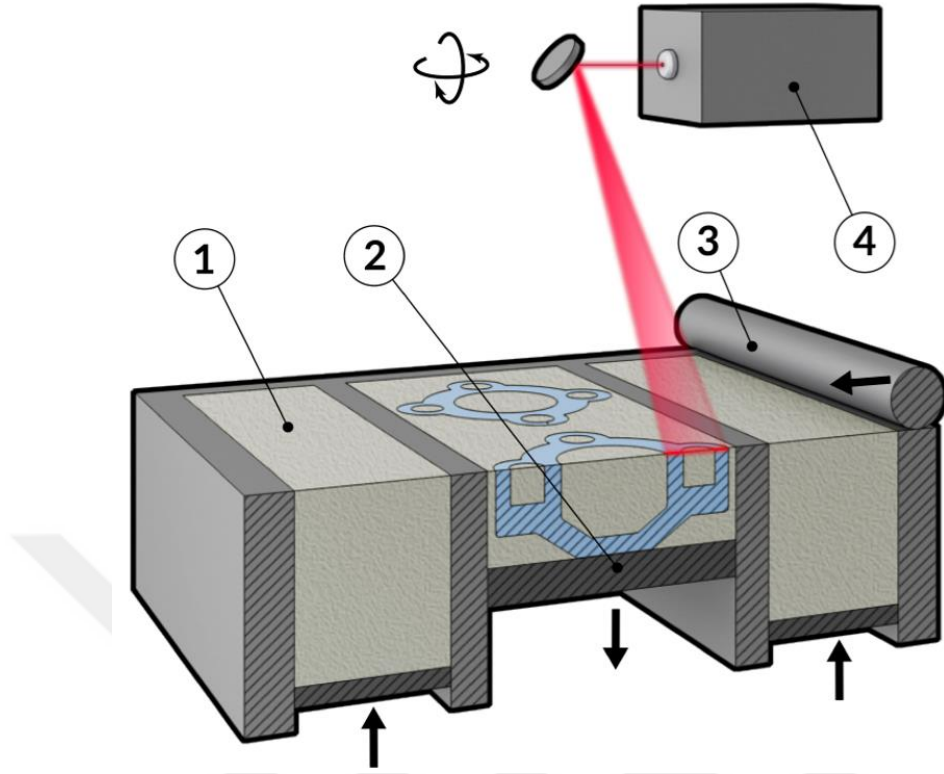
Şekil 2.5 Sinterleme işleminin şematik diagramı [19]

2.2.3.2 Direkt Metal Lazer Sinterleme (DMLS)

Direkt metal lazer sinterleme (DMLS), eklemeli imalat teknolojilerinden bir tanesidir. DMLS yönteminde, lazer ışınının katmanları tarayarak metal tozlarını sinterleme işlemi gerçekleştirilmektedir. Bu yöntem kapsamında, toz metal teknolojisini kullanılarak parça imalatı gerçekleştirilmektedir. DMLS, karmaşık geometriye sahip parçalar ve hassasiyeti yüksek olan parçaların üretiminde yaygın olarak tercih edilmektedir [21], [22].

DMLS yönteminde ilk adım, CAD programları vasıtasıyla 3D modelin oluşturulmasıdır. DMLS yönteminde, oluşturulan 3D model datası ince ve tek katmanlara ayrılmaktadır. Her bir dilim bir katmanı temsil etmektedir. DMLS makinesinde, toz partiküllerini platforma sermesi için merdane kullanılmaktadır. Toz serici merdane yardımı ile toz platforma düzenli bir şekilde serilir. Ardından, lazer ışını metal tozları sinterleyerek ilk katmanı oluşturmaya başlar. Her katman için bu adım tekrarlanarak devam eder. Toz partiküllerinin sinterlenmesi ile daha önce meydana gelen katmana bağlanma işlemi gerçekleşir. Nihai geometri oluşana kadar bu prosesler devam eder ve üretilen parça soğumaya bırakılır [9].

Şekil 2.6’da DMLS yönteminin şematize edilmiş hali verilmiştir [23].

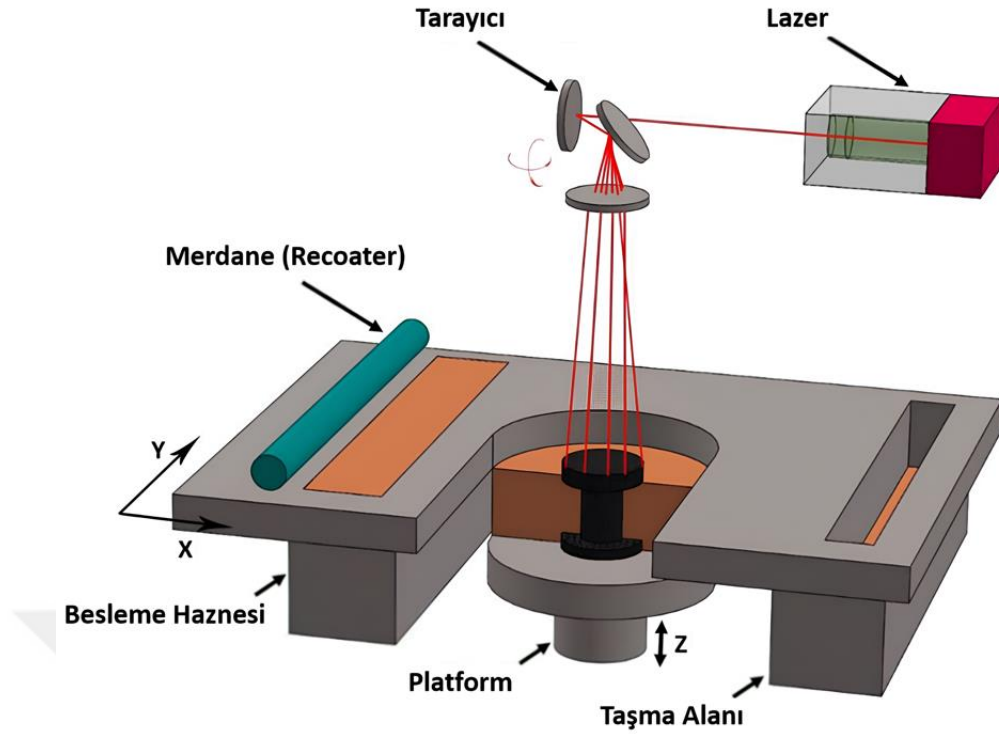


Şekil 2.6 Direkt metal lazer sinterleme şematik gösterimi [23]

2.2.3.3 Seçici Lazer Ergitme (SLM)

Seçici lazer ergitme (SLM), farklı malzeme çeşitliliği ile karmaşık geometriye sahip parçaların üretilmesi için tercih edilen eklemeli imalat yöntemlerinden birisidir. SLM, ISO/ASTM 52900 standartlarına göre otomotiv, havacılık, biyomedikal vb. sektörlerde sıklıkla kullanılan bir imalat yöntemidir. SLM yöntemi ile imalat süreci, metal parçaların katman katman üretilmesi proseslerini içermektedir. Her bir katmanda kullanılan metal tozları yüksek enerjili lazer ışını yardımıyla ergitilir. Ergiyen her bir katmandaki tozlar bir önceki katmana bağlanarak eklemeli imalat süreci nihai parça geometrisi oluşana kadar devam eder. SLM yöntemi, seri üretim dışında kullanılacak kısa seri üretimler için oldukça maliyet etkin bir yöntemdir. Bu yöntem için büyük ölçüde gaz atomize tozlar tercih edilmektedir. Bunun en temel sebebi, küresel geometrileriye sahip olmaları sebebiyle toz akışkanlığı son derece iyidir. İyi akışkanlık, sabit kalınlığa sahip toz tabakalarının elde edilmesi için gereklidir. Böylelikle, lazer ışınının homojen bir şekilde emilimi sağlanır [24].

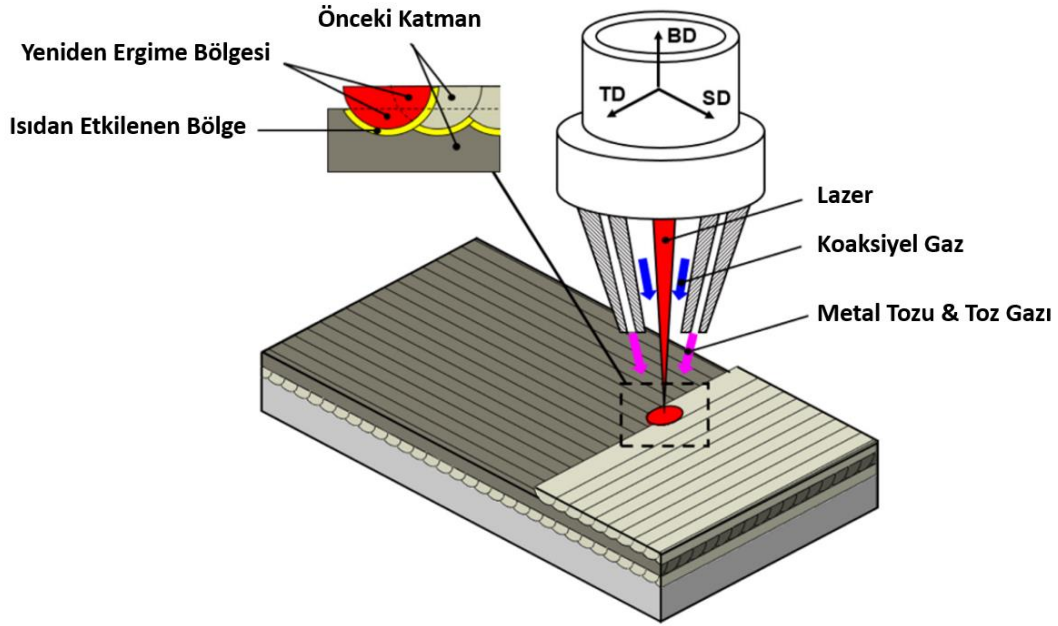
Şekil 2.7’de SLM yönteminin şematize edilmiş hali verilmiştir. Şekil 2.7, [25] numaralı kaynaktaki görselden uyarlanmış ve değiştirilmiştir.



Şekil 2.7 Seçici lazer ergitme şematik gösterimi [25]

Yüksek enerjili lazer ışınının tozları ergitmesi ile ergiyik havuzu oluşmaktadır. Ergime işleminin düzgün bir biçimde gerçekleşmemesine sebebiyet verebilecek durumlar oluşabilir. Bunlardan bir tanesi büyük tanecikli parçacıklardır. Büyük tanecikli parçacıklar, lazer ışınının nüfuziyetini azaltır. Böylelikle termal enerjinin emilimi yetersiz kalmaktadır. Bu bölgede yetersiz ısının meydana gelmesi toz taneciklerinin yetersiz ergimesine sebebiyet vererek ergime havuzunun viskozitesinin yüksek olmasına neden olur. Yüksek viskoziteye sahip ergiyik metal, gözeneklerin dolması için ergimemiş bölgeye daha az akar. Böylelikle, parça üretimi tamamlandığında gözenekli yapılar meydana gelebilir. Gözenekli yapılar, iç süreksizlikleri (porozite) meydana getirmektedir. Bu durum, parçanın mekanik özelliklerini olumsuz etkileyerek parça fonksiyonelliğini ve ömrünü azaltabilmektedir [26].

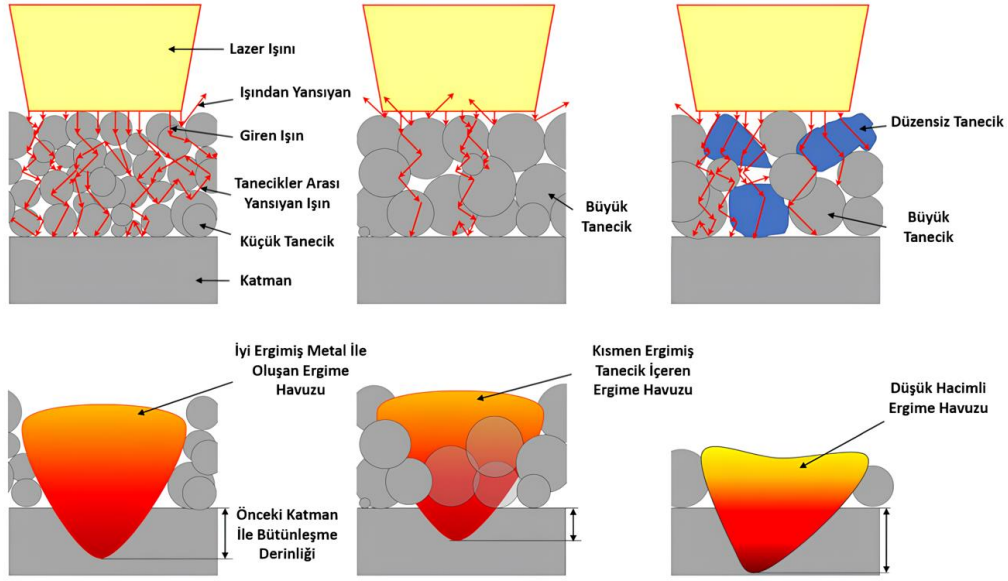
Şekil 2.8’de ergiyen katman ve sonrasında lazer yardımı ile ergitilen toz parçacıklarının birbirine nasıl bağlandığının şematik gösterimi verilmiştir. Şekil 2.8, [27] numaralı kaynaktaki görselden uyarlanmış ve değiştirilmiştir.



Şekil 2.8 Katmanların birbirine bağlanmasının şematik gösterimi [27]

Büyük ve orta boyutlu düzensiz tanecikler, açık boşluklar oluşmasına sebebiyet verebilmektedir. Meydana gelen bu büyük açıklıklar, lazerin yüksek nüfuziyet derinliğine izin verir. Yüksek nüfuziyetle birlikte oldukça hızlı ve yüksek bir ısı meydana gelebilir. Bu durum, tanecikler arasında hapsedilmiş gazın ani bir şekilde genişlemesiyle birlikte bir patlama ortaya çıkartır. Patlamayla birlikte ergime havuzu malzeme kaybeder. Bu durum ise düşük hacimli ergime havuzunun oluşmasına sebebiyet verir [26].

Şekil 2.9’da iyi ergimiş metal ile oluşan ergime havuzu, kısmen ergimiş tanecik içeren ergime havuzu ve düşük hacimli ergime havuzunun şematik gösterimi verilmiştir. Şekil 2.9, [26] numaralı kaynaktaki görselden uyarlanmış ve değiştirilmiştir.

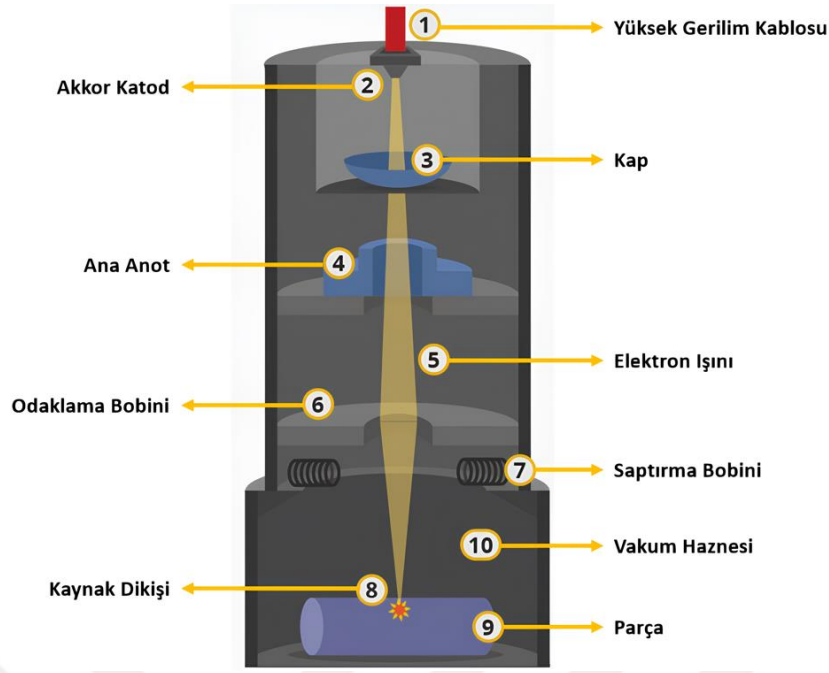


Şekil 2.9 Ergiyik havuzu oluşumu şematik gösterimi [26]

2.2.3.4 Elektron Işını Ergitme (EBM)

Elektron ışını ergitme (EBM) yöntemi, eklemeli imalat teknolojilerinden bir tanesidir. EBM yöntemi toz parçacıklarının tamamen ergitilmesi prensibine dayalı bir eklemeli imalat teknolojisidir. Temel çalışma prensibi olarak seçici lazer ergitme yöntemi ile birbirine benzer bir imalat süreci içermektedir. SLM yöntemi ile arasındaki temel fark ısı kaynağıdır. EBM yönteminde adından da anlaşılacağı üzere lazer yerine elektron ışını kullanılmaktadır. Toz malzemeyi ergitmek için kullanılan elektron ışınlarının dağılmaması gerekmektedir. Bu nedenle, vakumlu bir ortam kullanılması gerekmektedir. Yüksek sıcaklığa ulaşan elektronlar yayılmaya başlar ve sonrasında hız kazanırlar. Elektronların hız kazanmasıyla, metal tozlarını ergitecek olan enerji ortaya çıkmaktadır. Elektronlar manyetik alan ile birlikte malzemenin ergitildiği alana doğru hız kazanırlar. Malzemeye çarpan elektronlar enerji transferiyle birlikte malzemeyi önce ısıtır sonra ergitir. Ardından, ergitilecek olan ikinci katman metal tozları ilgili alana gönderilerek aynı işlem tekrarlanır. Bu işlem her bir katmanda gerçekleşerek nihai geometri elde edilmiş olur [28]. EBM yöntemi kullanılan eklemeli imalat cihazlarında yüksek gerilim kablosu, akkor katod, kap, anot, elektron ışını, odaklama bobini, saptırma bobini ve vakum haznesi bulunmaktadır [29].

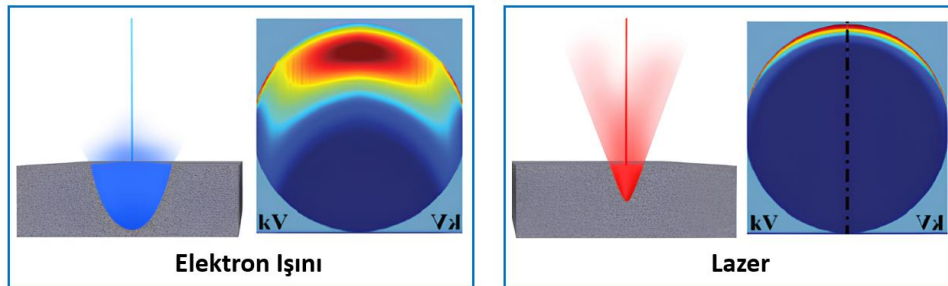
Şekil 2.10'da EBM yönteminin şematize edilmiş hali verilmiştir. Şekil 2.10, [29] numaralı kaynaktaki görselden uyarlanmış ve değiştirilmiştir.



Şekil 2.10 Elektron ışını ergitme şematik gösterimi [29]

EBM ve SLM yöntemleri incelendiğinde iki farklı yöntem birbirine benzer üretim proseslerini içermektedir. EBM yönteminde enerji kaynağı olarak elektron ışını, SLM yönteminde ise lazer kullanılmaktadır. Enerji yoğunluğu bakımından karşılaştırma yapıldığında elektron ışını lazere oranla daha fazla enerji yoğunluğuna sahiptir. Ek olarak, EBM yönteminde elektrik iletkenliği gereksinimi bulunmaktadır. Bu gereksinim sebebiyle, malzeme portföyü sadece metallerle kısıtlıdır. Fakat, SLM yönteminde böyle bir gereksinim olmamasından dolayı metal malzemelerin yanı sıra polimer ve seramik malzemeler de kullanılabilir [28], [30].

Şekil 2.11’de EBM ve SLM yöntemlerinde kullanılan enerji kaynaklarının meydana getirmiş olduğu ısı etki bölgesi farklılığının gözlemlenebileceği bir görsel verilmiştir [31].



Şekil 2.11 Elektron ışını ve lazer enerji transferi karşılaştırması [31]

2.2.4 Eklemeli İmalata Etki Eden Parametreler

Eklemeli imalatta proses parametreleri oldukça önem arz etmektedir. Proses parametreleri, üretimi yapılacak parçanın imalat sürecinin kontrol mekanizmasının sağlanmasını kolaylaştırır. Parametreler, parçanın mekanik özelliklerine ve performansına doğrudan etki edebilmektedir. Proses parametrelerinin özenli bir şekilde ayarlanması kaliteli bir ürünün üretilmesinde kritik bir rol üstlenmektedir.

Toz yatak füzyon teknolojisi kullanılarak üretilecek parçanın kalitesine etki edebilecek proses parametreleri dört temel başlık altında incelenebilir. Bu parametreler sırasıyla; lazer ile ilgili parametreler, tarama ile ilgili parametreler, toz ile ilgili parametreler ve sıcaklık ile ilgili parametrelerdir [32].

Lazer ile ilgili parametreler kapsamında lazer gücü, tarama hızı, spot boyutu (lazer odak noktası boyutu) ve ergime havuzu birincil parametreler olarak değerlendirilebilir. Malzemenin ergitilmesi için ihtiyaç duyulan enerji miktarının saptanabilmesi için lazer gücü ve tarama hızı en kritik iki parametredir. Ergiyük havuzunun boyutları ise tarama hızı, spot boyutu, lazer gücü ve yatak sıcaklığı parametrelerine göre değişkenlik gösterebilir [32].

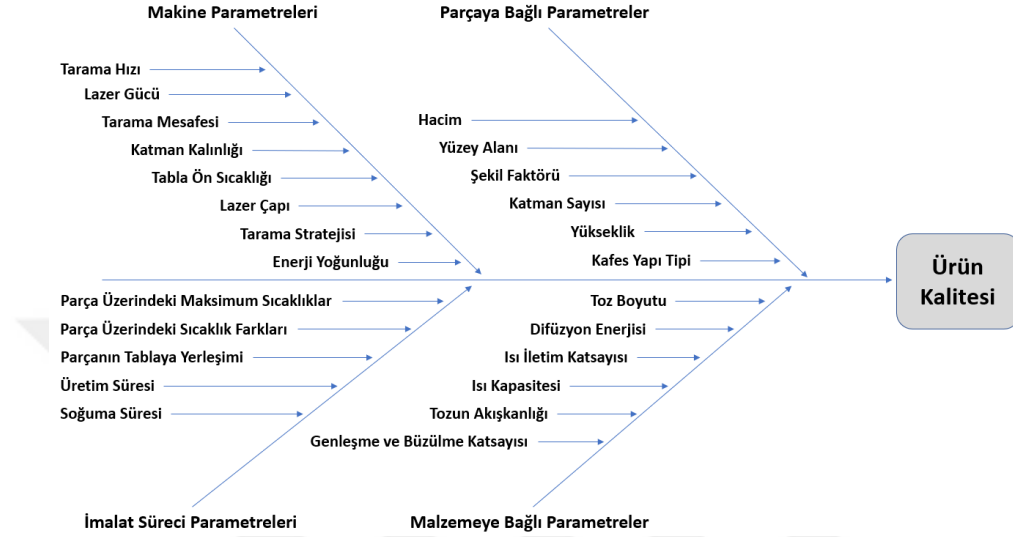
Tarama kapsamındaki parametreler tarama aralığı, tarama deseni ve tarama hızı olarak üç ana başlık kapsamında ele alınabilir. Bu parametrelerin değişkenliği, parçanın iç kısmında artık gerilmelerin oluşmasını önemli derecede etkileyerek parça fonksiyonelliği üzerinde kritik etki yaratabilmektedir. Tarama stratejisi farklılığı, aynı makinede üretilen aynı parçaların farklı performans sergilemelerine yol açabilir [32].

Toz parametreleri tozun morfolojisi, dağılımı, toz yatağı yoğunluğu vb. parametreleri içermektedir. İlgili parametreler, ergitme işleminin kalitesini etkilemektedir [32].

Sıcaklık parametreleri sıcaklığın homojen olması, toz yatağının sıcaklığı ve toz besleyicinin sıcaklığı şeklinde sıralanabilir. Sıcaklık parametreleri, diğer tüm parametrelerle bağlantı içerisinde olup üretim kalitesini önemli seviyede etkileyebilmektedir [32].

Eklemeli imalat proses parametreleri üretilen parçanın yapısal dayanımı, fiziksel görünümü ve kalitesini önemli ölçüde etkilemektedir. Doğru parametrelerin seçimi, üretim sürecinin kontrol edilebilmesi açısından oldukça kritiktir.

Şekil 2.12’de eklemeli imalat proses parametreleri dört ana başlık altında verilmiştir. İlgili parametreler, makine parametreleri, parçaya bağlı parametreler, üretim sürecine ait parametreler ve malzemeye bağlı parametreler olarak başlıklandırılmış olup her bir parametreye ait alt başlıklar şekil içerisinde gösterilmiştir [9].

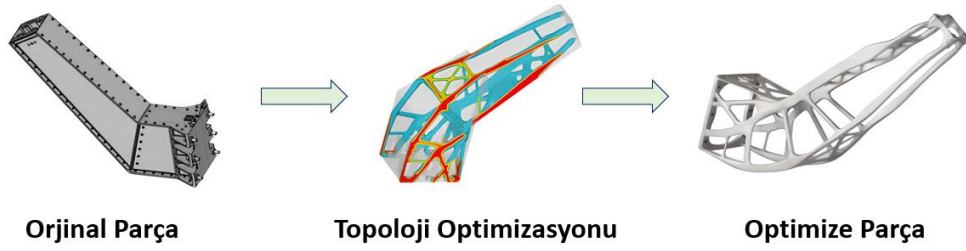


Şekil 2.12 Eklemeli imalat proses parametrelerinin sınıflandırılması [9]

2.3 Topoloji Optimizasyonu

Topoloji optimizasyonu, eklemeli imalat teknolojileri ile birlikte gelişimi hız kazanmış bir optimizasyon tekniğidir. Topoloji optimizasyonu, belirlenen sınır koşulları ve tasarım alanı içerisinde daha hafif parça tasarımlarının ortaya çıkarılması için kullanılan bir optimizasyon prosesidir. Hedeflenen sınır koşulları içerisinde daha az malzeme ile yapısal dayanımı korunmuş parça geometrilerinin optimize edilmesi için önemli bir çözüm aracıdır. Daha az malzeme kullanılarak üretilen parçaların birim maliyetlerinde iyileşmeler elde edilecektir. Ek olarak, bu durum enerji kullanımını da düşürmüş olacaktır. Topoloji optimizasyonu uygulanan parçaların geometrileri çok daha kompleks duruma kavuşabilmektedir. Bu bağlamda, topoloji optimizasyonu uygulanarak elde edilmiş parça geometrilerinin imalatı için konvansiyonel imalat yöntemleri sınırlı şekilde yanıt vermektedir. Fakat, eklemeli imalat teknolojileri her türlü karmaşık geometriye sahip parçaların üretimine olanak sağlamaktadır [33].

Şekil 2.13’te topoloji optimizasyonu uygulanmış bir parça geometrisi verilmiştir. Şekil 2.13, [34] numaralı kaynaktaki görselden uyarlanmış ve değiştirilmiştir.



Şekil 2.13 Topoloji optimizasyonu uygulanmış parça geometrisi [34]

Parça tasarım sürecinde, parça üzerine etkiyen kuvvetlerin göz önünde bulundurularak tasarımın asıl hedefinin parçanın yapısal bütünlüğünün ve fonksiyonelliğinin korunması olduğu dikkate alınmalıdır. Bunun için malzeme seçimi, parçanın çevre parçalarla olan bağlantısı, imalat yöntemi vb. kritik öneme sahiptir.

2.3.1 Topoloji Optimizasyonu İle Parça Ağırlık Azaltım Metodolojisi

Eklemeli imalat ve topoloji optimizasyonunun birlikte kullanımı ile fonksiyonelliği korunmuş ve daha hafif parça imalatı mümkündür.

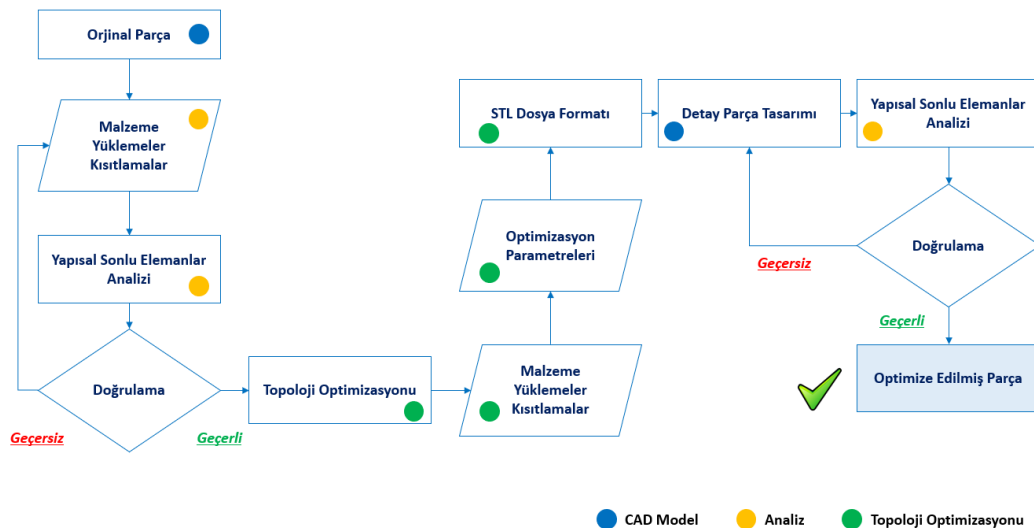
Topoloji optimizasyonu ile ağırlık azaltımı için şu adımlar uygulanabilir:

- **Orjinal Parça Tasarımı:** İlk işlem olarak hedeflenen parçanın geometrisi CAD programları vasıtasıyla oluşturulup malzeme tanımlaması yapılır.
- **Yüklemelerin ve Kısıtlamaların Tanımlanması:** Üretimi yapılacak parçanın kullanılacağı yer ve çevre parçalarla olan ilişkisi göz önüne alınarak parçaya ait yüklemeler ve kısıtlamalar ile sınır koşulları belirlenir.
- **Yapısal Sonlu Elemanlar Analizi ve Doğrulama:** Parçanın mekanik davranışının anlaşılabilmesi için yapısal sonlu elemanlar analizi (FEA) gerçekleştirilmelidir. Gerçekleştirilen bu analiz çalışması ile parçada meydana gelebilecek gerilme, deformasyon vb. durumların değerlendirmesi yapılır. Böylelikle, parçanın yük altındaki performansı görülmüş olur.
- **Topoloji Optimizasyonu Parametrelerinin Belirlenmesi:** Topoloji optimizasyon parametrelerinin belirlenmesi, parça optimizasyon süreci ve kalitesi açısından oldukça önemlidir. Bu aşamada, parçanın kullanılacağı yer için maksimum tasarım alanı da değerlendirilmelidir.
- **Topoloji Optimizasyonu Uygulaması:** Orjinal parça ağırlığından daha hafif ve fonksiyonelliğini koruyan parçalara geçiş için topoloji

optimizasyonu uygulanır. Optimize parçanın performansı, aynı sınır koşulları için herhangi bir düşüş yaşamamalıdır.

- **Malzeme, Yüklemeler ve Kısıtlamaların Yeniden Tanımlanması:** Topoloji optimizasyonu sonrasında elde edilen optimize geometri için malzeme, yüklemeler ve kısıtlamalar yeniden tanımlanır. Bu işlem sayesinde optimize edilmiş geometrinin belirlenen sınır şartlarında performansı değerlendirilir.
- **Detay Parça Tasarımı:** Optimize edilmiş parça için gerekli detay tasarım adımları uygulanır. Bu aşamada parçanın kullanım amacına ve üretime uygun olması için son güncellemeler yapılır.
- **Yapısal Sonlu Elemanlar Analizi ve Doğrulama:** Detay tasarımı tamamlanan parçanın nihai performansının değerlendirilmesi için yapısal sonlu elemanlar analizi tekrarlanır ve parça performansı değerlendirilerek son onay aşaması tamamlanmış olur.
- **Sonuçların Değerlendirilmesi ve Üretim:** Orjinal geometri ve optimize edilmiş geometri ağırlık, malzeme kullanımı, maliyet vb. önemli kriterler açısından değerlendirilir. Nihai geometri üretim aşamasına alınarak parça eklemeli imalat ile üretilir.

Şekil 2.14’de topoloji optimizasyonu - ağırlık azaltım metodolojisi verilmiştir. Şekil 2.14, [35] numaralı kaynaktaki görselden uyarlanmış ve değiştirilmiştir.

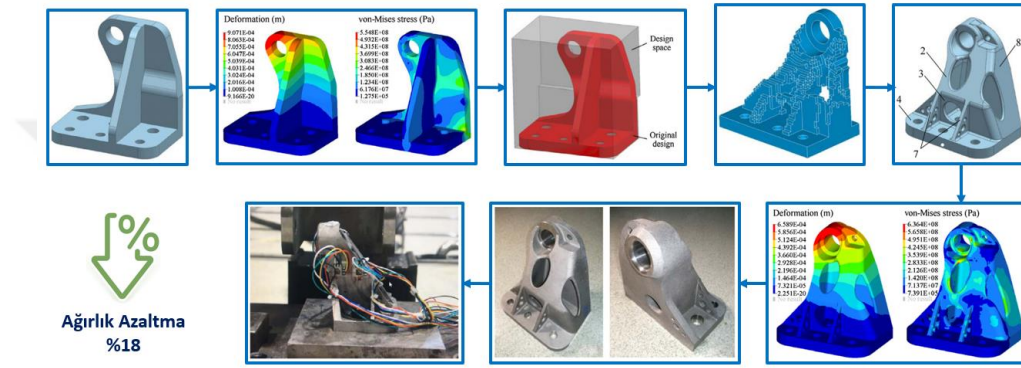


Şekil 2.14 Topoloji optimizasyonu ile ağırlık azaltım metodolojisi [35]

2.3.2 Topoloji Optimizasyonu Uygulanmış Örnek Parçalar

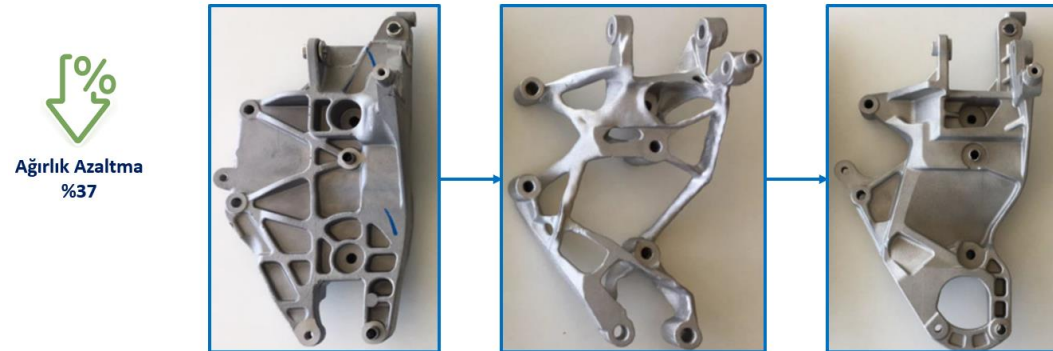
Şekil 2.15 ve Şekil 2.16’da gösterilen iki braket için topoloji optimizasyonu uygulanıp ağırlığının azaltılarak eklemeli imalat ile üretim aşamaları verilmiştir. Parçalarda sırasıyla yaklaşık olarak %18 ve %37 oranında malzeme azaltılarak parçaların ağırlığı iyileştirilmiş olup fonksiyonelliği ise korunmuştur. Böylelikle fonksiyonelliği korunmuş ve daha hafif braketler üretilmiştir [36], [37].

Şekil 2.15’te topoloji optimizasyonu uygulanarak eklemeli imalat ile üretilen, havacılıkta kullanılan bir braket örneği verilmiştir [36].



Şekil 2.15 Topoloji optimizasyonu uygulanmış havacılık braketini [36]

Şekil 2.16’da topoloji optimizasyonu uygulanarak eklemeli imalat ile üretilen bir alternatör braketini verilmiştir [37].



Şekil 2.16 Topoloji optimizasyonu uygulanmış alternatör braketini [37]

Elde edilen sonuçlar neticesinde, topoloji optimizasyonu ve eklemeli imalatın birlikte kullanımı bir çok avantajı da beraberinde getirecektir. Özellikle prototip parça maliyetinde iyileşme, üretim süresinin kısalması ve malzemeden tasarruf ile enerjiden kazanç bu avantajlardan en önemlileridir.

3.1 Sistem ve Parça Tanımlamaları

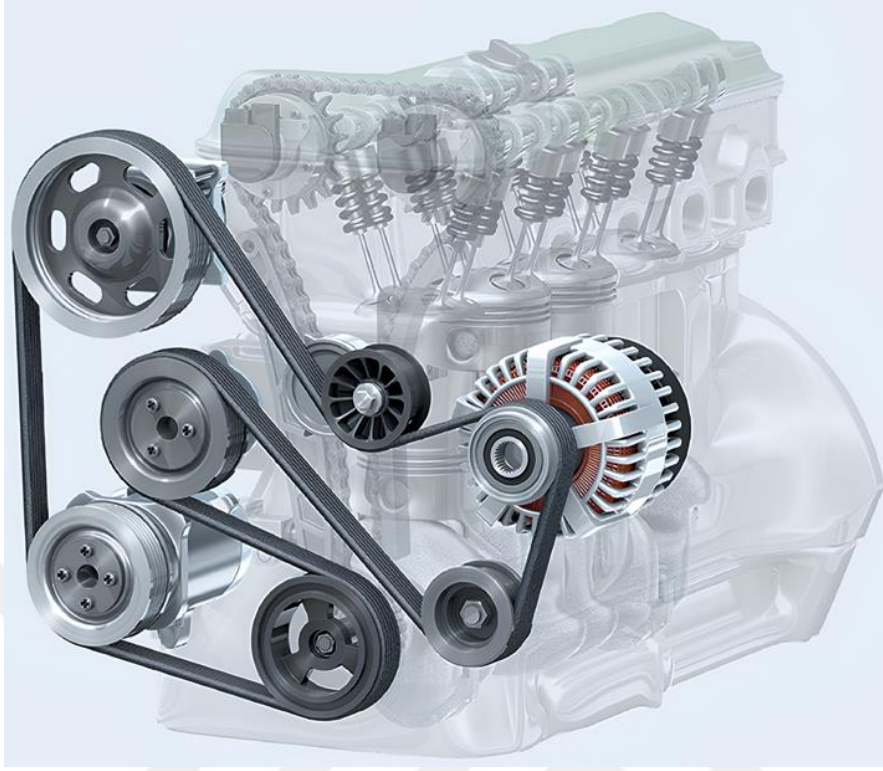
Bu bölüm içerisinde motor kayış-kasnak sisteminin temel görevi, çalışma prensibi ve sistem içerisinde bulunan parçaların temel fonksiyonları hakkında bilgiler verilmiştir.

3.1.1 Motor Kayış-Kasnak Sistemi (FEAD)

Kayış-kasnak sistemi, FEAD (Front End Accessory Drive System) olarak tanımlanabilmektedir. İçten yanmalı motorlarda güç aktarımının sağlanabilmesi için kayış-kasnak sistemi tercih edilmektedir. Bunun yanı sıra, güç aktarımında dişli sistemi de tercih edilebilmektedir. Her iki sisteminde kendi standartlarına göre avantaj ve dezavantajları bulunmaktadır.

Motor kayış-kasnak sistemi mekanik bir güç iletim mekanizmasıdır ve oldukça dinamik ve zorlayıcı sınırlar içerisinde çalışmaktadır. Kayış-kasnak sistemi, motorun çalışmasıyla birlikte elde edilen dönme hareketini/tahriği krank mili vasıtasıyla motor üzerinde kullanılan diğer aksesuar elemanlara verimli bir şekilde iletilmesi amacıyla tercih edilen bir güç aktarım mekanizmasıdır [38], [39]. Yardımcı elemanlar su pompası, alternatör, klima kompresörü vb. parçalar olabilir [39], [40]. Kayış-kasnak sistemi içten yanmalı motorlarda sıklıkla tercih edilmektedir. İçten yanmalı motorlarda tercih edilen bir diğer tahrik mekanizması olan dişli tahrik sistemlerine göre bazı avantajları bulunmaktadır. Bu avantajlardan bazıları, titreşimleri sönmölemek için kayış ve gergi mekanizmasının kullanılması, sessiz çalışması, maliyetinin dişli tahrik mekanizmasına göre ucuz olması ve az bakım gereksinimleri olarak sıralanabilir. Kayış-kasnak sistemi yağlamaya ihtiyaç duymayan bir sistemdir. Bu nedenle, açık ortamda çalışabilme avantajına da sahiptir. Fakat, dişli tahrik sistemi yağlamaya ihtiyaç duyduğu için açık ortamda çalışamaz.

Şekil 3.1’de örnek bir kayış kasnak sisteminin şematik gösterimi verilmiştir. Verilen görselde krank miline bağlı krank kasnağı yardımı ile yardımcı komponentler tahrik edilerek sistem tamamlanmıştır. Sistem içerisinde kayış, gergi, alternatör ve avare kasnak da kullanılmıştır [41].



Şekil 3.1 Örnek FEAD sistemi [41]

3.1.2 FEAD Sistemi Bileşenleri

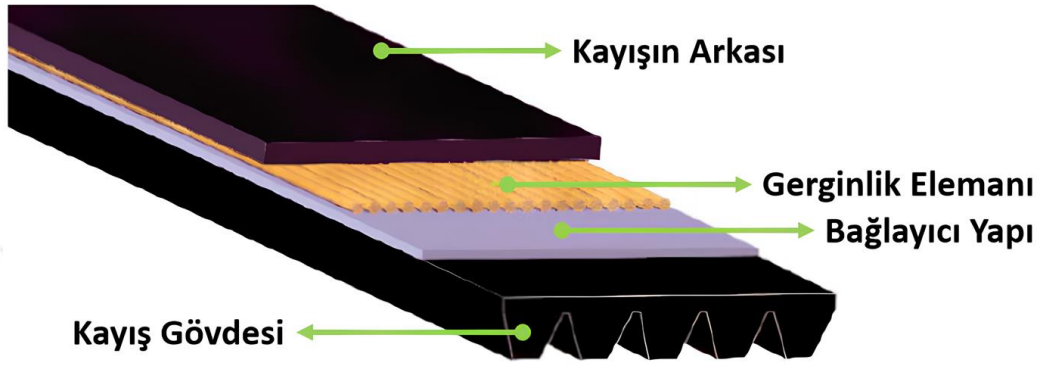
Motor FEAD sistemi V şeritli kayış, V şeritli kayışa uygun kasnak, gergi, gergi braketi ve tahrik edilen yardımcı bileşenlerden oluşmaktadır. Sistemin en temel bileşenleri ise kayış, kasnak, tahrik edilen parçalar ve gergidir.

3.1.2.1 Kayış

Kayış, motordan elde edilen gücün tahrik elemanlarına iletilmesi amacıyla istifade edilen oldukça sağlam ve esnek bir bileşendir. Yüksek sürtünme yüzeyine sahip olan kayış, iki veya daha fazla kasnak arasına yerleştirilerek kullanılabilir. Temel görevi, kasnaklardan bir tanesinin dönmesiyle elde edilen hareketle diğer kasnakların da dönmesini sağlamaktır [42]. V şeritli kayışlar, yüksek çevrim oranına sahip kompleks mekanizmalarda daha fazla tercih edilmektedir. Tercih sebeplerinden en önemlisi, kayışın sahip olduğu V kesiti güç aktarımının daha verimli olmasına olanak sağlamasıdır. V kayış üretimi, birden fazla kayış kanalının/dişinin bir araya getirilmesi ile gerçekleştirilmektedir. Kayışın sahip olduğu bu form, kasnağa daha dayanıklı bir şekilde monte edilmesini sağlamaktadır. Kayış içerisinde polyamid ve polyester esaslı bileşenler

bulunmaktadır. Bu bileşenler sayesinde, kayışın esneklik ve gerginlik özellikleri desteklenmektedir. Kayışın kasnağa oturduğu yüzey polibütan temelli kauçuktan üretilmektedir. Bağlantı yüzeyi, kasnağa temas etmekte olup aşınma ve sıcaklığa karşı yüksek dirence sahip olması gerekmektedir [43].

Şekil 3.2’de V kayış iç yapısını gösteren görsel verilmiştir. Şekil 3.2, [43] numaralı kaynaktaki görselden uyarlanmış ve değiştirilmiştir.



Şekil 3.2 V kayış iç yapısı [43]

3.1.2.2 Kasnak

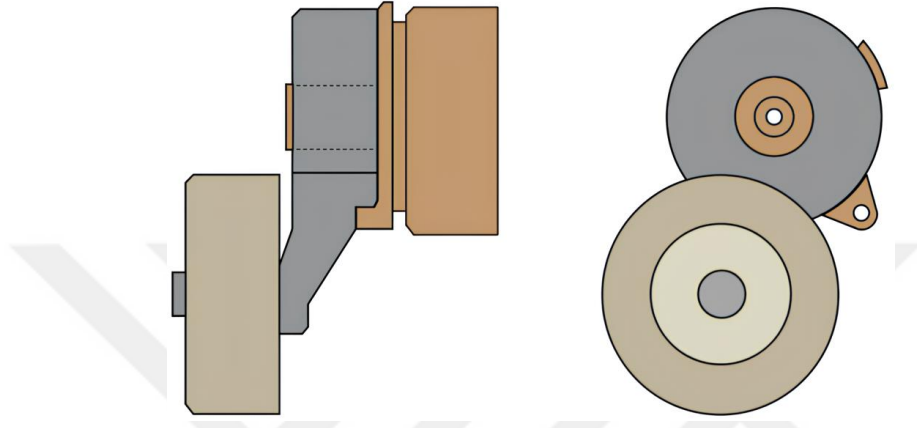
FEAD sisteminde kullanılan kasnaklar, kayışın temas ettiği ve güç aktarımının sağlandığı temel komponentlerdir. Krank kasnağı, FEAD sisteminin temel parçası olup güç aktarımının ana merkezidir. Motor FEAD sisteminin birincil parçası olan krank kasnağı, motorun krank miline montajlı olup motordan elde ettiği gücü tahrik edilecek parçaların kasnaklarına iletmekle görevlidir. Sistem içerisinde bulunan diğer kasnaklar ise tahrik edilecek parçalara bağlı olan kasnaklardır. Tahrik edilecek parçaların içinde bulunan millere ise tahrik edilecek kasnaklar montajlanmaktadır. FEAD sistemi içerisinde bulunan kasnak konumları doğru bir şekilde ayarlanmalıdır. Kasnaklar arasında oluşabilecek hizalama kaybı, paket içerisinde uyumsuzluk meydana getirecektir. Bu uyumsuzluk neticesinde, kayış montajı istenilen şekilde gerçekleştirilemeyip kayış kasnağa düzgün oturmayacaktır. Bu şartlar altında, kayış ve kasnak arasındaki sürtünme azalır ve sistem fonksiyonellik kaybına uğrayabilir.

3.1.2.3 Gergi

Gergi, motor FEAD sisteminde kullanılan bir parça olup kayış vasıtasıyla meydana gelecek gerilimi ayarlar. Böylelikle, güç aktarımının tutarlı bir şekilde sürekliliğini sağlar. FEAD sisteminde gergi kullanımı ile montaj esnasında oluşabilecek ön

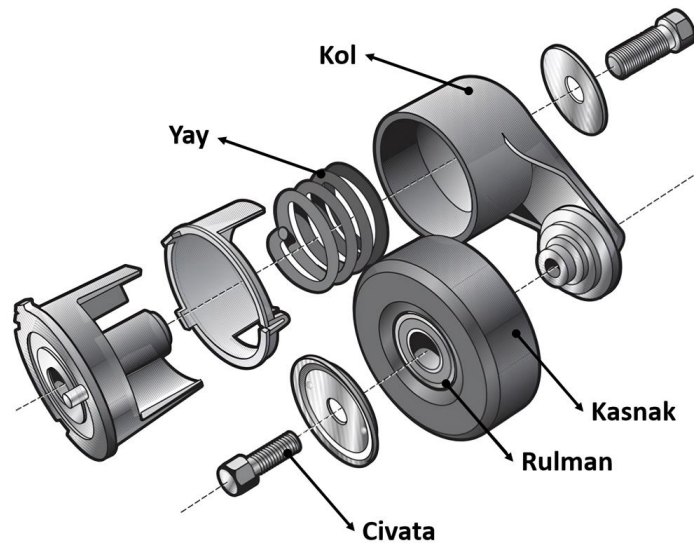
gerilmeler büyük ölçüde önlenmektedir. Gergi, iç mekanizmasında bulunan yay aracılığıyla yüksek ön gerilmeleri sönmölemeye yardımcı olmaktadır. Ek olarak, yüksek devirde çalışan sistemlerde kayış dalgalanmaları fazla olabilmektedir. Gergi sayesinde, ortaya çıkabilecek bu dalgalanmalar minimize edilerek sistem performansı artırılmış olacaktır [44].

Şekil 3.3'te örnek bir gergi modeli verilmiştir [45].



Şekil 3.3 Örnek gergi modeli [45]

Gergi, oldukça karmaşık bir geometriye sahip ve içerisinde çok sayıda farklı bileşenler içeren bir mekanizma olarak tanımlanabilir. Gerginin temel iki parçası gergi kolu ve gergi kasnağıdır. Diğer yardımcı parçalar ise yay, rulman, civata vb. şeklinde sıralanabilir [46]. Şekil 3.4'de gergi iç yapısı verilmiştir. Şekil 3.4, [46] numaralı kaynaktaki görselden uyarlanmış ve değiştirilmiştir.



Şekil 3.4 Gergi iç mekanizması [46]

3.1.2.4 Yardımcı Bileşenler

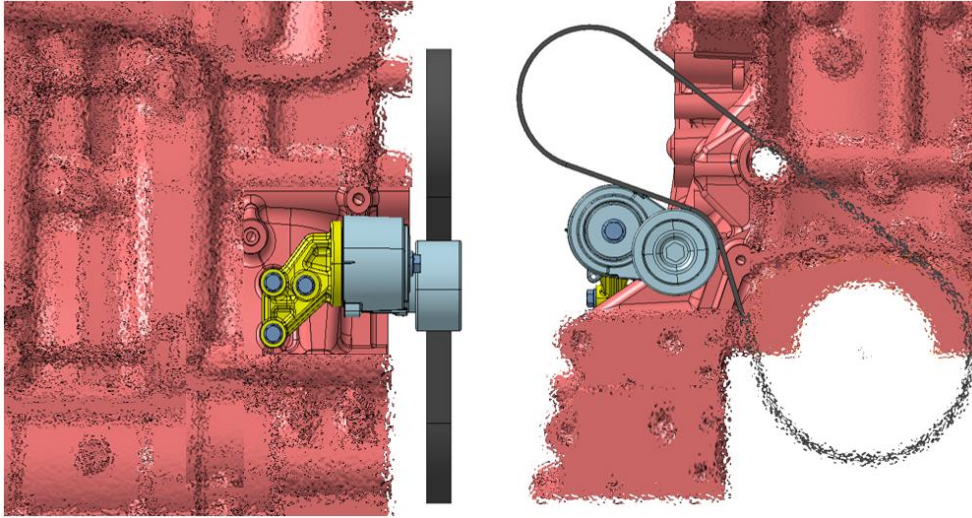
Motor FEAD sisteminde kullanılan krank kasnağı, kayış, gergi ve gergi braketlerini ana parçalar olarak düşünebiliriz. Yardımcı parçalar ise su pompası, alternatör ve klima kompresörü gibi tahrik edilmesi gereken parçalar olabilir. Yardımcı parçaların ana miline kasnak bağlıdır. Böylelikle, kasnak montajı yapılan tüm bu yardımcı parçalar FEAD sistemine dahil edilip kayış ile tahrik edilebilir. Su pompası, motor soğutma sisteminin temel bileşenidir. Görevi, motorda yanma ile meydana gelen fazla ısıнын atılması ve motorun çalışma sıcaklığını belirli aralıklarda tutarak motor soğutma suyunun sirkülasyonunu sağlamaktır. Alternatör, motorda meydana gelen mekanik enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürerek aracın elektriğe ihtiyaç duyduğu sistemlere (far, klima, radio vb.) elektrik enerjisi sağlar. Klima kompresörü, aracın iklimlendirme sisteminin (klima) çalışabilmesi için gerekli bir parçadır. Basıncılı gaz meydana getirerek, iklimlendirme sisteminin soğutulmasını sağlar. FEAD sistemi yardımcı bileşenleri, ihtiyaç duyulan gereksinimlere göre çoğaltılıp azaltılabilir.

3.2 Gergi Braketi

3.2.1 Gergi Braketinin Tanımı ve Fonksiyonu

Gergi braketi, içten yanmalı motorların FEAD sisteminde kullanılan gergi mekanizmasının sabitlenmesi için destek parça görevini üstlenmektedir. Mekanik bir parça olarak kullanılan gergi braketi, kayış aracılığıyla gergiye uygulanan kuvvetin tutarlılığını sağlayarak sistemin dengesini artırmaktadır. Kayışın amacına uygun bir gerginlikte çalışması ile kasnaklar arasında düzgün bir hizalama sağlanmış olacaktır. Bu durum, titreşim ve gürültü faktörlerini iyileştirerek sistemin daha emniyetli bir şekilde çalışmasına katkı sunacaktır. Kayışın kasnaklar ile dengeli bir şekilde çalışması bazı avantajları da beraberinde getirecektir. Bu avantajlar, tahrik edilen parçaların performansında iyileşme, kayış ömründe geri kazanım, gürültü ve titreşimde iyileşmeler olarak sıralanabilir. Gergi braketi, mekanik dayanım açısından değerlendirildiğinde malzeme seçiminde çoğunlukla dökme demir ve çelik tercih edilmektedir.

Şekil 3.5'te optimize edilecek orjinal gergi braketinin motor üzerindeki konumu verilmiştir.



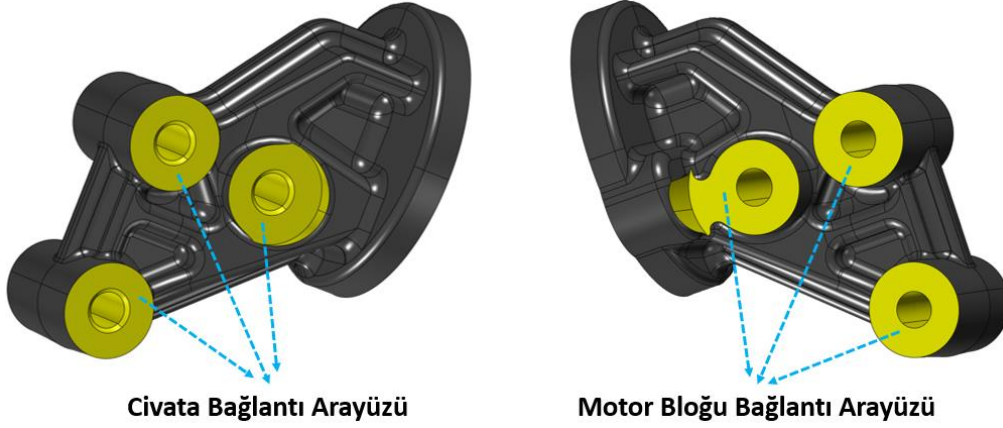
Şekil 3.5 Gergi braketinin motor üzerindeki konumu

Gergi braketinin temel fonksiyonları aşağıdaki gibidir:

- Kayışın gerginliğini ayarlayan gergi mekanizmasının sabitlenmesine destek olarak kayışın iki kasnak arasında zarar görmeden çalışmasını sağlar.
- Motor bloğuna ve gergiye bağlanarak sistemin stabilitesinin artmasını sağlayıp, motorun yüksek devirlerde titreşim karakteristiğini iyileştirir.
- FEAD sistemine uygun bir şekilde tasarlanarak montaj kolaylığı sağlar. Böylelikle, zamandan kayıp ve parça deformasyonları önlenmiş olur.
- Gergi vasıtasıyla kayışın uygun gerilimde çalışmasına destek olup kayış deformasyonlarını önleyerek bakım maliyetlerini düşürür.
- Gergi mekanizmasının kullanılmasına olanak sağlayarak gürültü ve titreşim gibi istenmeyen durumların önlenmesine yardımcı olur.

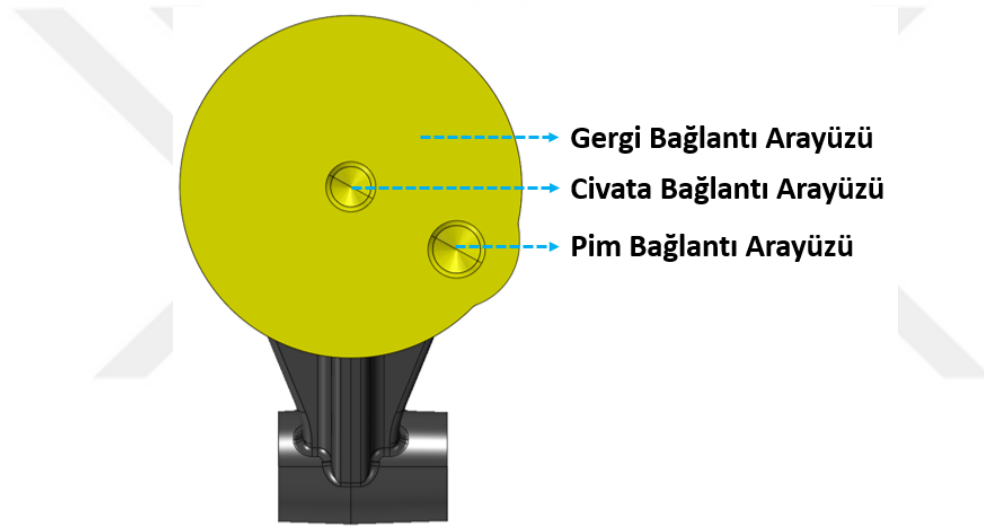
3.2.2 Gergi Braketinin Geometrisi ve Bağlantı Arayüzleri

Gergi braketini 3D modeli CATIA programında tasarlanmıştır. Orjinal parçanın üretim yöntemi dökümdür. Parça civata bağlantı arayüzleri döküm sonrası talaşlı imalat yöntemi ile işlenmektedir. Şekil 3.6 ve Şekil 3.7’de parçanın orjinal geometrisi verilmiştir. Siyah renk ile belirtilen yüzeyler dökümü, sarı renkli yüzeyler ise döküm sonrası talaşlı imalat ile işlenen yüzeylerin son durumunu göstermektedir. Talaşlı imalat prosesinin uygulanmasının temel nedeni parça bağlantı arayüzlerinde istenilen toleransların talaşlı imalat ile kolaylıkla sağlanabiliyor olmasıdır.



Şekil 3.6 Orjinal gergi braket blok ve civata bağlantı arayüzü

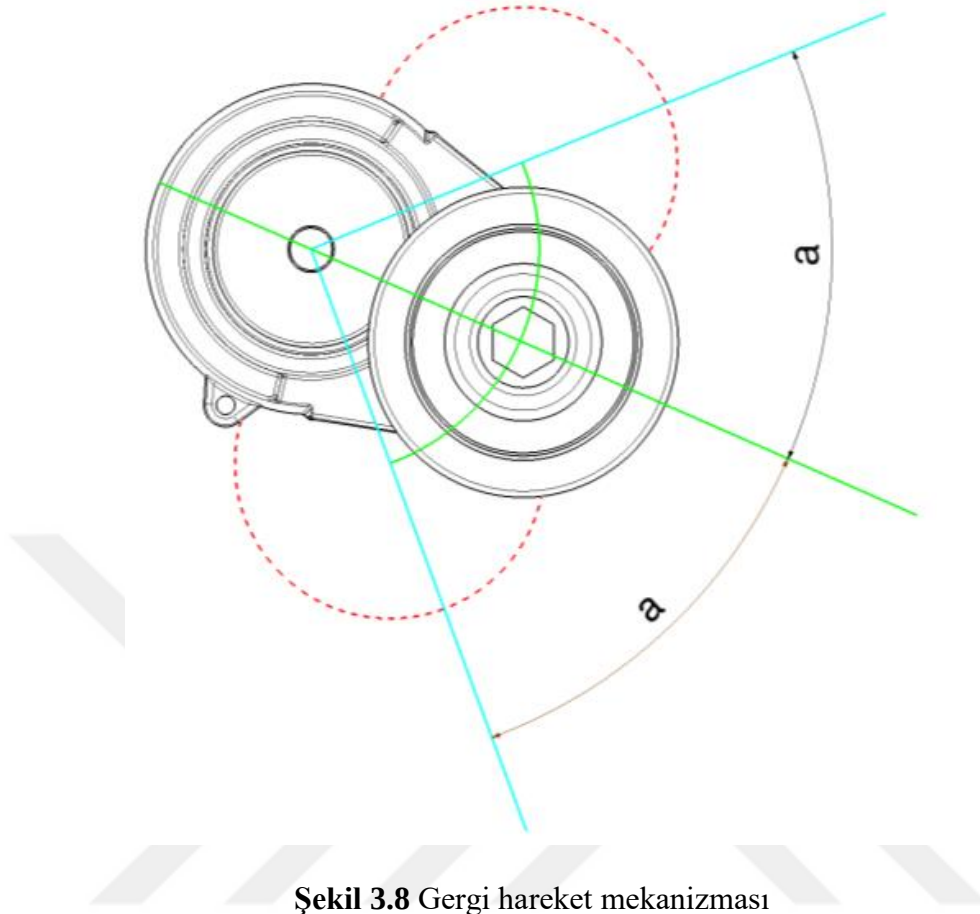
Şekil 3.7’de gerginin gergi braketine montajlanacağı arayüz verilmiştir.



Şekil 3.7 Orjinal gergi braket gergi bağlantı arayüzü

Gergi braket ve gergi birbirlerine civata ile bağlanmaktadır. Ek olarak, montaj kolaylığı sağlanması amacıyla gergi braket üzerine bir adet pim deliği açılmıştır. Pim deliğinin amacı ise gerginin gergi braketine montajında pozisyonlama kolaylığı sağlamasıdır. Gergi braketinin bir diğer bağlantı noktası ise motor bloğudur. Gerginin temel fonksiyonu, sistemin ihtiyaç duyduğu kayış gerginliğini sağlayarak kayışın sorunsuz çalışmasına yardımcı olmaktır. Gergi üzerinde bir gergi kasnağı bulunmaktadır. Kayış kasnağa monte edilmektedir. Gergi içerisinde yay mekanizması bulunmaktadır. Bu sayede kayışın gerginliği ayarlanabilmektedir. Gergi kasnağı üzerine kayış kuvvet uyguladığında, gergi mekanizması çalışmaya başlar. Böylelikle, kayış uygun bir gerginlikte çalışarak fonksiyonunu yerine getirmiş olur.

Şekil 3.8’de gergi mekanizmasına ait hareket aralığı verilmiştir.

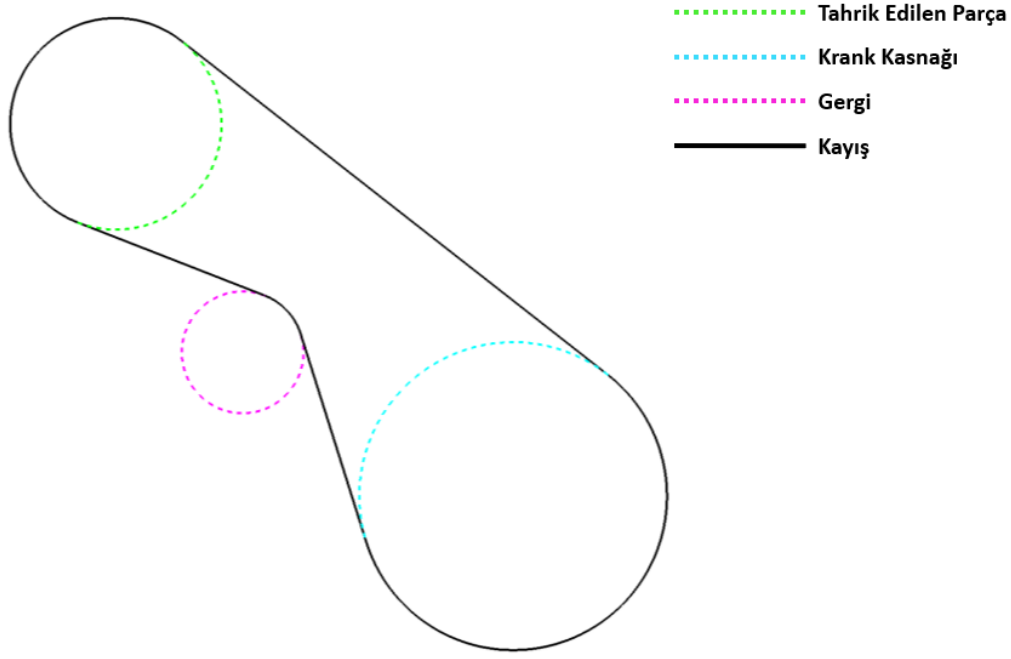


Şekil 3.8 Gergi hareket mekanizması

3.2.3 Gergi Braketinin Kullanıldığı Layout

Motor ilk çalıştırıldığında, silindir içerisindeki pistonlar aşağı ve yukarı yönlü hareket etmeye başlarlar. Elde edilen bu hareket, krank mili aracılığıyla dönme hareketine dönüştürülmektedir. Krank miline civatalarla bağlı olan krank kasnağı dönmeye başlar. Krank kasnağı, motordan elde edilen gücün aktarılmasında tercih edilen bir bileşendir. Krank kasnağı dönme hareketi, kayış yardımıyla diğer parçaların kasnaklarını tahrik ederek gücü iletmış olur.

Şekil 3.9’da krank kasnağı, tahrik edilen parça, gergi ve kayışın kullanılmış olduğu layout verilmiştir. Layout içerisinde dört temel parça bulunmaktadır. Mavi renk krank kasnağını, yeşil tahrik edilen parçayı, pembe gergiyi ve siyah renk ise kayışı temsil etmektedir. Yeşil renk ile şematize edilen bölge, tahrik edilecek parçanın kasnağını temsil etmektedir. Ek olarak, gergi braketini layout dışında bulunup gergiyi destekleyen parça konumundadır. Pembe renk ile şematize edilen gerginin ön kısmında gergi braketini bulunmaktadır.

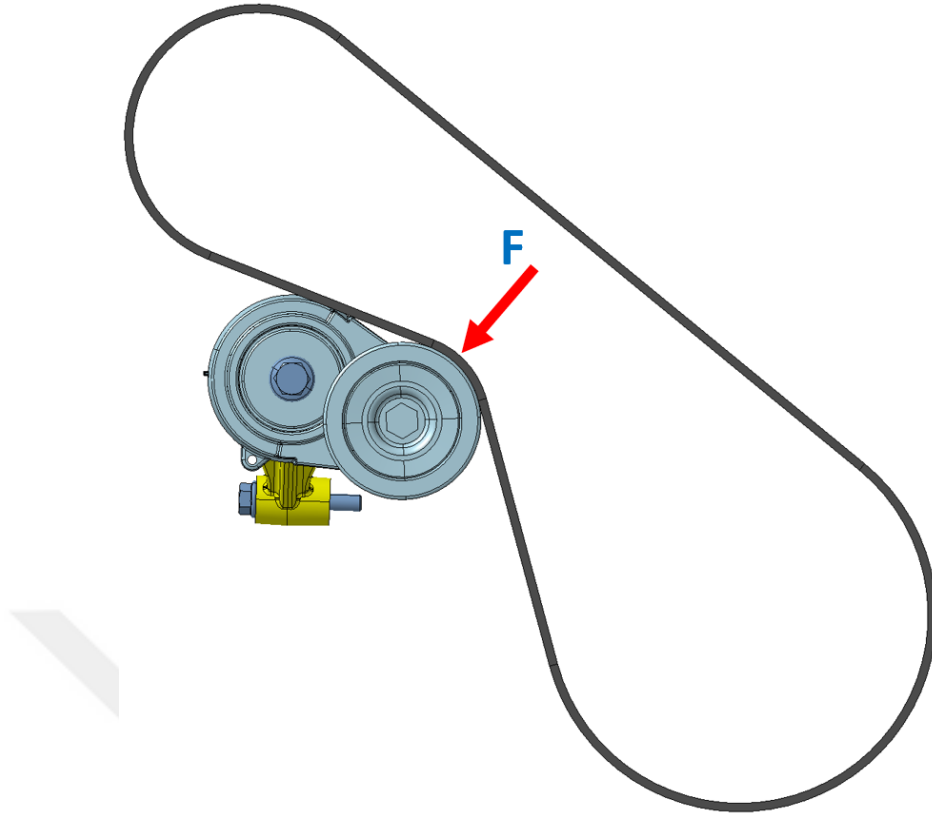


Şekil 3.9 Gergi braketinin kullanıldığı layout

3.3 Orjinal Gergi Braketi Yapısal Sonlu Elemanlar Analizi

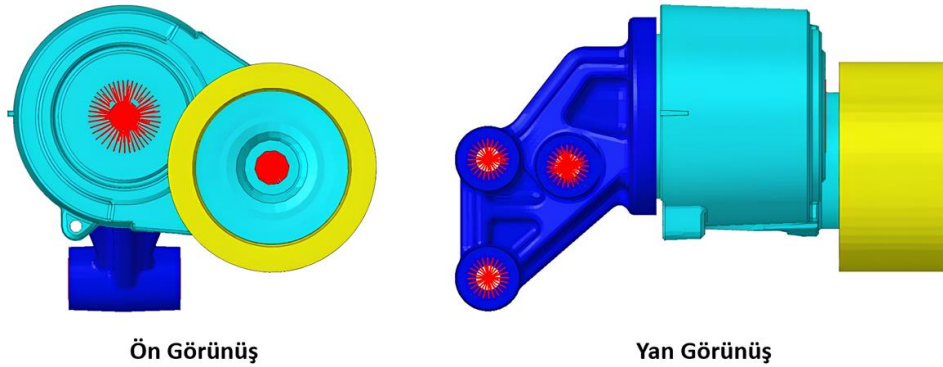
Yapısal sonlu elemanlar analizi, parçaların mekanik davranışını inceleyerek parçaların optimize edilmesi için oldukça önemli bir analiz yöntemidir. Sonlu elemanlar analizinde parçaların belirli sınır koşullarında nasıl reaksiyon göstereceği simüle edilir. Böylelikle, üretim öncesi parçaların potansiyel gerilme ve deformasyon bölgeleri tanımlanır. Bu doğrultuda, parçaların çalışabileceği maksimum koşullarda yapısal mekanik dayanım kapsamlı bir şekilde ele alınmış olur. Elde edilen sonuçlar, parça tasarım sürecinin hassasiyetle yönetilmesini ve malzeme seçimini kolaylaştırmaktadır.

Gergi braketine ait yapısal sonlu elemanlar analizi Ansys programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Modelleme için ikinci dereceden tetrahedral elemanlar kullanılmıştır. Gergi braketi motor bloğuna üç farklı noktadan, gergiye tek noktadan civata ile montajlanmaktadır. Ek olarak, gergi ve gergi braketinin karşılıklı montajında pozisyonlamanın daha rahat yapılabilmesi için pim bağlantısı tercih edilmiştir. Şekil 3.10'da kayış kuvvetinin gergi üzerine etkisi şematik olarak gösterilmiştir. Krank mili vasıtasıyla elde edilen dönme hareketi, krank kasnağı ve kayış ile tahrik edilecek parça kasnaklarına aktarılır. FEAD sistemi içerisinde bulunan gergi ve gergi braketi yapısal olarak zorlanma ile karşı karşıya kalmaktadır.



Şekil 3.10 Kayış kuvvetinin şematik gösterimi

Şekil 3.11’de gergi ve gergi braket montaj noktaları gösterilmiştir.



Şekil 3.11 Orjinal gergi braket montaj noktaları

Yapısal sonlu elemanlar analiz çalışmasında girdiler motorun en yüksek devri olan 2700 rpm’e göre değerlendirilmiştir. Kuvvetlerin dinamik etkileri için 1.5 güvenlik katsayısı ile analiz çalışması gerçekleştirilmiştir.

Yapısal sonlu elemanlar analiz çalışmasının girdi verileri Tablo 3.1’de verilmiştir.

Tablo 3.1 Yapısal sonlu elemanlar analizi girdi verileri

Yüklemeler		
Kayış Kuvvetleri	2700 rpm	Dinamik Etkiler
Fy	-772.34 N	-1158.51 N
Fz	-140.35 N	-210.53 N

Döküm yöntemi ile üretilen orjinal gergi braketi malzemesi GJL-300 dökme demirdir.

Tablo 3.2’de GJL-300 dökme demir mekanik özellikleri verilmiştir [47].

Tablo 3.2 GJL-300 dökme demir malzeme özellikleri [47]

Malzeme Özellikleri	
Malzeme	GJL-300
Çekme Dayanımı	300-400 MPa
Akma Dayanımı	195-260 MPa
Elastik Modülü	108-137 GPa
Poisson Oranı	0.26
Yoğunluk	7.25 gr/cm3

Tablo 3.3’te GJL-300 kimyasal kompozisyon değerleri verilmiştir [48].

Tablo 3.3 GJL-300 dökme demir kimyasal kompozisyon değerleri [48]

GJL-300 Dökme Demir Kimyasal Kompozisyon (%)											
C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	Al	Ti	Fe
3.890	1.920	0.350	0.372	0.054	0.433	0.020	0.074	0.057	0.101	0.017	91.70

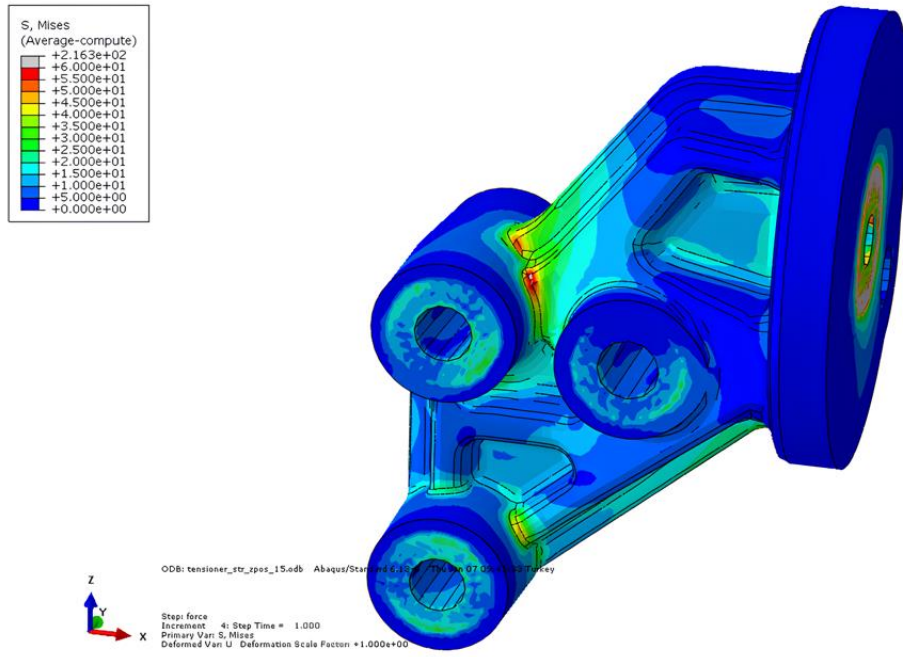
Yapısal sonlu elemanlar analiz çalışmasında birincil kuvvet olarak kayış kuvveti baz alınmıştır. Analiz çalışmasında braket ağırlığı da analiz çalışmasına dahil edilmiştir. Kayış kuvveti motorun en yüksek devri olan 2700 rpm değeri esas alınarak analiz süreci ilerletilmiştir. Motorun ilk çalıştırılması ile birlikte krank mili, krank kasnağını tahrik edip krank kasnağının dönmesine neden olur. Krank kasnağı ise kayış vasıtasıyla diğer parça kasnaklarını tahrik ederek dönme hareketini devreye almaktadır. FEAD sistem içerisinde bulunan gergi ve gergi braketi kuvvetlerin etkisi altında çalışmaktadır.

Motorun yüksek devirlerde çalışması durumunda gergi ve gergi braketi yüksek gerilimin etkisi altında çalışmaktadır. Yapısal sonlu elemanlar analizi, motorun emniyetli ve verimli bir şekilde çalışabilmesi için gerçekleştirilmiştir. Gergi braketi üzerine etkiyen yükleme koşulları dikkate alınarak gergi braketinin bu koşullar altında nasıl tepki verdiği simüle edilmiş olur. Bu sayede, gergi braketinde oluşabilecek gerilme ve deformasyonlar hakkında ön bilgi elde edilir.

Orjinal gergi braketi yapısal sonlu elemanlar analizi, kayış kuvvetinin etkisi altında incelenmiş olup X, Y, Z ve kayış kuvveti Von-Mises gerilim sonuçları elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlar Şekil 3.12, Şekil 3.13, Şekil 3.14 ve Şekil 3.15'te verilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde, maksimum gerilme değerinin yaklaşık olarak 67 MPa olduğu saptanmıştır.

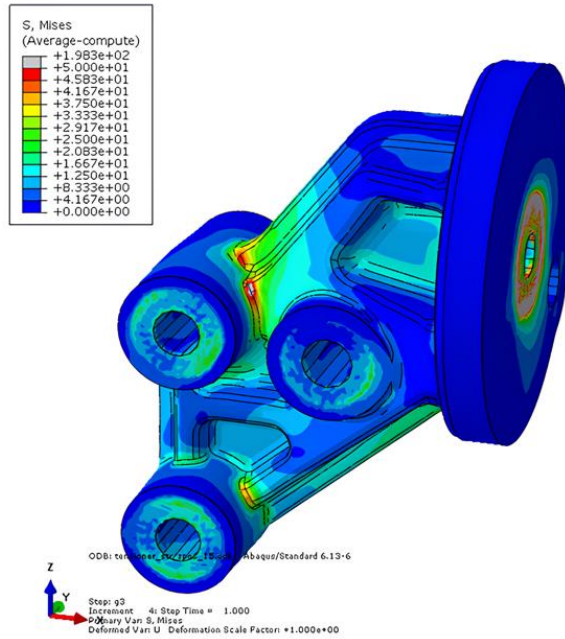
Sonuçlar, parça malzemesi olan GJL-300 dökme demir malzeme özellikleri ile karşılaştırılmış olup parça tasarımının FEAD sistemi ihtiyaçlarına uygun olduğu ve parçanın temel görevi olan gerginin stabilitesinin sağlanması fonksiyonunu yerine getireceği öngörülmüştür. GJL-300 dökme demirin akma dayanımı 195-260 MPa değerleri arasındadır. En kötü senaryo olan 195 MPa değeri, parça üzerinde tespit edilen 67 MPa gerilme değerinin yaklaşık 2.9 katıdır. Yapısal sonlu elemanlar analizi sonuçları neticesinde, malzemenin maksimum gerilmesinin elastik bölgede kalacağı tahmin edilmektedir. Parça üzerinde gözlemlenen maksimum gerilmenin elastik bölgede kalması ile malzemenin kalıcı şekil değişimine uğramayacağını açıklığa kavuşturmuştur. Böylelikle, orjinal gergi braketinin güvenli ve dayanıklı olduğu belirtilebilir.

3.3.1 Kayış Kuvveti Etkisi Altında Gerilim Sonuçları



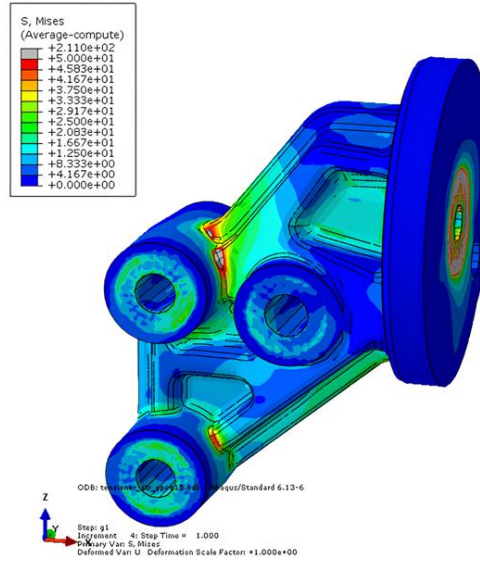
Şekil 3.12 Kayış kuvveti etkisinde Von-Mises gerilim sonuçları

3.3.2 +Z/-Z Gerilim Sonuçları



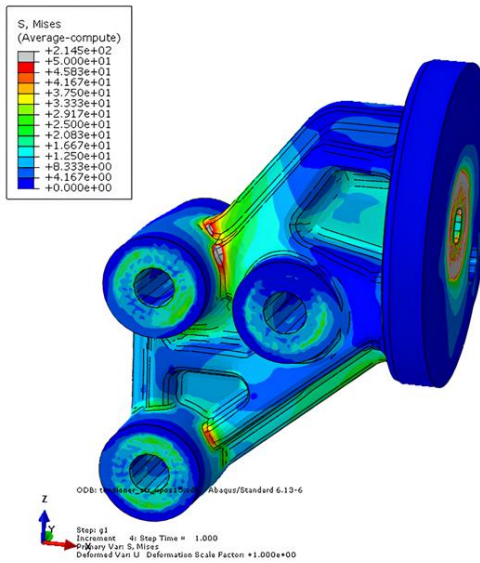
Şekil 3.13 +Z/-Z Von-Mises gerilim sonuçları

3.3.3 +Y/-Y Gerilim Sonuçları



Şekil 3.14 +Y/-Y Von-Mises gerilim sonuçları

3.3.4 +X/-X Gerilim Sonuçları



Şekil 3.15 +X/-X Von-Mises gerilim sonuçları

Orjinal gergi braketleri için gerçekleştirilen yapısal sonlu elemanlar analizi sonuçları X, Y ve Z yönlerinde yaklaşık değerler ile sonuçlanmıştır. Bu sonuç, tasarım süreci açısından olumlu bir durumdur. Yükleme koşullarının simetrik olması, parça üzerindeki gerilmelerin eşit bir şekilde dağıldığını gösterir. Eşit gerilme dağılımı, dengeli bir şekilde yük taşıma kapasitesi avantajı sunmaktadır.

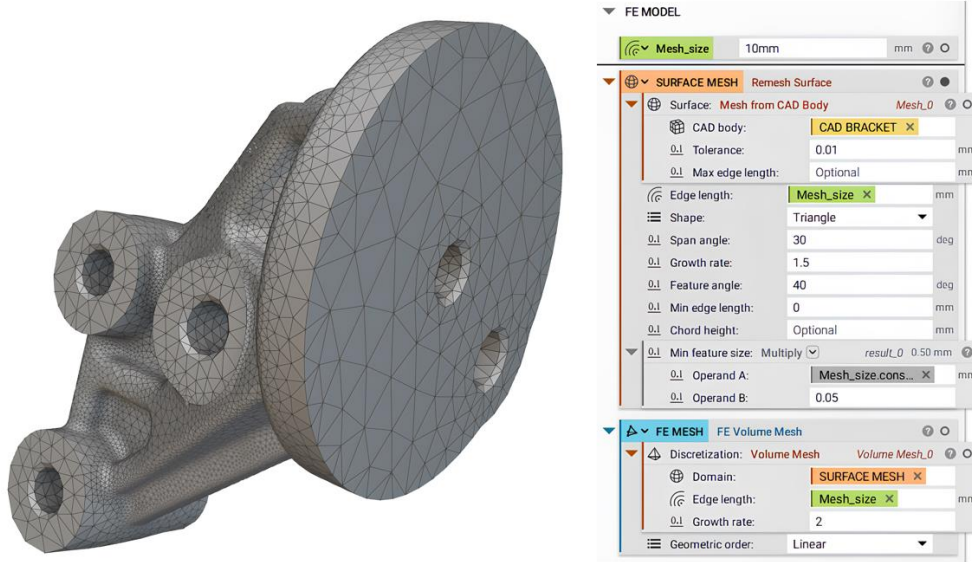
4

GERGİ BRAKETİNİN OPTİMİZE EDİLMESİ VE ÜRETİMİ

4.1 Gergi Braketine Topoloji Optimizasyonu Uygulanması

Topoloji optimizasyonu işlemleri için Ntopology programı kullanılmıştır. İlk olarak CATIA programında oluşturulan 3D model step datası şeklinde kayıt alınarak Ntopology programına aktarılmıştır. Sonrasında orjinal gergi braketine mesh atılmıştır. Mesh işlemlerinde üçgen mesh tercih edilmiştir.

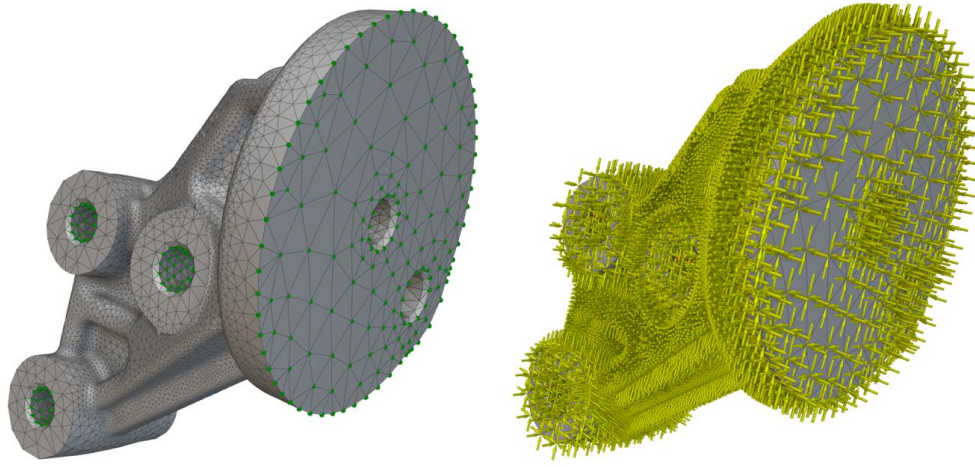
Şekil 4.1’de gergi braketine uygulanan mesh görüntüsü ve mesh parametreleri verilmiştir.



Şekil 4.1 Gergi braketi modeline mesh atılması

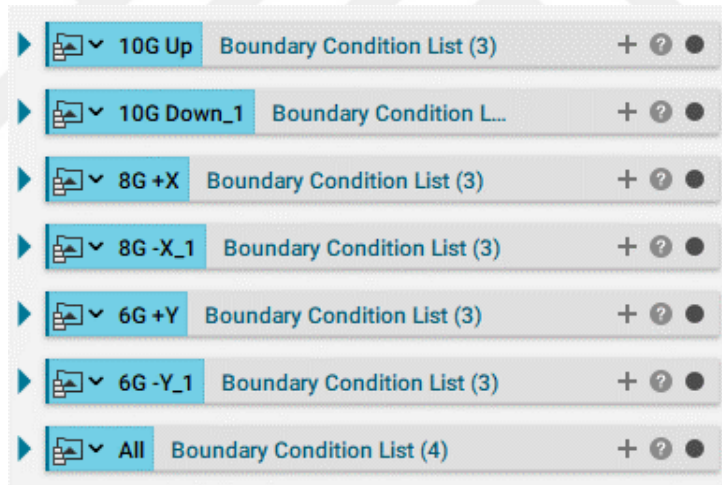
Mesh atma işlemlerinin tamamlanmasıyla parça, motor bloğu civata bağlantı bölgelerinden sabitlenmiştir. Gergi braketi, motor bloğuna üç farklı noktadan sabitlenmektedir. Parça üzerine etkiyen kuvvetlerin tanımlanması yapılarak girdi parametreleri programa işlenmiştir. Parça üzerine etkiyen birincil kuvvet olan kayış kuvvetinin yanı sıra 6G, 8G ve 10G kuvvetleri de ilave edilmiştir. Bu kuvvetler, parçanın maruz kaldığı gerilmelerin 6, 8 ve 10 katına karşılık gelmektedir. Bu işlemin temel amacı, parçanın yapısal olarak sağlamlığının çok daha güvenli bir aralıkta olduğunun kanıtlanmasıdır.

Şekil 4.2’de gergi braketinin montaj noktaları ve parça üzerine etki eden 6G, 8G ve 10G kuvvetlerinin uygulanması gösterilmiştir.



Şekil 4.2 Gergi braketine 6G, 8G ve 10G kuvvetlerinin uygulanması

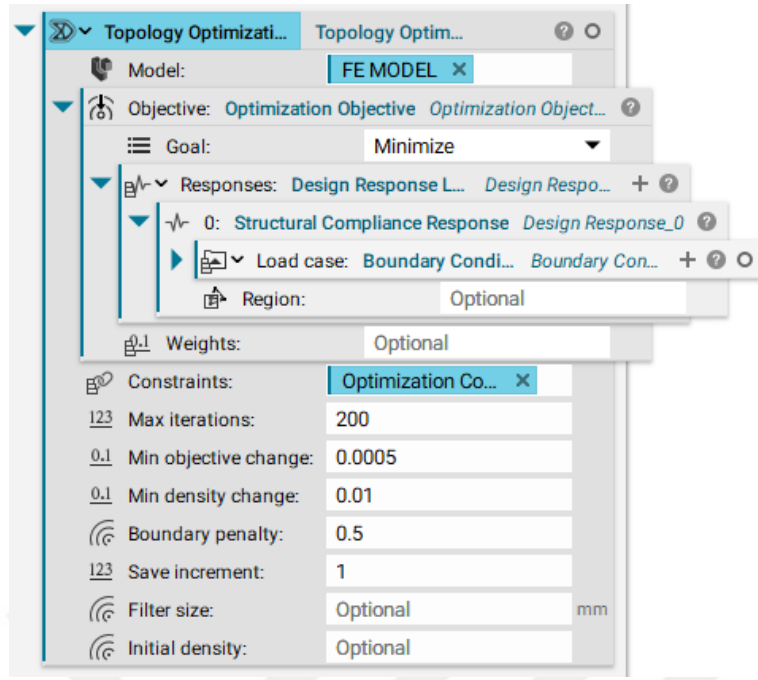
Şekil 4.3’te topoloji optimizasyonu programında 6G, 8G ve 10G kuvvetlerinin tanımlanmış hali verilmiştir.



Şekil 4.3 6G, 8G ve 10G kuvvetlerinin tanımlanması

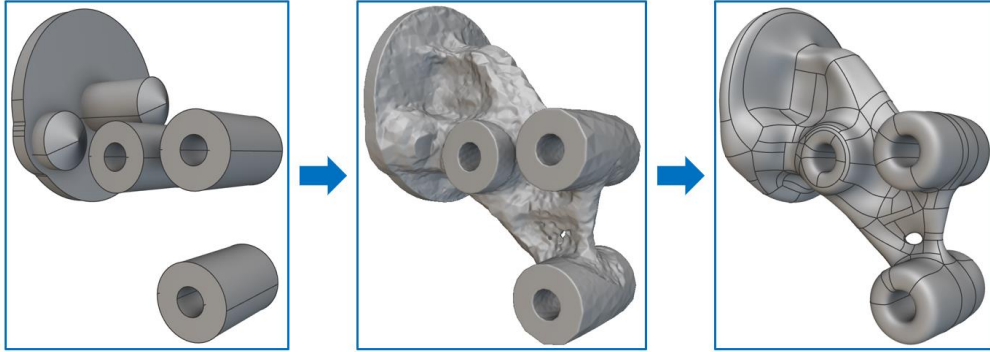
Son olarak, gergi braketini için topoloji optimizasyonu tanımlaması gerçekleştirilerek optimizasyon başlatılmıştır. Topoloji optimizasyonu uygulanmadan önce gergi braketini üzerinde malzeme çıkarılmaması istenilen bağlantı arayüzleri programa tanımlanmış olup bu bölgelerden malzeme çıkarılmamıştır.

Şekil 4.4’de topoloji optimizasyonu programında tanımlanan topoloji optimizasyonu parametreleri verilmiştir.



Şekil 4.4 Topoloji optimizasyonu işlem parametreleri

Şekil 4.5'te parçaya ait topoloji optimizasyonu işlem adımları gösterilmiştir.



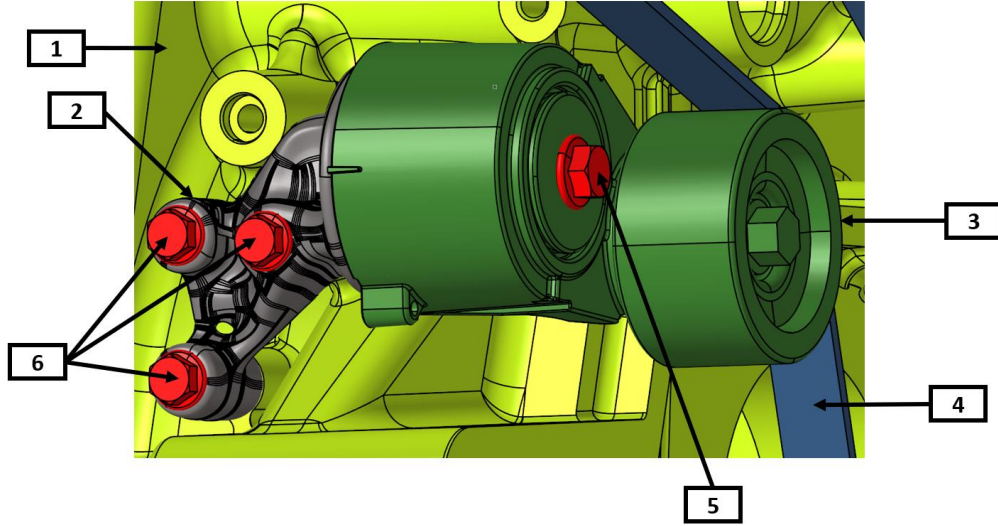
Şekil 4.5 Optimize edilmiş yeni modelin oluşturulması

4.2 Optimize Gergi Braketinin Yapısal Sonlu Elemanlar Analizi

Gergi braketinin motor bloğuna bağlandığı bölgede, motor bloğuna kısmi bir kesme uygulanmış ve braket, ilgili civatalar vasıtasıyla bloğa bağlanmıştır. Sonlu elemanlar modeli sayısal ağı düğümleri, bloktaki kesme yüzeylerinden 6 serbestlik derecesi (DOF) ile kısıtlanmıştır. Kuvvet yükleme, dinamik etkileri de kapsamı bakımından gerçekte sistem üzerinde oluşacak etkinin 1.5 katıdır. 1.5 kat büyük uygulanan kayış kuvvetleri etkisinde emniyetli olan gergi braketinin, döngüsel yükler ve titreşim gibi girdiler etkisinde güvenli kalacağı varsayılmıştır. Gergi braketini maksimum bileşke gerilmeye maruz bırakan yükleme –Y 10G yüklemesi

olup bu koşul maksimum civata ön gerilme kuvvetlerinin uygulandığı gerilme dağılımıda minimum olmak üzere bu iki sınır arasında yorulma analizi de (HCF) gerçekleştirilmiştir.

Şekil 4.6’da yapısal sonlu elemanlar analiz modelinde bulunan parçalar gösterilmiştir.



Şekil 4.6 Yapısal sonlu elemanlar analiz modeli

Tablo 4.1’de paket içerisinde bulunan parçaların malzeme tablosu verilmiştir.

Tablo 4.1 Malzeme tablosu

Parça Numarası	Parça İsmi	Malzeme
1	Blok	Dökme Demir
2	Optimize Gergi Braketi	17-4PH Paslanmaz Çelik
3	Gergi	Alüminyum
4	Kayış	EPDM
5	Civata (M10)	Çelik
6	Civata (M8)	Çelik

Tablo 4.2’de 17-4PH paslanmaz çelik malzemesine ait mekanik özellikler verilmiştir [49], [50].

Tablo 4.2 17-4PH paslanmaz çelik malzeme özellikleri [49], [50]

Malzeme Özellikleri	
Malzeme	17-4PH Paslanmaz Çelik
Çekme Dayanımı	886 MPa
Akma Dayanımı	860.6 MPa
Elastik Modülü	171-177 GPa
Yoğunluk	7.79 g/cm ³

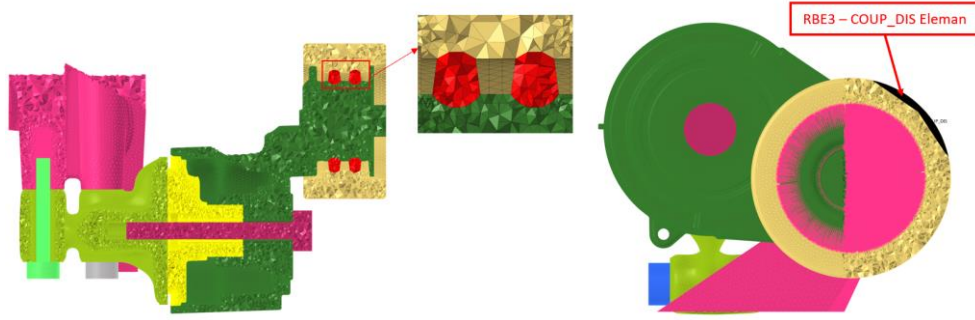
Tablo 4.3’te 17-4PH paslanmaz çelik kimyasal kompozisyon değerleri verilmiştir [49].

Tablo 4.3 17-4PH kimyasal kompozisyon değerleri [49]

17-4PH Kimyasal Kompozisyon (%)									
	Cr	Ni	Cu	Si	Mn	C	P	S	Nb+Ta
Min	15	3	3	-	-	-	-	-	0.15
Max	17.5	5	5	1	1	0.07	0.040	0.030	0.45

Gergi kasnağına gelen kayış kuvvetinin belirtilen yönde ve kayış temas alanından daimi etkimesi için, ilgili temas alanına atanmış bir RBE3 (Rigid Body Element Type 3) eleman kullanılmıştır. RBE3 eleman, parça üzerine etkiyen yüklerin parça yüzeyine düzgün bir yük aktarımı sağlaması için tercih edilmektedir. Bu elemanın merkez düğümüne ilgili kayış kuvvet bileşenleri etki ettirilmiştir.

Şekil 4.7’de modelin sayısal ağ detayı gösterilmiştir.



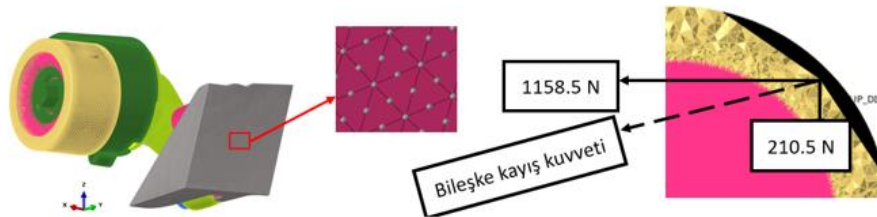
Şekil 4.7 Model sayısal ağ detayı

Tablo 4.4’de sayısal ağ istatistikleri verilmiştir.

Tablo 4.4 Sayısal ağ istatistikleri

Elemanlar				Düğümmler
3D Elemanlar		2D Elemanlar	Toplam	Toplam
TETRA (C3D4)	TETRA10 (C3D10M)	TRIA3 (S3)		
0	6722497	0	6722497	9728005

Motor bloğu, yeterli uzaklıktan kesilerek kesme yüzeylerinde bulunan düğümlere 6 serbestlik derecesinde sabitleme sınır koşulu uygulanmıştır. Gergi kasnağının, yatakları olduğu yerde dönmemesi ve kayıktan gelen gergi kuvvetinin daimi sabit yönde uygulanabilmesi için dönmemesi sağlanmıştır. Bu amaçla kasnak içine atılan bir RBE2 (Rigid Body Element Type 2) elemanın merkez düğümüne dönme eksenini temsil eden yönde dönme kısıtlaması konulmuştur. Bunun nedeni gergi kasnağı ile gergi braket gövdesi arasında iletimin rulmanla yapılıyor olmasıdır. RBE2 eleman, rijit bağlantıların olduğu durumlarda tercih edilmektedir.



Şekil 4.8 Kuvvet girdileri

Tablo 4.5'te analiz yükleme adımlarını içeren tablo verilmiştir.

Tablo 4.5 Analiz yükleme adımları

Adım	Tanım	Şiddet			
		M10 Civata	M8 Civata	Gergi Kasnağı RBE3 Eleman Merkez Düğümü	Tüm Model
1	Civata Kaynaklı Ön Gerilme	33698 N	14860 N	-	
2	Civata Sabitleme	-	-	-	
3	Kayış Yüklerinin Uygulanması	-	-	1158.51 N (Yatay) 210.53 N (Düşey)	
4	Ağırlık Uygulanması				1G İvme (Ağırlık -Z Yönü)
5,6,7,8,9,10	Her Eksen Yönünde 10 G İvme Uygulanması				± (X, Y, Z) 10G İvme

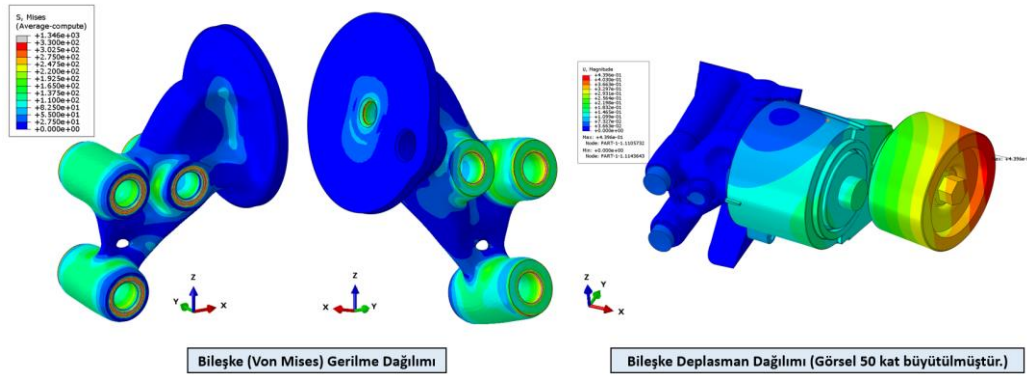
Optimize edilmiş gergi braketleri için 8 farklı yapısal sonlu elemanlar analizi çıktısı alınmıştır. Bu analiz çalışmaları sırasıyla kayış yükünün uygulanması, ağırlık (-Z Yönü 1G) uygulaması, +X 10G uygulaması, -X 10G uygulaması, +Y 10G uygulaması, -Y 10G uygulaması, +Z 10G uygulaması ve -Z 10G uygulaması şeklinde tamamlanmıştır. Elde edilen sonuçlarda maksimum gerilmenin yaklaşık 192 MPa olduğu tespit edilmiştir. Optimize gergi braketleri malzemesi olan 17-4PH paslanmaz çeliğin akma dayanımı yaklaşık olarak 860.6 MPa değerindedir. Yapısal sonlu elemanlar analizi sonucunda elde edilen maksimum gerilme değeri ile 17-4PH paslanmaz çelik akma dayanımı karşılaştırıldığında, parçanın güvenli bir şekilde çalışacağı sonucuna varılmıştır.

Güvenlik faktörü, parça üzerinde tespit edilen en yüksek gerilme ve parça malzemesinin dayanabileceği maksimum yük arasındaki oranı temsil etmektedir. Elde edilen sonuçlar neticesinde güvenlik faktörü yaklaşık olarak 4.48 olarak

hesaplanmıştır. Mühendislik uygulamalarında çoğunlukla parçaların güvenlik faktörü 1.5-3 arasında olması beklenmektedir. Optimize gergi braketinin sahip olduğu 4.48 güvenlik faktörü, beklenen değer aralığının fazlasıyla üzerindedir. Hesaplanan güvenlik faktörüyle, gergi braketinin aşırı yüklemeler karşısında oldukça dayanıklı olacağı öngörülmektedir. Bu durum, parça tasarımının da güvenilirliğini ispatlamaktadır. Böylelikle, parça belirlenen sınır koşullarında güvenli bir şekilde kullanılabilir.

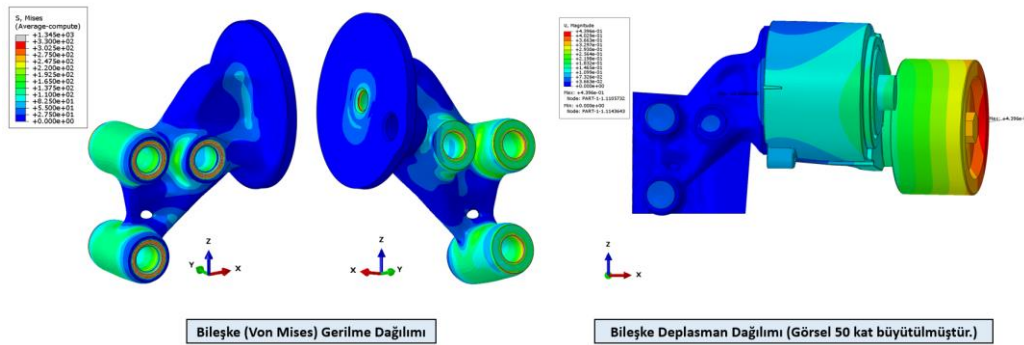
Optimize edilmiş gergi braketinin yapısal sonlu elemanlar analiz sonuçları Şekil 4.9, Şekil 4.10, Şekil 4.11, Şekil 4.12, Şekil 4.13, Şekil 4.14, Şekil 4.15 ve Şekil 4.16’da verilmiştir.

4.2.1 Kayış Yüklerinin Uygulanması



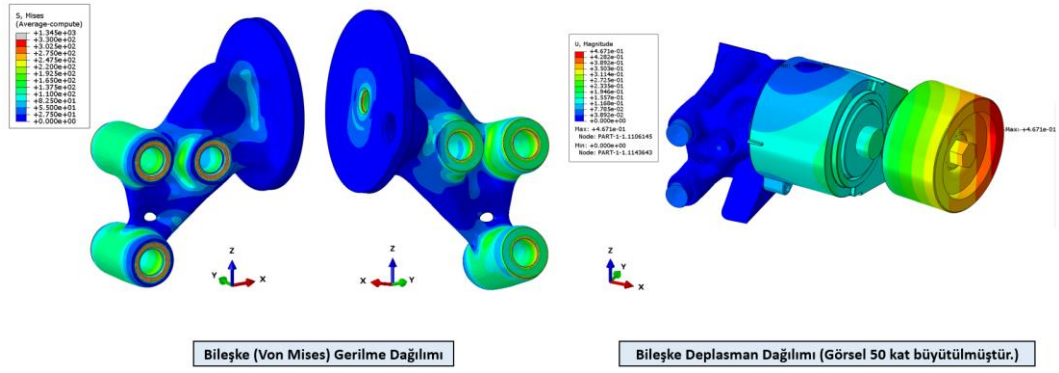
Şekil 4.9 Kayış yükleri analiz sonucu

4.2.2 Ağırlık (-Z Yönü 1G) Uygulanması

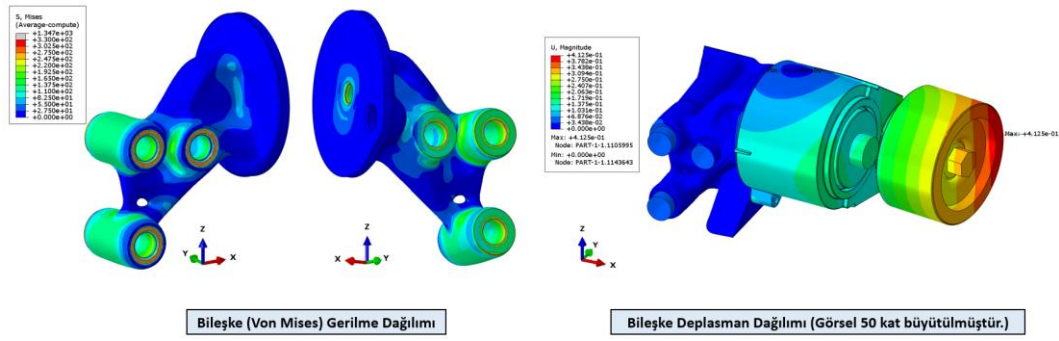


Şekil 4.10 Ağırlık (-Z yönü 1G) analiz sonucu

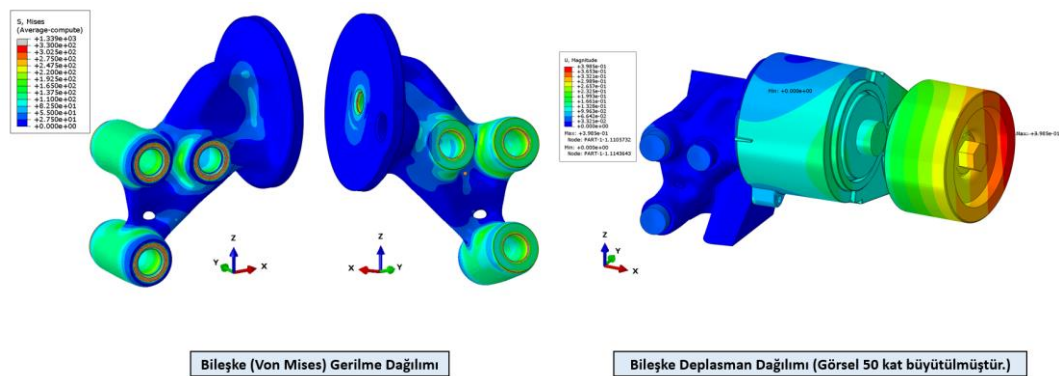
4.2.3 +X 10G Uygulaması



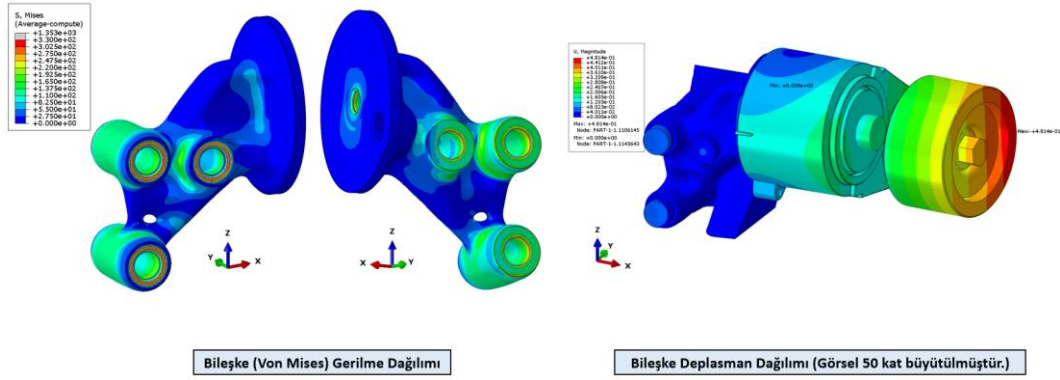
4.2.4 -X 10G Uygulaması



4.2.5 +Y 10G Uygulaması

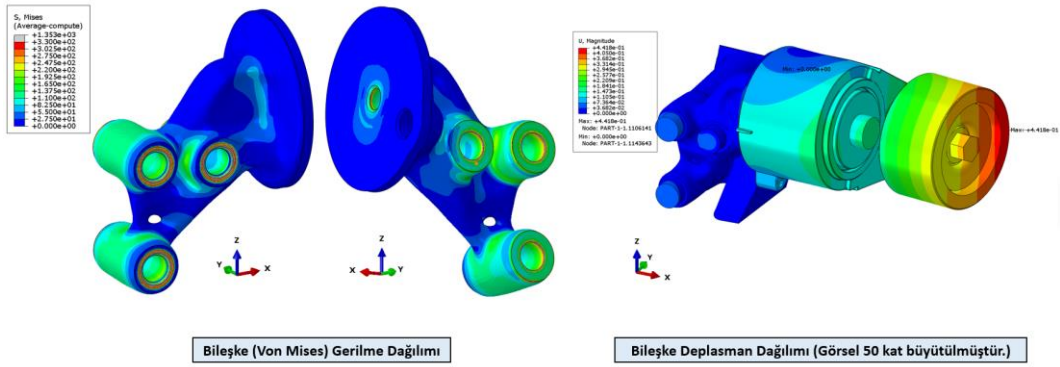


4.2.6 -Y 10G Uygulaması



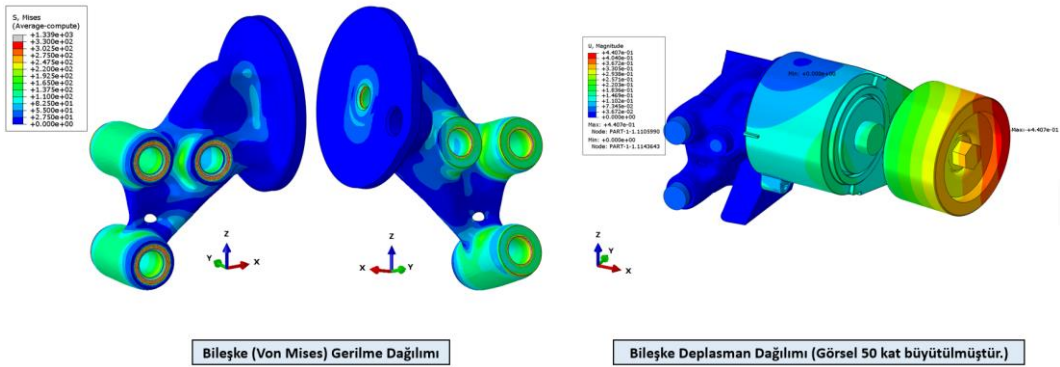
Şekil 4.14 -Y 10G analiz sonucu

4.2.7 +Z 10G Uygulaması



Şekil 4.15 +Z 10G analiz sonucu

4.2.8 -Z 10 G Uygulaması



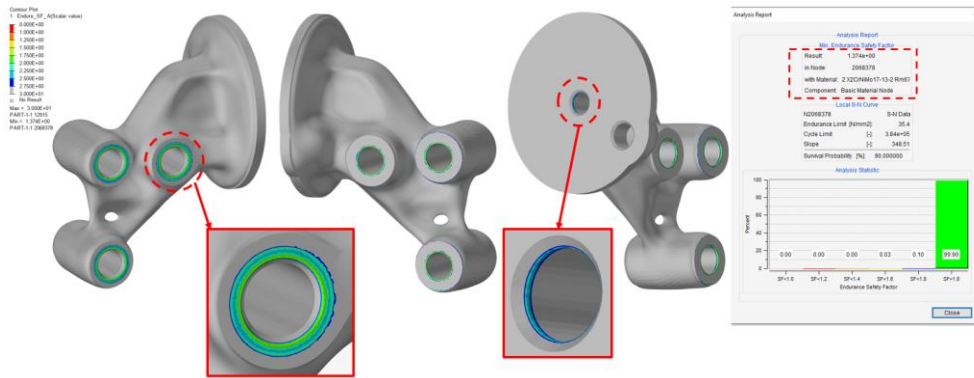
Şekil 4.16 -Z 10G analiz sonucu

4.3 Optimize Gergi Braketi Yorulma Analizi

Yorulma analizi, mekanik parçaların dayanımının ve parça performansının değerlendirildiği bir analiz yöntemidir. Yorulma analizi gerçekleştirilerek, analiz edilecek parçaların tekrarlı yükler altında nasıl performans sergileyeceğine ve uzun vadede ne kadar dayanabileceği üretim öncesi değerlendirilebilmektedir. Yorulma analizi, mekanik tasarım süreçleri için çok önemli bir değerlendirme aşaması olup tasarımcıların analiz sonuçlarına göre tasarım değişikliği yapmasına imkan tanımaktadır.

Optimize gergi braketini için yorulma analizi gerçekleştirilmiştir. Yorulma analizi sonucunda gergi braketini üzerinde alınan minimum değer 1.37 olarak hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar, parçanın uygulanan yükler altında ne kadarının kullanıldığını ifade etmektedir. 1.37 değeri, optimize gergi braketinin beklenen ömrünün analiz içerisinde uygulanan yükler altında tahmini değerinin 1.37 katı kadar olduğunu ifade eder. Ek olarak, optimize gergi braketinin uygulanan yükler altında güvenlik seviyesi içerisinde olduğunu belirtir.

Şekil 4.17’de optimize gergi braketini için yorulma analizi sonucu verilmiştir.



Şekil 4.17 Optimize gergi braketini yorulma analizi sonucu

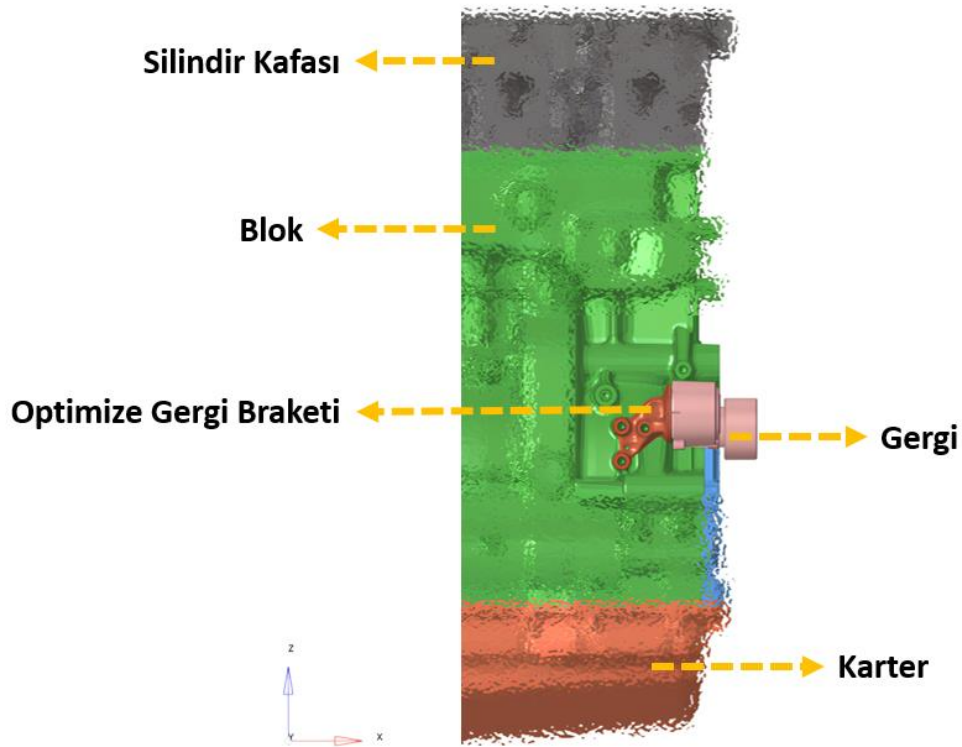
4.4 Optimize Gergi Braketini Modal Analizi

Modal analiz, üretim aşaması öncesi tasarımı tamamlanan parçaların titreşim özelliklerinin görülmesine olanak sağlayan bir analiz metodudur. Modal analiz çalışmalarında analiz edilecek parça veya sistemlerin serbest titreşim modları değerlendirilir. Değerlendirme sonrası, serbest titreşim modlarına karşılık gelen doğal frekansların saptanması hedeflenir. Özetle, analiz edilen parça veya sistemin hangi frekans aralığında titreşime maruz kalabileceği ve maruz kalınan titreşimlere

nasıl reaksiyon verebileceği belirlenir. Modal analiz, mühendislik uygulamalarında sıklıkla tercih edilen bir analiz yöntemidir. Parçaların veya sistemlerin dinamik davranışlarının anlaşılması için önemli bir adımdır. Tasarım optimizasyon sürecinin verimliliği, parça performansının artırılması ve sistemin meydana getirebileceği gürültü problemlerinin minimize edilmesi açısından ayrı bir önemi de bulunmaktadır. Sahip olduğu bu avantajlar sayesinde mühendislik projelerinin daha verimli ve başarılı olması için kritik öneme sahiptir.

Optimize gergi braketinin bulunduğu FEAD sistemi içerisindeki titreşim özelliklerinin belirlenmesi amacıyla modal analiz çalışması gerçekleştirilmiştir. Yapısal sonlu elemanlar analizinde belirlenen sınır koşulları bu analiz çalışmasında da benzer şekilde ele alınmıştır. Modal analiz çalışması modeli içerisinde silindir kafası, motor bloğu, karter, gergi ve optimize gergi braketleri bulunmaktadır.

Şekil 4.18’de modal analiz modeli verilmiştir.



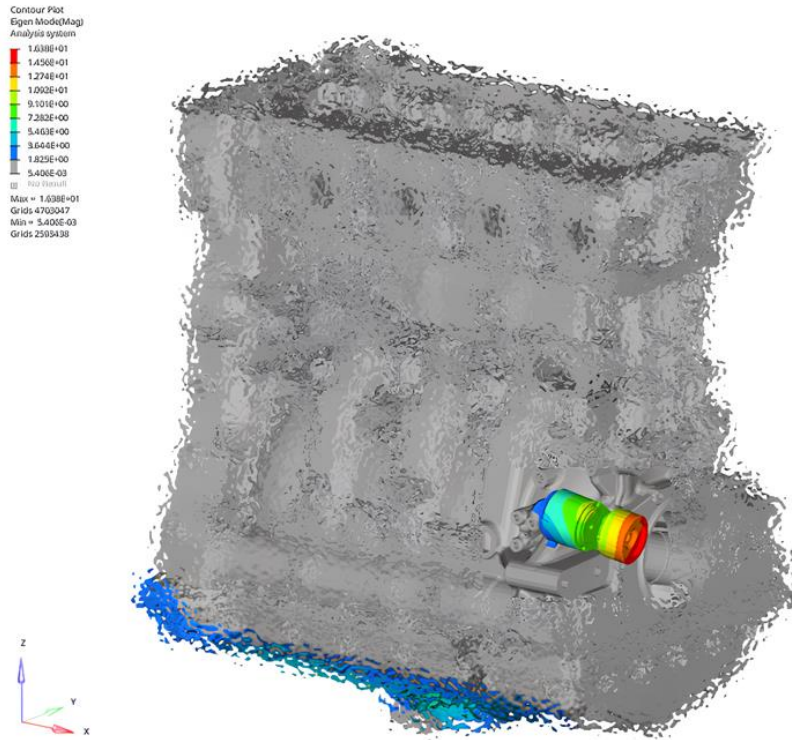
Şekil 4.18 Modal analiz modeli

Modal analiz çalışması 0-700 Hz aralığında gerçekleştirilmiştir. Motorun çalışma frekansı yaklaşık 105 Hz olup belirlenen çalışma frekans aralığı oldukça yeterlidir. Modal analiz çalışması iki bölüm içerisinde tamamlanmıştır. İlk bölüm gergi için

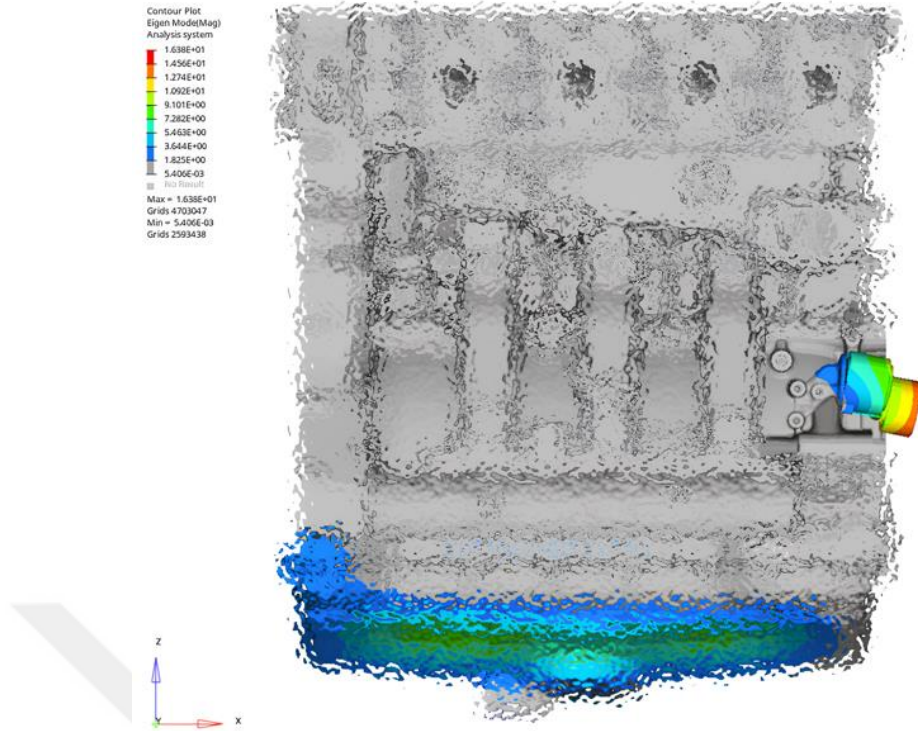
ikinci bölüm ise gergi ve gergi braketinin montajlı durumu için gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde gerginin 273.8 Hz değerinde çalıştığı gözlemlenmiştir. Gergi ve gergi braketinin montajlı durumda iken 633.4 Hz değerinde çalıştığı sonucu elde edilmiştir.

Motorun çalışma frekansı 105 Hz iken optimize gergi braketinin doğal frekansının 633.4 Hz olması, optimize gergi braketinin motorun çalışmış olduğu frekans aralığında rezonansa girme durumunun olmadığını ifade etmektedir. Özetle, optimize gergi braketinin motorun çalışması sırasında rezonansa girmeyecektir. Motor çalışma frekansı ile optimize gergi braketinin arasındaki büyük farktan dolayı optimize gergi braketinin yüksek mod frekansları ve farklı dinamik yükler altında bile rezonansa girmeden çalışabileceği öngörülmektedir. Sonuç olarak, optimize gergi braketinin titreşim, gürültü, frekans ve güvenilirlik faktörleri açısından olumlu değerlendirilmiştir.

Şekil 4.19 ve Şekil 4.20’de gergiye ait modal analiz sonuçları verilmiştir.

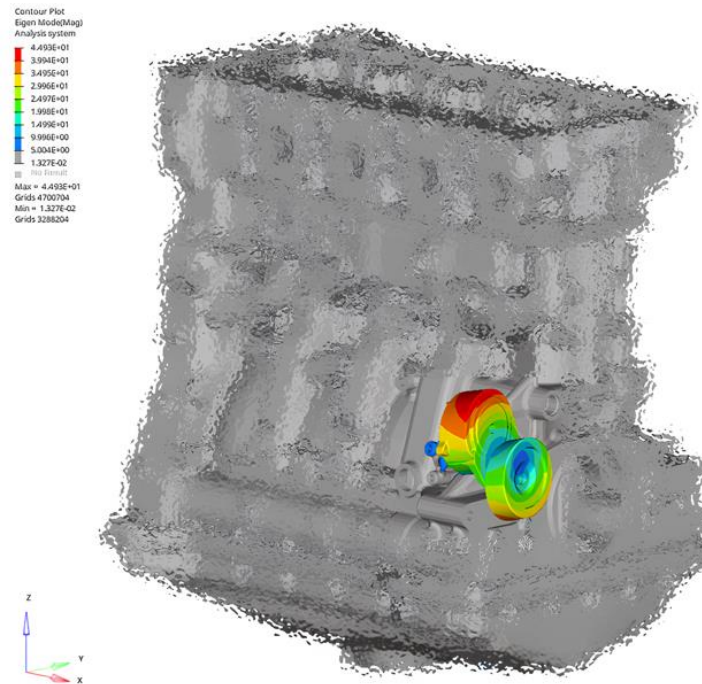


Şekil 4.19 Gergi modal analiz sonucu (izometrik görünüş)

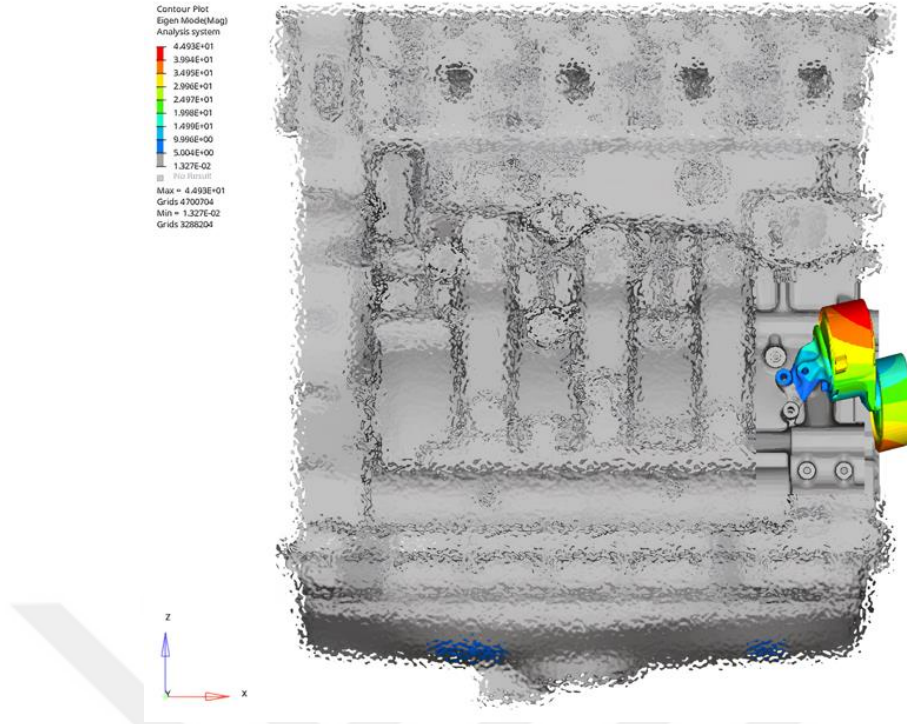


Şekil 4.20 Gergi modal analiz sonucu (yan görünüş)

Şekil 4.21 ve Şekil 4.22’de gergi ve optimize gergi braketinin montajlı haline ait modal analiz sonuçları verilmiştir.



Şekil 4.21 Gergi ve gergi braketi modal analiz sonucu (izometrik görünüş)



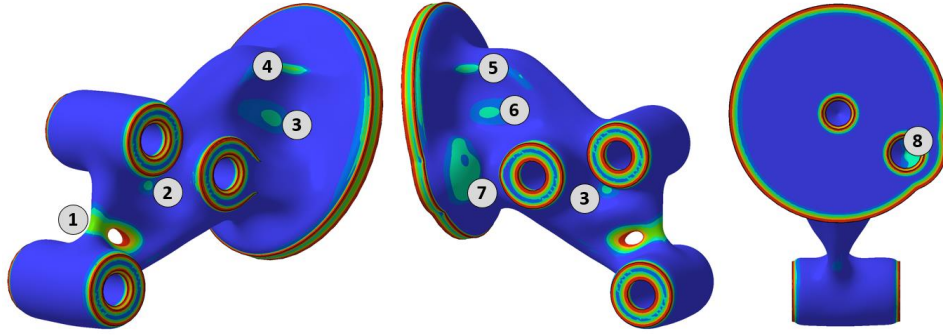
Şekil 4.22 Gergi ve gergi braketini modal analiz sonucu (yan görünüş)

4.5 Optimize Gergi Braketinin Et Kalınlığı Analizi

Et kalınlığı analizi, üretim aşamasına geçmeden önce parça üzerinde gerçekleştirilmesi gereken bir aşamadır. Parçaların farklı bölgelerindeki malzeme kalınlığı detaylı bir şekilde incelenir. Et kalınlığı analizinin temel amacı, parçanın mukavemeti ve performansı üzerinde hayati öneme sahip olmasıdır. Parça et kalınlığının eksik olması, parça üzerinde yük uygulanan bölgelerin dayanımının azalmasına ve parçanın kullanım aşamasında fonksiyonellik kaybına yol açabilir. Ek olarak, et kalınlığı analizi malzeme tasarrufu ve parçanın ağırlık optimizasyonu açısından ayrı bir öneme sahiptir. Et kalınlığı analizi sayesinde parça üzerindeki gereksiz malzeme atılır. Böylelikle, parça ağırlığının azaltılması ile birim parça maliyetleri düşürülmüş olur.

Döküm ve eklemeli imalat yöntemleri açısından değerlendirildiğinde, parçaların üretimi ve üretim sonrası ihtiyaç duyulabilecek ardıl işlemlere pratiklik sağlayabilmektedir. Bu sebeple, et kalınlığı analizi parça tasarımı, üretim ve ardıl işlemler için kritik bir aşamadır.

Optimize gergi braketine et kalınlığı analizi yapılmış olup elde edilen veriler Şekil 4.23 ve Tablo 4.6’da verilmiştir.



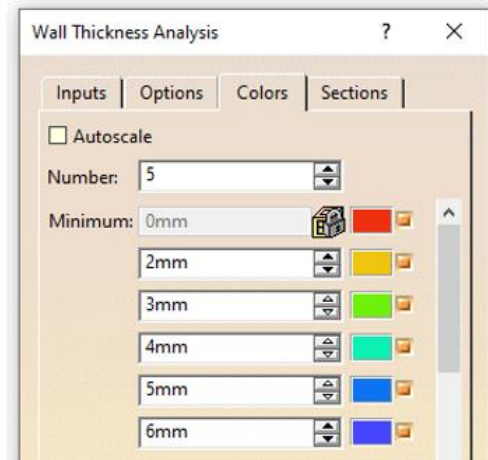
Şekil 4.23 Gerçi braketini et kalınlığı analizi

Gerçekleştirilen et kalınlığı analizi sonuçlarına göre parça üzerindeki minimum et kalınlığı 3.186 mm olarak saptanmıştır. İlgili bölge yapısal sonlu elemanlar analizi sonucunda dayanım açısından iyi bir sonuç vermiştir. Elde edilen bu sonuçlara göre, et kalınlığının parça dayanımı açısından kritik olmayan bölgelerde minimum olması, parça dayanımı açısından kritik bölgelerde ise maksimum olması topoloji optimizasyonu çalışmasının doğru uygulandığının bir göstergesidir.

Tablo 4.6 Et kalınlığı analiz sonuçları

Et Kalınlığı Analizi								
Numara	1	2	3	4	5	6	7	8
Et Kalınlığı	3.186	4.709	4.752	3.661	4.086	4.821	4.155	4.796

Şekil 4.24’de et kalınlığı analizi için belirlenen renk skalası verilmiştir.



Şekil 4.24 Et kalınlığı analizi renk skalası

4.6 Optimize Gergi Braketinin Üretimi

Optimize gergi braketi lazer toz yatak füzyonu (LTYF) ile üretilmiştir. LTYF, metal toz partiküllerinin lazer kullanılarak ergitilip sonrasında katman katman birleştirme prensibine dayalı bir eklemeli imalat yöntemidir. Parça malzemesi olarak 17-4PH paslanmaz çelik malzemesi tercih edilmiştir. 17-4PH, parçanın kullanılıcağı FEAD sisteminin sınır koşullarına entegre edilebilecek, mekanik özellikleri yüksek ve korozyon direnci iyi bir malzemedir. Ek olarak, üretim öncesi modelde civata ve pim bağlantı bölgelerine 1 mm offset verilmiştir. Bu bölgeler parça üretildikten sonra CNC işleme yöntemi ile alınmıştır. Parçaya ait üretim parametreleri Tablo 4.7’de verilmiştir.

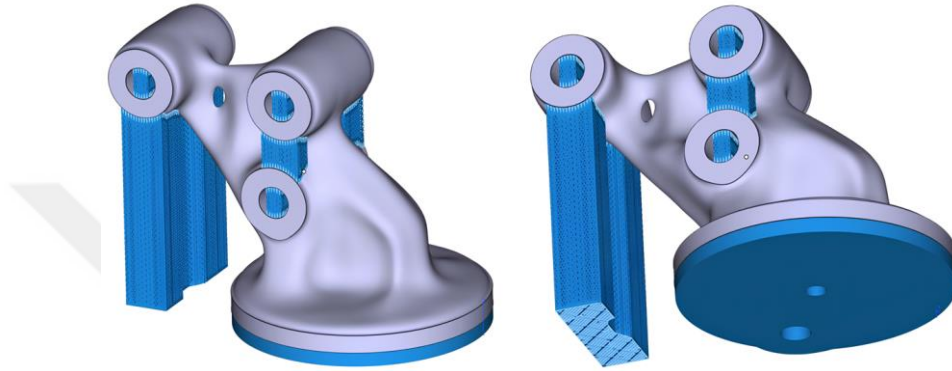
Tablo 4.7 Optimize gergi braketi üretim parametreleri

Üretim Parametreleri	
Malzeme	17-4PH Paslanmaz Çelik
Üretim Yöntemi	LTYF
Cihaz	EOS M 290
Katman Kalınlığı	40 µm
Parça Hacmi	102176 mm ³
Destek Yapı Hacmi	20000 mm ³
Destek Yapı Temizleme	Manuel
Ardıl İşlemler	Taşıma, Kumlama, CNC İşleme

Üretimi tamamlanan optimize gergi braketinin hacmi 102176 mm³ olup parça üretiminde kullanılan destek yapıların hacmi ise 20000 mm³ şeklindedir. Destek yapıların temel görevi, üretim esnasında parçanın sabit ve daha stabil kalmasına olanak sağlamasıdır. Böylelikle, üretim hassasiyeti çok daha iyi boyutlara ulaşmaktadır.

Optimize gergi braketine ait destek yapılar manuel olarak temizlenmiştir. Hassas ve kritik parçaların destek yapılarının temizlenmesinde manuel temizleme daha güvenilir bir yöntemdir. Destek yapıların temizlenme işlemi deneyimli bir operatör tarafından gerçekleştirilmiştir. Böylelikle, parçaya herhangi bir hasar vermeden destek yapılar sorunsuz bir şekilde temizlenmiştir.

Şekil 4.25'te parçanın üretim sırasında makinede nasıl konumlanacağı ve destek yapıların hangi bölgelere atılacağı şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 4.25 Üretim öncesi destek yapı ve baskı hazırlığı aşaması

Üretimi tamamlanan optimize gergi braketinin makineden çıkarılmadan son hali Şekil 4.26'da verilmiştir.



Şekil 4.26 Optimize gergi braketinin üretimi

Üretim sonrası parçaya birtakım ardıl işlemler uygulanmıştır. Uygulanan işlemler sırasıyla taşlama, kumlama ve CNC işleme şeklindedir.

- **Taşlama:** Taşlama prosesinin temel amacı, üretimi tamamlanan parçanın yüzey pürüzlülüğünü azaltarak yüzey özelliklerini iyileştirmektir.

- **Kumlama:** Taşalama işlemi tamamlandıktan sonra parçanın yüzey kalitesinin daha homojen bir duruma getirilmesi için kumlama prosesi uygulanmıştır. Kumlama prosesinde parçanın yüzeyinde oluşan minik pürüzler ortadan kaldırılarak parça yüzeyi daha iyi hale getirilmiştir.
- **CNC İşleme:** Parça civata bağlantı bölgeleri ve pim deliğinde 1 mm offset verilerek üretilmiştir. İlgili bölgeler CNC işleme yöntemi ile alınmıştır. Bu prosesin temel amacı, parça için oldukça kritik bağlantı bölgelerinin boyutsal hassasiyetini çok daha iyi duruma getirmesidir. Bu proses ile optimize gergi braketini son şeklini almıştır.

Şekil 4.27’de optimize gergi braketinin son görüntüsü verilmiştir.



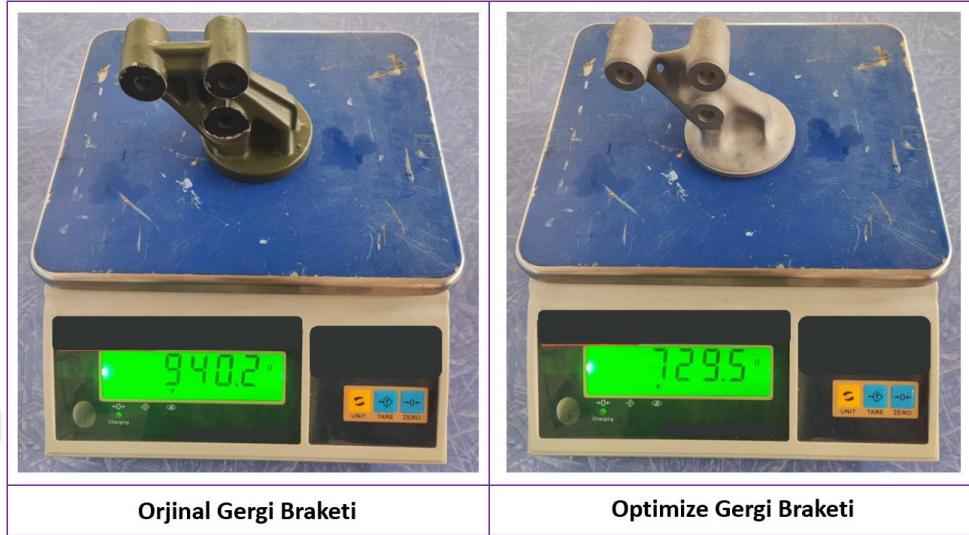
Şekil 4.27 Ardıl işlemleri tamamlanan optimize gergi braketini

Üretimi tamamlanan optimize gergi braketini ve orjinal gergi braketini ağırlıkları hassas terazide ölçülmüştür. Orjinal gergi braketini ağırlığı 940.2 gr olarak ölçülmüştür. Boyasız ağırlığı ise yaklaşık 924 gr’dır. Optimize gergi braketini ağırlığı ise 729.5 gr olarak ölçülmüştür. Boyasız ağırlıklar dikkate alındığında, parça ağırlığı bağlantı arayüzleri korunarak yaklaşık %21 oranında azaltılmıştır.

Parçaların ağırlıklarının azaltılması içten yanmalı motorlarda son derece kritik bir işlemdir. Parçaların ağırlığının azaltılması ile motorun taşımış olduğu toplam kütle düşürülmüş olur. Bu durum, motor yakıt tüketimini azaltıp enerji verimliliğini

artırmaktadır. Ayrıca, malzeme sarfiyatının azaltılması üretim maliyetlerinin iyileştirilmesine ve çevresel sürdürülebilirliğe katkı sunmaktadır.

Şekil 4.28’de braketlerin hassas terazide ölçüm sonuçları verilmiştir.



Şekil 4.28 Orjinal gergi braketinin ve optimize gergi braketinin ağırlık karşılaştırması

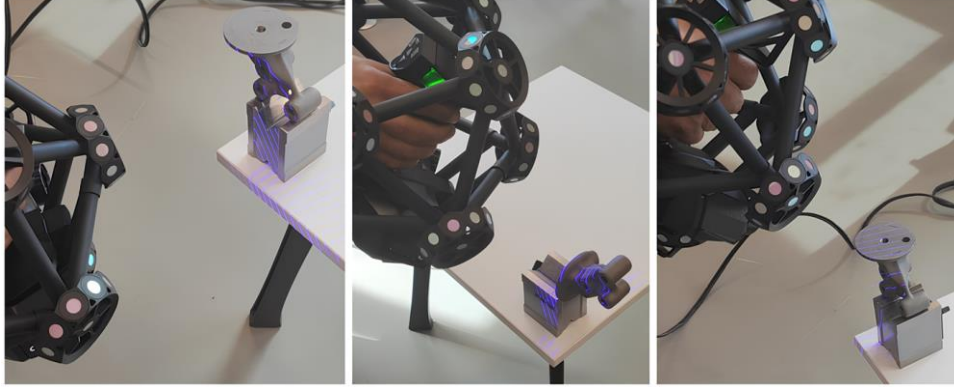
4.6.1 Optimize Gergi Braketi Geometrik Ölçüm Analizi

Geometrik ölçüm analizi, endüstride GOM (Geometrical Optical Metrology) analizi olarak da bilinmektedir. Bu teknoloji, parçaların geometrik boyut hassasiyetlerini ölçmek için kullanılmaktadır. GOM ölçümü yapılacak parçanın her açıdan taraması yapılır. Bu işlem vasıtasıyla, parçanın görüntüsü ve yüzey kalitesi hakkında bilgi sahibi olunur. Analiz sırasında ışık ve kameralar kullanılmaktadır. Böylece, parçanın dijital ortamda 3D modeli elde edilmiş olur [51], [52].

GOM ölçümüne başlamadan ön hazırlık aşamasında, optimize gergi braketinin platforma sabitlenmiştir. Bu işlemin temel amacı, tarama sırasında parçanın hareket etmediğinden emin olunmasıdır. Sonrasında, tarayıcı kullanılarak ışık desenleri parça üzerine yansıtılır. Kamera sistemi yardımıyla parça üzerine yansıtılan desenler, parça yüzeyinde bozulma durumlarını tespit ederek ilgili verileri toplamıştır. Tarama sırasında parça yüzeylerinin detaylı bir çıktısının alınabilmesi için parça farklı açılardan taranmıştır. Toplanan tüm bu veriler sayesinde optimize gergi braketinin 3D modeli elde edilmiştir. Elde edilen 3D model ve parçanın orjinal 3D modeli karşılaştırılmıştır. Böylelikle, optimize gergi braketinin geometrik boyutlarının doğruluğu test edilmiştir. GOM ölçümü sayesinde yüksek hassasiyetli

bir ölçüm gerçekleştirilmiştir. Bu sayede, tasarım ve üretim süreçlerinde oluşabilecek potansiyel hata modları değerlendirilebilmiştir.

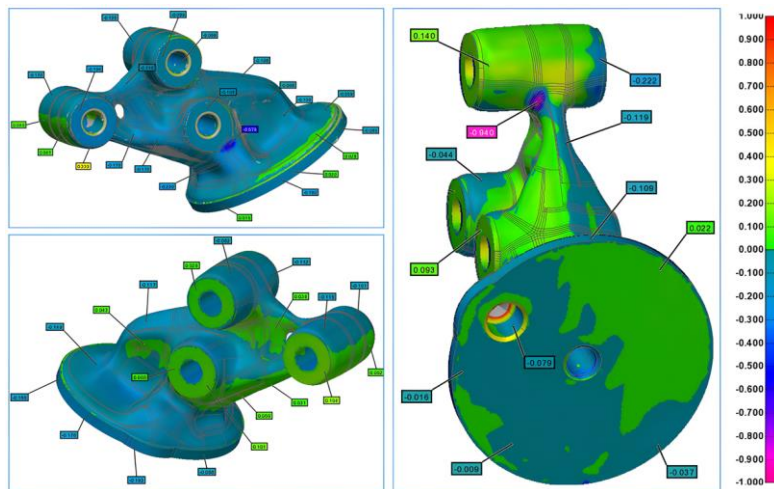
Şekil 4.29’da optimize gergi braketini GOM ölçüm görselleri verilmiştir.



Şekil 4.29 Optimize gergi braketini GOM ölçümü

GOM ölçüm sonuçları incelendiğinde, optimize gergi braketini yüzeyinde iki farklı bölgede maksimum 0.5 mm ve 0.9 mm sapmalar tespit edilmiştir. Bu sapmalar, parçanın fonksiyonelliğine ve montajlanabilirliğine herhangi bir engel teşkil etmemektedir. Ayrıca, yapısal sonlu elemanlar analizinde bu iki bölgenin oldukça güvenilir olduğu gözlemlenmiştir. Belirlenen tolerans aralığı içinde kalınması durumunda bu tarz minör sapmalar göz ardı edilebilmektedir. Elde etmiş olduğumuz iki sapma değeri belirlemiş olduğumuz tolerans limitleri içerisinde olup parça fonksiyonelliği için herhangi bir sorun teşkil etmeyecektir.

Şekil 4.30’da optimize gergi braketini GOM ölçüm sonuçları verilmiştir.



Şekil 4.30 Optimize gergi braketini GOM ölçüm sonuçları

4.7 Optimize Gergi Braketinin Montajı ve Test Edilmesi

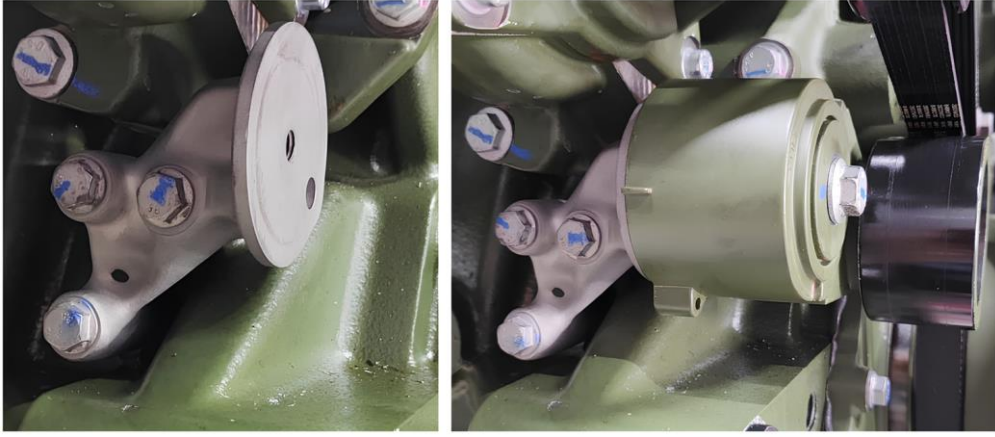
Bu bölüm içerisinde optimize gergi braketinin montaj adımlarının ve test aşamalarının detaylı açıklaması yapılmıştır.

4.7.1 Optimize Gergi Braketinin Montajı

Optimize gergi braketi, üretim sonrası destek yapıların temizliği ve bağlantı arayüzlerinin işlenmesi ile montaja hazır hale getirilmiştir. Montaj işlemleri öncesi FEAD sistemi parçaları detaylı bir şekilde incelenmiş olup gerekli güvenlik önlemleri alınarak montaj prosesine geçilmiştir.

İlk olarak, konvansiyonel imalat yöntemi ile üretilen orjinal gergi braketi motor üzerinden sökülmüştür. Optimize gergi braketinin bağlanacağı motor bloğu bağlantı arayüzleri temizlenmiştir. Böylelikle, bağlantı arayüzlerindeki kirlilik, çapak vb. durumlar ortadan kaldırılmıştır. Optimize gergi braketi motor bloğuna üç farklı bağlantı noktasından civata yardımıyla konumlandırılmıştır. Optimize gergi braketinin doğru konumlandırılmasından emin olunduktan sonra civatalar tork anahtarı vasıtasıyla montaj öncesi belirlenen tork değerlerine uygun bir şekilde sıkılmıştır. Civataların uygun tork değerlerine sıkılması oldukça kritik bir prosestir. Bunun temel sebebi, montajı yapılacak parçanın bulunduğu konuma sabitlenmesi ve civataların gevşeme riskini ortadan kaldırmaktır. Sonrasında, gergi ve optimize gergi braketi birbirlerine civata ile tek bir noktadan montajlanmıştır. Gergi ve optimize gergi braketinin birbirlerine montajı sırasında ilk olarak optimize gergi braketinde bulunan pim deliği aracılığıyla gerginin konumlandırılmasına kolaylık sağlanmıştır. Konumlama işleminin ardından civata ile sıkılarak montaj işlemine devam edilmiştir. Civata, tork anahtarı ile montaj öncesi belirlenen tork değerine sıkılarak civatanın gevşeme riski engellenmiştir. Optimize gergi braketi ve gerginin montaj işlemi tamamlandıktan sonra, kayış FEAD sistemine dikkatli ve özenli bir şekilde takılmıştır. Son olarak FEAD sistemi içerisinde bulunan kayışın gerginlik kontrolü yapılarak montaj tamamlanmıştır. FEAD sisteminin montaj noktaları tekrar kontrol edilmiş olup herhangi bir hata ve eksiklik olmadığı teyit edilmiştir. Sonuç olarak, optimize gergi braketi motora sorunsuz bir şekilde montajlanmıştır.

Şekil 4.31’de optimize gergi braketinin montaj adımlarını içeren görselleri verilmiştir.



Şekil 4.31 Optimize gergi braketinin montajı

4.7.2 Optimize Gergi Braketinin Test Edilmesi

Optimize gergi braketinin test edilebilmesi için motor dinamometre testi gerçekleştirilmiştir. İçten yanmalı motorların performans ve dayanıklılık testleri için motor dinamometre testleri eksiksiz bir şekilde gerçekleştirilmelidir. Motor dinamometre testleri test odalarında gerçekleştirilmektedir. Oda içerisinde bir platform bulunmaktadır. Test edilecek motor, platforma sabitlenerek test süreçleri uygulanmaktadır. Platformun temel görevi, test sırasında ortaya çıkabilecek titreşim ve hareketleri sönmölmektir. Test edilecek motor, dinamometreye direkt olarak montajlanır ve dinamometre test sürecinde motorun ürettiği güç ve tork değerleri ölçölür. Test öncesi montajı tamamlanan içten yanmalı motor dinamometreye bağlanır. Motorun dinamometreye bağlanma prosesinde ilk olarak motor düzgün bir şekilde hizalanıp sabitlenir ve bağlantıları eksiksiz bir şekilde gerçekleştirilerek proses tamamlanır. Tüm bu prosesler eksiksiz bir şekilde gerçekleştirilmelidir. Test edilecek motorun güvenliği ve ölçömlerin doğruluğu bakımından bağlanma işlemi oldukça önemlidir. Motora ait tork ve güç çıktıları dinamometre aracılığıyla ölçölmektedir. Montajı tamamlanan motorların farklı hız ve yükleme koşullarında nasıl bir performans sergileyeceği motor dinamometre testleri ile gerçekleştirilmektedir. Gerçekleştirilen bu testler, motorun araçta nasıl tepki vereceğini görmemize yardımcı olmaktadır. Motor dinamometre testlerinde, motorun tam yükte çalıştırılması motor üzerindeki parçalarının maruz kaldığı gerilmeler karşısında performanslarını ortaya çıkaracaktır. Test sürecinde gözlemlenebilecek tüm problemler tasarım, üretim ve montaj aşamalarındaki eksikliklerin belirlenmesine yardımcı olmaktadır. Motor dinamometre testleri,

mühendislerin ve montaj ekibinin motorun performansı hakkında değerlendirme yapabilmelerine ve seri üretim öncesi parçalarda ortaya çıkabilecek potansiyel eksikliklerin çok daha erken tespit edilmesine olanak tanımaktadır.

Şekil 4.32’de dinamometre test düzeneği gösterilmiştir.



Şekil 4.32 Dinamometre test düzeneği

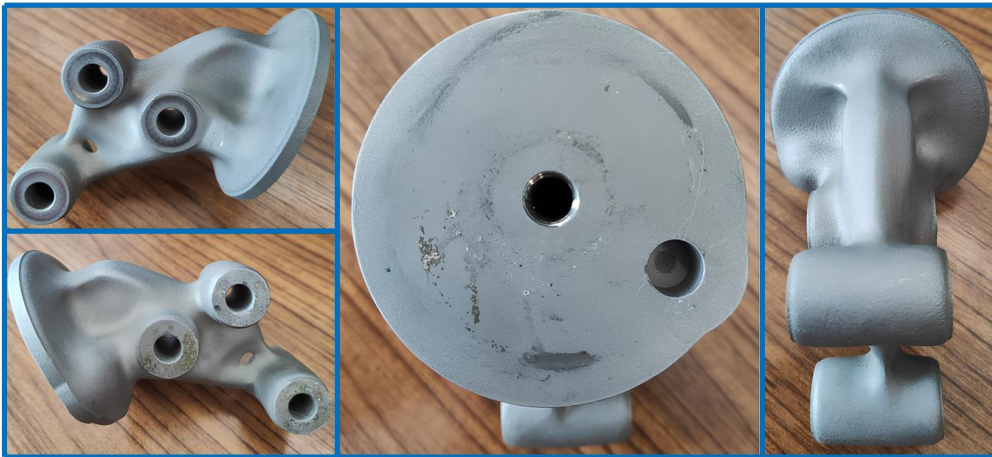
Motor dinamometre test aşamasında, motor toplamda 40 saat boyunca dinamometre testine tabi tutulmuştur. Test motorunun dayanıklılık ve performans karakteristiğinin gözlemlenebilmesi için motor genellikle tam yük veya tam yüke yakın çalıştırılmıştır. Tam yük, motor üzerindeki montajlı parçalarının motorun en yüksek kapasite aralığında sergilemiş olduğu performansı değerlendirebilmemizi sağlar. Motor dinamometre testleri aracılığıyla, gergi braketleri gibi yapısal dayanıklılığın ön planda olduğu parça performanslarının incelenmesi kritik bir süreçtir. Test süreçlerinin tamamlanmasının ardından test motorunun demontajı gerçekleştirilir. Demontaj sonrası sökülen parçalar detaylı bir şekilde incelenerek performansları kapsamlı bir şekilde değerlendirilir.

Söküm işlemi sonrası, optimize gergi braketleri öncelikle görsel olarak kontrol edilmiştir. Görsel kontrol aşamasında parçada meydana gelebilecek çatlak başlangıcı, deformasyon, yapısal hasarlar vb. durumlar detaylıca ele alınmıştır. Tamamlanan kapsamlı incelemeler sonucunda optimize gergi braketinde parça fonksiyonelliğine etki edebilecek herhangi bir problem tespit edilmemiştir. Böylelikle, optimize gergi yapısal dayanım kriterleri açısından kendini ispat

etmiştir. Ek olarak, motor FEAD sistemine ait parçalar detaylı bir şekilde incelenmiş olup sistem içerisinde bulunan parçalarda sorun ile karşılaşılmamıştır. Motor dinamometre testlerinin başarılı bir şekilde gerçekleştirilmesi, test sırasında FEAD sisteminin kusursuz bir şekilde çalışması ve test sonrasında FEAD sistemi parçalarında herhangi bir sorun tespit edilmemiş olması optimize gergi braketinin fonksiyonelliğini koruduğunu kanıtlar niteliktedir.

Optimize gergi braketinin motor dinamometre testi sonrası gerçekleştirilen detaylı görsel kontrollerinde parça fonksiyonelliğine etki edebilecek çatlak başlangıcı, çatlak, kırık vb. problemlerin gözlemlenmemesi, optimize gergi braketinin mekanik dayanımının ve yorulma performansının analiz çalışmalarını desteklediğini göstermektedir. Eklemeli imalat teknolojilerinin, karmaşık geometriye sahip parçaların yüksek dayanım gerektiren uygulamalarda çok iyi bir alternatif olduğu bu çalışma ile desteklenmiştir. Böylelikle, eklemeli imalat teknolojileri kullanarak imalatı tamamlanan parçaların, konvansiyonel imalat yöntemleri ile imal edilen parçalarla rekabet halinde bulunabileceği ve gelecekte gelişen teknoloji ile daha verimli bir şekilde kullanılabileceği söylenebilir. Gerçekleştirilen bu çalışma, eklemeli imalat teknolojilerinin sahip olduğu potansiyeli ve sağlamış olduğu katkıları optimize gergi braketini üzerinden aktarmıştır.

Şekil 4.33’de motor dinamometre test adımlarını başarılı bir şekilde tamamlayan optimize gergi braketinin demontaj sonrası görselleri verilmiştir.



Şekil 4.33 Optimize gergi braketini test sonrası görselleri

4.7.3 Optimize Gergi Braketi ve Orjinal Gergi Braketi Maliyet Hesabı

Bu bölümde, optimize gergi braketi ve orjinal gergi braketi için döküm ve eklemeli imalat yöntemlerinin maliyet etkinliği hesaplanmıştır. Prototip parça imalatında hangi yöntemin daha maliyet etkin olduğu detaylı bir şekilde açıklanmıştır. Maliyet çalışması, dört silindirli içten yanmalı bir motorun FEAD sisteminde kullanılan gergi braketi için gerçekleştirilmiştir. Bu çalışma içerisinde döküm ve eklemeli imalat yöntemlerinin maliyet etkinliği kıyaslanmıştır. Maliyet etkinlik çalışması, üç prototip motor özelinde gerçekleştirilmiştir. Prototip motor sayısı, parça tasarım değişikliklerinin üç faz aşaması ile tamamlanacağı düşünülerek belirlenmiştir. Gerçekleştirilecek projelerin kapsamı ve isterlerine göre bu sayı değişiklik gösterebilir.

Döküm yöntemi, seri üretim için oldukça maliyet etkin bir yöntemdir. Fakat, prototip parça imalatında parça sayılarının düşük olması, kalıp maliyeti ve işleme fikstürü maliyeti dikkate alındığında maliyet etkinliği azalmaktadır. Üç prototip motor için üç farklı parça tasarımı gerekmekte olup bu durum her bir faz aşamasında üç farklı kalıp ve işleme fikstürü maliyeti gerektirmektedir.

Tablo 4.8’de döküm yöntemi ile üretilen orjinal gergi braketi için toplam maliyet hesabı verilmiştir.

Tablo 4.8 Döküm yöntemi maliyet hesabı

Kalem	Birim Maliyet (€)	Adet	Toplam Maliyet (€)
Döküm Kalıbı	3.500	3	10.500
İşleme Fikstürü	2.500	3	7.500
Toplam Maliyet	6.000	3	18.000

Eklemeli imalat teknolojileri özellikle düşük adetli parça imalatları için son derece uygun bir imalat yöntemidir. Kalıp ve işleme fikstürü maliyeti bulunmamaktadır. İhtiyaç duyulması durumunda işleme maliyeti çıkabilmektedir. Gerçekleştirilen çalışma özelinde prototip motor üretimlerinde farklı tasarımlar için tekrardan kalıp ve işleme fikstürü maliyeti çıkarmayacaktır. Her bir parçanın birim maliyeti sabit olup tekil adetler üzerinden toplam maliyet hesaplanmaktadır.

Tablo 4.9’da eklemeli imalat ile üretilen optimize gergi braketi için toplam maliyet hesabı verilmiştir.

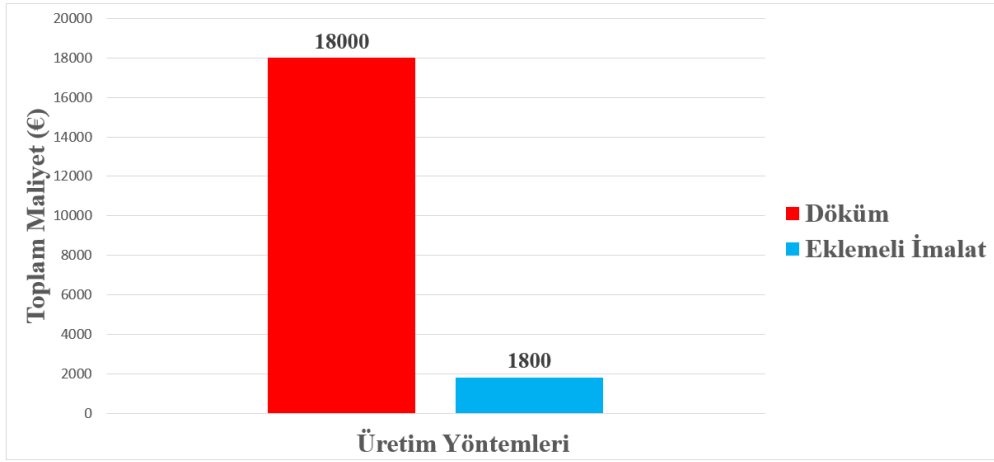
Tablo 4.9 Eklemeli imalat maliyet hesabı

Kalem	Birim Maliyet (€)	Adet	Toplam Maliyet (€)
Parça Üretimi	600	3	1.800
Toplam Maliyet			1.800

Döküm yöntemi için toplam maliyet 18.000 € iken eklemeli imalat yöntemi için toplam maliyet 1800 € (ardıl işlem maliyetleri dahil) olarak hesaplanmıştır. Elde edilen bu sonuçlar, prototip parça imalatında oldukça yüksek sabit maliyetlerden dolayı döküm yönteminin dezavantajlı olduğunu kanıtlar niteliktedir. Eklemeli imalat teknolojileri, düşük adetli parça üretimlerinde ve prototip parça geliştirme aşamalarında ekonomik açıdan avantaj sunmaktadır. Ek olarak, eklemeli imalat teknolojileri ile prototip parça imalatında zamandan tasarruf sağlayıp kalıp ve işleme fiktürleri gibi maliyetlerin de olmaması sebebiyle verimlilik artırılmaktadır.

Rianne E. Laureijs ve arkadaşları, gerçekleştirdikleri çalışmada eklemeli imalatın sunmuş olduğu tasarımda esneklik, imalat sürecinde parça oryantasyonu ve sahip olduğu farklı imalat tekniklerini göz önünde bulundurarak maliyet incelemesi yapmışlardır. Tamamlanan çalışma sonucunda, topoloji optimizasyonu ile ağırlık azaltımı, eklemeli imalat cihazında parçanın farklı oryantasyonlarda üretilebilme durumları ve eklemeli imalat teknolojilerinin bazı ardıl işlemlere ihtiyaç duymaması ile üretim sürelerinin kısılması durumları değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlar neticesinde, eklemeli imalat sayesinde malzemeden tasarruf, imalat ve tedarik süresinin kısılması vb. avantajlar ortaya konulmuştur. Böylelikle, maliyet incelemesi yapılan çalışma, gerçekleştirmiş olduğumuz tez çalışmasında vurgulanan maliyet azaltımını desteklemektedir [53].

Şekil 4.34’de döküm ve eklemeli imalat yöntemleri için toplam maliyet hesabı gösterilmiştir.



Şekil 4.34 Döküm ve eklemeli imalat toplam maliyet hesabı

Sonuç olarak, eklemeli imalat teknolojileri sağlamış olduğu düşük prototip maliyet, hızlı imalat ve parça tasarımında oluşabilecek değişikliklere olan esnekliği sebebiyle döküm yönteminden oldukça avantajlıdır.

Tamamlanan bu çalışmanın temel amacı, geleneksel imalat yöntemlerinden döküm ile üretilen gergi braketinin topoloji optimizasyonu uygulanarak yenilikçi bir imalat yöntemi olan eklemeli imalat teknolojisi ile daha hafif ve fonksiyonelliğini koruyan muadil bir optimize gergi braketini üretilmesidir. Topoloji optimizasyonu uygulamasında orjinal gergi braketinin motor bloğu ve gergi bağlantı arayüzleri korunmuştur. Diğer bölgelerde ise malzeme azaltılarak yeni bir geometri elde edilmiştir.

Optimize gergi braketini, yapısal sonlu elemanlar analizinde maksimum 192 MPa gerilim değerine ulaşmış olup 860.6 MPa akma dayanımına sahip 17-4PH paslanmaz çelik malzeme ile dayanım açısından güvenilir olduğu sonucuna varılmıştır. Modal analiz sonucunda 633.4 Hz frekans değeri elde edilmiş olup motor çalışma frekansı olan 105 Hz değerinin oldukça üzerinde bir sonuca sahip olduğundan optimize gergi braketini modal analizden geçmiştir. Yorulma analizi sonucunda 1.37 değeri elde edilmiştir. Bu değer, optimize gergi braketinin uygulanan yükler altında ömrünün 1.37 katı kadar olduğunu ifade etmektedir. Et kalınlığı analizinde ise en fazla gerilime sahip bölgelerde en fazla et kalınlığı, en az gerilime sahip bölgelerde ise en az et kalınlığı sonucu elde edilmiştir. Bu durum, topoloji optimizasyonunun doğru bir şekilde gerçekleştirildiğini kanıtlar niteliktedir.

Üretim sürecinde, optimize gergi braketini LTYF yöntemi ile üretilmiştir. Üretim sonrası destek yapı temizliği, taşlama, kumlama ve CNC işleme gibi ardıl işlemler uygulanarak parça montaja uygun hale getirilmiştir. Elde edilen optimize gergi braketinin ağırlığı hassas terazide 729.5 gr olarak ölçülmüştür. Orjinal gergi braketini ise 924 gr ağırlığa sahiptir. Böylelikle, optimize gergi braketinin uygulanan topoloji optimizasyonu ile ağırlığı orjinal gergi braketinden %21 daha hafif duruma getirilmiştir. Ağırlık azaltımının motor performansı üzerinde etkisi oldukça önemlidir. Ağırlık azaltımı ile muadil parçaların kullanılması motorun taşınması gereken yükü azaltarak yakıt verimliliğini artıracaktır. Daha az yakıt tüketimi ise karbon emisyonunu azaltacaktır. Parçalarda ağırlık azaltımı sadece motor

performansına değil, aynı zamanda çevresel sorumluluğu da artırarak daha sürdürülebilir bir geleceğe katkı sunar.

Tamamlanan çalışma sonucunda;

- Orjinal gergi braketinin ağırlığı, topoloji optimizasyonu ile yaklaşık %21 oranında azaltılarak parça fonksiyonelliği korunmuştur.
- Optimize gergi braketi yeni tasarımı ve malzemesi ile yapısal sonlu elemanlar analizi, modal analiz ve yorulma analizi aşamalarını başarılı bir şekilde tamamlamıştır.
- Montajı sorunsuz gerçekleştirilen optimize gergi braketi, 40 saat süren motor dinamometre testlerini farklı yükleme koşullarında performans kriterlerini başarılı bir şekilde tamamlayarak yapısal dayanımını kanıtlamıştır. Böylelikle, ağırlığı ve prototip parça maliyeti düşürülmüş, fonksiyonelliğini koruyan muadil bir gergi braketi geliştirilmiştir.
- LTYF yöntemi ile üretimi tamamlanan optimize gergi braketinin prototip parça maliyeti, konvansiyonel imalat yöntemlerinden döküm ile üretilen orjinal gergi braketine göre düşürülmüştür.
- Döküm ile imalat süresi 6-8 hafta sürerken eklemeli imalat ile bu süre 2 güne indirilmiştir. Bu durum enerji tasarrufu sağlayarak verimlilik artışı ile sonuçlanacaktır.
- Parça ağırlığının azaltılması ile hafifletilmiş bir optimize gergi braketi, maliyet tasarrufu, korunmuş veya artırılmış fonksiyonellik, artırılmış verimlilik, zamandan tasarruf ve sürdürülebilir çevre elde edilmiş olacaktır.

Ek olarak, incelenen akademik yayınlarda ve literatür araştırmalarında içten yanmalı motorlarda kullanılan GJL-300 dökme demir braketin, eklemeli imalat ile üretilen 17-4PH paslanmaz çelik braketle çevrilmesine dair benzer örneklere rastlanmamıştır. Bu durum, gerçekleştirilen çalışmanın özgünlüğünü ve yenilikçiliğini ortaya koymaktadır. Çalışmanın sonuçları, gelecekte ortaya çıkarılacak araştırma ve sanayi uygulamalarına katkı sağlayarak imalat süreçlerine farklı bir bakış açısı kazandıracaktır.

- [1] Selçuk, E. N., & Durak, E. (2023). EKLEMELİ İMALAT VE GELENEKSEL YÖNTEMLE İMAL EDİLMİŞ TİTANYUM ALAŞIMLI MALZEMENİN ABRAZİF AŞINMA ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 11(2), 659-668.
- [2] Cvetkovski, S., & Kozinakov, D. (2017). INVESTIGATION OF MICROSTRUCTURAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF DIFFERENT TYPE OF CASTINGS. *Materials Science. Non-Equilibrium Phase Transformations.*, 3(2), 60-64.
- [3] Adeleke, A. A., Oki, M., Anyim, I. K., Ikubanni, P. P., Adediran, A. A., Balogun, A. A., ... & Akinlabi, E. T. (2022). Recent development in casting technology: A pragmatic review. *Revue des Composites et des Matériaux Avancés-Journal of Composite and Advanced Materials*. 32(2), 91-102.
- [4] Aran, A. (2007). Döküm teknolojisi imal usulleri ders notları. *İTÜ Makine Fakültesi, İstanbul*.
- [5] Doğrusadık, A. (2023). Talaşlı İmalatta Kullanılan Kombine Delik İşleme Takımlarının Tasarımı ve Örnek Bir Uygulama. *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 35(1), 1-13.
- [6] Tezel, T., Topal, E. S., & Kovan, V. (2018). HİBRİT İMALAT: EKLEMELİ İMALAT İLE TALAŞLI İMALAT YÖNTEMLERİNİN BİRLİKTE KULLANILABİLİRLİĞİNİN İNCELENMESİ. *International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry*, 2(3), 60-65.
- [7] Gökdağ, İ. (2021). EKLEMELİ İMALAT İÇİN EŞ ZAMANLI PROSES PARAMETRE VE TOPOLOJİ OPTİMİZASYONU, Yüksek Lisans Tezi, TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- [8] Milewski, J. O. (2017). *Additive manufacturing of metals*, From Fundamental Technology to Rocket Nozzles, Medical Implants and Custom Jewelry (pp. 135-140). Springer.
- [9] Kayacan, M. Y., & Yılmaz, N. (2019). DMLS ile eklemeli imalatta dengesiz sıcaklık dağılımı ve parçaya etkilerinin araştırılması. *Academic Platform-Journal of Engineering and Science*, 7(1), 79-94.
- [10] Özer, G. (2020). Eklemeli üretim teknolojileri üzerine bir derleme. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 9(1), 606-621.
- [11] Pereira, T., Kennedy, J. V., & Potgieter, J. (2019). A comparison of traditional manufacturing vs additive manufacturing, the best method for the job. *Procedia Manufacturing*, 30, 11-18.
- [12] Ponche, R., Kerbrat, O., Mognol, P., & Hascoet, J. (2014). A novel methodology of design for Additive Manufacturing applied to Additive Laser Manufacturing process. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 30(4), 389-398.

- [13] Moreno Nieto, D., & Moreno Sánchez, D. (2021). Design for additive manufacturing: Tool review and a case study. *Applied Sciences*, 11(4), 1571.
- [14] Leirimo, T. S., & Martinsen, K. (2019). Evolutionary algorithms in additive manufacturing systems: Discussion of future prospects. *Procedia CIRP*, 81, 671-676.
- [15] Montanari, R., Palombi, A., Richetta, M., & Varone, A. (2023). Additive manufacturing of aluminum alloys for aeronautic applications: Advantages and problems. *Metals*, 13(4), 716.
- [16] Rouf, S., Malik, A., Singh, N., Raina, A., Naveed, N., Siddiqui, M. I. H., & Haq, M. I. U. (2022). Additive manufacturing technologies: Industrial and medical applications. *Sustainable Operations and Computers*, 3, 258-274.
- [17] Tofail, S.A.M., Koumoulos, E. P., Bandyopadhyay, A., Bose, S., O'Donoghue, L., & Charitidis, C. (2018). Additive manufacturing: scientific and technological challenges, market uptake and opportunities. *Materials today*, 21(1), 22-37.
- [18] Liu, L., Zhu, S., Zhang, Y., Ma, S., Wu, S., Wei, B., & Yang, G. (2024). Process Study of Selective Laser Sintering of PS/GF/HGM Composites. *Materials*, 17(5), 1066.
- [19] Han, W., Kong, L., & Xu, M. (2022). Advances in selective laser sintering of polymers. *International Journal of Extreme Manufacturing*, 4, 042002.
- [20] Formlabs, (2021). Guide to Selective Laser Sintering (SLS) 3D Printing.
- [21] Kalia, B., Singh, R., Pabla, B. S., & Dureja, M. (2024). On direct metal laser sintering of functionally graded material with virgin and mixed powder. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 49, 11857-11870.
- [22] Anand, M., & Das, A. K. (2021). Issues in fabrication of 3D components through DMLS Technique: A review. *Optics & Laser Technology*, 139, 106914.
- [23] Manufacturing Guide, (n.d.). Direct Laser Metal Sintering, DMLS. <https://www.manufacturingguide.com/en/direct-laser-metal-sintering-dmls>
- [24] Piekło, J., & Garbacz-Klempka, A. (2021). Use of selective laser melting (SLM) as a replacement for pressure die casting technology for the production of automotive casting. *Archives of Foundry Engineering*, 21(2), 9-16.
- [25] Babu, J. J., Mehrpouya, M., Pijper, T. C., Willemsen, G., & Vaneker, T. (2022). An experimental study of downfacing surfaces in selective laser melting. *Advanced Engineering Materials*, 24(8), 2101562.
- [26] Pal, S., Gubeljak, N., Bončina, T., Hudák, R., Toth, T., Zivcak, J., Lojen, G. Leben, N. & Drstvenšek, I. (2021). The effects of locations on the build tray on the quality of specimens in powder bed additive manufacturing. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 112, 1159-1170.
- [27] Shim, D. S. (2021). Effects of process parameters on additive manufacturing of aluminum porous materials and their optimization using response surface method. *Journal of Materials Research and Technology*, 15, 119-134.

- [28] Azam, F. I., Abdul Rani, A. M., Altaf, K., Rao, T. V. V. L. N., & Zaharin, H. A. (2018). An in-depth review on direct additive manufacturing of metals. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 328, 012005.
- [29] 3D Printing Industry, (n.d.). <https://3dprintingindustry.com/3d-printing-basics-free-beginners-guide#04-processes>.
- [30] An, Z., Wang, B., & Yu, M. (2024). Numerical Study of Temperature Field and Melt Pool Properties during Electron Beam Selective Melting Process with Single Line and Multiple Line Scanning. *Mathematics*, 12(14), 2238.
- [31] GE Additive, (n.d.). Electron Beam Melting.
- [32] Gibson, I., Rosen, D., & Stucker, B. (2015). Additive Manufacturing Technologies: 3D printing, rapid prototyping, and direct digital manufacturing (2nd Edition, pp. 123-124), Springer New York.
- [33] Godec, D., Gonzalez-Gutierrez, J., Nordin, A., Pei, E., & Ureña Alcázar, J. (2022). *A guide to additive manufacturing* (pp. 127-130). Cham, Switzerland, Springer International Publishing.
- [34] Kurup, P., Remo, T., Cotrell, J., Jenne, S.D., & O'Connor, P. (2018). *Analysis of Supply Chains and Advanced Manufacturing of Small Hydropower Systems* (No. NREL/TP-6A20-71511). National Renewable Energy Lab. (NREL), Golden, CO (United States).
- [35] Toscano, A. (2019). *Topology Optimization and Design for Additive Manufacturing: the case study of a hydraulic module for automotive application*. Yüksek Lisans Tezi, University of POLITECNICO DI TORINO
- [36] SHI, G., GUAN, C., QUAN, D., WU, D., TANG, L., & GAO, T. (2020). An aerospace bracket designed by thermo-elastic topology optimization and manufactured by additive manufacturing. *Chinese Journal of Aeronautics*, 33(4), 1252-1259.
- [37] Talay, E., Özkan, C., & Gürtaş, E. (2021). Designing lightweight diesel engine alternator support bracket with topology optimization methodology. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 63, 2509-2529.
- [38] Alam, Md. T., Kumar PS, V., Thakur, A., & Ghadei, S. (2018). *Development of Low Cost FEAD System with Stretch Fit Belt* (No. 2018-28-0064). SAE Technical Paper.
- [39] Liu, X., & Behdinan, K. (2021). Innovative analytical model for temperature prediction of front-end accessory drive. *Scientific Reports*, 11, 1476.
- [40] Forth, T., Antchak, J., Fought, M., & Russ, S. (2009). Optimized Engine Accessory Drive Resulting in Vehicle FE Improvement. *SAE International Journal of Engines*, 1(1), 1294-1302.
- [41] Autobiz, (n.d.). INA offers a FEAD for business growth. <https://www.autobiz.ie/home/ina-offers-a-fead-for-business-growth>
- [42] Da Silva, C. A. F. (2018). *Modeling and optimization of power losses in poly-V belt transmissions: Application to the Front Engine Accessory Drive of trucks*, Doktora Tezi, Université de Lyon.

- [43] Haraç, İ.B. (2009). KURUTUCULARDA TAHRİK MEKANİZMASI PROBLEMLERİNİN İNCELENMESİ, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- [44] Tonoli, A., Amati, N., & Zenerino, E. (2006). Dynamic modeling of belt drive systems: effects of the shear deformations, *Journal of Vibration and Acoustics*, 128(5), 555-567.
- [45] Talimi, M. (2016). *Fatigue Analysis of Automotive Tensioner in Front End Accessory Drive Systems*. Doktora Tezi. University of Toronto, Canada.
- [46] The Gates Rubber Company, (n.d.). Introduction to Front-End Accessory Drive Systems: Automotive Systems and Components.
- [47] DIN. (2012). DIN EN 1561: Founding - Grey cast irons (English translation of DIN EN 1561:2012-01).
- [48] Szajnar, J., Stawarz, M., Wróbel, T., & Sebzda, W. (2009). Influence of electromagnetic field on pure metals and alloys structure. *Journal of Achievements in Materials and manufacturing Engineering*, 34(1), 95-102.
- [49] EOS. (2022). EOS StainlessSteel 17-4PH: Material Data Sheet, EOS GmbH.
- [50] SLM Solutions. (n.d.). Stainless Steel 17-4PH: Material Data Sheet. SLM Solutions Group AG.
- [51] Budzik, G., Kozik, B., Oleksy, M., Grzelka, M., & Dobrowolska, A. (2012). THE APPLICATION OF GOM MEASUREMENTS FOR THE DETERMINATION OF ACCURACY OF GEAR CASTS MANUFACTURED IN THE RT/RP PROCESS. *Annals of the Faculty of Engineering Hunedoara – International Journal of Engineering*, 89-92
- [52] Rokicki, P., Budzik, G., Kubiak, K., Dziubek, T., Zaborniak, M., Kozik, B., Bernaczek, J., Prezeszlowski, L. and Nowotnik, A. (2016). The assessment of geometric accuracy of aircraft engine blades with the use of an optical coordinate scanner. *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*, 88(3), 374-381.
- [53] Laureijs, R. E., Roca, J. B., Narra, S. P., Montgomery, C., Beuth, J. L., & Fuchs, E. R. H. (2017). Metal additive manufacturing: cost competitive beyond low volumes. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 139(8), 081010.

TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR

Konferans Bildirileri

1. ÖZEK, K. and SAĞBAŞ, B. (2024). " Investigating Topology Optimization and Additive Manufacturing Processes of Engine Bracket " 2. International Hybrid Conference and Exhibition Advances in Welding and Metal Additive Manufacturing Technologies, İstanbul.

