T.C.

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

OTOMOTİV GÖVDE PARÇALARI İÇİN KAYNAK FİKSTÜRÜ TASARIM OPTİMİZASYONU

Kemal ÖZER

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Konstrüksiyon Programı

Danışman

Dr. Öğr. Üyesi İlyas İSTİF

Ekim, 2021

T.C.

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

OTOMOTİV GÖVDE PARÇALARI İÇİN KAYNAK FİKSTÜRÜ TASARIM OPTİMİZASYONU

Kemal ÖZER tarafından hazırlanan tez çalışması 08.11.2021 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Makine Mühendisliği Konstrüksiyon Programı **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Dr. Öğr. Üyesi İlyas İSTİF

Yıldız Teknik Üniversitesi

Danışman

Jüri Üyeleri

Dr. Öğr. Üyesi İlyas İSTİF, Danışman

Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Doç. Dr. Ahmet SAĞIRLI, Üye

Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Doç. Dr. Erkin DİNÇMEN, Üye

Işık Üniversitesi _____

Danışmanım Dr. Öğr. Üyesi İlyas İSTİF sorumluluğunda tarafımca hazırlanan Otomotiv Gövde Parçaları İçin Alternatif Kaynak Fikstür Tasarımı 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.

Kemal ÖZER

İmza

TEŞEKKÜR

Başta beni keyfiyle yapmış olduğum bu mesleğe yönlendiren her daim beni destekleyen ve ilerlemem için beni motive eden sevgili dedem Mehmet KOÇAK ve biricik eşi Methiye KOÇAK' a teşekkür ederim. Hayatımın her anında yanımda olan desteklerini asla esirgemeyen kıymetli annem Sibel ÖZER, kıymetli babam Sedat ÖZER ve değerli ablam Öykü ÖZER ve bana pes etmemeyi öğreten yol arkadaşım Duygu TÜM' e teşekkür ederim. Bu çalışmayı gerçekleştirirken ilgisi ve bilgisiyle beni destekleyen hocam Sayın İlyas İSTİF teşekkürü borç bilirim.

Kemal ÖZER

İÇİNDEKİLER

SİMGE LİSTESİ vi
KISALTMA LİSTESİ vii
ŞEKİL LİSTESİ viii
TABLO LİSTESİ x
ÖZET xi
ABSTRACT xiii
1 GİRİŞ **1**
1.1 Literatür Özeti..... 1
1.2 Tezin Amacı..... 4
1.3 Hipotez / Bulgular veya Orijinal Katkı..... 4
2 KAYNAKLI İMALATTA KULLANILAN FİKSTÜRLERİN YERİ VE ÖNEMİ **6**
2.1 Kaynak Fikstürlerinin Otomotiv Sektöründeki Yeri..... 6
2.2 Otomotiv Sanayisinde Kullanılan Fikstürlerin Sınıflandırılması..... 8
3 YAPISAL OPTİMİZASYON **13**
3.1 Optimizasyon Tanımı..... 13
3.2 Tarihçe..... 13
3.3 Yapısal Optimizasyon Tanımı..... 14
3.3.1 Ayrık Yapıların Topoloji Optimizasyonu..... 14
3.3.2 Sürekli Yapıların Topoloji Optimizasyonu..... 15
3.4 Yapılan Çalışmalar..... 29
3.4.1 Başlangıç Koşullarının Belirlenmesi..... 29
3.4.2 Topoloji Optimizasyon Analizlerinin Gerçekleştirilmesi..... 34
3.4.3 Parçaların Nihai tasarımlarının yapılması..... 35
3.4.4 Topoloji Optimizasyon Sonuçları 37
4 FİKSTÜR İMALATINDA KULLANILAN ALTERNATİF MALZEMELER **38**
4.1 Geleneksel Malzemeler..... 38
4.2 Kompozit Malzemeler..... 40
4.3 Kompozit malzemelerin fikstür üzerinde kullanılması..... 42
5 EKLEMELİ İMALAT **44**
5.1 Eklemeli İmalat Yöntemlerinin Fikstürler Üzerinde Kullanılması..... 44
5.2 Eklemi İmalat İle Üretilen Parçalar..... 45

6 SONUÇ VE ÖNERİLER **47**
KAYNAKÇA 49
TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR 54

SİMGE LİSTESİ

w	Açısal Hız
a	Akım
d/dk	Dakikadaki Devir Sayısı
T	Kaynak Kalınlığı
P1	Kaynak Nüfuziyeti
L2	Kaynak Uzunluğu
F	Kuvvet
m	Kütle
°/sn	Saniyedeki Açısal Salınım
x	Sehim Miktarı
V	Voltaj
k	Yaylanma Katsayısı
t	Zaman

KISALTMA LİSTESİ

C	Karbon
CAD	Bilgisayar Destekli Tasarım
CAM	Bilgisayar Destekli İmalat
CM	Santimetre
CNC	Bilgisayarlı Sayısal Kontrol
Cr	Krom
Fe	Demir
G	Gram
Gpa	Giga Paskal
kN	Kilo Newton
Mn	Manganez
Mo	Molibden
MÖ	Milattan Önce
MPa	Mega Pascal
Ni	Nikel
RPM	Dakikadaki Dönüş Sayısı
SIMP	Solid Isotropic Material with Penalization
Si	Silisyum
Zn	Zirkonyum
3D	Üç Boyutlu

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1. 1 Otomotiv endüstrisi için kaynak fikstür tasarımları[6] 2

Şekil 1. 2 Tek eksenli fikstür örneği 3

Şekil 2. 1 1900'lü yıllarda kullanılan endüstriyel jig 6

Şekil 2. 3 Krank mili fikstürü 7

Şekil 2. 3 Günümüzde seri imalatta kullanılan fikstürü 8

Şekil 2. 5 Elle işletilen kaynak fikstürü örneği 9

Şekil 2. 6 Robot kaynak fikstürü örneği 10

Şekil 2. 7 Kaynak fikstürü pim örnekleri 11

Şekil 2. 7 Şim ayar bloğu 11

Şekil 2. 8 Pnömatik tahrikli kenet grubu örneği 12

Şekil 3. 1 Boyut optimizasyonu [23] 15

Şekil 3. 2 Boyut optimizasyonu [27] 17

Şekil 3. 3 Şekil optimizasyonu [27] 18

Şekil 3. 4 Topoloji optimizasyonu [27] 18

Şekil 3. 5 a) 3B alanda optimal malzeme dağılımını bulmanın genelleştirilmiş şekil tasarım yöntemi b) topoloji optimizasyonu işlem adımları [30] 19

Şekil 3. 6 Homojenleştirme metodu adımları [33] 22

Şekil 3. 7 Yüklü bir kirişin optimize edilmiş malzeme düzenini [36] 24

Şekil 3. 8 E_0'ın elastikiyet modülü ve izotropik malzeme modeli arasındaki ilişki grafiği[36] 25

Şekil 3. 9 Satranç tahtası efekti örneği 27

Şekil 3. 10 Level set yöntemi [37] 29

Şekil 3. 11 Robotla çalışan fikstür örneği [38] 30

Şekil 3. 12 İlk 3D modeller 31

Şekil 3. 13 İlk analizin yükleri ve fikstürleri 32

Şekil 3. 14 SP-1009 nolu parçanın yük detayları 32

Şekil 3. 15 HJ-2001 nolu parçanın yük detayları 32

Şekil 3. 16 İlk analizin çalışma sonuçları SP1-1009 stres(A) ve yer değiştirme(B) için 33

Şekil 3. 17 İlk analizin çalışma sonuçları HJ-2001 stres(A) ve yer değiştirme(B) için 34

Şekil 3. 18 Topoloji optimizasyonu sonrası modellerin görünümleri 35

Şekil 3. 19 Optimize edilmiş tasarımlar 35

Şekil 3. 20 Nihai analizin yükleri ve fikstürleri 35

Şekil 3. 21 Nihai analiz için çalışma sonuçları SP01-009 stres (A) ve yer değiştirme (B) 36

Şekil 3. 22 Nihai analiz için çalışma sonuçları HJ-2001 stres (A) ve yer değiştirme (B). 37

Şekil 4. 1 Portatif kaynak tabancası örneği 40

Şekil 4. 2 Fikstür üzerinde kullanılan kestamit parçalar 40

Şekil 4. 3 Kullanılan karbon fiber malzeme 43

Şekil 5. 1 Eklemeli imalat yöntemi temsili 44

Şekil 5. 2 Eklemeli imalat ile üretilen parçalar 46

Şekil 6. 1 Optimizasyonu tamamlanan kaynak fikstürü 47

Şekil 6. 2 Ergonomi analizi 48

TABLO LİSTESİ

Tablo 3. 1 İlk 3B model özellikleri 30

Tablo 3. 2 Malzeme özellikleri 30

Tablo 3. 3 Birincil analiz için mesh bilgileri 33

Tablo 3. 4 Son analiz için mesh bilgileri 36

Tablo 4. 1 C45 çeliği kimyasal bileşenleri [39] 38

Tablo 4. 2 CuCrZn mekanik özellikleri [41] 39

Tablo 4. 3 Karbon fiber teknik bilgileri 42

ÖZET

Otomotiv Gövde Parçaları İçin Kaynak Fikstürü Tasarım Optimizasyonu

Kemal ÖZER

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi İlyas İSTİF

Bu çalışmada, otomotiv endüstrisinde kullanılan kaynak fikstürlerinin ağırlığını azaltmak için bilgisayar destekli tasarım ve sonlu eleman analizine dayanan bir topoloji optimizasyon çalışması yapılmıştır. Ek olarak daha önce kaynak fikstürlerine kullanılmayan farklı imalat yöntemleri ve yeni malzeme türleri için araştırmalar yapılmıştır. Kaynak fikstürlerinin üretim hatlarındaki hareketi, operatörler veya robotlar tarafından sağlanabilir. Hareket sırasında robotun kaldırdığı yük artarsa, robotun yatırım maliyetleri ve bakım maliyetleri artacaktır. Öte yandan, operatörün taşıdığı fikstürlerin ağırlığının arttırılması ergonomi riski yaratmaktadır. Üretim hatlarında kullanılan ekipmanın ağırlığını azaltmak, toplam robot maliyeti ve çalışan sağlığı ile ilgili bu sorunları azaltmak için önemlidir. Çalışmanın amacı, Solidworks Simulation Topoloji Etüdü kullanarak parçaların ağırlığını azaltmaktır. Analiz sonucunda, yazılım programının önerdiği organik yapı dikkate alınarak tasarım tekrarlanmıştır. Çalışmanın temel amacı, kaynak fikstüründe kullanılan parçaların gerilme enerjisini inceleyerek ekipmanın toplam ağırlığını azaltmaktır. Yapılan topoloji optimizasyonlarının verimsiz kaldığı parçalar için ise malzeme değişikliğine gidilmiştir. Temel olarak metal malzemelere alternatif kompozit malzemeler ve plastik malzemeler kullanılmıştır. Bu

yeni malzemelerin kullanımı için de eklemeli imalat gibi yeni imalat yöntemleri de araştırılıp fikstür üzerinde kullanılması için tasarımlar gerçekleştirilmiştir. Son olarak, ilk tasarım ve optimize edilmiş tasarım üzerine uygulanan statik analiz ve yorulma analizi ile parçaların kararlılığı kontrol edildikten sonra son parçalar oluşturulmuştur. Tasarımları yapılan parçaların imalatı gerçekleştirilmiştir. Yapılan yeni kaynak fikstürü üzerinde üretimler yapılıp sonuçlar karşılaştırılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Topoloji optimizasyonu, kaynak fikstürü, sonlu elemanlar analizi, tasarım,

ABSTRACT

Welding Fixture Design Optımizatıon For Automotive Body Parts

Kemal ÖZER

Department of Mechanical Engineering

Master of Science Thesis

Supervisor: Assist. Prof. Dr. İlyas İSTİF

In this study, a topology optimization study is conducted to reduce the weight of welding fixtures used in the automotive industry. The topology optimization study was based on computer aided design and finite element analysis. Additionally, new types of materials and different manufacturing methods were searched that were not used in welding fixtures before. Welding fixtures can be moved by operators or robots on production lines. Investment costs and maintenance costs of the robot would be raised due to the increase in the load lifted by the robot during movement. Furthermore, ergonomics risk could be an issue for the operator due to the increased weight of the fixtures carried. To avoid these robot costs and employee health issues, it is important to decreasing the weight of equipment used in production lines. This study aimed to reduce the weight of parts using the Solidworks Simulation Topology Study. As a result of the analysis, the design has been repeated considering the organic structure proposed by the software program. Decreasing the total weight of the equipment by examining the tensile energy of the parts used in the welding fixture is the main aim of the study. For the parts where the topology optimizations were inefficient, material changes were made. Composite materials and plastic materials are used as option to metal materials. New manufacturing methods such as additive manufacturing were investigated and designs were made for the use of new materials on fixtures. After, initial design's and also optimized design's stability checked by appling static analysis and fatigue analysis, the final pieces concluded. The designed

parts were manufactured. Productions were made and results on the new welding fixture were compared

Keywords: Topology optimization, welding fixtures, finite element analysis, design

1

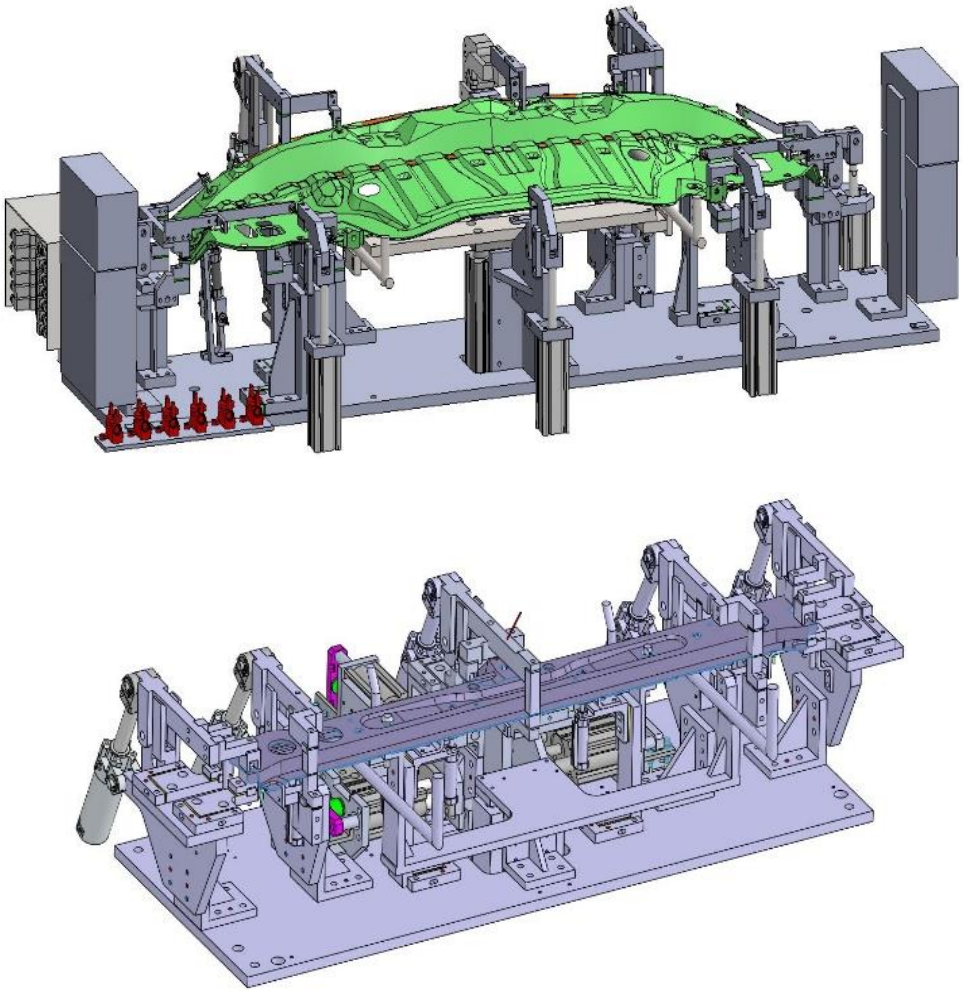
GİRİŞ

1.1 Literatür Özeti

Kaynakla birleştirme yöntemi, çözülemeyen bir bağlantı tekniği olarak seri üretimde önemli yere sahiptir. Savunma sanayi ve otomotiv gibi sektörlerde seri üretimde kaynaklı birleştirme yöntemleri sıklıkla kullanılmakta ve bu nedenle kaynaklı imalat yöntemi ülke ekonomisine dolaylı olarak katkı sağlamaktadır. Kaynak sektörünün önemi göz önüne alındığında doğru ekipmanların kullanılması ve optimum tasarımların yapılması ekonomik olarak büyük önem taşımaktadır. Kaynak işleminde kullanılan ekipmanlar göz önüne alındığında, kaynak fikstürleri ve kaynak jigleri en maliyetli bileşenlerdir. Fikstür ve jig tasarımı, deneyim gerektiren ve zaman alıcı bir süreçtir. Tasarım yapacak personelin deneyim kazanması ve bilgilerini geliştirmesi gerekmektedir. Gelişen teknoloji ile birlikte CAD/CAM programlarının devreye girmesi, kaynak ekipmanlarının daha hızlı ve daha fonksiyonel olarak tasarlanmasını sağlamıştır. Bu durum, hafiflik ve maliyet gibi alanlarda yeni tasarımların geliştirilmesini sağlamıştır [1], [2]. Jigler ve fikstürler, birden fazla parçadan oluşan ürünlerin doğru bir şekilde kaynak yapılabilmesi için kullanılan ekipmanlardır. Kaynak makinesi veya diğer işleme takımları ile iş parçası arasında doğru pozisyonu sağlamak için kullanılır. Jigler ve fikstürlerin iş parçasını belirtilen sınırlar içinde kaynaklanması veya işlenmesi için doğru konumda tutacak şekilde tasarlanmış olması gerekir. Jigler ve fikstürler terim olarak sıklıkla karışır veya birbirlerinin yerine kullanılır. Aralarındaki fark ise takımın iş parçası üzerinde yönlendirilme şeklidir. Fikstür, işlenecek parçayı tutan, destekleyen veya yerleştirilen özel bir cihazdır. Jig ise iş parçasını sadece yerleştirmek ve tutmakla kalmayıp aynı zamanda işlem yapılırken işlem yapan takımlara da kılavuzluk etmesi için yapılan bir üretim aletidir [3].

İlk fikstür kavramı 1900'lerin başında ortaya çıkmıştır. Talaşlı imalat alanında

üretim yapan makinelerine bağlanması gereken iş parçalarını sabitleyen aparatların kullanılmasıyla fikstür kavramı ortaya çıkmıştır. İlerleyen yıllarda gelişen ve yaygınlaşan kaynak tekniği ile kaynak fikstürlerine ihtiyaç artmıştır. Bu durum kullanılan ekipman için gelişim sürecini de başlatmıştır [4]. Fikstürler, üretilen ürünün kalitesini, verimliliğini ve maliyetini doğrudan etkiler. Fikstür tasarımı ve üretimi ile ilgili maliyetler, üretim sisteminin toplam maliyetinin yaklaşık olarak %10 ila %20'sini oluşturabilir. Üretimden sonra reddedilen parçaların yaklaşık %40'ı, yetersiz fikstür tasarımından kaynaklanan parçadaki boyut hatalarından kaynaklanmaktadır. Bu nedenle seri üretim yapan bir işletmede fikstür tasarımı ve imalatı önemli bir yere sahiptir [5].

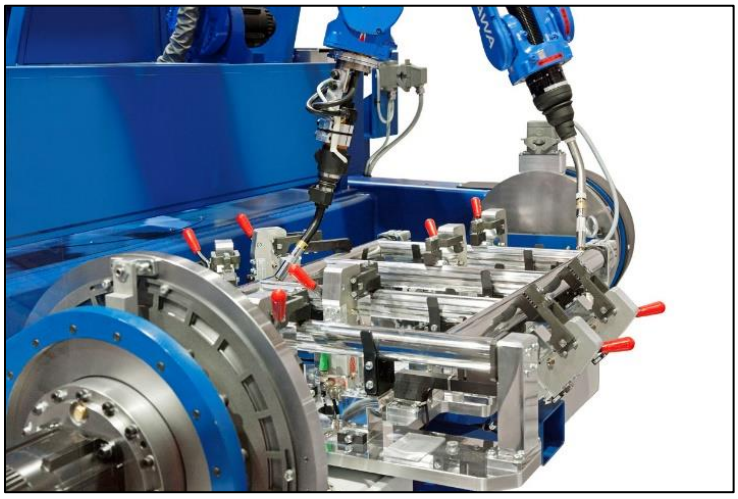


Şekil 1. 1 Otomotiv endüstrisi için kaynak fikstür tasarımları[6]

Şekil 1'de, otomotiv sektöründe kullanılan bir kaymak fikstürü gösterilmektedir.

Genel olarak kaymak fikstürleri konumlandırıcılar, kenet sistemleri ve destekler gibi parçalardan oluşur. Konumlandırıcılar, referans pimleri ve dayama bloklarından oluşur. Parçayı sabitlemek için referans pimleri ve dayama blokları kullanılır. Kenet sistemleri çalışma sırasında iş parçası üzerine uygulanan kuvvetlere karşı iş parçasını jig veya fikstür içinde sıkıca tutar. Fikstürler üzerinde en önemli elemanlardan biri kenet gruplarıdır. Fikstürde uygun kenet grupları kullanılması, yapılan işin doğruluğunu, kalitesini ve üretim süresini doğrudan etkiler [7]. Destekler, üretim sürecinde takımlar tarafından uygulanan yükler nedeniyle iş parçasının maruz kaldığı elastik deformasyonları yerel olarak azaltmak için kullanılan, sevk kabiliyeti olmayan statik olarak konumlandırılmış elemanlardır. Ayrıca fikstür ile iş parçası arasındaki hareketleri de azaltırlar. Fikstürler üzerinde kullanılan destek elemanlarının sayısında herhangi bir sınırlama yoktur. Fakat iş parçası üretimi sırasında oluşabilecek varyasyonlar fazla destek noktası bulunması durumunda ayar yapılmasını zorlaştırabilir. Kenet sistemleri ve konumlandırıcıların aksine, desteklerin varlığı gerekli değildir[8].

Kaynak fikstürleri üretim sırasında hareketli veya sabit durumda olabilir. Sabit yapılı fikstürlerde kaynak fikstür işlem sırasında hareket etmez ve kaynak takımı parça üzerinde gezerek işlem gerçekleştirilir. Parçanın çok büyük olduğu veya parça üzerinde kaynak yüzeylerine erişimin kolay olduğu parçalar için bu yöntem kullanılır.



Şekil 1. 2 Tek eksenli fikstür örneği

Hareketli fikstürlerde ise kaynak takımı sabit veya hareketli olabilir. Kaynak

yüzeylerine erişimin zor olduğu durumlarda bu yöntem kullanılır. Ayrıca üretim hızını da arttırmak için bu yöntem tercih edilebilir. Fikstürün boyutu ve ağırlığına bağlı olarak fikstürlerin hareketi operatör veya makine tarafından gerçekleştirilebilir. Şekil 1.2'de tek eksende hareket eden bir fikstür örneği verilmiştir. Hareketli fikstürlerde ağırlık tasarımı etkileyen büyük bir değişkendir. Fikstürün ağır olması makineler için yatırım maliyetini ve enerji tüketimini arttırır. El fikstürlerinde ise operatörün maruz kaldığı yükler ergonomi sorunlarına sebep olabilir.

1.2 Tezin Amacı

Seri üretimin olduğu her alan gibi otomotiv sektöründe de sürdürülebilir kalite en önemli unsurlardandır. Üretim adetlerinin yüksek olması üretim sürelerinin en aza indirilmesi amaçlanan bu üretim sisteminde genellikle otomasyon ürünleri tercih edilmektedir. Otomasyon makinelerinin yatırım maliyetlerinin fazla olması nedeniyle her koşulda kullanılabilmesi mümkün olamamaktadır. Bu nedenle insan gücü ile gerçekleştirilen proseslerde sistemin bir parçasıdır. Üretim adetlerinin yüksek olması insanlar tarafından gerçekleştirilen bu proseslerde çeşitli ergonomi problemlerine neden olmaktadır. Bu tez de operatörler tarafından yönetilen bir prosesin ergonomik olarak iyileştirilmesi için yapılan hafifletme çalışmalarına yer verilmiştir.

1.3 Hipotez / Bulgular veya Orijinal Katkı

Tez amacı doğrultusunda; kaynaklı imalatın yoğun olduğu bir firma içeresinde üretim hatlarında kullanılan operatör tarafından taşınıp hareket ettirilmesi gereken el fikstürleri ve robotlar tarafından hareket ettirilen fikstürler incelenmiştir. Taşınması sırasında ergonomik açıdan riskli olarak değerlendirilen fikstürler için hafifletilme yoluna gidilmiştir. Bu amaç doğrultusunda kaynak fikstür tasarımı gerçekleştirilmiştir. Geleneksel fikstür tasarımdan farklı olarak bu fikstür üzerinde hafiflik sağlanması amacıyla çeşitli optimizasyonlar yapılmıştır. Daha sonrasında çeşitli malzeme değişikliği ve imalat yöntemi değişikliği ile hafiflik sağlanmıştır. Literatürde hafiflik için pek çok çalışma mevcutken özel olarak kaynak fikstürleri üzerinde yapılan pek az sayıda çalışma vardır. Kaynak fikstürleri üzerinde yüksek adetli üretimlerde kalitesel olarak hatalara neden vermemesi ve üzerine gelen

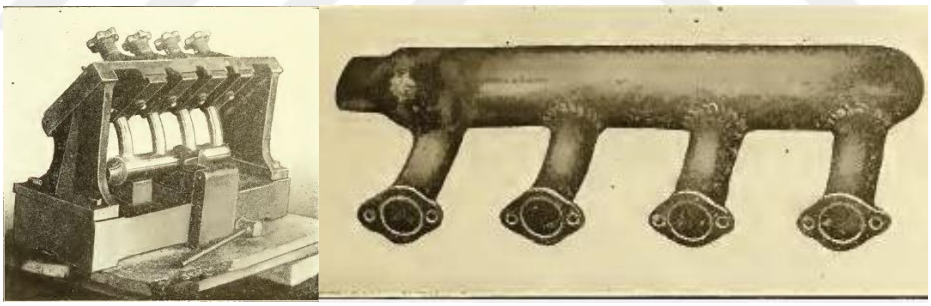
kaynak çapakları ile deforme olmaması ile diğer hafiflik gerektiren sistemlerden farklılaşmaktadır.

2

KAYNAKLI İMALATTA KULLANILAN FİKSTÜRLERİN YERİ VE ÖNEMİ

2.1 Kaynak Fikstürlerinin Otomotiv Sektöründeki Yeri

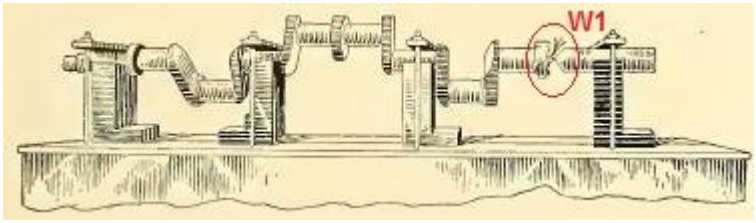
Talaşlı işlem, kaynaklı birleştirme ve montaj işlemleri sırasında, ilgili parça veya parçaların işlenmesi veya bir araya getirilmesinde fikstürler kullanılmaktadır. Fikstürler, farklı şekillerde olan iş parçalarını istenilen konumlarda sabit tutarak, imalatta standart üretimi sağlamaktadır. [9] 20. yüzyılın başlarında sanayileşmenin ortaya çıkışı ile birlikte, üretimde kullanılan adama olan ihtiyaç da artmaya başlamıştır. [10] Bu doğrultuda kalitesel anlamda istenilen adetlerde üretimi karşılayabilmek için de 1900'lü yılların başından itibaren fikstür kullanımı imalat sektöründe yaygınlaşmaya başlamıştır. [11]



Şekil 2. 1 1900'lü yıllarda kullanılan endüstriyel jig

Fikstürler ilk olarak talaşlı imalat sektöründe yaygın olarak kullanılmaya başlanmış olup, ilgili iş parçalarını fikstür üzerinde birbirine göre hareketsiz şekilde tutmak için yapılmaktaydı. Fikstür ve sabitleme ekipmanlarına olan ihtiyaç, kaynak tekniğinin ilerlemesi ve imalat sektöründe kaynaklı birleştirmeye olan talebin artması sayesinde artmıştır. Artan talebin sonucunda fikstür ve sabitleme ekipmanlarının gelişim süreci başlamıştır. [11] Şekil 2. 1 1921 yılında motosiklet manifoldunun kaynaklı birleşimi için kullanılan fikstür, aşağıdaki Şekil 2.2'de ise

krank milinin işaretlenmiş olan “W1” bölgesine yapılacak kaynak için kullanılan fikstür yer almaktadır.

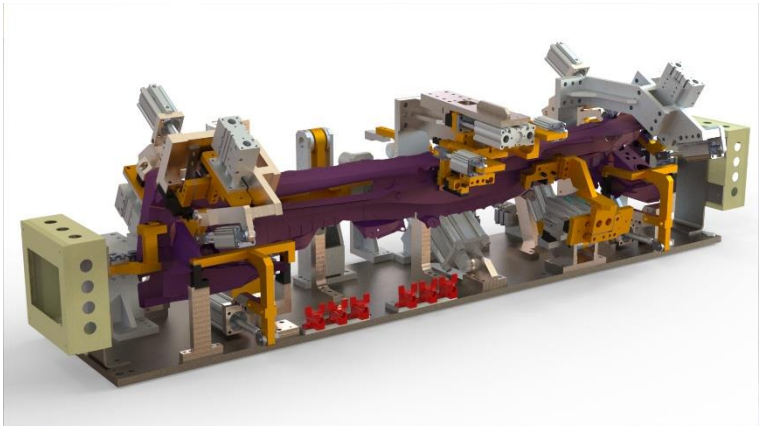


Şekil 2. 2 Krank mili fikstürü

Kaynak işlemi üretim sanayisinde sıklıkla kullanılan bir süreç olup, iki veya daha fazla metalin birbirine ayrılmaz şekilde birleşmesini sağlayan bir işlemdir. Bu süreç sayesinde parçaların birbirleriyle homojen bir şekilde birleşmesi sağlamaktadır. Ark kaynak imalat yönteminin pek çok çeşidi bulunmaktadır, bununla birlikte uçak, uzay ve otomotiv endüstrisinde geniş bir kullanıma sahip önemli bir mühendislik alanı oluşturmaktadır. [12]

Üretim endüstrisinin gelişmesi ile birlikte, makinelerin kullanımının artması ile otomotiv imalat sektöründe, özellikle araç şase parçalarının imalat ve birleştirme işleminde yüksek miktarda otomasyonel sistemine olan ihtiyacı arttırmıştır. Yüksek miktarlarda olan üretim adetlerini gerçekleştirebilmek, kalite ve standardizasyonu koruyabilmek için de otomobil üreticileri için yüksek yatırım bütçeleri gereklidir. Özellikle artan araç ihtiyacı ve araç çeşitliliğinin giderek çoğalmasıyla birlikte oluşan elektrikli ve alternatif otonom araçlara olan talebin doğrultusunda araç pazarı sıklıkla değişkenlik göstermektedir, böylece otomotiv üretim sektöründe daha esnek bir üretime ihtiyaç duyulmaktadır. Esnekliğin sağlanabilmesi için yatırım maliyetlerine ayırılan bütçeler de artmakta, fikstürler ise ortaya çıkan yatırım maliyetlerinin yaklaşık %35’lik kısmını oluşturmaktadır. Üretimde kullanılan fikstürlerin parçaların varyasyon miktarının önüne geçmesi bu gerekliliğin asıl oluşma sebebidir. Özellikle günde 1000-2000 gibi adetlerde üretilen araçların ve prototip araçların üretimi için de kaynak jigleri araç üretim endüstrisinde önemli bir yere sahiptir. [13] Ayrıca, üretim sanayisinde sıklıkla kullanılan fikstürler, üretilebilirlik, maliyet ve üretim kalitesini doğrudan etkilemektedir. [14] Bu nedenle fikstürün kaynak işleminde kullanılırken, emniyeti ve iş parçasına ait nominal konumu korumayı sunarken kolay kullanılabilir olması, üretim

maliyetlerini azaltarak üretkenliği artırmaya yönelik sonuçlara sahip olması gerekmektedir. [15]



Şekil 2. 3 Günümüzde seri imalatta kullanılan fikstür örneği

Kaynak işlemlerinde jig kullanılmasının önemi incelendiğinde, parça deformasyonlarının jig üzerinde yapılan kaynak uygulandığında daha az olduğu görülmüştür. Özellikle kaynağa bağlı açısal distorsiyonların kaynak uygulamalarında jig kullanımıyla birlikte etkili bir şekilde azaldığı görülmüştür. [16] Özellikle pek çok kaynak yönteminin kullanılması imalat sanayisinde kaynaklı uygulamaların geniş yer tutması sayesinde sağlanmıştır. Tozaltı ark kaynağı, gazaltı ark kaynağı veya manuel metal ark kaynağı gibi kaynak tiplerinin hangisinin kullanılacağı fark etmeksizin endüstriyel üretimlerde fikstür kullanımı gerekli bir hale gelmiştir. [11]

Kaynak endüstrisinde kullanılan fikstürlerin tarihsel gelişim süreci göz önünde bulundurulduğunda kullanılan yapıların zamanla değiştiği, teknolojik gelişmelerle birlikte fikstürlerin üretimi daha kontrollü ve daha güvenli sağladığı görülmüştür. Geçmişte fikstür üzerinde manuel olarak uygulanmakta olan kaynak işlemi, otomasyonel sistemlerin gelişimiyle birlikte günümüzde elektronik, mekanik ve pnömatik bileşenlerin harmanlandığı yapılarda otomatik olarak gerçekleşebilmektedir. [4] Şekil 2.3'te modern anlamda kaynaklı uygulamalarda kullanılan fikstür yer almaktadır. Pnömatik kenetleme ekipmanları sayesinde kaynaklı üretim sırasında parçanın sabit kalmasını sağlamakta ve ilgili iş parçasını istenilen konumda üzerinde taşıdığı pimler sayesinde sabitleyebilmektedir.

2.2 Otomotiv Sanayisinde Kullanılan Fikstürlerin Sınıflandırılması

Otomotiv sanayisinde kaynaklı uygulamalarda temel olarak iki çeşit fikstür kullanılmaktadır. Bunlardan birincisi kaynak operatörünün manuel olarak kaynak yapabilmesine imkan sağlayan manuel kaynak fikstürleridir.

Diğeri ise seri imalata uygunluğu, uygulama veriminin yüksekliği ve üretim kolaylığı sunan robot kaynak fikstürleridir. Robot hatlarında kullanılan kaynak fikstürleri göreceli olarak manuel kaynak fikstürlerinden daha çok maliyete sahiptir. Bu tip fikstürler genel olarak parça bazlı özel imal edilmektedir. [17] Ancak günümüz teknolojisinde değişen parça sıklığı ve maliyet konuları göz önüne alındığında modüler fikstür kavramı da fabrikasyon uygulamalarında kendine yer bulmaktadır.

2.2.1 Elle İşletilen Kaynak Fikstürleri

Kaynak operatörü tarafından ilgili iş parçalarında kaynak torcu kullanarak birleştirilen ekipmanlar elle işletilen kaynak fikstürleridir. Elle işletilen kaynak fikstürleri, gelişen teknoloji ile birlikte pnömatik ve elektrik altyapıya sahip olabilirler. Seri üretim hatlarında kullanılır ve sıklıkla daha sade ve manuel klemp içerikli tarzda olmaktadırlar. Bu fikstürlerin öne çıkan özellikleri, kılavuzlar içermeleridir. Bu kılavuzlar ilgili kaynak bölgeleri üzerinde işlem yapılmasına yardımcı olur. Mevcut kılavuzlar sayesinde operatörün kaynağı nominal bir şekilde gerçekleştirmesi hedeflenir. [4]



Şekil 2. 4 Elle işletilen kaynak fikstürü örneği

2.2.2 Robot İle İşletilen Kaynak Fikstürleri

İş parçalarının otomasyonel robotlar tarafından otomatik olarak kaynak yapılmasını sağlayan ekipmanlar, robot ile işletilen kaynak fikstürleridir. Kısaca

robot kaynak fikstürü olarak da adından söz edilebilir. Robot kaynak fikstürleri, pnömatik ve elektrik altyapıya sahiptirler ve bununla birlikte, sıklıkla servo motorlu döner yapıyla beraber hareket etmektedirler. Bu sayede fikstüre kendi ekseni etrafında dönme kabiliyeti verilmiş olup, robot ve fikstürün birbirleriyle eş zamanlı bir durumda çalışması sağlanmaktadır. [4]

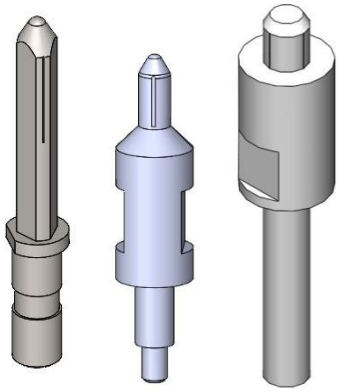


Şekil 2. 5 Robot kaynak fikstürü örneği [19]

Elle İşletilen kaynak fikstürlerine nazaran robot kaynak fikstürlerinin yapılarından kaynaklanan nedenlerle tasarımsal süreçleri de farklılık göstermektedir. Robot kaynak fikstürlerinin dizaynı, kaynak işlemi sırasında kullanılacak olan robota göre belirlenmektedir, ayrıca robotun ulaşımını engellemeyecek şekilde ilgili kaynak bölgeleri planlanmalıdır. Ayrıca kaynak sırasında oluşan sıcaklığa karşı robot kaynak fikstürlerinin kaynak bölgesine yakın olan fikstür ekipmanları dirençli malzemeden üretilmeli ya da bu sıcaklığa karşı başka önlemler alınarak imal edilmelidir. [18]

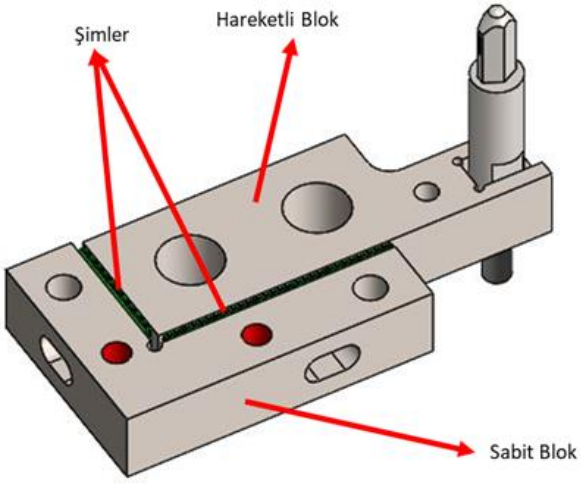
Çeşitli fonksiyonel bileşenler kaynak jiglerinin sistemsel olarak gerekliliklerini yerine getirebilmeleri için gereklidir. Bahsi geçen fonksiyonel yapılar aşağıda üç kategoride incelenmektedir.

Birinci kategoride, üretilecek parçaya has fonksiyonel yapılar ve farklı parçalar için farklılık gösteren özel şekilli pimler yer almaktadır.



Şekil 2. 6 Kaynak fikstürü pim örnekleri

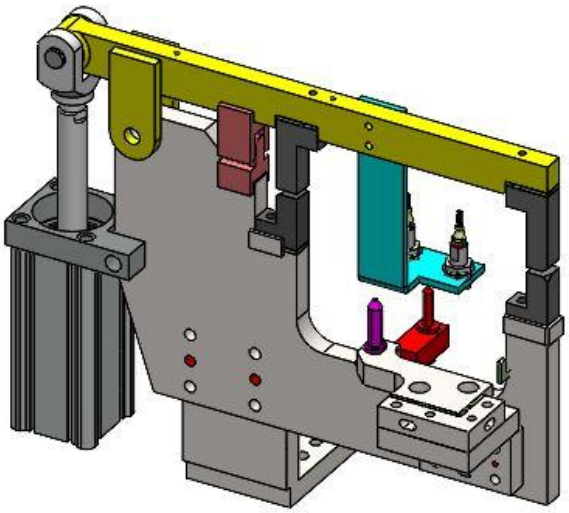
İkinci kategoride ise, ayar mekanizmaları bulunmaktadır. Sıklıkla iki veya üç eksende de ayar yapabilme imkanı sağlayan, çeşitli kalınlıklarda parçalar kullanılır. Bu parçalara şim adı verilir. Nominal üretilebilirlik koşullarını sağlamak için, parça üretimi sırasında bu ayarlar yapılarak kullanılmaktadır. [14]



Şekil 2. 7 Şim ayar bloğu

Şekil 2.7'de görülebileceği gibi çeşitli kalınlıklardaki şimler pim bloğu ile sabit blok arasına yerleştirilmiştir. İki eksen doğrultusunda hareket imkanı koyulan şimler tarafından kazandırılmaktadır.

Üçüncü kategori de ise, kenet sistemleri ve çeşitli bağlantı elemanları bulunmaktadır. [13] (Şekil 2.8) Bu kenet sistemleri parçayı imalat sırasında sabitler.



Şekil 2. 8 Pnömatik tahrikli kenet grubu örneği

Kenet sistemleri, iş parçasının hareket etme ihtimalini engeller. Kaynak işlemi gerçekleşirken robotun hareketleri ve sıkıştırma kuvvetiyle birlikte oluşan titreşimleri önleyen, önemli tasarım unsurlarıdır. [4] Kenet sistemleri, uzun yıllar boyunca seri üretim koşullarında çalışabilir. Bu koşullar göz önüne alındığında, yüksek sertlik mukavemet ve tokluk gibi kullanılacak malzeme özelliklere dikkat edilmesi gerekmektedir. Sıkıştırma momenti etkisinde sürekli olarak çalışan kenet sistemlerinde aşınma ve gevşeme göz önünde bulundurularak bu durumlardan kaynaklanan deformasyonlara karşı önlemler almak gerekmektedir. [10]

3

YAPISAL OPTİMİZASYON

3.1 Optimizasyon Tanımı

Optimizasyon, bir sistemde bulunan kaynak veya kaynakların (işgücü, zaman, malzeme, üretim süresi, kapasite, ekipman gibi) en verimli şekilde kullanılarak belirli amaçlara (maliyet en azaltılması, karlılığın arttırılması, kapasite kullanımının en yükseltilmesi ve verimliliğin en yükseğe çıkarılması gibi) ulaşmaya yarayan yöntemler bütünü olarak tanımlanmaktadır (Gass, 2000) [20].

3.2 Tarihçe

Optimizasyon yöntemlerinin varlığı Cauchy, Lagrange ve Newton gibi bilim insanlarının yaptığı çalışmalara kadar uzanmaktadır. Newton ve Leibnitz'in hesaplamaya katkısıyla diferansiyel hesap yöntemlerinin geliştirilmesi sağlanmıştır. Bernoulli, Euler, Lagrange ve Weirstrass fonksiyonelliklerin en küçüğü bulma ile uğraşan çeşitlerinin temellerini oluşturmuşlardır. Bilinmeyen çarpanları eklemeyi içeren kısıtlı sorunlar için optimizasyon yöntemi, ilk olarak Lagrange tarafından önerilmiştir. Kısıtsız minimizasyon problemlerini çözmek için ilk uygulama Cauchy tarafından yapılmıştır. Bu erken katkılara rağmen, yirminci yüzyıla kadar yeni metotlar üzerine çok az ilerleme kaydedilmiştir. 1947 yılında George Dantzig tarafından Lineer optimizason metodu olan Simplex metodu geliştirilmiştir. Dantzig'in geliştirdiği bu yöntem Doğrusal Programlama konusundaki en büyük gelişmelerden biri olarak kabul edilmektedir. Daha sonraları Charnes, Cooper, Henderson ve diğerleri tarafından çeşitli varyasyonları geliştirilen bu metodun temel prensibi, optimum çözüme ardışık yaklaşım yolu ile ulaşmaktır. 1950 yılında Nonlineer programlama metotları geliştirilmiştir. Bu çalışmalar doğrusal olmayan programlamada daha sonraki araştırmaların temelini oluşturmuştur. 1960'ların başında Zoutendijk ve Rosen'in doğrusal olmayan programlamaya katkıları önemli olmuştur. 1980li yıllarda bilgisayarların yaygınlaştırılması ile optimizasyon metotlarının kullanımı yaygınlaştı. 1990lı

yıllarda simülasyon programları dışarıdan ilavelerle optimizasyon seçenekleriyle birlikte desteklenmeye başladı. 2000li yıllarda ise artık Mühendislikte büyük ölçekli optimizasyon uygulamaları başlamış oldu.[21]

3.3 Yapısal Optimizasyon Tanımı

Yapısal optimizasyonlarda amaç, optimizasyon tanımında da bahsedildiği üzere fonksiyonun minimize edilmesi üzerinedir. Bu fonksiyonlarda değişken genellikle kütle, yer değiştirme ya da gerilme değerleridir.

Yapısal optimizasyon yöntemleri sayesinde birden fazla sayıda tasarım parametrelerini ve tasarım kısıtlamalarını etkili bir şekilde kullanılabilmek mümkün hale gelmiştir. Son yıllarda git gide artan yapısal optimizasyonda topoloji optimizasyonu gibi yeni sayılabilecek çözüm yöntemleri verimli tasarımlara ulaşmak için sıklıkla başvurulan yöntemlerdir.

Bu bağlamda optimum tasarıma en hızlı ve doğru şekilde yaklaşan metotların seçimi çok önemlidir. Yapısal optimizasyon yöntemlerini pek çok şekilde sınıflandırmak mümkündür. İlk aşmada ayrık yapılarda ve sürekli yapılarda olmak üzere ikiye ayrılabilir.

3.3.1 Ayrık Yapıların Topoloji Optimizasyonu

Birbirinden ayrı parçalara sahip yapılarda kullanılan bu yöntem ilk olarak yapıdaki önemli olan yapı bileşenlerini sabit tutarak önemsiz olanları kardırarak sistemi en iyilemeye çalışır. Ancak, optimizasyon başlangıçtaki yapıda kullanılan pek çok bileşeni sabit tuttuğundan, ana bileşenlerden uzak daha iyi bir sonuç elde etmek pek mümkün değildir.

Genel olarak ayrık yapılardaki optimizasyon algoritmalarının eksi yönler, birçok mühendislik uygulamalarında istenilenin aksine ortaya koyulan ürünün simetrik parça sayısının az olduğu bir yapısal geometriye sahip olmasıdır. Bu durum imal için zorluklar yaratabilmektedir. [22]

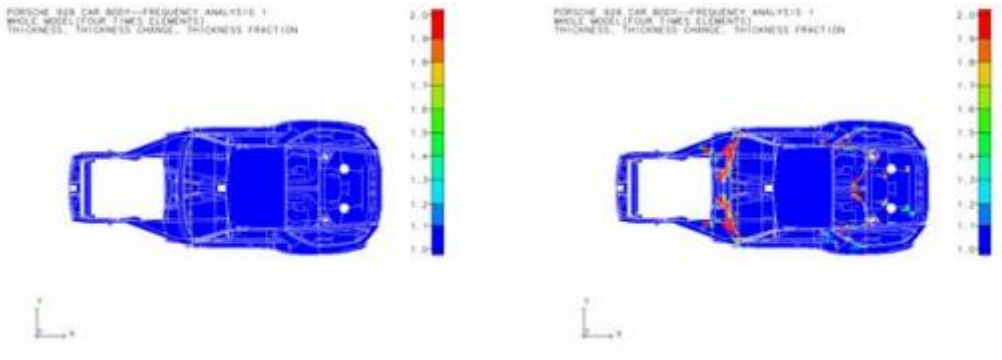
3.3.2 Sürekli Yapıların Topoloji Optimizasyonu

Sürekli yapılarda topoloji optimizasyonu temel olarak üç başlıkta toplanabilir. Bunlar; homojenleştirme metodu, yoğunluk metodu ve evrimsel metodudur. Tüm bu topoloji optimizasyon metotlarının temelinde amaç fonksiyonuna göre yapılan iterasyonlar yer alır.

3.1.1.1 Topometri Optimizasyonu

Topometri, eleman bazında boyut optimizasyonu yöntemidir. Öğelerin gruplar halinde tasarlanan geleneksel boyut optimizasyonu yönteminin aksine, kullanıcıların her bir öğenin boyutlarını ayrı ayrı tasarlamasına olanak tanır. Topometri optimizasyonu, Genesis yazılımında bulunan bir yöntemdir. İlk olarak yaklaşık dört yıl önce geliştirilmiş ve bu zamana kadar geliştirmek için birkaç yeni özellik eklenmiştir.

Topometri optimizasyonu, ek gereksinimleri olduğu için boyut optimizasyonundan farklıdır. Bu gereksinimlerden bazıları topoloji optimizasyon gereksinimlerine benzer: örneğin, topometri, imalat kısıtlamalarını ve/veya simetri koşullarını karşılamak için seçenekler içermelidir.



Şekil 3. 1 Boyut optimizasyonu [23]

Yukarıdaki Şekil 3.1 solda, bir araba gövdesinin ilk kalınlık dağılımını göstermektedir. Sağda, kırmızı elemanlar, istenen bir doğal frekansı arttırmak için kalınlaştırılacak elemanları göstermektedir.[23]

3.1.1.2 Topografya Optimizasyonu

Topografya optimizasyonu kabuk veya kompozit elemanlarla birleştirilmiş yapıların eğriliğini iyileştirmeye yarayan bir optimizasyon tekniğidir. (grid location optimization) Topografya optimizasyonu, özel bir şekil optimizasyonu türü olarak değerlendirilebilir. Şekil optimizasyonunu uygulamanın en yaygın kullanılam yolu, permütasyon vektörlerini kullanmaktır. Permütasyon vektörü, karşılık gelen tasarım değişkeni 1.0 ve diğer tüm şekil tasarım değişkenleri 0.0 ise, kendisiyle ilişkili ızgaraların hareket edeceği yeri gösteren bir vektördür. karşılık gelen tasarım değişkenleri tarafından ölçeklenen permütasyon vektörlerinin en iyi doğrusal kombinasyonu. Bu tip şekil optimizasyonu çalışmasında, optimize edici karşılık gelen tasarım parametreleri tarafından ölçeklenen permütasyon vektörlerinin en iyi lineer kombinasyonunu arayarak en iyi çözümü oluşturmaya çalışır. Topografya optimizasyonunda, tasarlanabilir bölgenin meshe, kabuğa ya da kompozit elemanlara dik ya da belirli bir yönde hareket etmesine imkan tanır. Topografya optimizasyonunun önemli bir uygulaması, kabuk yapılarının sertliğini artırmak için boncuk deseni optimizasyonudur. Şekil optimizasyonunun özel bir durumu olarak uygulanan topografya optimizasyonu, özel permütasyon vektörlerinin ve bunlarla ilişkili tasarım değişkenlerinin oluşturulmasını gerektirir. Şekil optimizasyonunun özel bir durumu olarak uygulanan topografya optimizasyonu, özel permütasyon vektörleri ve bunlarla ilişkili tasarım değişkenlerinin oluşturulmasını gerektirir. Bu özel permütasyon vektörleri, burada topografya permütasyon vektörleri olarak adlandırılmaktadır.[24]

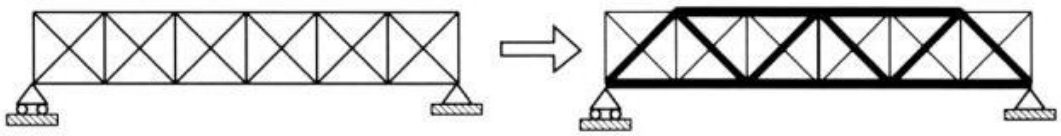
Topografya permütasyon vektörleri yaratmanın birkaç farklı yöntemi bulunur, örnek olarak Visteon Corporation firması tasarlanabilir alandaki tüm elemanların asıl konumuna dik olarak hareket etmesine izin verilen bir metot geliştirdi. Altair Engineering firması ise topografya permütasyon vektörleri oluşturmak için daha farklı bir metot geliştirdi. Nne yazık ki Altair firmasının geliştirdiği yöntemler yayınlamamıştır [24].

3.1.1.3 Serbest Form Optimizasyonu

Serbest biçimli optimizasyon, şekil optimizasyonunun başka bir özel durumudur. Bu tip optimizasyonda, program herhangi bir verili permütasyonu mesh bazında çoklu permütasyonlara böler. Bu yöntem, geleneksel şekil optimizasyonu ile karşılaştırıldığında tasarım alanının değişkenliğini artırır. Topografya optimizasyonunun aksine serbest biçim, her tür elemana uygulanabilir. Serbest biçim, katı bileşenler üzerinde nervür tasarlamak ve sabit veya değişken yükseklikte tanecik desenleri tasarlamak için kullanılabilir [25].

3.1.1.4 Boyut Optimizasyonu

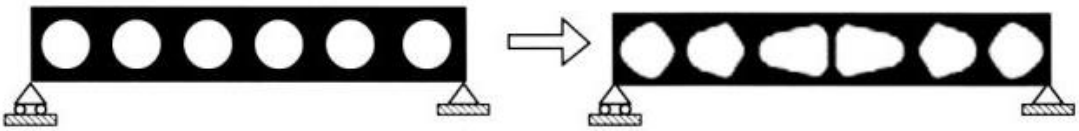
Boyut optimizasyonunda en iyiye ulaşmak için kullanılacak fonksiyon parametreler parçanın kalınlık uzunluk genişlik ölçüleridir[26] . Yapının genel şeklini sabit tutar. Örnek olarak bir silo tasarımı sırasında kullanılacak saclarının kalınlıklarının uygun seçilmesi işlemi boyut optimizasyonu olarak değerlendirilir.



Şekil 3. 2 Boyut optimizasyonu [27]

3.1.1.5 Şekil Optimizasyonu

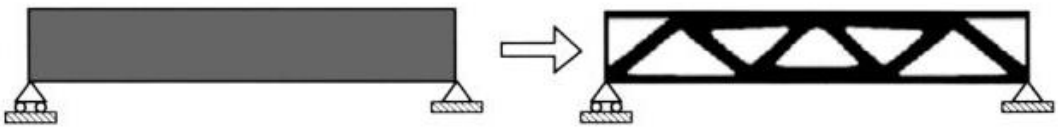
Şekil optimizasyonu isminden de anlaşıldığı üzere yapılar dış şekillerinin optimize edilmesidir. Şekil optimizasyonu, yapısal parçaların daha önceden tanımlanan şekil değişkenleri yardımıyla, amaç fonksiyonunun verilen kısıt fonksiyonuna en uygun biçime göre minimize hale getirilmesi sürecidir. Parametrik matematik model kullanımı ile şekil değişkenleri optimizasyonun her iterasyonunda, çözüm ağına otomatik olarak yansıtılır. Bu sayede hızlı sonuç alınması sağlanır. Katı ve karmaşık yapılarda çözüm ağı üzerinde şekil değişkenleri morf yöntemi ile aktarılmaktadır. Özetle, şekil optimizasyonu yardımı ile belirlenen kısıt fonksiyonu ile belirli bir kalınlığı olan bir sac metal üzerindeki radyus, pah ya da deliğin şekli değiştirilerek verilen şekil değişkenleri yardımıyla amaç fonksiyonu sağlanır [28].



Şekil 3. 3 Şekil optimizasyonu [27]

3.1.1.6 Topoloji Optimizasyonu

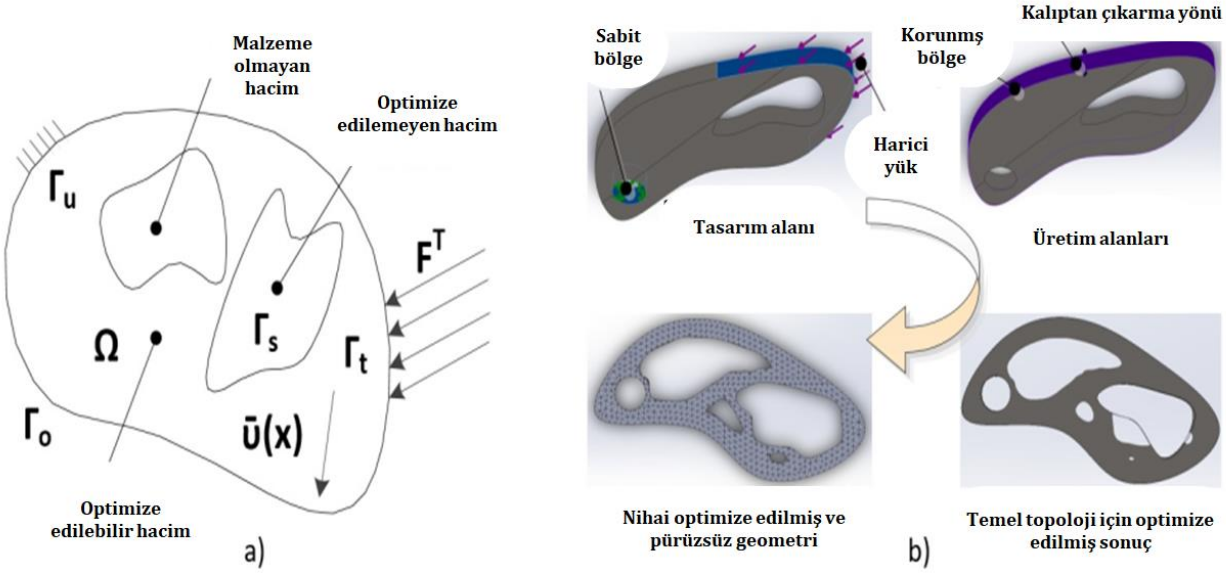
Yeni üretim teknolojilerinin gelişmesi ve üretimden beklentilerin artması ile tasarım aşamasında yapılan simülasyon ve analizler önem kazanmaktadır. Gelişen teknoloji tasarımcıları pek çok açıdan desteklemekte ve bazı sınırlamaları da beraberinde getirmektedir. Müşteri odaklı üretimin artması, üretim sonucunda elde edilen ürünlerin kalite açısından yüksek verim sağlamasını gerektirmektedir. Bu durumlar dikkate alındığında; tasarım aşamasında yapılacak tüm işlemler, üretim sonuçlarını doğrudan etkileyecek en önemli aşamalardır. Tasarım aşamasında yapılacak analizler ile üretim kayıpları öngörülebilir. Üretimde karşılaşılabilecek yüksek maliyetler azaltılabilir ve tasarım aşamasında ürün üretim değerlendirmeleri yapılabilir. Bunun için tasarım programlarına entegre çalışan topoloji araçları; tasarım araçları ve üretim teknikleri için optimize edilmiştir. Topoloji araçları, tasarımları değerlendirmek için hızlı ve dönüşümsel teknoloji sunar [29]. Geleneksel üretim teknolojileri yerini yenilikçi üretim tekniklerine bırakmıştır. Eklemeli imalat yapılarının gelişmesi ile kalıp kullanılmadan üretilen ürünler, ardından hibrit imalat teknolojilerinin gelişmesiyle daha kısa proses adımları ile üretilebilmektedir. Tasarım aşamasında topoloji gibi araçların kullanılması ile üretim tekniklerinin verimliliği arttırılabilir. Üretimde rekabet ön plana çıkmakta ve bu araçlar içgörü sağlayarak ve dijitalleşme sürecine katkı sağlamaktadır [30].



Şekil 3. 4 Topoloji optimizasyonu [27]

Topoloji; çeşitli yükler ve gerilmeler altında geometrik yapıların değişmez uzamsal özellikleri ile ilgilenen bir matematik bilimidir. Topoloji optimizasyon tasarımı;

yükler ve diğer kısıtlamalar altında mümkün olan en iyi şekli oluşturmak için algoritma yardımıyla, sınır koşullarının çizilmesi ve üretim parametrelerinin belirlenmesi esasına dayanmaktadır. Kırk yılı aşkın süredir; topoloji optimizasyonu, havacılık, biyomedikal, otomotiv vb. gibi birçok endüstride sıklıkla tercih edilir. [30], [31]. Genel olarak, topoloji optimizasyonu Şekil 3. 5 'de gösterildiği gibi belirli bir tasarım alanı Ω içindeki malzeme düzenini optimize eden matematiksel bir yöntemdir.



Şekil 3. 5 a) 3B alanda optimal malzeme dağılımını bulmanın genelleştirilmiş şekil tasarım yöntemi b) topoloji optimizasyonu işlem adımları [30]

Verilen tasarım alanı Ω, yük koşulları L, Γo, Γs, Γt ve Γu bileşenleri ile oluşan sınır koşulları Γ ile ifade edilmiştir. Burada Γ = Γu ∪Γo ∪Γt ∪Γs ve bir veya daha fazla üretim kısıtlaması olduğunu ifade etmek için kullanılmıştır. Genellikle verilen tasarım alanı Ω, yük koşulu L, Γo, Γs, Γt ve Γu parçalarından oluşan sınır koşulları Γ kullanır, burada Γ = Γu ∪Γo ∪Γt ∪Γs ve bir veya daha fazla üretim kısıtlaması. Yüzey sürtünmeleri "t" Γt bölgesinde uygulanır; Γu ile gösterilen bölgeleri destek koşullarını temsil eder; Γs ile gösterilen bölgeler optimize edilemeyen alanları belirtir ve Γo tasarım uzayının geometrik sınırlarını temsil etmektedir. Lineer elastik izotropik malzemeden oluşan bir yapısal sistemin optimum yerleşimini bulmak için malzeme dağıtım yöntemleri kullanılabilir. Buradaki ana soru, belirli bir kriteri en aza indirmek için malzeme hacminin tasarım alanına nasıl dağıtılacağıdır.

$$\text{x'i en aza indir} \qquad C(x) = F^T.\bar{u}(x) \tag{3.1}$$

$$\text{Sınır şartı} \qquad \frac{V(x)}{V_0} = f$$

$$F = K(x).\bar{u}(x) \tag{3.2}$$

$$0 < X_{min} \leq x \leq 1$$

Genellikle en çok kullanılan kriter esneklik C olarak gösterilmiştir. Özkütle değerleri x tasarım alandaki malzeme hacminin dağılımını kontrol etmek için kullanılır. Özkütle değerleri (0−1) aralığında değerler alır; burada sıfır, olan noktalarda malzeme yok anlamına gelir Denklem (3.1)'in ikinci ifadesi, bir hacim kısıtlamasına atıfta bulunur; burada f, optimize edilmiş yerleşimin işgal etmesi gereken Ω alanının hacim kesirleridir. Denklem (3.1)'in üçüncü ifadesinde yer alan sistemin global rijitlik matrisi K(x), özkütle değerlerinin tanım kümesini temsil eder ve denge denklemine karşılık gelir [30].

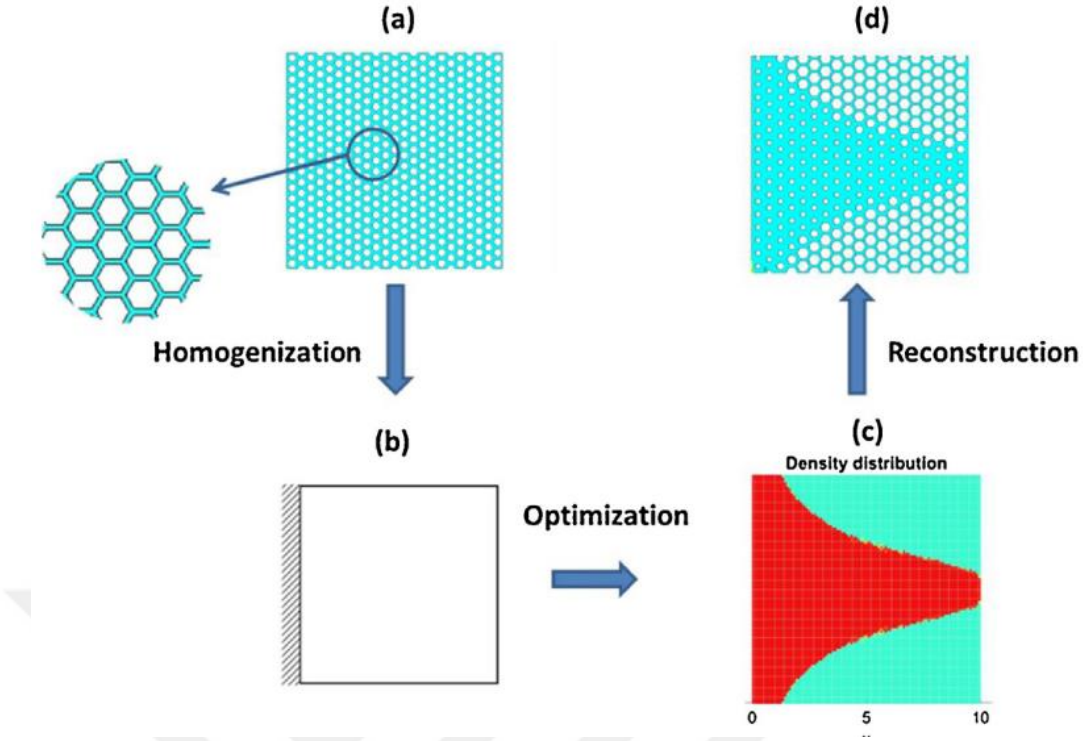
Topoloji optimizasyonu yaklaşımı, Şekil 3. 5'de gösterildiği gibi, genellikle dört ana aşamayı içerir. İlk aşama, nesnenin orijinal (yani optimize edilmemiş) 2B veya 3B geometrisini temsil eder. Bu aşamada, tasarım malzemesi özellikleri, modelin sabit yüzeyleri, dış yüklerin uygulandığı yüzeyler, dış yüklerin türü ve büyüklüğü gibi parametreler ayarlanır. İkinci aşamada ise topoloji optimizasyonu sırasında değiştirilmeyecek korunacak bölgeler, kalıptan çıkarma yönü, yük simetrisi gibi üretim kısıtlamalar belirlenir. İmal edilmesi zor olabilecek çok ince veya çok kalın bölgeler oluşmaması için parça kalınlıkları sisteme dahil edilir. Üçüncü aşama, sonlu elemanlar analizi yapıldıktan sonra temel topoloji optimize sonucunun elde edilmesidir. Bu adımda, kalan ve çıkarılan malzemenin hacim oranını hassas bir şekilde ayarlamak ve ayrıca pürüzlü kenarlar ve/veya keskin açılar oluşturan öğeleri kaldırmak veya değiştirmek için yüzey yumuşatma algoritmaları kullanmak mümkündür. Topoloji optimizasyon sürecinin son aşamasında, üretim sürecini kolaylaştırmak için "organik görünümlü" alanları optimize edilmiş modelden daha basit alanlara dönüştürmek için Bilgisayar Destekli Tasarım (CAD) yazılım araçları kullanılır. Topoloji optimizasyon modülleri geliştirilmiş pek çok bulunmaktadır. Örnek SOLIDWORKS (SolidWorks Corporation, Waltham, MA, ABD), ANSYS (ANSYS,

Inc., Canonsburg, PA, ABD) COMSOL Multiphysics® (COMSOL, Inc., Stockholm, İsveç) programları verilebilir. [30]

Yıllar boyunca birçok farklı topoloji optimizasyon yöntemi geliştirildi. Bunlar arasından yaygın kullanılan yöntemler seviye seti yöntemleri, özkütle yaklaşımı, evrimsel yaklaşımlar. Bu yöntemler dışında kullanılan çeşitli yöntemler de bulunmaktadır. Ayrıca, belirli optimizasyon problemlerini çözmeyi amaçlayan bu temel yöntemlerin kendi içinde de çeşitleri ve modifikasyonları vardır. İlk olarak kendi için de ayrık yapılarsa topoloji optimizasyonu ve Sürekli Yapılarda Topoloji Optimizasyonu olarak ikiye ayırmak mümkündür. Daha sonra Sürekli Yapılarda Topoloji Optimizasyonu kendi içinde de çeşitleri mevcuttur bu çalışmada genel olarak literatürde kullanılan yöntemler başlıklar halinde incelenmiştir.

a. Homojenleştirme Metodu

Homojenleştirme metodu ilk olarak 1988 senesinde Bendsoe ve Kikuchi tarafından ortaya atılmıştır. Bu metodun temeli malzemenin sonlu sayıda mikroskobik düzeyde boşluklu olarak modellenmesi ile oluşur. Tasarlanacak olan alanda bulunan boşlukların boyutu tespit edilir. 1991 yılında Suzuki ve Kikuchi, Bendsoe ve Kikuchi'nin metotlarına ilave problemler daha ekleyerek metodun geliştirmesi için çalışmışlardır. 1994 yılında ise Tenek ve Hagiwara izotropik ve kompozit malzemelerin özgül frekans değerlerini bu metot içeresinde kullanmıştır. 1997 senesinde Larsen'in negatif poisson oranlı malzeme ile yaptığı tasarımlar topoloji optimizasyonunda en meşhur örneklerden birdir. Maar ve Schulz 2000 senesinde homojenleştirme yönteminin geliştirmek amacıyla bir takım çalışmalar gerçekleştirmiştir.[32].



Şekil 3. 6 Homojenleştirme metodu adımları [33]

Homojenleştirme yönteminde, istenilen alanın topolojisi bulunarak malzeme dağılımı belirlenmelidir. Yapı kompozit olarak düşünülür ve homojenleştirilmeye çalışılmaktadır. Homojenleştirme yönteminde mikro yapı üç gruptan oluşmaktadır. Bu gruplar malzeme bulundurmayan (delik boyutu =1), izotropik malzeme bulunduran (delik boyutu = 0) ve ortoropik (0 < delik boyutu <1) olarak isimlendirilir. Yapının topolojisini, yapı içerisinde bulunan boşluk, gözenek ve mikro yapıların konumları ile belirlenir. Homojenleştirme yönteminde malzeme yapısındaki gözeneklerin birbirinden farklı olması sebebiyle mikro yapıların elastikiyet özellikleri yaklaşık olarak eşit olarak kabul edilir. Yapı homojenleştirme teorisine göre periyodik olarak mikro yapılardan oluştuğu ve eşdeğer malzeme özelliklerini çok düşük düzeylerde sınır süreç ile belirlendiği kabul edilir. Ek olarak malzeme özellikleri belirlenirken malzeme eksenlerinin doğrultusu göz önünde bulundurulmalıdır. Malzeme miktarı belli ise malzeme tasarım alanı içerisinde çeşitli noktalara yönelebilir. Homojenleştirme metodu ile topoloji optimizasyonu, sınır şartları verilen tasarım alanı içerisinde malzemenin uygun dağılımının bulunması olarak ifade edilebilir [34].

Homojenleştirme yönteminin en kötü yönü her bir eleman için gerekli olan tasarım parametrelerinin özkütle metoduna göre fazla olmasıdır. Ancak, birden fazla yükleme koşulunu barındıran yapısal tasarım problemlerinde başarılı bir şekilde uygulanabilmektedir[35].

b. Yoğunluk Metodu

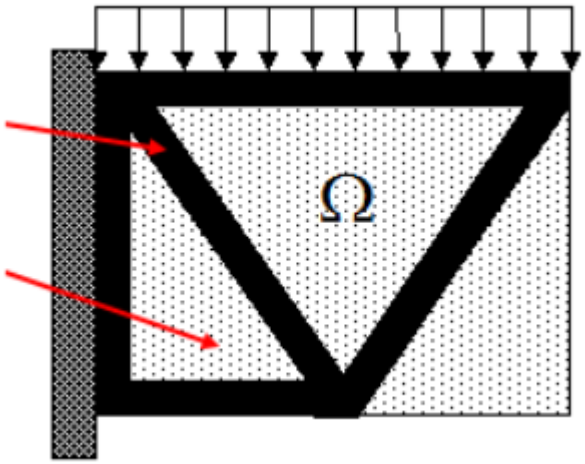
Topoloji optimizasyonu için en çok kullanılan matematiksel metot, yoğunluk metodudur. Bu yöntem literatürde Solid Isotropic Material with Penalization kısaca SIMP olarak bilinmektedir. 1988 yılında Kikuchi ve Bendsoe daha sonrasında 1992 yılında Zhou ve Rozvany yoğunluk metodunun temellerini oluşturmuştur. Yoğunluk metodu belirli yük durumları, sınır şartları, üretim koşulları ve performans gereklilikleri için belirli bir tasarım hacimi içerisinde en iyi kütle dizilimini yaratmayı amaçlar.[36]

1989 yılında Bendsoe'ın yapmış olduğu çalışmada: "en genel ayarıyla şekil optimizasyonu, tüm noktada malzeme varlığına dikkat etmeden , tüm noktalar için tasarım hacmi içinde belirlenmesinden oluşmalıdır." Topoloji optimizasyonuna yönelik konvensiyonel yaklaşım, tasarım bölgesinin, izotropik katı mikro yapılar olarak isimlendirilen sonlu elemanların meshlere bölünmesidir. Her bir mesh elemanı malzeme ihtiyaç duyulan alanları malzeme ile doldurulur veya malzemeyi yok sayabileceğiniz alanlarda malzemeleri kaldırır. Malzemenin bir tasarım alanı içindeki özkütle dağılımı ρ olarak tanımlanmıştır. Bu yoğunluk değişkeni bağımsızdır. Tüm elemanlar için ikili değer atanır:

Kütlenin olması gerektiği bölgeler (koyu renkler) $\rho_{(e)} = 1$

Kütlenin kaldırılabileceği bölgeler (açık renkler) $\rho_{(e)} = 0$

Örnek olarak, aşağıdaki Şekil 3. 7'de üzerine yük uygulanan yatay taşıyıcının en iyileştirilmiş malzeme dağılımını gösterir. $\rho_{(e)} = 1$ özkütleli elemanlar koyu renkken, $\rho_{(e)} = 0$ sahip olan bileşenler kaldırılır.



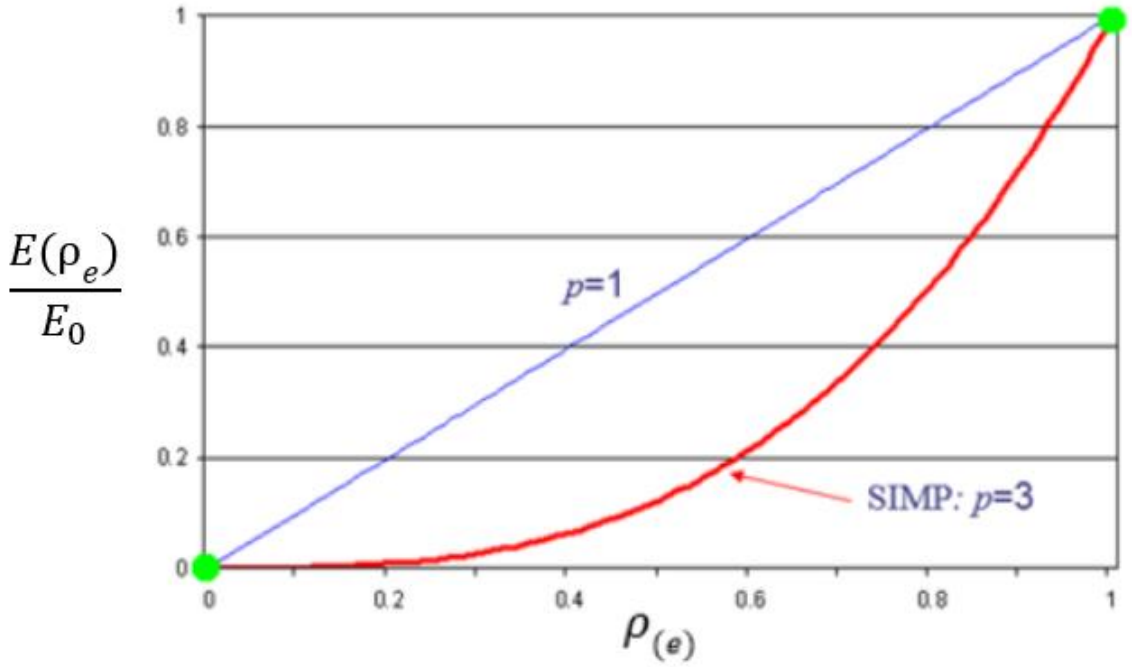
Şekil 3. 7 Yüklü bir kirişin optimize edilmiş malzeme düzenini [36]

Sürekli bağıl yoğunluk dağılımı fonksiyonunun sunulması, sorunun ikili, kapalı-açık özelliğini engeller. Tüm elemanlara atanan bağıl yoğunluk, elemanlar için ara yoğunlukların atanmasına serbestlik tanıyan en küçük değer ρ_{min} ile 1 arasında değişebilir.

ρ_{min}, sıfırdan daha büyük boş elemanlar için kullanılabilen en küçük bağıl özkütle değeridir. Sonlu eleman analizinin sayısal kararlılığını sağlanması için ρmin yoğunluk değerine ihtiyaç vardır.

Malzeme bağıl yoğunluğu devamlı farklılaşabildiğinden dolayı, her bileşenin Young modülü de devamlı değişebilir. Tüm eleman için, malzeme bağıl yoğunluk faktörü ρ_e ile belirlenen izotropik malzeme modeli E_0'ın elastikiyet modülü birbiri ile olan bağlantısı aşağıda bulunan güç yasasına göre hesaplanabilir:

$$E(\rho_e) = \rho_e^p E_0 \qquad (3.2)$$



Şekil 3. 8 E_0'ın elastikiyet modülü ve izotropik malzeme modeli arasındaki ilişki grafiği [36]

Kısıt faktörü p, 0-1 arasında yoğunluklara sahip bileşenlerin toplam sertliğe yapmış olduğu olumlu etkiyi azaltır. Kısıt faktörü, optimizasyon çözümünü kütlenin olması gerektiği koyu renkli ($\rho_e = 1$) veya kütle olmasına gerek olmayan beyaz ($\rho_e = \rho_{min}$) olan elemanlara yönlendirir. Yapılan çalışmalar, p = 3 şeklinde bir kısıt faktörü değerinin uygun olduğunu göstermektedir.

Elemanın malzeme elastikliği modülündeki düşüş, eleman sertliğinin de düşmesine sebep olmaktadır. Yoğunluk yöntemine göre parça içindeki etkin sertlik, aşağıdaki kurallara göre analizlere eklenir:

$$K_{SIMP(\rho)} = \sum_{e=1}^{N}\left[\rho_{min} + (1-\rho_{min})\rho_e^p\right]K_e \qquad (3.4)$$

Bileşen sertlik matrisi Ke olduğunda, ρ_{min}, en düşük bağın yoğunluktur, ρ_e eleman bağıl yoğunluğudur, p kısıt faktörüdür ve N dizayn hacmi içindeki bileşenlerin miktarıdır. Genel olarak optimizasyonlarda amaç, yapının mukavemet değerini en yükseğe çıkarmak veya belirli bir kütle azaltarak verimli şekilde malzeme

kullanmaktır. Sertliğin karşıtı olan uyumluluk, yapının genel yumuşaklığının veya esnekliğinin bir ölçüsüdür.

Küresel uyumluluk, eleman elastik ya da gerinim enerjilerinin toplamına eşittir. C olarak ifade edilen global uyumluluğu en aza düşürmek, global sertliği azami değerine çıkarmak anlamına gelmektedir.

Optimizasyon çözüm sistemi, yinelemeli bir işlemle, yapının küresel uyumluluğunu en aza indiren eleman yoğunluklarını bulunmasını sağlar.

$$min\ \ C(\{\rho\}) = \sum_{e=1}^{N} (\rho_e)^p [u_e]^T [K_e][u_e] \tag{3.5}$$

[ue] e elemanının düğüm yer değiştirmesi vektörü

[Ke] e elemanının sertliği

{ρ} elemanların bağıl yoğunluklarını ρ_e değeri

Tüm optimizasyon tekrarlanması sırasında, hedef kütle kısıtlaması, küresel kuvvet-sertlik dengesi ve gerekli fonksiyonel sınırlandırmalar karşılanmalıdır:

$$\sum_{e=1}^{N} \{v_e\}^T \rho_e \leq M_{hedef} \tag{3.6}$$

$$[K\{\rho\}]\{u\} = \{F\} \tag{3.7}$$

v_e, eleman hacmi

M_{hedef}, optimizasyonun hedef kütlesi.

[K{**ρ**}], bağıl yoğunluklar vektörü ile temsil edilen küresel sertlik matrisi

{u} yer değiştirme vektörü

{F} kuvvet vektörü.

$$\theta(\{\rho\},\{u\})_1 \leq \theta_1^*, \theta(\{\rho\},\{u\})_2 \leq \theta_2^*, \ldots\ldots \quad (3.8)$$

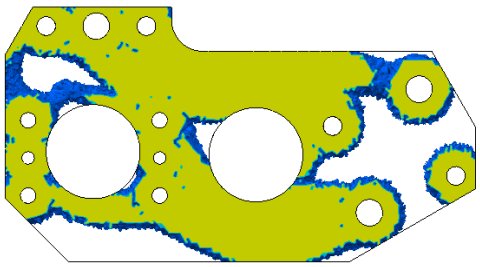
Yukarıdaki verilen eşitsizlik; gerilimler, yer değiştirmeler, rezonans frekansları vb. sınırları gibi dizayn tepkisi sınırlandırmalarını içerir.

Her tekrarlama esnasında optimizasyon algoritması, sertliği en üst düzeye çıkarmak amacıyla malzeme yoğunluklarının değişkenliğinin amaç fonksiyon üzerindeki etkisini değerlendirmek üzere bir hassasiyet analizi gerçekleştirir.

Matematiksel olarak hassasiyet analizi, malzeme yoğunluklarına göre amaç fonksiyonun türevi olarak ifade edilir:

$$\frac{dC}{d\rho_e} = -p(\rho_e)^{p-1}[u_e]^T[K_e][u_e] \quad (3.9)$$

Hassasiyet analizi yapılırken, düşük malzeme yoğunluk faktörleriyle ağırlık atanan elemanlar, yapısal önemlerini yitirir ve sonraki tekrarlamalar hesaplanırken analizden dışlanırlar. [36]



Şekil 3. 9 Satranç tahtası efekti örneği

Tüm elemanların hassasiyetini birer birer hesaplarsanız ve elemanlar arasındaki bağlantıyı göz ardı edilmesi durumunda, malzemenin süreksizliğine ve taneciklerin ana yapı ile bağlı olmamasına sebep olabilir (Şekil3.9). Bu duruma, satranç tahtası ektisi denilmektedir.

c. Evrimsel Metot

1993 yılında Y.M. Xie and G.p. Steven evrimsel yapı optimizasyonu sistemini geliştirmişlerdir. Bu optimizasyon sisteminde amaç fonksiyonuna yaklaşılıncaya kadar rastgele seçimler yapılır. Genellikle bu amaç fonksiyonu sertliğin en iyilenmesi veya ağırlığının azaltılmasıdır. Sonlu elamanlara bölünen tasarım alanı içerisindeki elemanlar sistematik bir sıra ile çıkarılıp eklenir ve amaç fonksiyonuna yakınsama gerçekleşene kadar işlem devam eder. Malzeme silme işlemi için elemanlar Von Mises gerilme metoduna göre gerinim enerjisine göre değerlendirilir. Enerji değerine göre ana tasarım hacminden çıkarılıp çıkarılmayacağı bu analizler sonucunda karar verilir. Kısaca evrimsel metodun matematiksel modellenmesi aşağıda verilmiştir[35].

$$\left.\begin{array}{l} \min f(\{x\}), \\ g_j(\{x\}) \le 0 \\ h_j(\{x\}) = 0 \\ x_j^1 \le x_j \le x_j^u \end{array}\right\} \qquad (3.10)$$

$$j = 1,\ldots,k,\ j = 1,\ldots,l,\ j = 1,\ldots,m,$$

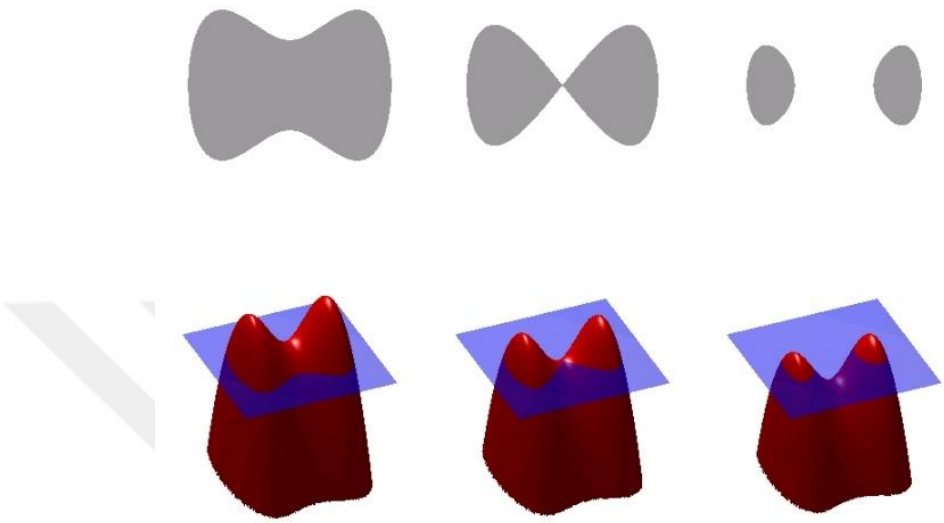
f({x}) ile gösterilen ifade amaç fonksiyonu ve {x} tasarım parametrelerinin vektörüdür. gj({x}) eşitsizlik ve hj({x}) eşitlik sınır şartlarını temsil eder. k eşitlik l ise eşitsizlik sınır şartlarının sayısıdır. x_j^u tasarım değişkeninin üst, x_j^1 ise alt sınırıdır. m toplam tasarım parametrelinin sayısını ifade eder.

Sayısal örneklerde, tasarım hacmi sonlu elemanlar kullanılarak modellenir ve problemlerin dizayn parametreleri belirtilmez. Evrimsel yapı optimizasyonunda bazı elamanlar tasarım hacminden çıkarıldığında tasarım değişkenlerinin değerleri elamanların rijitlik matrislerini de etkilemektedir. Bu nedenle, eleman kalınlıkları veya eleman elastisite modülü tasarım parametresi olarak alınabilir [35].

d. Level set yöntemi:

Level set, bir yapının topoloji optimizasyonu için kullanılan başka bir olası yoludur. Level Set yöntemini Sethian ve Wiegmann ilk olarak elastik yapılar için geliştirmişlerdir. Bu yöntemi karmaşık şekillerdeki yapıların dış hatlarının

tanımlamak için kullanmışlardır. Bu optimizasyon metodunda tasarım alanı kapalı fonksiyon olarak modellenir. Kapalı fonksiyonun malzemenin olduğu yerde pozitif ve malzemenin olmadığı yerde negatiftir. Böylece level set, bu fonksiyonun sıfır olduğu ve yapının sınırını temsil ettiği noktalar kümesidir.[26]

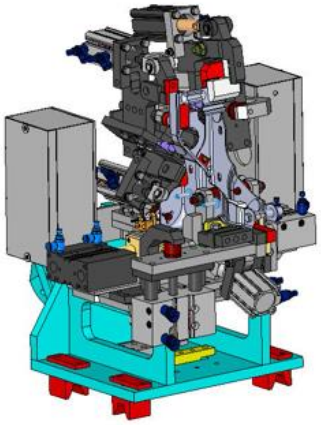


Şekil 3. 10 Level set yöntemi [37]

3.4 Yapılan Çalışmalar

3.4.1 Başlangıç Koşullarının Belirlenmesi

Bu çalışmada robot ile hareket ettirilen kaynak fikstürlerinde kullanılan bir parça ve el fikstürlerinde kullanılan bir parça üzerinde çalışılmıştır. Parçalara ilk olarak statik analiz gerçekleştirilmiştir. Ardından parçaların topoloji optimizasyon analizi yapılmış çıkan sonuca göre tasarım tamamlanmıştır. Yapılan nihai tasarımlar başlangıç tasarımına göre mukavemeti karşılaştırılmak için tekrar statik analiz yapılmıştır.



Şekil 3. 11 Robotla çalışan fikstür örneği [38]

Parça SP1-1009 robot tarafından taşınan kaynak fikstür parçası ve parça HJ-2001 el fikstüründe kullanılan parçalardır. SP1-1009 parçasının görevi pnömatik silindirleri taşımaktır. Parça özellikleri Tablo 3. 1 verilmiştir. C45 malzemeden imal edilmiştir. Malzeme hakkındaki bilgiler Tablo 3. 2 ile verilmiştir. Parça HJ-2001 el fikstüründe kenet ile bağı sağlayan bir parçadır.

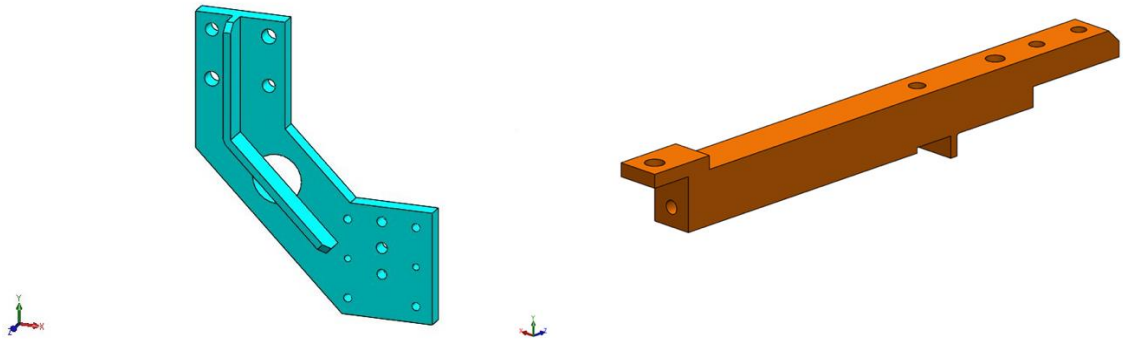
Tablo 3. 1 İlk 3B model özellikleri

	SP1-1009	HJ-2001
Kütle	0.96771kg	0.517902kg
Hacim:	0.000124065 m3	5.89187e-05m3
Özkütle:	7800 kg/m3	2680 kg/m3
Ağırlık:	9.48356 N	1.54744 N

Tablo 3. 2 Malzeme özellikleri

	1.0503 (C45)	**5052-H38, Çubuk (SS)**
Model tipi:	İzotropik Doğrusal Elastik	**İzotropik Doğrusal Elastik**
Varsayılan hata kriteri:	Maks. von Mises Gerilimi	**Maks. von Mises Gerilimi**
Akma mukavemeti:	580 N/mm^2	**255 N/mm^2**

Gerilme mukavemeti:	750 N/mm^2	**290 N/mm^2**
Elastik modül:	210000 N/mm^2	**70000 N/mm^2**
Poisson oranı:	0.28	**0.33**
Kütle yoğunluğu:	7.8 g/cm^3	**2.68 g/cm^3**
Yırtılma modülü:	79000 N/mm^2	**25900 N/mm^2**
Termal genleşme katsayısı:	1.1e-05 /Kelvin	**2.4e-05 /Kelvin**

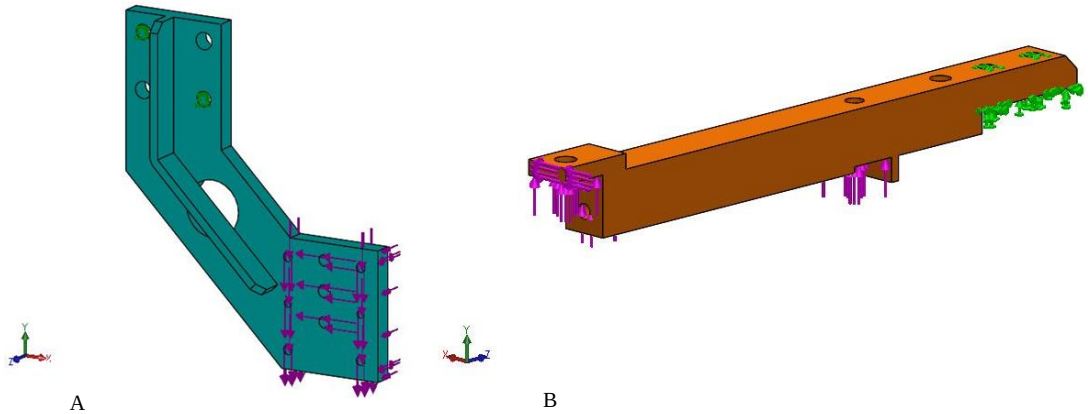


Şekil 3. 12 İlk 3D modeller

Parça SP1-1009 tespit pimleri ile sabitlenir. Parçanın üst kısmında bulunan deliklerden ise cıvatalar boş geçerek arkasında bulunan parçaya bağlanır. Bu nedenle deliklerin iç yüzeyleri yüke maruz kalmaz. Parçanın üzerinde bulunan diğer delikler ise pnömatik elemanın bağlanması için açılmıştır. Parçanın analizi sırasında tespit pimi olan noktaları sabit kabul edilmiş pnömatik sistemin bağlandığı noktalardan ağırlıklarını temsil eden yükler eklenmiştir. Parçanın zorlanma yönleri ve emniyetli bir yapı oluşturması açısından gerçekten farklı ve malzemeyi daha çok zorlayacak şekilde tayin edilmiştir. Etki eden kuvvetler Şekil 3. 13 ile gösterilmiştir. Şekil 3. 14 ile kuvvet yönleri detayı gösterilmiştir. Parça SP1-1009 için her yöndeki kuvvetler her yön için toplam 500N olarak alınmıştır.

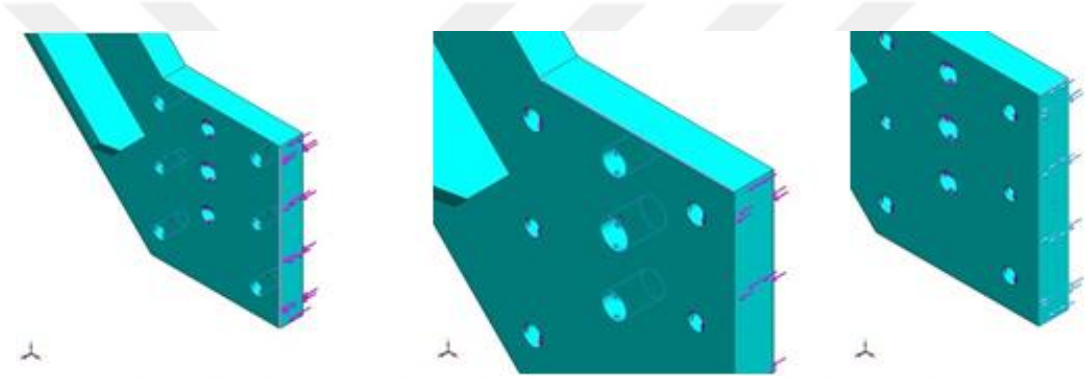
Parça HJ-2001 üzerinde bulunan cıvata delikleri sayesinde tutulur ve diğer uçtan diğer parçalara sabitlenir. Parça çalışma yapısına uygun olarak yerleştirilmiştir. +y yönde kuvvetler toplam 250N ve +x toplam 100N olarak seçilmiştir. Etki eden

kuvvetler Şekil 3. 13 ile gösterilmiştir. Şekil 3. 15 ile kuvvet yönleri detayı gösterilmiştir.

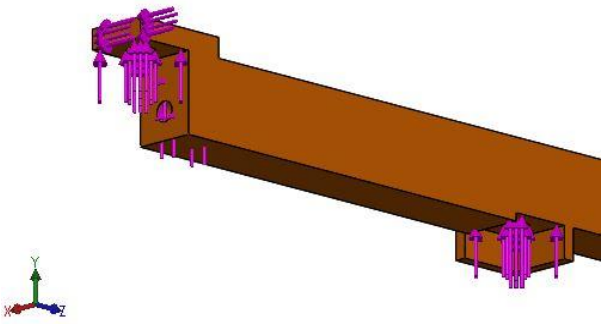


A B

Şekil 3. 13 İlk analizin yükleri ve fikstürleri



Şekil 3. 14 SP-1009 nolu parçanın yük detayları



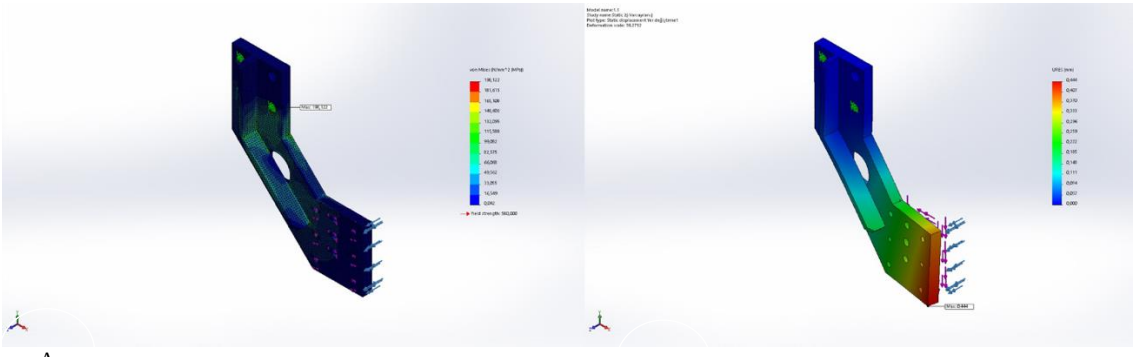
Şekil 3. 15 HJ-2001 nolu parçanın yük detayları

Kuvvet ve sabit yüzeyleri belirlenen parçaya mesh tanımlanmıştır. Parçalara ait Mesh hakkındaki detaylar Tablo 3. 3' de verilmiştir.

Tablo 3. 3 Birincil analiz için mesh bilgileri

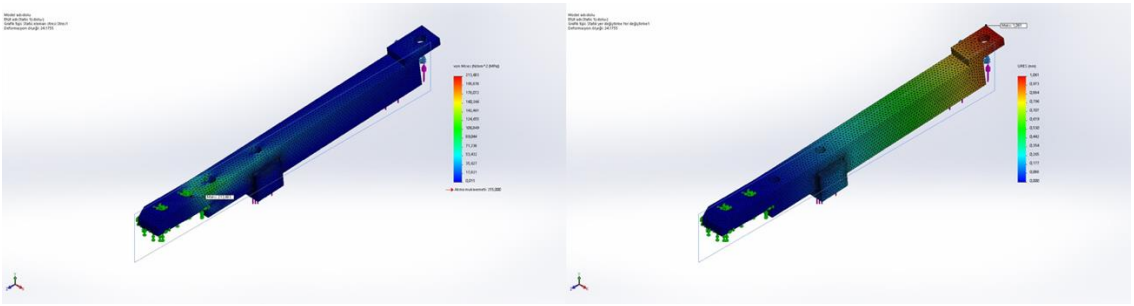
	SP1-1009	HJ-2001
Mesh tipi	**Katı Mesh**	**Katı Mesh**
Kullanılan Meshleyici:	**Standart**	**Karışık eğrilik tabanlı meshleyici**
Yüksek kaliteli mesh için jakoben noktalar:	**16 Nokta**	**16 Nokta**
Eleman Boyutu:	**2 mm**	**2 mm**
Tolerans:	**0.1 mm**	**0.4 mm**
Toplam Düğüm:	**159659**	**100264**
Toplam Elemanlar:	**105567**	**67074**

Analiz sonrasında parça SP01-009 üzerindeki maksimum gerilme 198.122 MPA ve maksimum Yer değiştirme 0.444mm olarak bulunmuştur. Parça HJ_2009 maksimum gerilme 213.683 MPa ve maksimum Yer değiştirme 1.061 mm olarak bulunmuştur



A B

Şekil 3. 16 İlk analizin çalışma sonuçları SP1-1009 stres(A) ve yer değiştirme(B) için



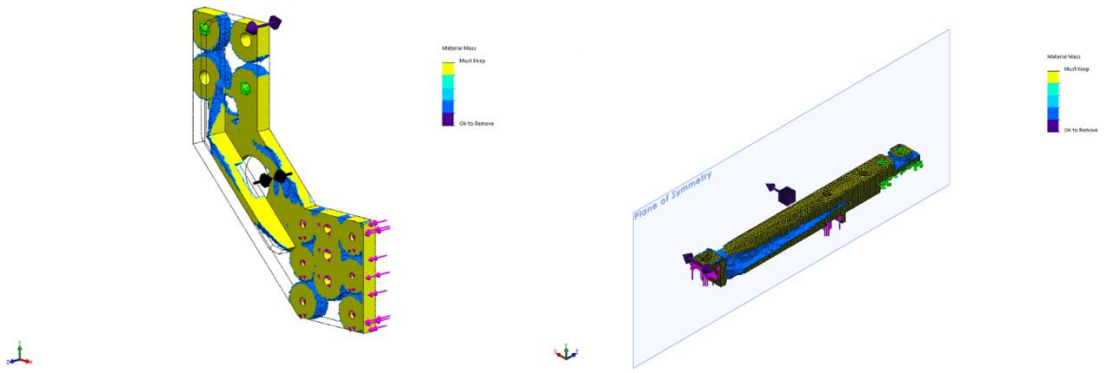
Şekil 3. 17 İlk analizin çalışma sonuçları HJ-2001 stres(A) ve yer değiştirme(B) için

3.4.2 Topoloji Optimizasyon Analizlerinin Gerçekleştirilmesi

Sonlu elamanlar analizi yapılan parçaya kuvvet ve sabitleme noktaları aynı kalacak şekilde hazırlanıp topoloji analizi gerçekleştirilmiştir.

Parça SP_1009 için Analiz sırasında parça üzerindeki delikler korunacak bölge olarak seçilmiştir. Korunmuş bölge derinliği 7.5mm olarak alınmıştır Kalınlık kontrolü 5mm seçilmiştir. Kalıptan çıkma yönü Şekil 3. 18'de gösterilmiştir. Kalıptan çıkma yönü orta düzlem her iki yön olarak seçilmiştir. Hedef ve sınırlama seçeneklerinden en iyi sertlik ve ağırlık oranı seçilmiştir. Kütle azaltma seçeneği en az %50 alınmıştır. Mesh işlemi otomatik olarak alınmış ve mesh faktör en ince seçilmiştir.

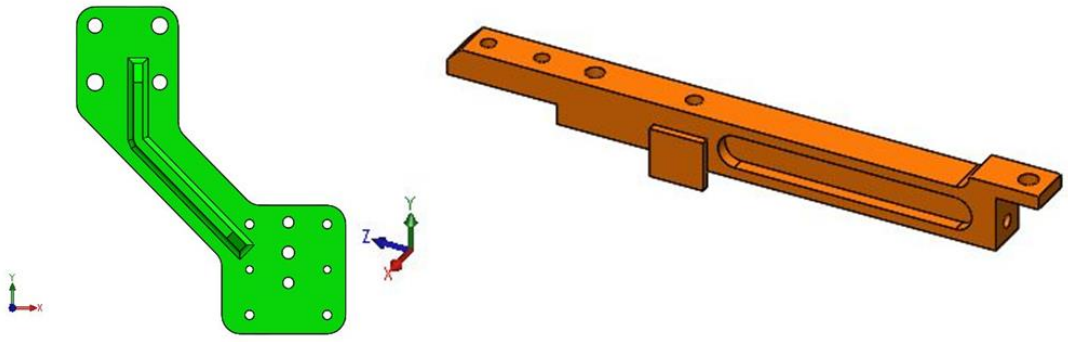
Parça HJ_2009 için Analiz sırasında parça üzerindeki delikler ve kuvvetlerin etki ettiği yüzeyler korunacak bölge olarak seçilmiştir. Korunmuş bölge derinliği 3mm olarak alınmıştır. Kalınlık kontrolü kullanılmamıştır. Kalıptan çıkma yönü Şekil 3. 18'de gösterilmiştir Kalıptan çıkma yönü orta düzlem her iki yön olarak seçilmiştir. Simetri ekseni olarak Şekil 3. 18 görülen düzlem seçilmiştir. Hedef ve sınırlama seçeneklerinden en iyi sertlik ve ağırlık oranı seçilmiştir. Kütle azaltma seçeneği en az %30 alınmıştır. Mesh işlemi otomatik olarak alınmış ve mesh faktör varsayılan olarak seçilmiştir.



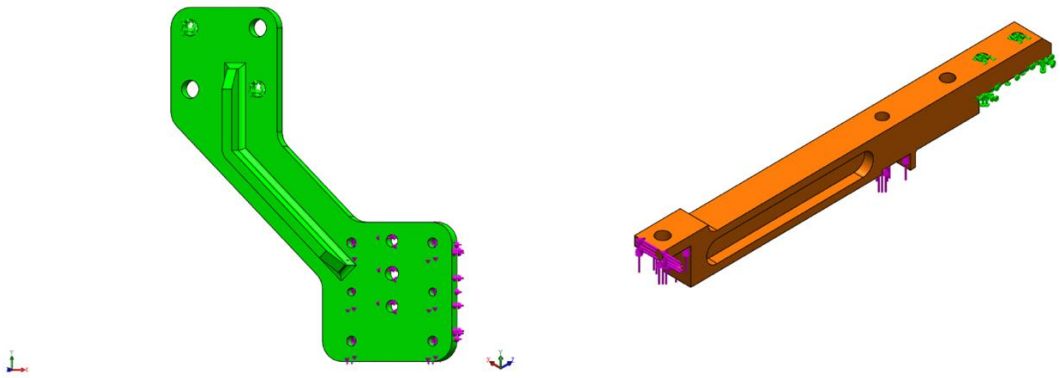
Şekil 3. 18 Topoloji optimizasyonu sonrası modellerin görünümleri

3.4.3 Parçaların Nihai tasarımlarının yapılması

Topoloji analizi sonrası ortaya çıkan parça imalatı geleneksel yöntemlerle imalata uygun değildir. Parça imalatını kolaylaştırmak için analiz sonucu çıkan model temel alınarak yeniden parça tasarımı gerçekleştirilmiştir. Kuvvet noktalı sabitleme noktaları sabit tutularak analiz tekrarlanmıştır. Parçalarının sonuçları ilk tasarımlar ile karşılaştırılmıştır.



Şekil 3. 19 Optimize edilmiş tasarımlar

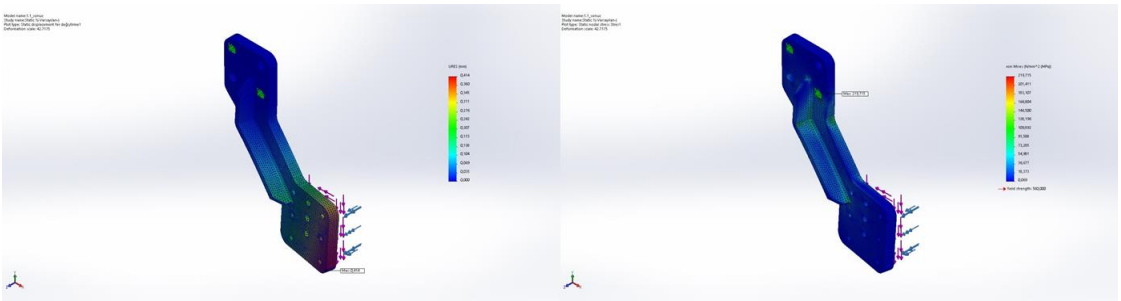


Şekil 3. 20 Nihai analizin Yükleri ve Fikstürleri

Tablo 3. 4 Son analiz için mesh bilgileri

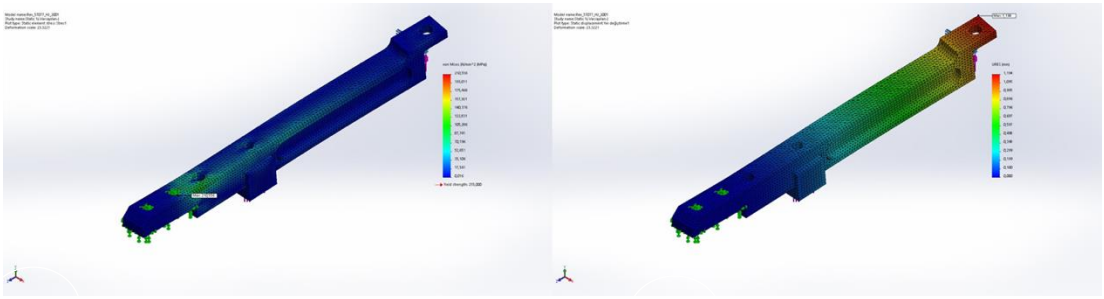
	SP1-1009	HJ-2001
Mesh tipi	**Katı Mesh**	**Katı Mesh**
Kullanılan Meshleyici:	**Standard Mesh**	**Standard Mesh**
Yüksek kaliteli mesh için jakoben noktalar:	**16 Nokta**	**4 Nokta**
Eleman Boyutu:	**2 mm**	**1.81687 mm**
Tolerans:	**0.1 mm**	**0.0908437 mm**
Toplam Düğüm:	**141929**	**92719**
Toplam Elemanlar:	**94292**	**60551**

Analiz sonrasında parça SP01-009 üzerindeki maksimum gerilme 219.715 MPA ve maksimum Yer değiştirme 0.414 mm olarak bulunmuştur. HJ-2001 nolu parçada maksimum gerilme 210.55.6MPa ve maksimum Yer değiştirme 1.194 mm olarak bulunmuştur.



A B

Şekil 3. 21 Nihai analiz için çalışma sonuçları SP01-009 stres (A) ve yer değiştirme (B)



A B

Şekil 3. 22 Nihai analiz için çalışma sonuçları HJ-2001 stres (A) ve yer değiştirme (B)

3.4.4 Topoloji Optimizasyon Sonuçları

Bu çalışmada topoloji optimizasyonu yapılan 2 adet parça için elde edilen sonuçlar aşağıdaki tabloda yer almaktadır. SP1- 1009 nolu parça için ilk durumda 967.71g olan parça analizle sonucunda 836.91g'a düşürülmüştür. Parçanın ilk durumda maruz kaldığı maksimum gerilmesi 198.122 MPa iken son durumdaki gerilmesi 219.715MPa olarak hesaplanmıştır. Parçanın imal edildiği malzeme e kullanım koşulları değerlendirildiğinde yapılan çalışmanın tehlikeli bir durum oluşturmadan kullanılabileceği görülmüştür.

Analizi gerçekleştirilen HJ-2001 nolu parça ise başlangıçta 157.90g ilen 128.46g'a düşürülmüştür. Bu ağırlık kazancı sorasında parça mukavemeti azaltılmamıştır. Bu sayede daha hafif bir imalat yapılıp yeni el fikstürü üzerinde kullanılmıştır.

Genel olarak parçalar geleneksel tasarım yöntemleri kullanıldıktan sonra topoloji optimizasyonu ile mukavemetlerinde büyük ölçüde olumsuzluklar görülmeden yaklaşık olarak %15 ağırlık kazancı elde edilmesi mümkün olacağı görülmüştür.

Tablo 3. 1 Analiz Sonuçları

	SP1-1009			HJ-2001		
	Başlangıç 3B Model	Topoloji Optimizasyon edilmiş 3D Model	Final	Başlangıç 3B Model	Topoloji Optimizasyon edilmiş 3D Model	Final
Kütle (gr) :	967.71	485.07	836.91	157.90	112.2	128.46
Azami Stres (MPa) :	198.122	-	219.715	213.683	-	210.55.6
Yer Değiştirme (mm):	0.444	-	0.414	1.061	-	1.194

4

FİKSTÜR İMALATINDA KULLANILAN ALTERNATİF MALZEMELER

4.1 Geleneksel Malzemeler

Geleneksel olarak kaynak fikstürlerinde talaşlı işlem kabiliyeti yüksek, ucuz ve ulaşılabilirliği yüksek olan imalat çelikleri tercih edilir. Bu tip malzemelere en iyi örnek C45 çeliğidir. Bu malzemenin kimyasal bileşimi Tablo 4. 1'de sunulmaktadır. Çeliğinin kimyasal bileşimi, üretici firmalar arasında düşük farklılıklar gösterebilir. C45 çeliği, alaşım elementleri içermeyen sade karbonlu bir çeliktir. Bu malzeme sınırlı kaynaklanabilirliğe sahiptir (ön ısıtma ve son işlem dahil özel kaynak prosedürleri gerektirir), kolayca işlenir ve sıcak şekillendirilir. Orta yükler altında çalışan bazı alet ve makine elemanlarının imalatında kullanılır. Bu çelik aşınmaya dayanıklı bir malzemedir [39].

Tablo 4. 1 C45 çeliği kimyasal bileşenleri [39]

Kütle (%)						
C	Mn	Si	Cr	Mo	Ni	Fe
0.42-0.50	0.5-0.8	0.1-0.4	0.3	0.10	0.3	Kalan

Kaynak fikstürlerinde özellikle yoğun ark kaynağı yapılan fikstürlerde üretim sırasında ekipmanlar üzerinde kaynak çapağı yığılması meydana gelmektedir. Kaynaklanan iş parçasından sıçrayan kaynak çapakları fikstürün şekilsel olarak etkilenmesine sebep olabilmektedir. Bu nedenle fikstürün çapağa sık maruz kalan yerleri ve iş parçasının çapaktan korunması gereken kısımları çapağı az tutan bakır paçalar ile kapatılır.

Yüksek sıcaklıklarda fiziksel özellikleri güçlü olan bu malzemenin elektrik iletkenliği de yüksektir. Bakır malzemeler ticari olarak 1930'lu yıllara kadar pek rağbet görmemiştir. Kaynak fikstürlerinde çapar konuma amaçlı kullanılan bakır CuCrZn malzemesidir. Kullanım alanı her geçen gün artan CuCrZn genellikle kontak malzemeleri, elektrik direnç kaynağı elektrotları, motor parçalarında kullanılmaktadır. Malzeme yüksek sıcaklıklarda yüksek mukavemetli oluşu ve iletkenliği sebebiyle ısıyı yaymasından dolayı kaynak çapağına da dirençlidir. Kimyasal birleşimleri Cr % 0,4, Zr %0,03, Cu % 99,57 şeklindedir[40] . Malzemeye ait mekanik özellikler aşağıdaki şekilde verilmiştir.

Tablo 4. 2 CuCrZn mekanik özellikleri [41]

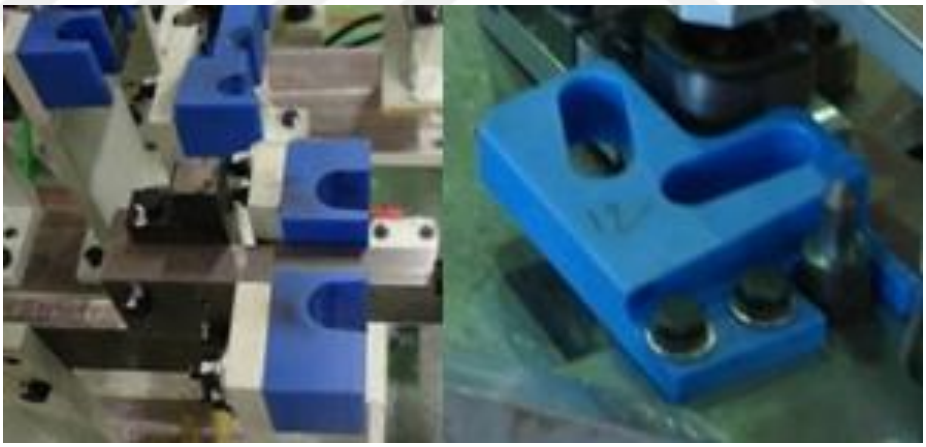
Serlik HB 30 ≤ HB	Akma Mukavemeti N/mm^2	Gerilme Mukavemeti N/mm^2	Yüzde Uzama %
175	310	400-500	8-10
Özkütle g/cm^3	Elektrik Direnci Ms/m	Isı iletkenliği W/m.K	Elastiste Modülü kN/mm^2
8,91	≥43	310-340	125

Metal malzemelere ek olarak elektrik iletkenliği düşük plastik malzemeler de fikstürler üzerinde kullanılmaktadır. Kaynak fikstürlerinin üzerindeki iş parçasına kaynak işlemi operatör tarafından gerçekleştirilen proseslerde kaynağın konumu gösteren rehber parçaların bulunması gerekmektedir. Bu parçalar kaynak elektrotu ile temas halinde olacağı için elektrik iletkenliği düşük malzemelerden seçilmelidir. Genellikle portatif kaynak tabancaları ile punta kaynak işlemi yapan kaynak fikstürlerinde kullanılırlar.



Şekil 4. 1 Portatif kaynak tabancası örneği

Bu rehber paçalar için genellikle imalatı kolay ve ulaşılabilir olması nedeniyle kestamit malzemeler tercih edilir. Aşağıdaki şekilde kaynak fikstürü üzerinde kullanılan kestemit malzemelere örnek parçalar gösterilmiştir.



Şekil 4. 2 Fikstür üzerinde kullanılan kestamit parçalar

4.2 Kompozit Malzemeler

Kompozit malzemeler; iki veya daha fazla bileşenin makro boyutta bir araya gelmesi ile oluşan ve özel yapısal özellikler gösteren malzemelerdir [42], [43]. Kompozit malzeme bileşenleri birbiri içinde çözünerek değil, fiziksel olarak ara yüzey oluşturma suretiyle bir araya gelirler ve tek bir malzeme gibi davranırlar [44].

Kompozit malzemeler sahip oldukları yüksek mukavemetin yanında düşük yoğunluk, yüksek korozyon ve aşınma direnci, yüksek yorulma mukavemeti, uzun ömürlü olması gibi özelliklerinden dolayı diğer malzemeler yerine tercih edilebilirler. Mukavemet hafiflik oranının diğer mühendislik malzemelerine göre iyi olduğu göz önüne alınarak kompozit malzemeler; uzay ve havacılık, denizcilik, otomotiv, yapı ve inşaat gibi birçok sektörde kullanım alanı bulmuştur [45].

Kompozit malzemeler üretim maliyetlerinin yüksek olması en büyük dezavantajıdır. Kaynak fikstürlerinde bu nedenle pek fazla kendine yer bulabilen bir malzeme türü değildir. Ayrıca kompozit malzemeler ile metal malzemeler ile birlikte kullanılması için gereken bağlantı sistemleri yeterince gelişmiş durumda değildir.

FRP parçalarının montajı söz konusu olduğunda, yapıştırma ve perçinleme en çok kullanılan tekniklerdir [46]. Her iki yöntemin de dezavantajları vardır. Örneğin, yapıştırma işlemi yüksek yük kapasitesine sahip olabilir fakat istenirse her iki yöntem de verimli bir sökme işlemine izin vermez. [47] Vidalama ise polimer parçaların kolay montaj ve demontajını sağlar [48].

FRP içinde bu tür bir cıvatalı bağlantıyı gerçekleştirmek için genel bir yaklaşım, yapıştırılmış veya laminasyon işlemi sırasında, bütünleşmiş dişli metal ara parçalar veya dış uçların kullanılmasıdır [49]. CTP parçalarda bu ek veya dış uçlar kullanılarak vidalı bağlantılar yapmak mümkün olsa da oldukça fazla çaba gerektirir.

Bu nedenle fikstürler üzerinde karbon esaslı kompozitlerin kullanılmadan önce malzemenin diğer metal malzemeler ile montajının nasıl yapılacağı araştırılmıştır.

Zemann R.'nin (2015) yaptığı çalışmada karbon fiber takviyeli polimere üzerine doğrudan diş çekilmesini anlatmaktadır. Diş çekilme işlemi için bir CNC işleme merkezi kullanılır. Açılan diş delikleri çekme test makinesi ile test edilir. Sonuçlar, karbon fiber takviyeli polimere doğrudan diş çekmenin mümkün olduğunu göstermektedir. Test edilen iki dişin her ikisi de M5 için ortalama 4,42 kN ve M8 diş için 6,56 kN'lik iyi bir yük kapasitesi göstermiştir. [50]

Yapılan bu çalışma esas alınarak kompozit parçaların uygun parametre ve takımlarla dişleri açılıp montajı yapılabileceğine karar verilmiştir.

4.3 Kompozit malzemelerin fikstür üzerinde kullanılması

Hafifletilmek istenen el fikstürü incelendiğinde kompozit malzemelerin kullanımı için en uygun parçanın tabla parçası olduğu görülmüştür. Tabla levha olarak imal edilen karbon esaslı kompozit malzemeler ile imalatının kolay ve diğer parçalara göre daha az maliyetli olmasından dolayı tercih edilmiştir. Ayrıca tabla el fikstürü üzerinde bulunan en büyük kütleli parça olduğundan dolayı yapılacak olan malzeme değişiklinin toplam kütleye etkisinin en yüksek olacağı parçadır. Tabla mevcut durumda 5052-H38 malzemeden imal edilmiştir. Bu durumda tabla 698 gram olarak hesaplanmaktadır. Isıl dayanımı çapak tutmama özelliği ve maliyeti göz önünde bulundurularak tabla yerine kullanılacak kompozit malzeme olarak karbon esaslı kompozit malzeme tercih edilmiştir. Kullanılan karbon esaslı malzemeye ait teknik bilgiler Tablo 4.2 de verilmiştir. Malzeme özellikleri göz önünde bulundurularak kullanılacak tabla kalınlığı 5mm seçilmiştir. Yapılan yeni tabla ağırlığı ise 253.5 g ölçülmüştür.

Tablo 4. 3 Karbon fiber teknik bilgileri

Reçine tipi	**EPOKSİ**
Ağırlığa Göre Lif İçeriği:	**>%60**
Hacme Göre Fiber İçeriği	**>%50**
Çekme Dayanımı (Elyaf Yönünde)	**>775 Mpa**
Basma Mukavemeti (Elyaf Yönünde)	**>475 Mpa**
Bükülme mukavemeti (Elyaf Yönünde):	**>725 Mpa**
Eğilme modülü (Elyaf Yönünde)	**>60 Gpa**
Yoğunluk	**>1,5 g/cm3**



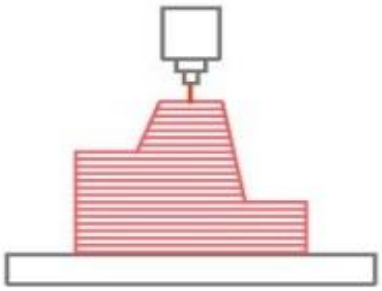
Şekil 4. 3 Kullanılan karbon fiber malzeme

5

EKLEMELİ İMALAT

5.1 Eklemeli İmalat Yöntemlerinin Fikstürler Üzerinde Kullanılması

Eklemeli imalat tasarlanmış bir parçanın katmanlar halinde kendi üzerine yığılarak üretilmesi işlemleridir. Bu imalat yöntemi ile karmaşık şekilli parçalar düşük maliyetler ile üretilebilmektedir. Karışık geometriye sahip bazı parçalar ise eklemeli imalat yöntemleri ile üretilmesi yüksek maliyetli olmalarına rağmen başka bir imalat yöntem ile üretilmesi imkansız olduğu için bu maliyetleri göz ardı edilerek eklemeli imalat ile üretilmektedir. Uygun maliyet ve hızı sebebiyle bazı alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Fakat bazı malzemelerin bu yöntem ile kullanılması hem kalitesel hem de maliyet açısından dezavantajları mevcuttur.



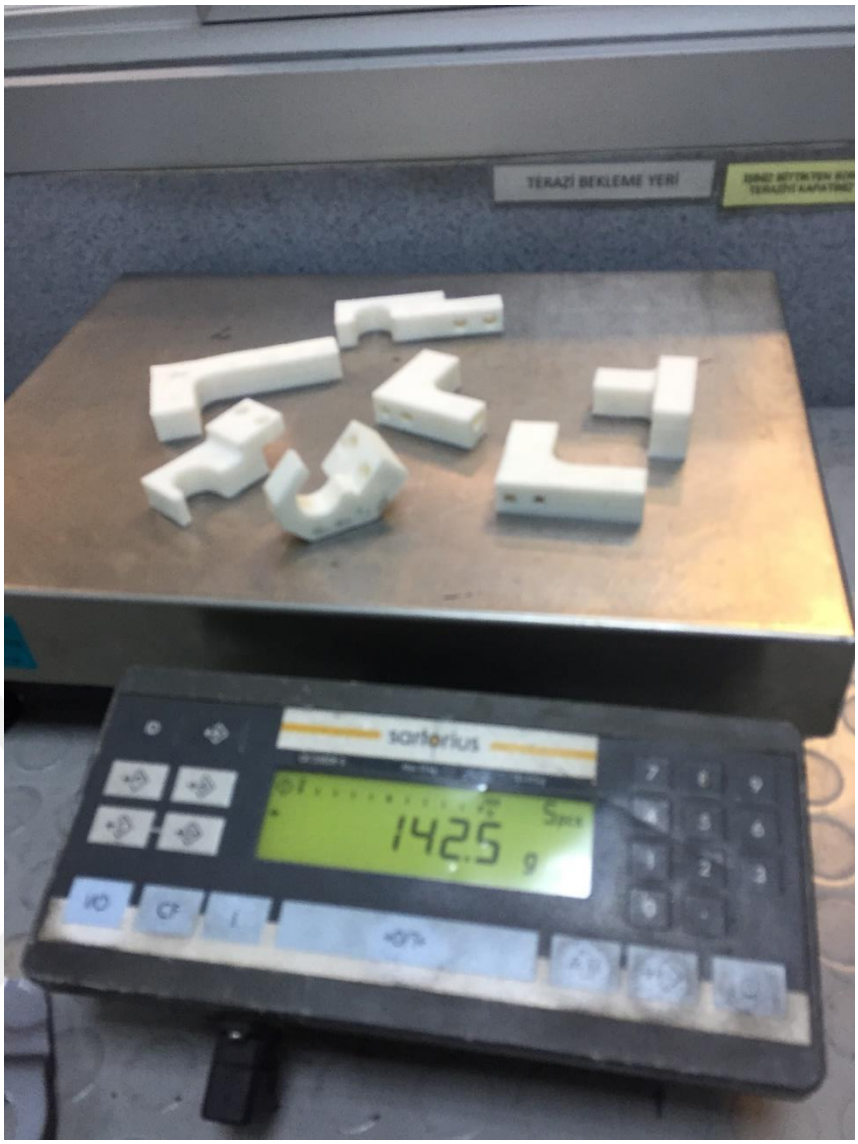
Şekil 5. 1 Eklemeli imalat yöntemi temsili

Eklemeli imalat yöntemleri, seri imalat olarak üretilmeyen kaynak fikstürleri için kullanılabilir, ancak metal bazlı eklemeli imalat usulleri henüz ekonomik görünmemektedir. Günümüzde, otomotiv gövde parçaları üretiminde kullanılan kaynak fikstürleri, genel olarak önce su jeti veya lazer ile kesme ve ardından talaşlı imalat teknolojileri kullanılarak üretilmektedir. Ancak talaşlı imalat teknolojilerinin iki ana nedenden dolayı kaynak fikstürü imalatında dezavantajlı durumdadır. Özellikleri nedeniyle, talaşlı imalat teknolojileri genellikle takımlar, kalıplar veya bazı aşırı durumlarda özel makinelere ihtiyaç duymaktadır. Her fikstürün

kullanılacağı parçaya özgü olması nedeniyle genellikle benzersiz olan Body In White (BIW) kaynak fikstürleri talaşlı imalar için yüksek üretim maliyetleri anlamına gelir. İkincisi, otomobil gövdesi üretimi, üretim süreci açısından çok karmaşıktır ve bu karmaşıklık, kullanılan kaynak fikstürlerine de yansımaktadır. Zor kenet pozisyonları, hacim kısıtlamaları veya hareketli parçalar gibi tasarım talepleri, kaynak fikstürü elemanlarının çok karmaşık şekillerine sahip olmasına neden olur. Karmaşık parçalar pahalı olduğundan ve farklı teknolojilere sahip uzun süreç zincirleri gerektirdiğinden, talaşlı imalat bu elemanların üretimi için verimli değildir. Öte yandan eklemeli imalat teknolojileri, düşük üretim hacimlerinde yüksek karmaşıklığa sahip parça üretmenin çok iyi kurulmuş bir yoludur. [51]

5.2 Eklemi İmalat İle Üretilen Parçalar

Bu çalışmada optimize edilen kaynak fikstürü üzerinde bulunana kaynak makinesinin konumlandırılmasına yarayan kestamit parçalar eklemeli imalat yöntemleri ile tekrar üretilmiştir. Bu sayede parçaların üretimi sırasında bal peteği yapısı sayesinde parçaların iç kısımlarında boşluklar yaratılmıştır. Bu sayede daha önce kestamit kullanılarak talaşlı imalat ile üretilen parçalar eklemli imalat ile %30 daha hafif üretilmiştir.



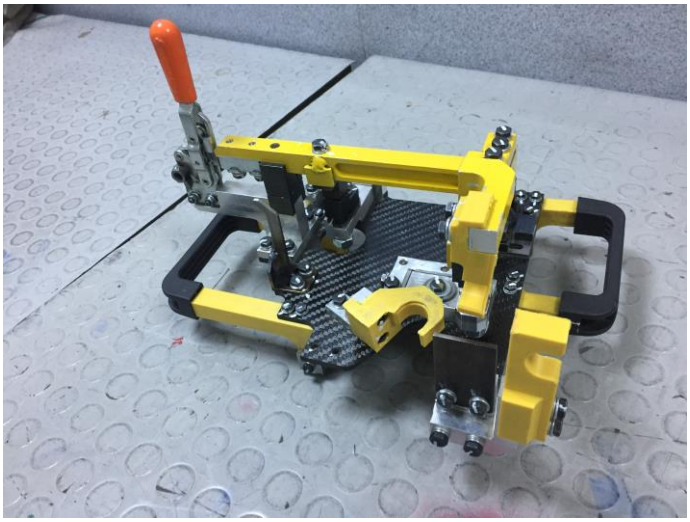
Şekil 5. 2 Eklemeli imalat ile üretilen parçalar

6

SONUÇ VE ÖNERİLER

SP1- 1009 nolu parça için ilk durumda 967.71g olan parça analizle sonucunda 836.91g'a düşürülmüştür. Parçanın ilk durumda maruz kaldığı maksimum gerilmesi 198.122 MPa iken son durumdaki gerilmesi 219.715MPa olarak hesaplanmıştır. Analizi gerçekleştirilen HJ-2001 nolu parça ise başlangıçta 157.90g ilen 128.46g'a düşürülmüştür. Bu ağırlık kazancı sorasında parça mukavemeti azaltılmamıştır. Bu sayede daha hafif bir imalat yapılıp yeni el fikstürü üzerinde kullanılmıştır. Genel olarak parçalar geleneksel tasarım yöntemleri kullanıldıktan sonra topoloji optimizasyonu ile mukavemetlerinde büyük ölçüde olumsuzluklar görülmeden yaklaşık olarak %15 ağırlık kazancı elde edilmesi mümkün olacağı görülmüştür.

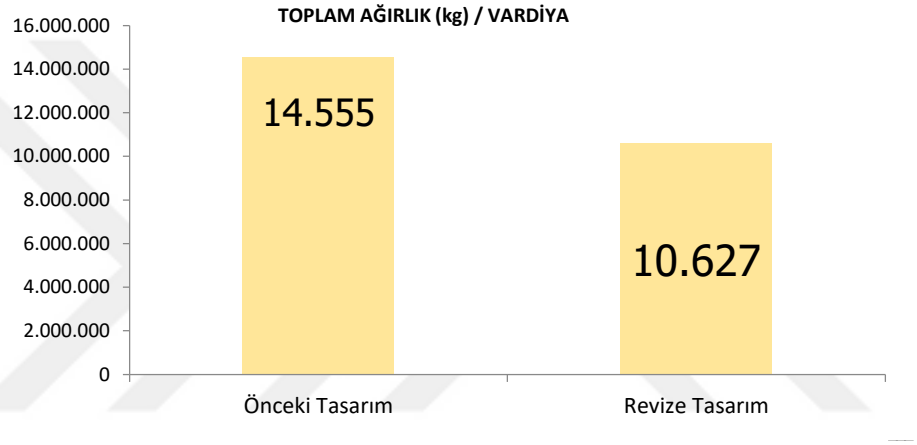
Yenilenen el fikstüründe kullanılan karbon esaslı kompozit sayesinde el fikstüründe yaklaşık olarak 450g'lık bir ağırlık kazancı elde edilmiştir. El fikstürünün başlangıçtaki ağırlığı göz önüne alınarak bu durumun ciddi ölçüde fark yarattığı görülmüştür. Eklemeli imalat sayesinde ise daha ucuz ve %30 daha hafif malzemeler üretilmiştir. Yapılan çalışmalar sonucunda üretimi gerçekleştirilen fikstüre ait fotoğraf aşağıda verilmiştir.



Şekil 6. 1 Optimizasyonu tamamlanan kaynak fikstürü

Optimizasyonu yapılan fikstür ile parça imalatı sırasında kaynak 4 kere tezgah üzerinden alınıp geri konması gerekmektedir. İş parçası 1 adet vardiya sırasında 618 adet üretilmesi gerekmektedir. Bu durumda operatör tarafından fikstür bir vardiya süresince 2472 defa kaldırılması gerekmektedir. Bunu fikstürün ve iş parçasının toplan ağırlığı olan 5888 gram ile çarpılması durumunda operatörün günlük olarak 14.555 kg yüke maruz kaldığı görülmüştür.

Yapılan analizler sonucunda fikstür ağırlığı 2988grama düşürülerek operatörün vardiya başına maruz kaldığı yük 10.627kg'ye çekilmiştir.



Şekil 6. 2 Ergonomi analizi

Topoloji etüdü yöntemi kullanılarak tasarımların optimizasyonu sağlanmıştır. Bundan sonraki fikstür tasarımlarda büyük ve ağır yapıların yerine aynı dayanıma sahip daha küçük ve hafif yapıların kullanılabilmesinin önü açılmıştır.

KAYNAKÇA

[1] Wanga, H., Rong, Y., Li, H., (2008). 'Case Base Reasoning Method for Computer Aided Welding Fixture Design', Computer Aided Design 40, 1121–1132.

[2] Suthar, J., Patel, K., M., Luhana, S., (2013). 'Design and Analyses of Fixture for Welding an Exhaust Impeller', Procedia Engineering 51, 514-519.

[3] Hoffman, E., (2003). 'Jig and Fixture Design', Delmar Celgage Learning, 5th Edition, ISBN: 1401811078.

[4] Sevengil, O., Korkut, E., Akdikmen, O., (2019). 'Otomotiv Sektöründe Kullanılan Kaynak Fikstürlerine Genel Bakış', Makinatek Dergisi (http://makinatek.com.tr/uncategorized/173-otomotiv-sektorunde-kullanilan-kaynak-fiksturlerine-genel-bakis/)

[5] Wanga, H., Rong, Y., Li, H., Shaun, P., (2010). 'Computer Aided Fixture Design: Recent Research and Trends', Computer Aided Design, Volume 42, Isuue 12, 1085-1094.

[7] Rong, Y., Huang, S. Hou, Z.(2005). 'Advanced Computer-aided Fixture Designn', Elsevier Academic Press, ISBN: 0125947518

[8] Bakker, O., J., (2012). 'Active Fixturing: Literature Review and Future Research Directions', International Journal of Production Research, Vol. 51, No. 11, 3171-3190.

[9] Koca, M. (2006). Bilgisayar Destekli Fikstür Tasarımı ve Analizi. (Yüksek Lisans tezi). T.C. Yükseköğretim Kurulu Dokümantasyon Merkezi. (223464)

[10] Venkataraman, K., (2015). Design of Jigs, Fixtures and Press Tools. India: John Wiley & Sons Ltd.

[11] Y. Karahasanoğlu, Burak Altınok, B., Kaynak İşleminde Kullanılan İla[23]ve Donatımlar – Kaynak Teknolojisi 3. Ulusal Kongresi Bildiriler Kitabı, 321.

[12] Abugh, A., Kunchy, I.K., (2013) Microstructure and mechanical properties of vibrated castings and weldments: A review. Journal of Engineering Studies and Research – Volume 19, No.1, 7-12.

[13] Kampker, A., Bergweiler, G., Hollah, A., Lichtenthaler, K., Leimbrink, S., (2019). Design and testing of the different interfaces in a 3D printed welding jig. 52nd CIRP Conference on Manufacturing Systems, 45-50.

[14] Wang, H., Rong, Y., Li, H., Sahun, P., (2010). Computer aided fixture design: Recent research and trends. Elsevier, 42 (12), 1059-1240, https://doi.org/10.1016/j.cad.2010.07.003

[15] Vural, M., Muzafferoglu, H.F., Tapıcı,U.C., (2007). The effect of welding fixtures on welding distortions. Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering , 20(2)

[16] Ma, N., Huang, H., Murakawa, H.,(2015). Effect of jig constraint position and pitch on welding deformation. Journal of Materials Processing Technology, 221; 154-162, https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2015.02.022

[17] Tapıcı, U.Ç., (2006). Robotla Kaynak Uygulaması İçin Fikstür Tasarımı Ve Kaynak Distorsiyonlarının Analizi. (Yüksek Lisans tezi). T.C. Yükseköğretim Kurulu Dokümantasyon Merkezi. (223123)

[18] Williams, I, N., (2006). Design And Implementation Of A Fixture For Robotic Welding. (Yayımlanmamış Lisans Tezi). California Polytechnic State University. California.

[19]https://www.yaskawa.eu.com/en/products/robotics/peripherals/positioners/productdetail/product/rwv2-compact/ (Erişim Tarihi: 01.10.2019)

[20] Türkay, M. (2011). Optimizasyon Modelleri ve Çözüm Metodlari. URL: http://home. ku. edu. tr/~ mturkay/indr501/Optimizasyon. pdf.

[21] T. Şahin, “Bozkurt Optimizasyon Tekniği Kullanılarak Rulmanların Çok Amaçlı Tasarım Optimizasyonu,” Yüksek lisans tezi, Endüstriyel Tasarım Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gazi Üniversitesi, Ankara, Türkiye, 2019.

[22] Ö. Höke, “Hafif Ticari Araçlarda Kullanılan Motor Traversinin Yapısal Optimizasyonu,” Yüksek lisans tezi, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Konstrüksiyon Programı, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul Türkiye, 2016.

[23] Leiva, J. P., Watson, B. C., & Kosaka, I. (2007, May). A comparative study of topology and topometry structural optimization methods within the genesis software. In 7th World Congress of Structural and Multidisciplinary Optimization (Vol. 2, pp. 1-5).

[24] Leiva, J. P. (2003, May). Methods for generating perturbation vectors for topography optimization of structures. In 5th World Congress of Structural and Multidisciplinary Optimization, Venice, Italy.

[25] Leiva, J. P. (2011, November). Structural optimization methods and techniques to design efficient car bodies. In Proceedings of international automotive body congress.

[26] Göv, İ., & Kütük, M. A. (2008). Topoloji Optimizasyonunda Eleman Silme Metodunun Uygulanmasi.

[27] Aliyi, A. M., & Lemu, H. G. (2019, October). Case study on topology optimized design for additive manufacturing. In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering (Vol. 659, No. 1, p. 012020). IOP Publishing.

[28] C. Özdirikman, "Topoloji Optimizasyonu Yöntemi İle Ağırlığı Azaltılmış, Yeni Bir Araç Taşıyıcı Yüksek Konteyner Kavramsal Tasarımı," Yüksek lisans tezi, Gemi İnşaatı ve Gemi Makinaları Mühendisliği Anabilim Dalı, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, 2018.

[29]https://www.solidworks.com/sites/default/files/2018-08/DS-18031-Designer-to-Analyst-Topology-Whitepaper.pdf (Erişim Tarihi: 05.11.2019)

[30] Slavov, S., Bakalova, M., K., (2019). 'Optimizing Weight of Housing Elements of Two-Stage Reducer by Using the Topology Management Optimization Capabilities Integrated in Solidworks: A Case Study', Machines 2019, 7-9.

[31] Ghandriz, T., Führer, C., Elmqwist, H., (2017). 'Structural Topology Optimization of Multibody Systems', Multibody Syst Dyn (2017) 39:135–148.

[32] Browne, P.A., (2013). Topology Optimization of Linear Elastic Structures, Doktora Tezi, University of Bath Department of Mathematical Sciences.

[33] Wang, X., Zhang, P., Ludwick, S., Belski, E., & To, A. C. (2018). Natural frequency optimization of 3D printed variable-density honeycomb structure via a homogenization-based approach. *Additive Manufacturing*, *20*, 189-198.

[34] Bendsøe, M., P., Sigmund O., *Topology Optimization: Theory, Methods, and Applications*, New York, Springer-Verlag: Berlin Heidelberg, (2003).

[35] Gunwant, D., Misra, A., (2012). "Topology Optimization of Sheet Metal",MIT International Journal of Mechanical Engineering, ISSN: 2230-7680.

[36]http://help.solidworks.com/2022/Turkish/SolidWorks/cworks/c_simp_method_topology.htm?id=af3e9063195f499aa5a840ba1f026691#Pg0 (Erişim Tarihi: 11.10.2021)

[37] Perez, D., H., "Level Set Method Applied to Topology Optimization" , https://www.upct.es/goe/level-set-slides.pdf., (Erişim Tarihi: 11.10.2021)).

[38] http://www.toyotetsu.com.tr/Uretim/production_design (Erişim Tarihi: 15.10.2019)

[39] Pashechko, M., Dziedzic, K., & Jozwik, J. (2020). Analysis of wear resistance of borided steel c45. *Materials*, *13*(23), 5529.

[40] Anık S., Oğur A., Vural M. , Turan H. (2016). Direnç Nokta Kaynak Elektrodu Ömrünün Deneysel Analiz, kaynak teknolojisi 2. ulusal kongresi.

[41] E. Korkut, "Çoklu Nokta Kaynağı Elektrodu Tasarımı Ve Uygulaması," Yüksek lisans tezi, Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Sakarya, Türkiye, 2021.

[42] Army, MR., (2012). "Composite Materials Handbook (CMH-17) Volume 3, Polymer Matrix Composites: Materials Usage, Design, and Analysis", Canada.

[43] Aysu, E., (2011). Şehir Planlamasında Yoğunluk, Yıldız Teknik Üniversitesi Yayınları, 214, İstanbul (baskıda).

[44] Laurenzi, S. ve Marchetti, M., (2012). Advanced Composite Materials, Chapter 7, Department of Astronautic Electrical and Energy Engineering, Sapienza Università di Roma, Italy

[45] Aström, T. B., Manufacturing of Polymer Matrix Composites, Department of Aeronautics, KTH, Sweden.

[46] H. Schürmann, Construction with Fibre Reinforced Polymers, „Konstruieren mit Faser-Kunststoff-Verbunden“, Springer, Berlin, Heidelberg, New York, 2007

[47] R. Zemann, Preparation of Bonding Surfaces at FRP Parts, “Präparation von Klebeflächen an Faserverbundbauteilem”, Jahrbuch Oberflächentechnik, Band 70, Eugen G. Leuze Verlag KG, D-88348 Bad Salgau, 2014, pp.115-124

[48] E. Witten, Handbook Fibre Reinforced Polymers, „Handbuch Faserverbundkunststoffe“, Vieweg + Teubner | GWV Fachverlag GmbH, Wiesbaden, 2010

[49] H. Schürmann, Construction with Fibre Reinforced Polymers, „Konstruieren mit Faser-Kunststoff-Verbunden“, Springer, Berlin, Heidelberg, New York, 2007

[50] ZEMANN, Richard. Manufacturing of threads direct into a carbon fibre reinforced polymer. Materials Today: Proceedings, 2016, 3.4: 1226-1229.

[51] Schuh, G., Bergweiler, G., Lichtenthäler, K., Fiedler, F., & de la Puente Rebollo, S. (2020). Topology Optimisation and Metal Based Additive Manufacturing of Welding Jig Elements. *Procedia CIRP*, *93*, 62-67.

TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR

Konferans Bildirileri

1. Özer, K., İstif, İ., Barut, E., (2019). Investıgatıon Desıgn Of Weldıng Fıxture And Jıg Parts For Topology Optımısatıon, 5th Internatıonal Conference On Advances In Mechanıcal Engıneerıng. İstanbul, Türkiye.