

**BİR OTOMOBİL PARÇASINDA LAZER
SERTLEŞTİRME TEKNİĞİ İLE DAYANIM
ÖZELLİKLERİNİN ARTIRILMASI**

Ahmet ONAYLI



T.C.
BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**BİR OTOMOBİL PARÇASINDA LAZER SERTLEŞTİRME TEKNİĞİ İLE
DAYANIM ÖZELLİKLERİNİN ARTIRILMASI**

AHMET ONAYLI
0000-0001-8418-4289

Prof. Dr. Ferruh ÖZTÜRK
(Danışman)

YÜKSEK LİSANS TEZİ
OTOMOTİV MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA – 2021

TEZ ONAYI

Ahmet ONAYLI tarafından hazırlanan "BİR OTOMOBİL PARÇASINDA LAZER SERTLEŞTİRME TEKNİĞİ İLE DAYANIM ÖZELLİKLERİNİN ARTIRILMASI" adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Bursa Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Otomotiv Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Danışman : Prof. Dr. Ferruh ÖZTÜRK
0000-0001-5767-8312

Başkan Prof.Dr. Ferruh ÖZTÜRK
0000-0001-5767-8312
Bursa Uludağ Üniversitesi,
Mühendislik Fakültesi,
Otomotiv Mühendisliği
Anabilim Dalı

İmza



Üye Prof.Dr. Necmettin KAYA
0000-0002-8297-0777
Bursa Uludağ Üniversitesi,
Mühendislik Fakültesi,
Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

İmza



Üye Dr. Öğr. Üyesi İsmail ÖZTÜRK
0000-0003-2641-5880
Pamukkale Üniversitesi
Teknoloji Fakültesi,
Otomotiv Mühendisliği Anabilim Dalı

İmza



Yukarıdaki sonucu
onaylarım

Prof. Dr. Hüseyin Aksel EREN
Enstitü Müdürü

.....



Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.



08/02/2021

Ahmet ONAYLI

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

BİR OTOMOBİL PARÇASINDA LAZER SERTLEŞTİRME TEKNİĞİ İLE DAYANIM ÖZELLİKLERİNİN ARTIRILMASI

Ahmet ONAYLI

Bursa Uludağ Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Otomotiv Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Ferruh ÖZTÜRK

Otomotiv sektöründeki teknolojik gelişmeler, yenilikçi arayışlar ve araç hafifletme çalışmaları CO₂ emisyonlarını azaltmak için her geçen gün hız kazanmaktadır. Bu isterleri karşılayabilmek için parçanın tasarım değişikliklerinin yanı sıra parça kalınlığını azaltmak için yeni nesil yüksek mukavemetli çelik sac malzeme kullanımını da zorunlu hale getirmiştir.

Yüksek mukavemetli çelik sac malzemelerin maliyetleri, geleneksel çelik sac malzemelerine kıyasla daha yüksek olmaktadır. Aynı zamanda, mukavemetin artırılması çoğu zaman şekillendirilebilirliğin azalmasına neden olmaktadır. Bu sebeple, otomotiv üreticileri ve tedarikçileri sektörde daha rekabetçi olabilmek ve parça şekillendirilebilirliğini arttırabilmek adına farklı çözüm önerileri geliştirmektedir.

Bu tez kapsamında, yüksek mukavemetli sac kullanımına alternatif çözüm önerilerinden biri olan lazer sertleştirme konusuna yer verilmiştir. Bu doğrultuda, bir otomotiv pasif güvenlik sistemi elemanı ile bir süspansiyon parçasının lazer sertleştirme tekniği ile dayanım özelliklerinin iyileştirilmesi gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, Taguchi deney tasarımı ve Yanıt Yüzey yöntemi kullanılarak lazer sertleştirme prosesinde kullanılan parametrelerin en iyileme çalışmaları yapılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Lazer sertleştirme tekniği, Taguchi deney tasarım yöntemi, Yanıt Yüzey yöntemi

2021, ix + 60 sayfa.

ABSTRACT

MSc Thesis

Enhancement of strength characteristics of a vehicle part using laser hardening technique

Ahmet ONAYLI

Bursa Uludağ University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Automotive Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Ferruh ÖZTÜRK

In automotive industry; technological trends, innovations and vehicle weight reduction studies are accelerated day by day for CO₂ emission reduction. Besides the design changes on the products, the use of new generation high strength steel sheet materials becomes mandatory in order to minimize the thickness.

The costs of high strength steel sheet materials are higher than traditional sheet steel materials. At the same time, increasing the strength often causes to make formability difficult. For this reason, automotive manufacturers and suppliers develop different solution proposals to be more competitive in the sector and to increase part formability.

In the scope of this thesis, laser hardening, which is one of the alternative solutions to the use of high-strength sheet metal, has been taken place. Accordingly, an automotive passive safety system product and a suspension part's strength properties have been improved via laser hardening technique. In addition, optimization studies of the parameters used in the laser hardening process have been carried out using the Taguchi experimental design and the Response Surface method.

Key words: Laser hardening technique, Taguchi experimental design method, Response surface method

2021, ix + 60 pages.

TEŐEKKÖR

Tez alıőmamda; Bir otomobil parçasında lazer sertleştirme tekniği ile dayanım özelliklerinin artırılması çalıőmasını gerçekleőtirdim.

Hem yüksek lisans tez konusu olarak çalıőmama izin veren hem de tez çalıőmamda; lisans ve lisanüstü öğrenim hayatım boyunca bana destek verip yol gösteren, motive eden değerli danışman hocam sayın Prof. Dr. Ferruh ÖZTÜRK'e teőekkürlerimi sunarım.

Gerek iç hayatım gerekse öğrenim hayatım boyunca bana sürekli destek veren ve her koőulda desteklerini esirgemeyen aileme teőekkürlerimi sunarım.

Ahmet ONAYLI
08/02/2021

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	v
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ	ix
1. GİRİŞ.....	1
2. KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ARAŞTIRMASI	2
2.1. Martenzit Yapı	2
2.1.1. Martenzit Yapı Özellikleri	2
2.1.2. Martenzit Oluşum Mekanizması	4
2.1.3. Mikroyapı.....	5
2.1.4. Martenzit Yapı Oluşumunda Martemperleme Uygulanması	5
2.1.5. TTT Diyagramı	6
2.2. Sertlik	7
2.2.1. Brinell Sertlik Ölçme Yöntemi	8
2.2.2. Vickers Sertlik Ölçme Yöntemi	10
2.2.3. Rockwell Sertlik Ölçme Yöntemi	11
2.2.4. Mikrosertlik Ölçme Yöntemi	12
2.3. Lazer ve Çesitleri	12
2.3.1. Lazer.....	12
2.3.2. Diyot Lazerler	13
2.4. Lazer Sertleştirme Yöntemi	15
3. MATERYAL ve YÖNTEM.....	21
3.1. Malzeme Özellikleri.....	21
3.2. Lazer Sertleştirme Uygulanacak Numune Ölçüleri	22
3.3. Lazer Sertleştirme Prosesine Etki Eden Parametreler ve Seviyeleri.....	23
3.4. Malzemenin ve Uygulanacak Parametrelerin Belirlenmesi	24
3.5. Deneysel Tasarım Yöntemleri.....	26
3.5.1.Taguchi Deney Tasarım Yöntemi	26
3.5.2. Anova Analiz Yöntemi	30
3.5.3. Yanıt Yüzey Yöntemi	31
4. BULGULAR	42
4.1. Çarpışma Kutusu Üzerinde Lazer Sertleştirme Çalışması	42
4.2. Salıncak Kolu Üzerinde Lazer Sertleştirme Çalışması	46
5. TARTIŞMA ve SONUÇ	56
KAYNAKLAR	57
ÖZGEÇMİŞ.....	59

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler	Açıklama
b_{ii}	Kuatratik katsayılar
ε	Uygun hata
J	Joule
Fe	Demir
C	Karbon
S	Kükürt
Mn	Mangan
Cu	Bakır
P	Fosfat
N	Nikel
Si	Silisyum
Ti	Titanyum
γ	Östenit fazı
F	Uygulanan kuvvet
D	Bilye Çapı
d	İz çapı
σ_{ζ}	Çekme dayanımı
Kg	Kilogram
C	Malzeme cinsi
CO ₂	Karbon dioksit
N	Newton
Mm	Milimetre
Kw	Kilowatt
mm ²	Milimetre kare
MPa	Megapaskal
y	Yanıt
x_{iu}	Denklemler Parametreleri
b_o	Regresyon denklem sabiti
b_i	Doğrusal katsayılar
b_{ij}	Etkileşim katsayılar
d _{ort}	İzin köşegen ortalaması
d1	Köşegen uzunluğu
E	Penetrasyon derinliğinin

Kısaltmalar	Açıklama
KYM	Kübik yüzey merkezli
KHM	Kübik hacim merkezli
HMT	Hacim merkezli tetragonal
HB	Brinell sertlik
HV	Vickers sertlik
MS	Martenzitik dönüşümün başladığı sıcaklık
MF	Martenzitik dönüşümün tamamlandığı sıcaklık
TTT	Zaman sıcaklık dönüşüm diyagramı
BSD	Brinell sertlik değeri
VSD	Vickers sertlik değeri
RSD	Rockwell sertlik değeri
KSD	Knoop sertlik değeri
P	Uygulanan yük
l	Uzun köşegen uzunluğu
S	Sinyal faktörü
N	Gürültü faktörü
S/N	Sinyal gürültü oranı
AHSS	Yüksek mukavemetli çelik sac

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2.1. Demir karbon denge diyagramı	3
Şekil 2.2. Martenzit Dönüşüm Sıcaklıkları a) Sıcaklık değişimi b) Demir ve nikel oranına göre martenzitik dönüşümü.....	4
Şekil 2.3. Martenzit Mikroyapı	5
Şekil 2.4 TTT diyagramı ve martenzit oluşumu	6
Şekil 2.5 Sertlik ölçüm yöntemleri.....	8
Şekil 2.6 Brinell Testi	9
Şekil 2.7 Vickers Testi	10
Şekil 2.8 Lazer ışın kaynaklarının absorbe olma derecesi	14
Şekil 2.9. 1.5 mm sac kalınlığına sahip malzemenin lazer hızına bağlı soğuma grafiği	17
Şekil 2.10 Farklı malzemelerin lazer sertleştirme uygulama sonrası sertlik ölçüm değeri	18
Şekil 2.11. Lazer uygulanan bölgedeki iki farklı malzeme türüne göre sertleşme mekanizması.....	19
Şekil 2.12. İki farklı lazer hızına ve farklı lazer penetrasyon değerlerine karşı sertlik ölçümleri	20
Şekil 3.1. Lazer sertleştirme prosesinde kullanılan numune ve fikstür ölçüleri	23
Şekil 3.2. Gerilme-şekil değiştirme eğrisi.....	25
Şekil 3.3. S/N oranına göre parametrelerin lazer sertleşmeye etkisi ve etkinlik dereceleri	29
Şekil 3.4. Ortalamaya göre parametrelerin lazer sertleşmeye etkisi ve etkinlik dereceleri	30
Şekil 3.5. Pareto grafine göre parametrelerin lazer sertleşmeye etki sıralaması.....	33
Şekil 3.6. Normal dağılımı	33
Şekil 3.7. Lazer sertleştirme prosesine etki eden parametreler ortamaya göre değişimi. 33	
Şekil 3.8. Lazer sertleştirme prosesine etki eden parametrelerin birbiri arasındaki ilişkiyi gösteren 3D yüzey grafiği	34
Şekil 3.9. Lazer sertleştirme prosesine etki eden parametrelerin birbiri arasındaki ilişkiyi gösteren kontur grafiği.....	35
Şekil 3.10. Parametrelerin sertlik, martenzitik dönüşüm ve akma mukavemet değerine göre değişimi	36
Şekil 3.11. Pareto grafine göre parametrelerin lazer sertleşmeye etki sıralaması.....	39
Şekil 3.12: Normal dağılımı	40
Şekil 3.13. Parametrelerin belirlenen seviyelerdeki değişimi	41
Şekil 4.1. Çarpışma kutusu	42
Şekil 4.2 : Çarpışma kutusu ölçüleri ve sınır koşulları	43
Şekil 4.3. Çarpışma kutusu üzerine lazer sertleştirme prosesi uygulaması	44
Şekil 4.4. Lazer sertleştirme prosesi sonrası martenzitik dönüşüm ve sertlik değerleri .	44
Şekil 4.5. Lazer sertleştirme uygulanmış çarpışma kutusunun çarpışma sonrasındaki görüntüsü.....	45
Şekil 4.6. Mevcut ve lazer sertleştirme uygulanmış model kuvvet deplasman grafiği... 45	
Şekil 4.7. Salıncak kolunun araç üzerindeki gösterimi	47
Şekil 4.8. Salıncak kolu statik analiz sınır koşulu.....	47
Şekil 4.9. Statik analiz sonucunda oluşan gerilme değeri	48
Şekil 4.10. Salıncak kolu topology optimizasyon koşulları	48

Şekil 4.11. Salıncak kolu topology optimizasyon sonucu.....	49
Şekil 4.12. Birinci model lazer sertleştirme prosesinin modellenmesi	50
Şekil 4.13. Birinci model üzerinde lazer sertleştirme prosesinin uygulanması	50
Şekil 4.13. Birinci model üzerinde lazer sertleştirme sonrası sertlik değeri.....	51
Şekil 4.14. Birinci model üzerinde lazer sertleştirme sonrası martenzitik dönüşüm sonucu	51
Şekil 4.15. Birinci model üzerinde lazer sertleştirme sonrası yapılan statik analiz sonucunda oluşan gerilme değerleri.....	52
Şekil 4.16. İkinci model lazer sertleştirme prosesinin modellenmesi.....	52
Şekil 4.16. İkinci model üzerinde lazer sertleştirme prosesinin uygulanması	53
Şekil 4.17. İkinci model üzerinde lazer sertleştirme sonrası sertlik değeri.....	53
Şekil 4.18. İkinci model üzerinde lazer sertleştirme sonrası martenzitik dönüşüm sonucu	54
Şekil 4.19. İkinci model üzerinde lazer sertleştirme sonrası yapılan statik analiz sonucunda oluşan gerilme değerleri.....	54
Şekil 4.20. Mevcut ve lazer sertleştirme uygulanmış modellerin kuvvet deplasman grafiği	55

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

Çizelge 2.1. Rockwell Sertlik Skalaları	11
Çizelge 2.2. Lazer çeşitleri.....	13
Çizelge 2.3. Farklı akma, çekme noktasına ve karbon (c) oranına sahip malzemeler	17
Çizelge 2.4. Lazer sertleştirme proses parametreleri	18
Çizelge 3.1 Akma dayanımı 1400 N/mm ² sahip çelik malzeme kimyasal bileşimi.....	21
Çizelge 3.2 Akma dayanımı 355 N/mm ² sahip çelik malzeme kimyasal bileşimi.....	21
Çizelge 3.3. Akma dayanımı 700 N/mm ² sahip çelik malzeme kimyasal bileşimi.....	22
Çizelge 3.4. Akma dayanımı 250 N/mm ² sahip çelik malzeme kimyasal bileşimi.....	22
Çizelge 3.5. Akma dayanımı 300 N/mm ² sahip çelik malzeme kimyasal bileşimi.....	22
Çizelge 3.6. Lazer sertleştirme prosesine etki eden parametreler ve seviyeleri	23
Çizelge 3.7. Isı iletim koşulları ve ısı iletim katsayıları	24
Çizelge 3.8. Akma dayanımı 355 N/mm ² sahip çelik malzeme kimyasal bileşimi.....	24
Çizelge 3.9. Lazer sertleştirme prosesine etki eden parametreler ve seviyeleri	25
Çizelge 3.10. Taguchi L25 ortogonal deney tasarım tablosu.....	26
Çizelge 3.11. Sinyal-gürültü oranı	28
Çizelge 3.12. Ortalama	28
Çizelge 3.13. Ortalama	30
Çizelge 3.14 Regresyon Analizin Varyansı	31
Çizelge 3.15 Yanıt Yüzey Yöntemi parametreleri.....	35
Çizelge 3.16 Yanıt Yüzey Yöntemi sonuçları	36
Çizelge 3.17. Yanıt Yüzey deneysel tasarım tablosu.....	37
Çizelge 3.18 Regresyon Analizin Varyansı	38
Çizelge 3.19 Optimizasyon hedef ve sınırlarının belirlenmesi.....	40
Çizelge 4.1. Maksimum kuvvet değerinin yüzde olarak artışı	46

1. GİRİŞ

Otomotiv sektöründeki teknolojik gelişmeler, yenilikçi arayışlar ve araç hafifletme çalışmaları her geçen gün hız kazanmaktadır. Araç hafifletme çalışmada belirlenen sınır koşulları altında daha yüksek dayanım özelliklerine sahip ve daha hafif parçalar istenmektedir. Bu isterleri karşılayabilmek için parçanın tasarım değişikliklerinin yanı sıra yeni nesil yüksek mukavemetli çelik sac malzeme kullanımını da yaygınlaştırmıştır. Yeni nesil yüksek mukavemetli çelik sac malzemelerin fiyatı geleneksel çelik sac malzemelerin fiyatına göre yüksek olduğu için birim parça fiyatını arttırmaktadır. Otomotiv şirketleri fiyat artışında daha rekabetçi olabilmek adına farklı alternatifler aramaktadır. Bu çalışmada, araç parçaları üzerinde kritik bölgeleri yani daha yüksek performans beklenen bölgeleri önceden belirleyerek o bölgelerde lazer sertleştirme uygulanmıştır. Belirlenen bu bölgelerde sac parça kalınlığı aynı kalarak hatta daha ince sac parça kullanılarak bölgesel iyileştirme çalışmaları yapılmıştır. Literatürde lazer sertleştirme çalışmaları genellikle otomotivde kalıpcılık sektöründe pres altında sac parçaların şekillendirilmesi sırasında kullanılmaktadır. Kalıp yüzeyinde deformasyonu azaltmak ve açınım sacının kalıp yüzeyinden daha rahat ayrılmasını sağlamak için kalıp yüzeyinde sertleştirme çalışmaları yapılmaktadır (Ameri ve ark. 2018, Moradi ve KaramiMoghadam 2019). Son yıllarda lazer teknolojisindeki gelişmelerle birlikte sac parçaları üzerinde ısı işlem uygulanarak malzeme dayanımını artırma çalışmaları yapılmaktadır (Syed ve ark. 2017). Bu çalışmada farklı kalınlıkta ve farklı sac malzeme kullanarak lazer sertleştirme proses parametrelerinin optimizasyon çalışmaları yapılmıştır. Pasif güvenlik sistemi elemanlarından olan çarpışma kutusu ve araç dinamiğinde önemli rolü olan salıncak kolu parçaları üzerinde önceden belirlenen bölgelerde lazer sertleştirme uygulamaları yapılmıştır.

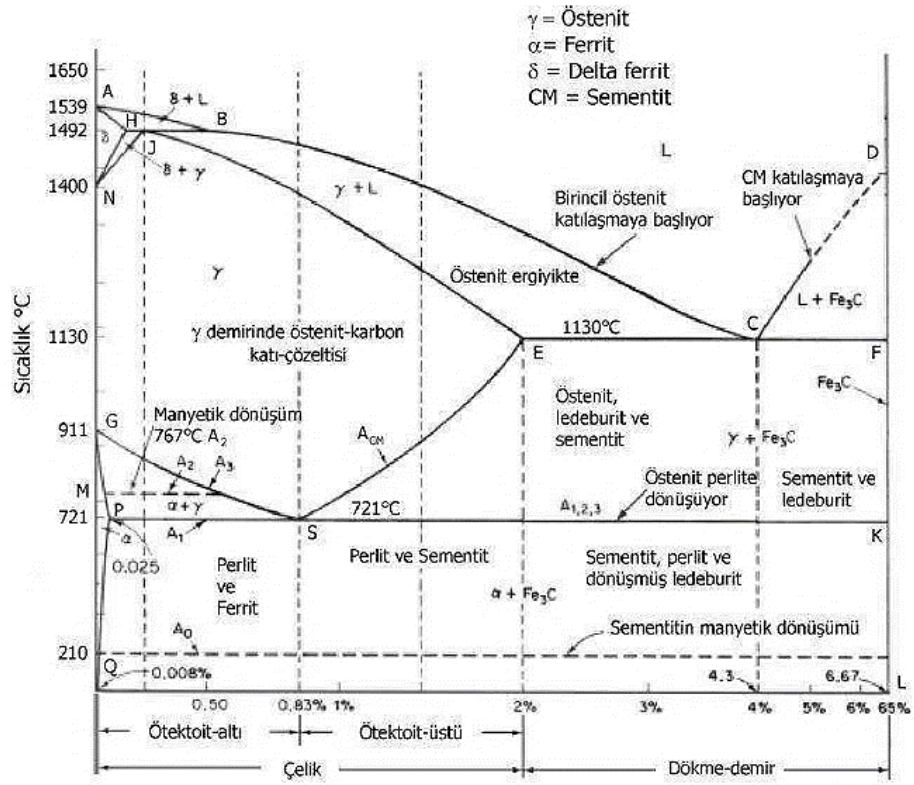
2. KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ARAŞTIRMASI

2.1. Martenzit Yapı

Martenzit yapı ilk olarak Alman bilim adamı Adolf Martens tarafından bulunmuştur. (Kaya ve ark. 2016). Yeterli karbon seviyesine sahip bir çelik malzeme östenit fazına kadar ısıtıldıktan sonra su verildiğinde veya hızlı bir şekilde oda sıcaklığına kadar soğutulduğunda kübik yüzey merkezli kafes (KYM) yapısından, kübik hacim merkezli (KHM) ya da hacim merkezli tetragonal (HMT) kafes yapısına dönüşmektedir. Bu dönüşüm sırasında malzeme içerisinde bulunan karbonlar su verme ya da hızlı soğutma olduğu için difüzyon ile dışarıya çıkacak vakit bulamamaktadır ve kafes yapısını içerisine sıkışmaktadır. Böylece ortaya martenzit denilen çok sert ve kırılğan yapılar meydana gelmektedir. Ancak, martenzit kavramı sadece çelikteki bir faz olarak düşünülmemelidir. Aynı zamanda difüzyon olmayan bir katı hal faz dönüşümüne de martenzit denilebilmektedir (Anonim 2019).

2.1.1. Martenzit Yapı Özellikleri

Martenzit yapısı, çeliğin hızlı soğuması ile, kristal yapı içerisinde bulunan karbon atomlarının Fe_3C – Sementit oluşturamadan yapı içerisinde kaldıkları için kararsız sert ve kırılğan bir yapıdadır. Bu yapı hacim merkezli tetragonal (HMT) bir yapıdır ve bu yapının oluşabilmesi için karbon oranının %0.6 ve üzerinde olması gerekmektedir. Östenit fazından martenzite dönüşüm süresi yaklaşık olarak 0.001 saniye kadardır. Martenzit yapı kararsız bir yapı olduğu için ve düşük sıcaklıkta temperleme işlemi ile sementit ve ferrit yapısına ayrıştırılarak sertliği azaltılabilir ve tokluk seviyesi artırılabilir. Ancak bu işlem yapılmaz ise, sertlik 700 HB (Brinell) sertliğe kadar ulaşacaktır. Bu sertlikteki çelikler çok kırılğan yapılarda olduğu için kullanıma uygun değildir (Aran 2008).



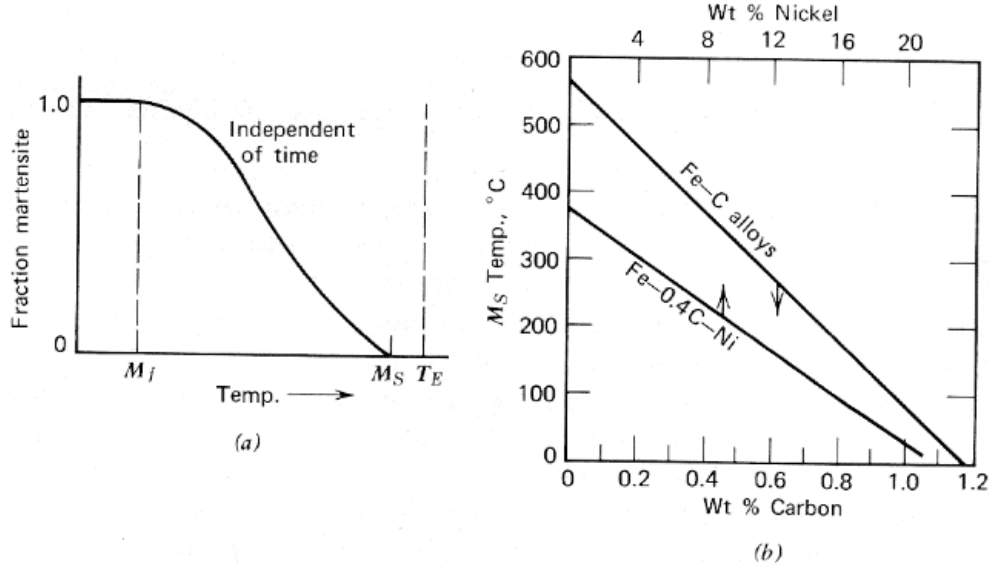
Şekil 2.1. Demir karbon dengeli diyagramı (<https://www.metalurjimalzeme.net/demir-karbon-denge-diyagrami/>, Erişim tarihi: 15.06.2019)

Yukarıda Demir Karbon Denge Diyagramı görülmektedir. Demir karbon diyagramında martenzit yapısının olmamasının sebebi, bu diyagramın bir denge diyagramı olmasıdır. Martenzitik yapı kararsız bir yapıdır. Bu nedenle bu diyagramda gösterilmez. Bu diyagramda gösterilen yapılar, yavaş soğuma ile elde edilen dengeli-kararlı yapılardır (Anonim 2019).

Aşırı sert yapılar istenildiğinde bu dönüşüm sağlanır. Ancak pratik uygulamalarda kullanılabilmesi için temperleme işleminden geçmesi gerekmektedir. Bu işlemde geçemeyen çelikler malzemeler çok sert bir yapıya dönüşmekte ve mühendislik olarak kullanımı çok mümkün olmamaktadır. Martenzit dönüşümler sonucunda oluşan yapılar aşınmaya karşı direçli olduğu için aşınma dayanımı beklentisi olan parçalarda kullanımını yaygınlaştırmaktadır (Aran 2008).

2.1.2. Martenzit Oluşum Mekanizması

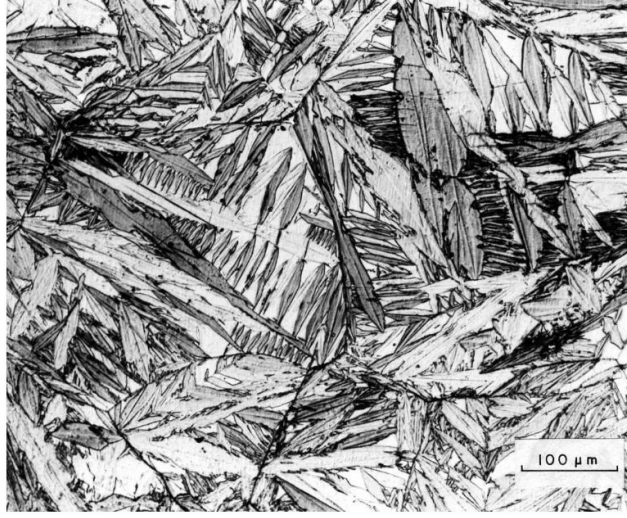
Çelik östenit fazından soğutulmaya başladığında veya çeliğe su verme işlemi sırasında, martenzitik dönüşümün başladığı sıcaklığa (M_s) ulaşır ulaşmaz dönüşüm başlar ve dönüşümün tamamlandığı sıcaklığa (M_f) ulaşınca martenzit dönüşüm sona erer.



Şekil 2.2. Martenzit Dönüşüm Sıcaklıkları a) Sıcaklık değişimi b) Demir ve nikel oranına göre martenzitik dönüşümü (<https://www.metalurjimalzeme.net/martenzit-nedir/>, erişim tarihi: 15.06.2019)

Martenzit dönüşüm sıcaklıkları Şekil 2.2 incelendiğinde, malzeme içerisindeki % karbon miktarı arttıkça M_s düştüğü görülmektedir. Yani karbon miktarı ne kadar fazla ise, dönüşüm o kadar düşük sıcaklıkta meydana gelebilir ve kolaylaşır. Aynı etkiyi yine -b grafiğinde baktığımızda görebileceğimiz gibi nikel elementi de karbon gibi dönüşüme etki eder. Yani nikel ne kadar fazla ise, dönüşüm sıcaklığı da o kadar düşecektir. Örneğin, %0.2 karbon içeren bir çelik, 400 Santigrat derece üzerinde dönüşüme başlarken, %0.6 karbon içeren aynı çelik 300 Santigrat derecenin biraz altında dönüşüme başlar. Yani çeliğin içerdiği karbon miktarı ne kadar fazla ise martenzit oluşturabilme kapasitesi o kadar yüksektir (Aran 2008).

2.1.3. Mikroyapı



Martenzit Mikroyapısı

Şekil 2.3. Martenzit Mikroyapı (<https://www.metalurjimalzeme.net/martenzit-nedir/>, erişim tarihi: 15.06.2019)

Şekil 2.3 'deki mikroyapı görüntüsünü incelediğimizde, martenzitik yapıların keskin köşeli ve sivri yapılar olduğunu görmekteyiz. Östenit fazı içerisinde çok hızlı bir şekilde büyümüş bu yapılar malzeme içerisinde görüldüğünde yapının sertliğinin çok yüksek olduğu anlamına gelmektedir. Martenzit yapısı, östenit fazı içerisinde yüksek karbonlu çeliklerde plakalar halinde büyüyebileceği gibi, daha düşük karbonlu çeliklerde iğne halinde de büyüebilir (Aran 2008).

Hızlı soğuma sırasında oluşan martenzit yapısı aşırı iğneli yapıda olabilir. Bu demek oluyor ki dönüşüm sırasında çok kırılgan ve sert bir malzeme oluştu. Bu durumun istenmediği zamanlarda martenzitik dönüşüm sonrası ısıtma işlemi uygulanarak istenilen tokluk ve sertlik değerine getirilebilir (Aran 2008).

2.1.4. Martenzit Yapı Oluşumunda Martemperleme Uygulanması

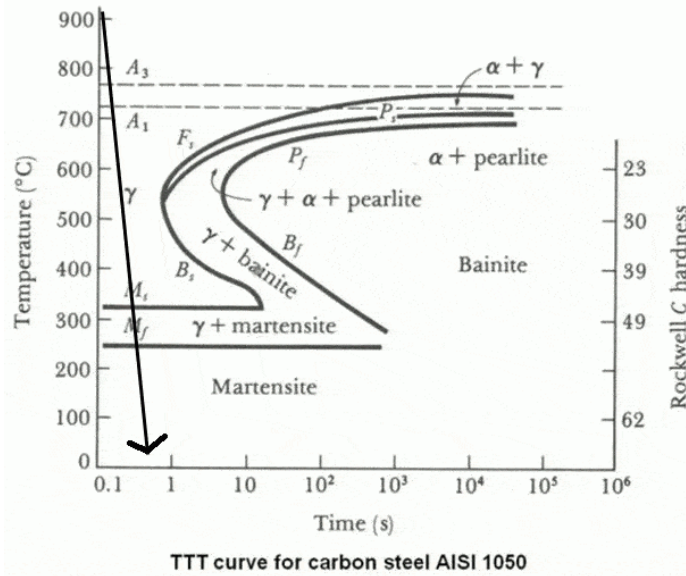
Martemperleme işlemi kontrollü bir sertleştirme işlemidir. Yapıdaki % karbon oranına göre, hızlı soğutma işlemi sırasında çelikte çatlak oluşumu meydana gelebilir. Bu çatlak

oluşumunun önüne geçmek ve aynı sertlik değerine ulaşmak için martemperleme yapmak gerekmektedir (Aran 2008).

Martemperleme işlemi östenit sıcaklığına çıkarılan çelik malzeme, Ms sıcaklığının hemen üstüne kadar hızla soğutulurken Ms 'nin biraz üzerinde beynit oluşturmayacak kadar bekletilir. Bu bekletmenin amacı, malzemenin iç yüzeyi ile dış yüzeyi arasındaki gerilim farkını azaltmak ve sıcaklık dengesini sağlamaktır. Bu işlemden sonra tekrar çeliğe su verilerek soğutma işlemi gerçekleştirilir. Bekleme işlemi ile gerilimler giderildiği için martenzitik yapı oluşumu sırasında çatlama oluşmaz ve istenilen sertlik değeri elde edilmiş olur (Aran 2008).

2.1.5. TTT Diyagramı

TTT (Time-Temperature-Transformation) Zaman – Sıcaklık – Dönüşüm diyagramı olarak bilinmektedir.



Şekil 2.4 TTT diyagramı ve martenzit oluşumu (<https://www.metalurjimalzeme.net/martenzit-nedir/>, erişim tarihi: 15.06.2019)

Bu diyagramı incelediğimizde yukarıdan aşağıya inen oku görmekteyiz. Bu ok martenzitik dönüşümün başladığı sıcaklık (Ms) ve dönüşümün tamamlandığı sıcaklık (Mf) çizgilerini neredeyse dik bir açı ile kesmektedir. Grafikte “γ” olarak gösterilen kısım

östenit fazı temsil etmektedir. Grafiğin sol kısmı sıcaklık, alt kısmı süreyi göstermektedir. Süre soldan sağa doğru gidildikçe artmaktadır. Yani grafikte gözüken ok ne kadar kısa süre içerisinde (sol tarafa yakın) aşağıya iner ise, martenzit oluşma ihtimali de o kadar artmaktadır. Eğer soğuma hızı yavaşlar ise, grafiğin sağ tarafına doğru gidilmiş olur. Ösnetit, ferrit ve perlit gibi yumuşak ve kararlı fazlar oluşur. Bu süre daha da uzatırsa beynit yapısı oluşturulabilir. Sonuç olarak, sıcaklık düşüşü ne kadar hızlı ve keskin olur ise, oluşacak martenzitik yapı o oranda fazla olacaktır (Aran 2008).

2.2. Sertlik

Malzeme biliminde sertlik kavramı dayanımı ile doğrudan ilişkili bir özelliktir. Sertlik göreceli bir ölçü olup malzemenin delinmeye, kesilmeye ve aşınmaya karşı göstermiş olduğu tepkinin bir ölçüsüdür. Diğer bir tabirle malzemenin yüzeyine sert bir cisim batırıldığında ona karşı göstermiş olduğu direçtir. Malzemenin sertlik değeri bu oluşan izle ters orantılıdır (Pürçek 2014).





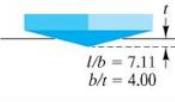

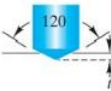

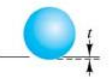



Malzeme hakkında bilgi edinmenin en pratik ve kolay yolu sertlik ölçümünün yapılmasıdır. Sertlik ölçümünün avantajı direk olarak malzemenin mukavemet değeri hakkında bilgi verir. Malzemenin sertlik bilgisi ile mekanik özellikleri arasında doğrusal bir ilişki mevcuttur. Örnek olarak çekme mukavemet değeri ile sertlik arasında doğru orantı mevcuttur. Ayrıca deneyin basit oluşu ve malzeme üzerinde diğer yöntemlere oranla az tahribat vermesi diğer avantajlarından. Sertlik ölçümünde dikkat edilmesi gereken bazı noktalar vardır. Bunlar maddeler halinde şu şekildedir:

- Koni, piramit ve bilya gibi batıcı ucların sertlik değerleri ölçüm yapılacak malzemedan daha yüksek olmasına dikkat edilmelidir.
- Sertlik ölçümü yapılacak numunenin kalınlık değeri batıcı ucun iz derinliğinin minimum 10 katı olması gereklidir.
- Sertlik ölçümü numunenin köşelerine yakın bölgeden yapılmamalı ve ayrıca izler arasındaki mesafe minimum bir iç çapı kadar veya köşegen uzunluğunun 3 katı kadar olmalıdır.
- Sertlik ölçümü yapılan bölge ile sertlik numunesinin oturma yüzeyi birbirine paralel olması gereklidir.

Sertlik ölçüm yöntemleri batıcı ucun geometrisine ve uygulanan kuvvet büyüklüğüne göre değişmektedir (Pürçek 2014).

Başlıca sertlik ölçüm yöntemleri:

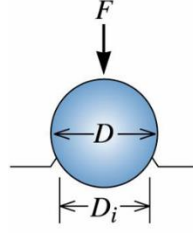
- Brinell sertlik ölçme yöntemi
- Vickers sertlik ölçme yöntemi
- Rockwell sertlik ölçme yöntemi
- Mikrosertlik ölçme yöntemi

Test	Indenter	Shape of indentation		Load	Formula for hardness number
		Side view	Top view		
Brinell ✓	10 mm sphere of steel or tungsten carbide			P	$BHN = \frac{2P}{\pi D \left[D - \sqrt{D^2 - d^2} \right]}$
Vickers ✓	Diamond pyramid			P	$VHN = 1.72P/d_1^2$
Knoop microhardness	Diamond pyramid			P	$KHN = 14.2P/l^2$
Rockwell ✓					
A } C } D }	Diamond cone			60 kg 150 kg 100 kg	$R_A =$ $R_C =$ $R_D =$ } 100 - 500r
B } F } G }	$\frac{1}{16}$ in. diameter steel sphere			100 kg 60 kg 150 kg	$R_B =$ $R_F =$ $R_G =$ } 130 - 500r
E } H }	$\frac{1}{8}$ in. diameter steel sphere			100 kg 60 kg	$R_E =$ $R_H =$

Şekil 2.5 Sertlik ölçüm yöntemleri (<https://slideplayer.biz.tr/slide/2798476/>, erişim tarihi: 20.07.2020)

2.2.1. Brinell Sertlik Ölçme Yöntemi

Brinell sertlik ölçüm yönteminde malzeme yüzeyine belirli bir yük (F) belirli bir çaptaki (D) batıcı ucun malzeme yüzeyinde kalıcı bir iz bırakma esasına dayanır. Burada batıcı ucun malzemeden daha sert olması gerektiğine dikkat edilmelidir. (Pürçek 2014).



Şekil 2.6 Brinell Testi (<https://slideplayer.biz.tr/slide/2798476/>, erişim tarihi: 20.07.2020)

Sertlik ölçüm değeri şu formülasyonla hesaplanır:

BSD = Brinell sertlik değeri

D = Bilye çapı

F = Uygulanan kuvvet

d = iz çapı.

σ_{ζ} = Çekme dayanımı

$$BSD = \frac{2F}{\pi D [D - \sqrt{D^2 - d^2}]} \quad (2.1)$$

Bu formülasyonda F uygulanacak kuvveti veya yükü (kg) D bilyanın çapını (mm) ve d ise iz çapını (mm) göstermektedir. Deney sırasında standart olarak kullanılan 1.25-2.5-5-10 mm çapta bilya kullanılabilir. Uygulanacak yük malzemenin cinsine göre değişkenlik göstermektedir. $d/D = 0.2 - 0.7$ oranında uygulanacak yük değeri $F = C.D^2$ formülü ile hesaplanır. Yükü uygulama süreside 10-15 saniye arasında değişmektedir.

Buradaki C değeri malzemenin cinsini ifade etmektedir.

-Demir esaslı malzemede (çelik) $C=30$

-Bakır ve Alüminyum alaşımlı malzemede $C=10$

-Yumuşak malzemede $C=5$

Brinell sertlik değeri ile çekme mukavemeti arasında şu şekilde bir ilişki vardır:

$$\sigma_{\zeta} (kg/mm^2) = 0.35 \times BSD (kg/mm^2) \quad (2.2)$$

Bu formülasyonu kullanarak çeliklerde çekme dayanımını yaklaşık olarak hesaplayabiliriz (Pürçek 2014).

2.2.2. Vickers Sertlik Ölçme Yöntemi

Bu yöntemle batıcı uc profile tepe açısı 136° olan elmas kare piramit uc kullanılmaktadır. F uygulanacak yük ile malzemeye batırılan piramit ucun dörtgen izin köşegenleri ölçülerek hesaplanan ortalama köşegen uzunluğu formülünde yerine koyularak Vickers sertlik değeri ölçülür. Bu yöntemde sertlik değeri yüke bağlı değildir. Ölçümde hataları azaltmak için yükü ve izi büyütmek doğru bir yöntemdir. Dikkat edilmesi gereken nokta köşegen uzunluğu, ölçülen parçanın kalınlığının en fazla üçte ikisi kadar olmalıdır. Yükün numune üzerinde kalma süresi 20 saniye olmalıdır. Bu süre bitiminde baskı ucu numeden kaldırılarak hesaplama yapılır (Pürçek 2014).

VSD	=	Vickers sertlik değeri
F	=	Uygulanan kuvvet
d_{ort}	=	izin köşegen ortalaması.
d_1, d_2	=	Ölçülen köşegen uzunlukları

İz köşegen ortalamasının formülü aşağıda gösterildiği şekildedir.

$$d_{ort} = \frac{d_1 + d_2}{2} \quad (2.3)$$



Şekil 2.7 Vickers Testi (<https://slideplayer.biz.tr/slide/2798476/>, erişim tarihi: 20.07.2020)

Vickers sertlik değerinin hesaplanması aşağıdaki formülasyonla hesaplanmaktadır.

$$VSD = \frac{1.72F}{d_{ort}^2} \quad (2.4)$$

2.2.3. Rockwell Sertlik Ölçme Yöntemi

Rockwell sertlik ölçümünde batıcı uç olarak elmas konik uç ya da çelik bilye kullanılır. Batıcı uç genellikle küçük yüklerle malzeme yüzeyine bastırılarak oluşan izin dip noktası başlangıç noktası olarak belirlenir. Bunun sebebi numune ile arasındaki kesin teması sağlamaktır. Daha sonrasında yük daha yüksek bir değere çıkartılarak tekrar önceki değere indirilir. Uzun batma derinliğindeki artışa göre Rockwell sertlik değeri ölçülmüş olur. Batıcı uç olarak elmas konik kullanılırsa tepe açısı 120° tepe noktası çapı 0.2 mm olarak seçilir. Bilye tipindeki batıcı uç kullanılırsa çapları da yaklaşık olarak 1.6 mm 3.2 mm 6.35 mm ve 12.7 mm olarak seçilebilir. Rockwell sertlik ölçümünde Rockwell skalası olarak bilinen batıcı ucun tipine, kullanılan malzeme tipine ve uygulanan yük değerlerine göre tablo oluşturulmuştur. Tablo aşağıdaki gösterildiği şekildedir. (Pürçek 2014).

Çizelge 2.1. Rockwell Sertlik Skalaları (<https://slideplayer.biz.tr/slide/2798476/>, Erişim tarihi: 20.07.2020)

Sembol	Batıcı Uç	Yük (Kgf.)	Tipik Kullanım yerleri
B	1.6 mm bilya	100	Bakır alaşımlar, yumusak çelikler, Alüminyum alaşımlar
C	Elmas konik uç	150	Çelik sert dökme demirler, perlitik temper döküm, titan derin olarak yüzeyi sertleştirilmiş çelik ve Rockwell B değeri 100'den daha fazla olan diğer malzemeler
A	Elmas konik uç	60	Sert metaller, ince çelik ve yüzeyi ince tabaka halinde sertleştirilmiş çelikler
D	Elmas konik uç	100	Ince çelik, orta kalınlıkta yüzeyi sertleştirilmiş çelik
E	3.2 mm bilya	100	Dövme demir alüminyum ve magnezyum alaşımları
F	1.6 mm bilya	60	Tavllanmış bakır alaşımları, yumuşak ince saç metaller
G	1.6 mm bilya	150	Fosforlu bronz berilliyumlu bakır temper döküm

RSD = Rockwell sertlik değeri

Rockwell sertlik değerinin bulunmasında kullanılan formüller:

RSD - A,C,D =100-500t

RSD – B,F,G,E = 130-500t (2.5)

Burada t batıcı uçun batma derinliğini (mm) cinsinden ifade etmektedir.

2.2.4. Mikrosertlik Ölçme Yöntemi

Bu yöntem, özellikle çok küçük numuneler ve ince sacların sertlik ölçümünde yaygın kullanılan bir yöntemdir. Elektrolit olarak kaplanmış, azotla sertleştirilmiş, dekarbürize ve karbürize edilmiş malzemelerin sertlikleri bu yöntemle ölçülmektedir. Ayrıca sert ve kırılğan parçaların cam, porselen ve seramik gibi malzemelerin sertlik ölçümünde yapılabilir. Vickers ve Knoop mikrosertlik ölçme yöntemlerindedir.

Vickers yönteminde ; tabanı kare, tepesi 136° derece olan piramit uç, Knoop yönteminde ise 172° olan piramit biçimindeki elmas uç kullanılır (Pürçek 2014).

KSD = Knoop sertlik değeri:

P = Uygulanan Yük

I = Uzun köşeğen uzunluğu

Knoop sertlik değerinin bulunmasında kullanılan formülü:

$$KSD=14.2 P/I^2 \quad (2.6)$$

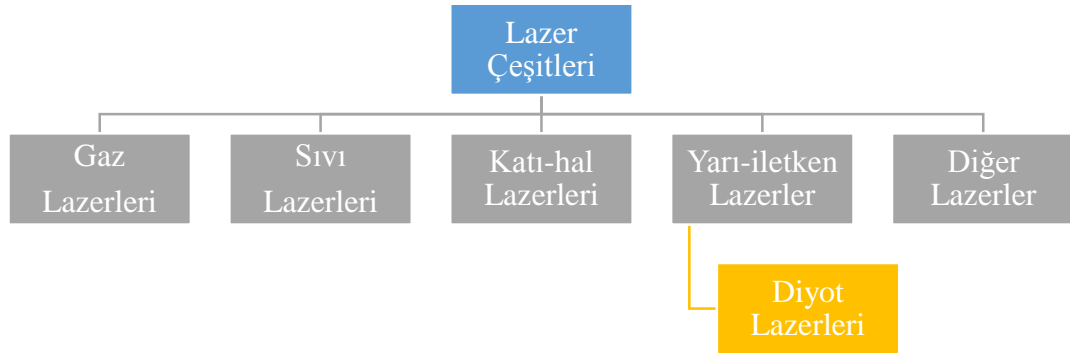
2.3. Lazer ve Çesitleri

2.3.1. Lazer

Bir elementi meydana getiren atomların elektronları belirli bir yörüngede kararlı bir şekilde dönerler. Bu atomlar, dışarıdan gelen bir enerji ile (ısı, ışık veya elektrik) uyarıldığında, ışık kaynaklarının ışıkları uyarılmış atomlarındaki elektronlar yüksek bir

halden daha düşük bir hale geçerken (yörünge değiştirerek) birbirlerinden farklı fazda ve yönde yayılan fotonlardan oluşur. Lazer ışımında ilk uyarılan atomlardan yayılan fotonlar, iki yüzey arasında ileri geri hareket ederken lazer boşluğundaki diğer atomları da uyararak aynı fazda, aynı yönde yayılan ışınlardan daha yüksek enerjiye sahip bir ışık yayarlar. Yeni meydana gelen yüksek enerjili bu ışına lazer (light amplification by the stimulated emission of radiation) denir (Nöbet 2019).

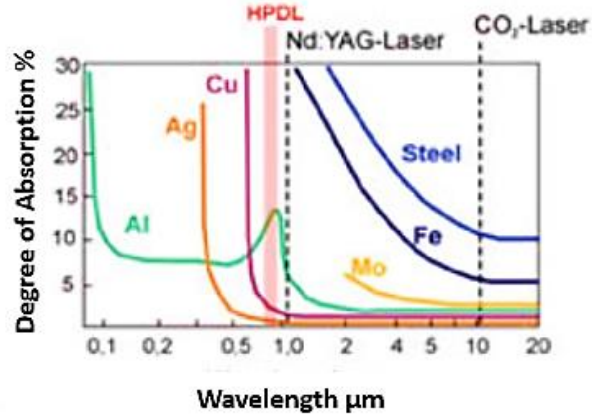
Çizelge 2.2. Lazer çeşitleri



Metal malzemelerde lokal olarak malzeme özelliklerini değiştirmede en yaygın olarak kullanılan lazer tipi diyot lazerlerdir.

2.3.2. Diyot Lazerler

Diyot lazerler bir lazer ışın kaynağıdır. Yüzey sertleştirme prosesi için benzersiz kalitededir. Enerjinin malzemeye absorbe edilmesi açısından en verimli enerji kaynağıdır. Çelik malzeme yüzeylerinde bu enerji çok iyi absorbe olabilmektedir. Diyot lazerler yüksek kapasitede güç değişimlerini yüksek hızlarda gerçekleştirebilmektedir. Bu özelliği ile et kalınlıkları farklı olan keskin köşeler içeren parçalarda büyük avantaj sağlamaktadır. Diyot lazerlerin elektro optik verimlilikleri diğer lazer kaynaklarına (CO₂ lazer ve Nd: yag lazer) kıyasla %35 fazladır. Diğer lazer kaynaklarına göre metal malzeme yüzeyinde absorblanma derecesi açısından yüksek değerler içerir. Bu değer yaklaşık olarak % 40 ve CO₂ lazere kıyasla çok iyidir. Şekilde değişik lazer ışın kaynaklarının absorbe olma derecesinin karşılaştırması görülmektedir (Nöbet 2019).



Şekil 2.8 Lazer ışın kaynaklarının absorbe olma derecesi (<https://diyot.net/lazer-diyot/>, Erişim tarihi: 08.06.2020)

Diyotlarda üretilen lazer ışınının orantılı olarak kullanılabilir. Eğer diyot güç sağlayıcısının gücünü ani olarak değiştirirseniz lazer çıkış gücünde aynı hızla değişecektir. Bunun gerçekleşmesi sisteme entegre edilen termal kamera yardımıyla sağlanmaktadır. Termal kamera parçanın yüzeyinde tanımlanmış olan Östenitleme sıcaklığını çok hassas toleranslarda kontrol etmekte ve bu östenitleme sıcaklık değerinde sabit tutmaktadır. Bu belirlenen Östenitleme sıcaklık değerinin sabit kalmasını güç değişimi ile sağlamaktadır (Nöbet 2019).

Diyot lazerlerin belli başlı özellikleri:

- Diyot lazerler, çeşitli teknolojik manipülasyonlarla 300 nm UV dalga boyundan 3000 nm IR dalga boyları arasında, (görünür bölge dahil) ışın üretebilir.
- Diyot lazerler küçüktür, fazla yer kaplamaz.
- Lazer diyotları eski radyolardaki lambalar, televizyonlardaki tüpleri gibi dayanıklıdır, kolay arıza yapmaz.
- Geniş bir kullanım alanına sahiptir. Fiber optik haberleşme, barkod okuyucular, lazer pointer, lazer yazıcılar ve tarayıcılar.

2.4. Lazer Sertleştirme Yöntemi

Lazer ile sertleştirme; derin çekme, kesme, büküm, plastik enjeksiyon, hafif metal döküm kalıplarında, düşük maliyetli ve mukavemetli çelik, yüksek mukavemetli çelik (AHSS) sac levhaların bölgesel olarak sertleştirilmesinde kullanılan ve giderek yaygınlaşan bir yöntemdir. Yöntemin en büyük avantajı sertleştirme sonrasında parça üzerinde şekil değişimi olmamasıdır. Bu sayede, kalıplarda ve sac levhalarda geleneksel sertleştirme işlemleri sonrası yapılmak zorunda olan son işlem operasyonları ortadan kalkmaktadır. Odaklanmış lazer ışını belirlenen bölgede ergime sıcaklığının altındaki bir sıcaklığa kadar lazer ışını ile belirlenen derinlikte ve hızda ısıtılır. Yüksek sıcaklıkta parçanın atomlarının kafes yapısının değişmesine neden olur ve tanımlanan bölgede ostenitik yapılar oluşur. Bu sıcaklık değeri değişmeyecek şekilde parça yüzeyinde pyrometre sistemi ile sıcaklık sürekli kontrol altında tutulur. Lazer ışını o bölgeyi terk ettikten sonra aşırı yüksek hızda ısınma nedeniyle, hala soğuk kalmış olan parçanın iç kısmına doğru ısı transferi gerçekleşir ve yüzey aniden soğur bu hızlı soğuma malzemenin kafes yapısının eski haline dönmesine engel olur. Yüzeyde yüksek sertlik değerine sahip martenzitik yapı oluşur. Homojen ısı dağılımı sonucunda homojen iç yapı elde edilir. İç yapının düzenli homojen ve küçük taneli olması, yüksek sertliklerde oluşan gevreklik problemini de ortadan kaldırır (Nöbet 2019).

Lazerin temas ettiği yüzeyde sıcaklık artış hızı çok yüksek olduğu için malzemenin geneline etki eden ısı yük düşüktür. Bu nedenle şekil deformasyonu minimum düzeydedir. Ürünün sadece sertlik alması istenen bölgelerine işlem yapılmasına olanak sağladığı için lazer yüzey sertleştirme, hem parçanın geri kalan kısmının gereksiz yere işleme dahil olmasının önüne geçer hem de lokal sertleştirme sayesinde, büyük parçalar için işlemin ekonomik olması anlamına gelir (Nöbet 2019).

Lazer Sertleştirme Yönteminin avantajları:

- Belirli karbon oranına sahip tüm sertleştirilebilen çeliklerde uygulanabilir.
- Sertlik hat genişliği; kullanılan lazerin özelliği, lazer kafasında kullanılan optik çapı ve maksimum lazer çıkış gücüne bağlı olarak 1 ile 50 mm arasındadır.

- Sertlik derinliği malzemeye bağlı olarak değişmekle birlikte maksimum 2 mm'dir.
- Kısa süren noktasal işlemler olduğu ve yüksek enerji girişinden dolayı yapı üzerinde çarpılma olmaz ve sonraki proses için ekstra işleme gerek kalmaz.
- Isıl işlem hattı boyunca değişmeyen enerji yoğunluğu uygulanabilir.
- Kısmi yüzey sertleştirme ve hassas sertleştirme yapılır.
- İdeal kristal yapı küçük tane boyutu ve homojen mikroyapı elde etmede etkili bir yöntemdir.
- Kontrollü kolay ve stabil bir prosestir.
- Ekstra maliyeti oluşturacak yüksek soğutma sistemlerine ihtiyaç yoktur.
- Minimum deformasyon ve yüksek kalitede homojen sertlikte yapılar elde edilir (Nöbet 2019).

Dezavantajları:

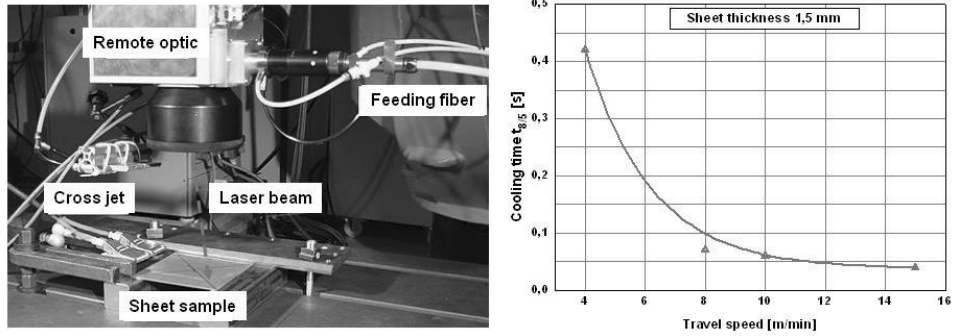
- Üst üste gelen hatlarda uygulamak mümkün değildir. Üst üste gelen, birbirini takip eden sertlik hattı önceki sertlik hattının tavlanmasına yol açar. Gerekli olan en az sertleştirme bölge mesafesi yaklaşık 1.0 ile 1.5 mm arasındadır.
- Çalışma mesafesi; lazer kafası, parçanın yüzeyi ve optiğe bağlı olarak yaklaşık 100-350 mm'dir
- Lazer kafası için hareket serbestliği ve çalışma alanına dikkat edilmeli ayrıca ışının sertleştirilen parça yüzeyine odaklanmasına dikkat edilmelidir.
- Saçılan lazer ışınlarından dolayı gerekli güvenlik donanımı alınması gerekmektedir. Uygun kabin yapılmalı ve proses uygulandığı süre boyunca kabin dışında kalınmalıdır (Nöbet 2019).

Literatürde yapılan çalışmalar incelendiğinde farklı karbon (C) oranına, akma ve çekme mukavemet değerlerine sahip sac malzemeler Çizelge 2.3'te gösterildiği gibi üzerinde lazer sertleştirme yöntemi uygulandığı görölmektedir (Jahn ve ark. 2011, Wagner ve ark. 2016).

Çizelge 2.3. Farklı akma, çekme noktasına ve karbon (c) oranına sahip malzemeler (Jahn ve ark 2011'den alınmıştır)

Steel grade		t [mm]	R _{p0.2} [N/mm ²]	R _m [N/mm ²]	C [%]	CET [%]
DC 05	Mild steel	1.0	140-180	270-330	0.031	0.05
HX340LAD	Micro alloyed steel	1.5	340-420	410-510	0.049	0.13
HCT600X	Dual phase steel	1.5	340-410	600-700	0.081	0.24
HCT690T	TRIP steel	1.5	410-510	690-790	0.233	0.40
22MnB5	Press hardening steel	1.5	360-500	550-700	0.252	0.37

Yapılan çalışmalar sonucunda farklı tipte lazer hücresi ve parametre kullanıldığı görülmektedir. Lazer sertleştirme prosesinde en önemli parametreler; lazer hızı, lazer gücü, lazer penetrasyon değeri, sac parça kalınlığı ve sac soğuma hızı parametreler çok önemlidir. 1.5 mm sac kalınlığında lazer hızına bağlı olarak soğuma hızı grafikte verilmiştir (Jahn ve ark. 2011).



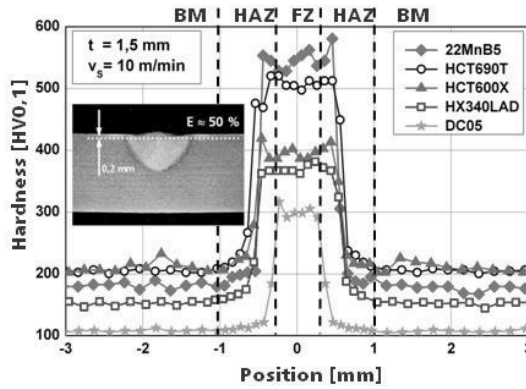
Şekil 2.9. 1.5 mm sac kalınlığına sahip malzemenin lazer hızına bağlı soğuma grafiği (Jahn ve ark 2011'den alınmıştır)

Yapılan çalışmalarda lazer parametreleri farklılık göstermekle birlikte sertlik değerlerinin önemli ölçüde arttığı görülmektedir. Yapılan çalışmalar sonucunda lazer parametreleri aşağıdaki Çizelge 2.4 de gösterildiği gibidir.

Çizelge 2.4. Lazer sertleştirme proses parametreleri (Jahn ve ark 2011’den alınmıştır)

	V1	V2
Laser source	Nd:YAG (DY044)	
Laser power P_L	2.5 kW	
Focus diameter D	600 μm	
Travel speed v_s	4 m/min	10 m/min
Penetration $E = t_{\text{track}} / t$	100 %	ca. 50 %
Cooling time $t_{8/5}$	0.42 s	0.06 s

Yapılan numuneler üzerinde belirlenen bölgelerde lazer işlemleri uygulandıktan sonra mikro yapı metalografik olarak yerel malzeme özelliklerinde inceleme yapılmıştır. Numuneler üzerine yüzeyin 0.2 mm altında çapraz sertlik ölçümleri Şekil 2.10’da değerlendirilmiştir. İncelenen tüm çelik türlerinde sertlik değerlerinin arttığı gözlenmektedir. Malzemelerin erime bölgesindeki sertlik değeri baz malzemenin karbon içeriğine tekabül ettiği görülmüştür. Sertlik maksimum değeri ve temel malzeme değeri arasındaki fark çeliğin maksimum sertleşme potansiyelini göstermektedir (Jahn ve ark. 2011).

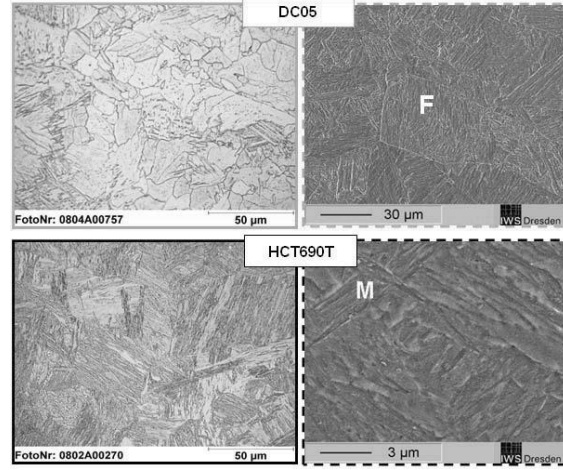


Şekil 2.10 Farklı malzemelerin lazer sertleştirme uygulama sonrası sertlik ölçüm değeri (Jahn ve ark 2011’den alınmıştır)

Sertleşme etkileri, optik mikroskopi ve SEM kullanılarak yapılan mikro yapısal incelemelerle netleştirilmiştir. Karbon içeriğine bağlı olarak iki farklı sertleşme mekanizması tespit edilmiştir (Jahn ve ark. 2011).

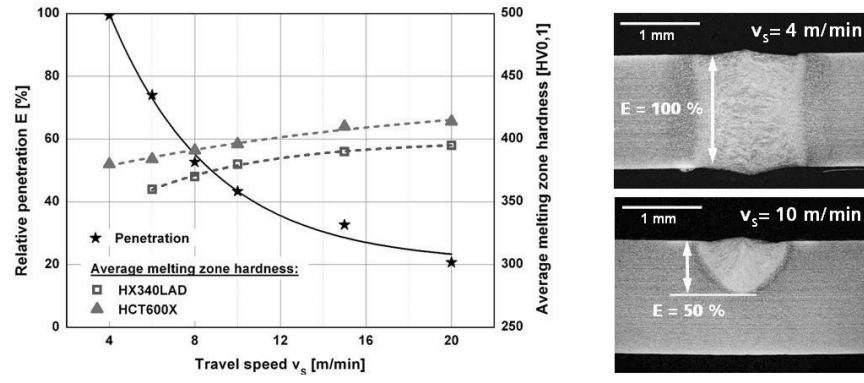
Düşük karbon içeren çelikler (örneğin DC05; C < % 0.1), lazer uygulanan bölgelerdeki sertlik artışı seviyesinin oldukça düşük olduğu Şekil 2.10’da görülmüştür. Ancak baz malzemeye göre önemli ölçüde artış görülmüştür. Lazer uygulanan bölgede mikro yapıda

tane sınırlarında karbon çökeltisinin ferrit yapıda oluşu, tane boyutunun küçük olması ve su verme işlemi sırasında malzemede sertlik artışı olduğundandır (Jahn ve ark. 2011). C oranının yüksek olan çelik malzemelerde sertlik artışının sebebi martenzit oluşumundan kaynaklanmaktadır. Martenzitik dönüşüm miktarı ve sertlik değeri doğrudan çeliğin C içeriğine bağlıdır (Jahn ve ark. 2011).



Şekil 2.11. Lazer uygulanan bölgedeki iki farklı malzeme türüne göre sertleşme mekanizması (Jahn ve ark 2011'den alınmıştır)

Şekil 2.11'de lazer eritme bölgelerinin tipik makrograflarını göstermektedir. Diyagram artan lazer hızına bağlı olarak penetrasyon düşüşünü göstermektedir. Öte yandan, yüksek lazer hızında hızlı soğuma sonrasında martenzit oluşumu, kendiliğinden tavlama etkilerini önlemiş olur ve sonunda daha yüksek sertlik değerlerine yol açar. Bu yüzden lazer hızı sertleşme üzerindeki güçlü etkisinden dolayı en önemli proses parametresi olarak belirlenmiştir. Lazer sertleştirme prosesinde lazer hızının etkisinin yanı sıra lazer penetrasyon etkisinde sertleşme prosesine etkisi önemlidir. Lazer hızının 4 m/dk ile 1.5 mm sacın tam penetrasyonu $E=100\%$ ile lazer hızının 10 m/dk ile 1.5mm sacın $E=penetrasyon\ derinliğinin\ \%50'sine$ düşürülmesi sonucunda sertlik değerindeki değişimini göstermektedir (Jahn ve ark. 2011).



Şekil 2.12. İki farklı lazer hızına ve farklı lazer penetrasyon değerlerine karşı sertlik ölçümleri (Jahn ve ark 2011'den alınmıştır)

3. MATERYAL ve YÖNTEM

3.1. Malzeme Özellikleri

Yapılan literatür araştırmaları neticesinde beş farklı karbon (C) oranına sahip malzeme belirlendi (Wagner ve ark. 2016, Jahn ve ark 2011). Belirlenen malzemelerin kimyasal bileşimi ve sertlik değerleri aşağıda verilmiştir. Malzeme kimyasal bileşimi ‘Simufact Welding Material 2018’ yazılımının malzeme kütüphanesi kullanılarak oluşturulmuştur.

1. Akma dayanımı 1400 N/mm^2 ve sertlik değeri **275 Hv** sahip malzemenin kimyasal analizi

Çizelge 3.1 Akma dayanımı 1400 N/mm^2 sahip çelik malzeme kimyasal bileşimi (Simufact Welding Material 2018’den değiştirilerek alınmıştır)

Akma Dayanımı 1400 N/mm^2 Sahip Çelik Malzeme					
Al	0.039	Fe	97.99	S	0.001
B	0.003	Mn	1.24	Si	0.26
C	0.24	Mo	0.004	Ta	0.003
Co	0.005	N	0.0008	Ti	0.035
Cr	0.12	Ni	0.02	V	0.0008
Cu	0.015	P	0.012		

2. Akma dayanımı 355 N/mm^2 ve sertlik değeri **150 Hv** sahip malzemenin kimyasal analizi

Çizelge 3.2 Akma dayanımı 355 N/mm^2 sahip çelik malzeme kimyasal bileşimi (Simufact Welding Material 2018’den değiştirilerek alınmıştır)

Akma Dayanımı 355 N/mm^2 Sahip Çelik Malzeme					
Al	0.05	Mn	1.6	S	0.011
C	0.17	N	0.005	Si	0.02
Fe	98.127	P	0.017		

3. Akma dayanımı 700 N/mm^2 ve sertlik değeri **260 Hv** sahip malzemenin kimyasal analizi

Çizelge 3.3. Akma dayanımı 700 N/mm² sahip çelik malzeme kimyasal bileşimi (Simufact Welding Material 2018'den değiştirilerek alınmıştır)

Akma Dayanımı 700 N/mm² Sahip Çelik Malzeme					
C	0.16	Mn	1.45	S	0.005
Cr	0.55	Mo	0.37	Si	0.3
Fe	96.963	Ni	0.15	V	0.04
P	0.012				

4. Akma dayanımı 250 N/mm² ve sertlik degeri **135 Hv** sahip malzemenin kimyasal analizi

Çizelge 3.4. Akma dayanımı 250 N/mm² sahip çelik malzeme kimyasal bileşimi (Simufact Welding Material 2018'den değiştirilerek alınmıştır)

Akma Dayanımı 250 N/ mm² Sahip Çelik Malzeme					
C	0.15	Fe	98.293	S	0.027
Cu	0.4	Mn	1.1	N	0.01
P	2				

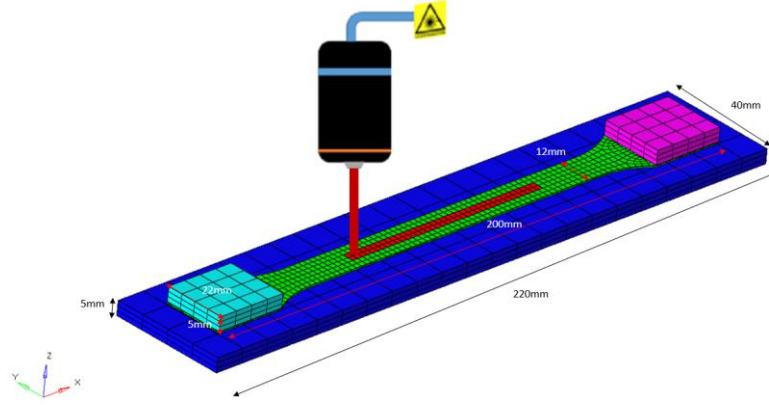
5. Akma dayanımı 300 N/mm² ve sertlik degeri **150 Hv** sahip malzemenin kimyasal analizi

Çizelge 3.5. Akma dayanımı 300 N/mm² sahip çelik malzeme kimyasal bileşimi (Simufact Welding Material 2018'den değiştirilerek alınmıştır)

Akma Dayanımı 300 N/mm² Sahip Çelik Malzeme					
Al	0.02	Mn	1.1	Si	0.65
C	0.1	Mo	0.15	Ti	0.15
Fe	97.68	Ni	0.15		

3.2. Lazer Sertleştirme Uygulanacak Numune Ölçüleri

Lazer sertleştirme prosesi kapsamında yapacağımız çalışmaları süreci daha etkin ve hızlı şekilde yürütmek ve değerlendirmek için numuneler üzerinde çalışmalar gerçekleştirdik. Bu numune ve fikstür ölçüleri Şekil 3.1'de gösterildiği şekildedir.



Şekil 3.1. Lazer sertleştirme prosesinde kullanılan numune ve fiktür ölçüleri

3.3. Lazer Sertleştirme Prosesine Etki Eden Parametreler ve Seviyeleri

Yapılan araştırmalar sonucunda lazer sertleştirme prosesine etki eden parametreler ve seviyeleri Çizelge 3.6’da gösterilmektedir. Bu parametreler sırası ile lazer gücü, lazer hızı, lazerin sac üzerinde etki alanını ve derinliğini belirlemek için üst radius, alt radius, derinlik değerleri, malzeme tipi ve soğuma süresi olarak belirlenmiştir.

Çizelge 3.6. Lazer sertleştirme prosesine etki eden parametreler ve seviyeleri

Parametreler	Birimler	Seviye				
		1	2	3	4	5
Lazer Gücü	kw	600	700	800	900	1000
Lazer Hızı	mm/s	6	8	10	12	14
Üst Radius	mm	3	2,5	2	1,8	1,5
Alt Radius	mm	1,5	1,3	1	0,7	0,5
Derinlik	mm	1	0,8	0,7	0,6	0,5
Soğuma Süresi	$W/m^2 * K$	20	100	500	1000	20000
Malzeme Tipi	-	1	2	3	4	5

Malzeme tipi 1,2,3,4 ve 5 olarak isimlendirilen malzemeler sırası ile Bölüm 3.1. ‘de belirlenen malzemelerdir. Farklı soğuma süresi tanımlamak için simülasyon ortamında

farklı ısı iletim katsayıları kullanarak sağlanmaktadır. Bu iletim katsayıları aşağıda belirtilen Çizelge 3.7. referans alınarak belirlenmiştir (Çolak ve Ayık 2020).

Çizelge 3.7. Isı iletim koşulları ve ısı iletim katsayıları

Isı İletim Koşulları	Isı İletim Katsayısı [W / m ² * k]
Serbest Taşınımli Gazlar	5-37
Serbest Taşınımli Su	100-1200
Serbest Tasınan Yağ	50-350
Tupler ve Borular Arasında Gaz Akışı	10-350
Tüplerde Akan Su	500-1200
Tüplerde Akan Yağ	300-1700
Tüplerden Akan Erimiş Metaller	2000-45000
Kabarcıklı Kaynamış Su	2000-45000

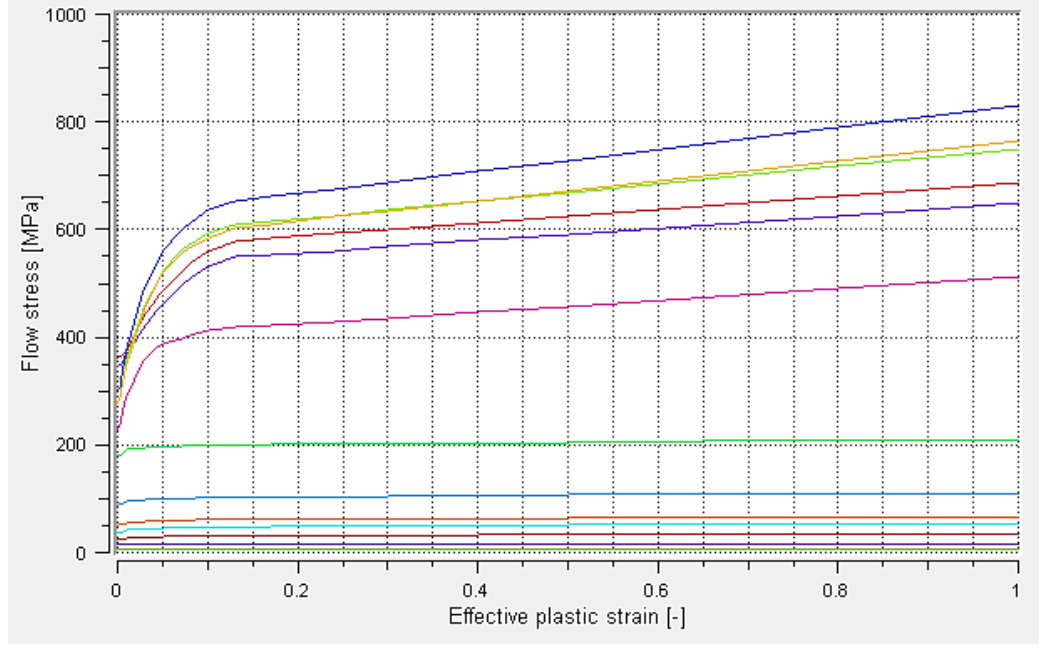
3.4. Malzemenin ve Uygulanacak Parametrelerin Belirlenmesi

Belirlenen 5 farklı malzeme içerisinde akma dayanımı 355 N/mm² ve sertlik değeri 150 Hv sahip malzeme seçildi. Bu seçim işlemini daha sonra üzerinde lazer sertleştirme uygulaması yapılacak olan çarpışma kutusu malzemesi referans alınarak belirlendi.

Akma dayanımı 355 N/mm² ve sertlik değeri 150 Hv sahip malzemenin farklı sıcaklık değerlerine göre gerilme-şekil değiştirme eğrisi Şekil 3.2’de ve kimyasal bileşimi Çizelge 3.8 ‘de gösterilmektedir.

Çizelge 3.8. Akma dayanımı 355 N/mm² sahip çelik malzeme kimyasal bileşimi (Simufact Welding Material 2018’den değiştirilerek alınmıştır)

Akma Dayanımı 355 N/mm ² Sahip Çelik Malzeme					
Al	0.05	Mn	1.6	S	0.011
C	0.17	N	0.005	Si	0.02
Fe	98.127	P	0.017		



Şekil 3.2. Gerilme-şekil değiştirme eğrisi (Simufact Welding Material 2018'den değiştirilerek alınmıştır)

Bu aşamada optimize edilecek lazer sertleştirme proses parametreleri ve seviyeleri Çizelge 3.9'da gösterildiği şekildedir. Parametrelerin içerisinde 5 parametrenin seçilmesindeki sebep model kurulum esnasında test sayısını azaltmak ve daha anlamlı matematiksel model kurmaktır. Bu parametreler sırası ile; lazer gücü, lazer hızı, lazerin sac üzerinde etki alanını ve derinliğini belirlemek için üst radius, alt radius ve derinlik değerleri yer almaktadır.

Çizelge 3.9. Lazer sertleştirme prosesine etki eden parametreler ve seviyeleri

Parametreler	Birimler	Seviye				
		1	2	3	4	5
Lazer Gücü	kw	600	700	800	900	1000
Lazer Hızı	mm/s	6	8	10	12	14
Üst Radius	mm	3	2,5	2	1,8	1,5
Alt Radius	mm	1,5	1,3	1	0,7	0,5
Derinlik	mm	1	0,8	0,7	0,6	0,5

3.5. Deneysel Tasarım Yöntemleri

Deneysel tasarım yöntemi 1920 yıllarında genetikçi ve matematikçi olan Fisher tarafından ortaya atılmış bir yöntemdir (Gökçe ve Taşgetiren 2009). Yöntem matematiksel problemleri analiz etmek şekillendirme ve süreçleri iyileştirmek için oluşturulmuştur. Bu yöntemler sayesinde süreci ya da prosesi etkileyen bağımlı ya da bağımsız değişkenler arasındaki ilişkiyi matematiksel olarak tanımlamak ve sürecin optimize edilmesinde kullanılmaktadır.

3.5.1. Taguchi Deney Tasarım Yöntemi

Taguchi deney tasarım yöntemi, otomotiv ve makine sanayinde en çok kullanılan deneysel tasarım yöntemlerinden bir tanesidir. Bu yöntemde kullanılmak üzere daha önceden belirlediğimiz lazer sertleştirme yöntemine etki eden parametreler ve seviyeleri Çizelge 3.10'da gösterildiği şekildedir (Derdour ve ark. 2018).

Lazer sertleştirme proses işlemi sırasında kullanılacak olan parametre ve seviyelerimizi dikkate alarak deneysel tasarım yöntemlerinden olan Taguchi deney tasarım yönteminde kullanılan ortogonal tablolardan parametre ve seviyemize uygun olan L25 ortogonal dizisi seçilerek Çizelge 3.10'da gösterildiği şekilde oluşturulmuştur.

Çizelge 3.10. Taguchi L25 ortogonal deney tasarım tablosu

Test	Lazer Gücü	Lazer Hızı	Üst Radius	Alt Radius	Derinlik
1	600	6	3	1.5	1
2	600	8	2.5	1.3	0.8
3	600	10	2	1	0.7
4	600	12	1.8	0.7	0.6
5	600	14	1.5	0.5	0.5
6	700	6	2.5	1	0.6
7	700	8	2	0.7	0.5
8	700	10	1.8	0.5	1

Çizelge 3.10. Taguchi L25 ortogonal deney tasarım tablosu (devam)

9	700	12	1.5	1.5	0.8
10	700	14	3	1.3	0.7
11	800	6	2	0.5	0.8
12	800	8	1.8	1.5	0.7
13	800	10	1.5	1.3	0.6
14	800	12	3	1	0.5
15	800	14	2.5	0.7	1
16	900	6	1.8	1.3	0.5
17	900	8	1.5	1	1
18	900	10	3	0.7	0.8
19	900	12	2.5	0.5	0.7
20	900	14	2	1.5	0.6
21	1000	6	1.5	0.7	0.7
22	1000	8	3	0.5	0.6
23	1000	10	2.5	1.5	0.5
24	1000	12	2	1.3	1
25	1000	14	1.8	1	0.8

Üretim veya ürün kullanımında, kontrol edilebilen sistemden alınan gerçek değerler olan sinyal faktörleri (S) ile kontrol edilemeyen ancak deney sonucunu etkileyen gürültü faktörleri (N) vardır. Bu faktörlerin etkisini görmek ve azaltmak için sinyal-gürültü (S/N) oranı tanımlaması yapılır. Üretim veya süreç üzerindeki gürültü faktörü (N) etkisini en aza indiren, kontrol faktörünü tanımlamak ve seviyelerini belirlemek gereklidir. Tasarımdaki kontrol faktörü seviyelerinin her bir kombinasyonu için ayrı bir (S/N) oranı hesaplanır. Denemenizin amacına bağlı olarak, farklı (S/N) oranları arasından seçim yapmak mümkündür (Derdour ve ark. 2018). Burada gürültü faktörü ne kadar küçük olursa hedefimize o kadar çok yaklaşmış oluruz. Bu çalışmada (S/N) yöntemlerinden biri olan en büyük en iyi yöntemi (larger the better) kullanılmıştır (Derdour ve ark. 2018).

$$S/N = -10 * \log_{10} \frac{1}{n} \sum_{i=0}^n \frac{1}{y_i^2} \quad (3.1)$$

Taguchi deneylerinde genellikle 2 aşamalı bir optimizasyon işlemi kullanır. 1. adımda, değişkenliği azaltan kontrol faktörlerini tanımlamak için sinyal-gürültü oranını kullanımı. 2. adımda, ortalamayı hedefe hareket ettiren ve sinyal-gürültü oranı üzerinde küçük veya hiç etkisi olmayan kontrol faktörlerini kullanılır (Derdour ve ark. 2018).

Yapılan 25 adet test sonucunda elde edilen sertlik değerleri iki optimizasyon yöntemine göre incelenmiştir. Analiz sonuçlarına bakılarak parametrelerin lazer sertleştirme prosesine etkileri, etki derecesine göre signal gürültü oranı Çizelge 3.11. ve ortalamaya göre Çizelge 3.12. verilmiştir.

Çizelge 3.11. Sinyal-gürültü oranı

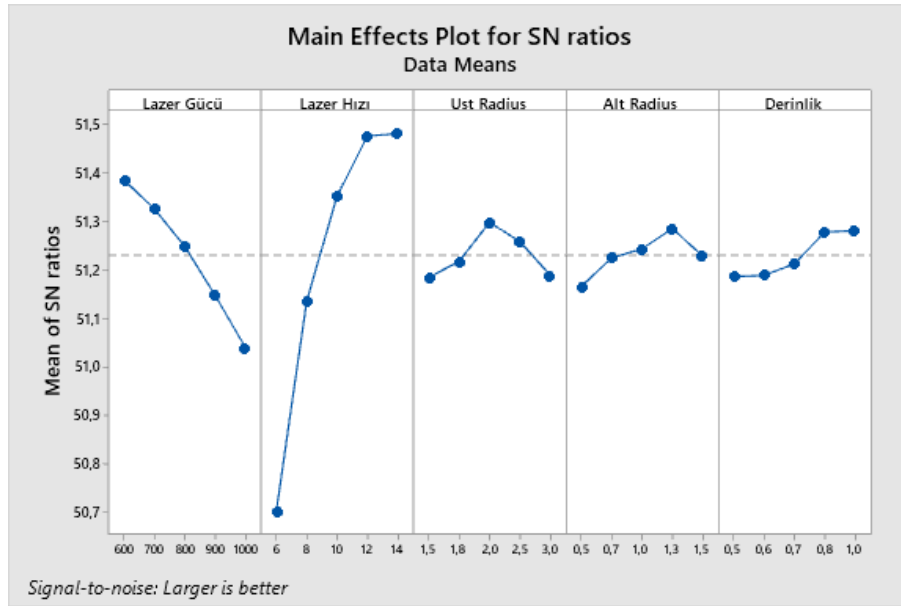
Level	Lazer Gücü	Lazer Hızı	Üst Radius	Alt Radius	Derinlik
1	51,39	50,70	51,18	51,17	51,19
2	51,33	51,14	51,22	51,22	51,19
3	51,25	51,35	51,30	51,24	51,21
4	51,15	51,48	51,26	51,29	51,28
5	51,04	51,48	51,19	51,23	51,28
Delta	0,35	0,78	0,11	0,12	0,09
Rank	2	1	4	3	5

Çizelge 3.12. Ortalama

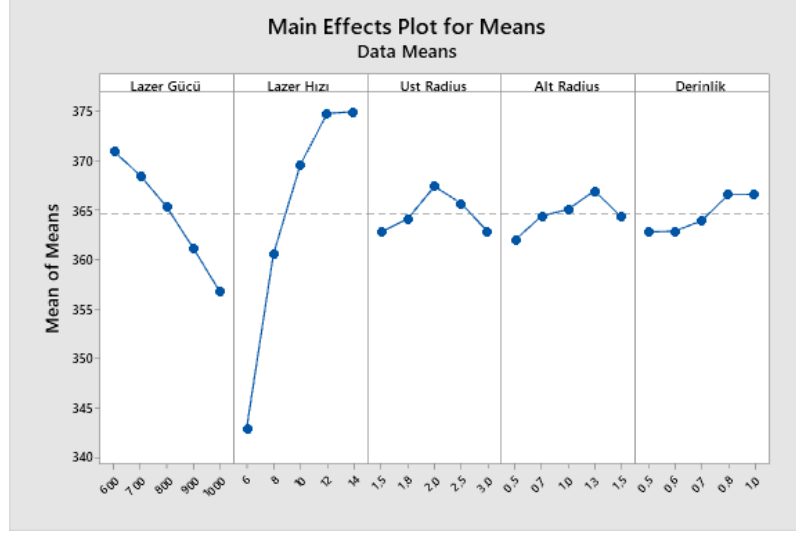
Level	Lazer Gücü	Lazer Hızı	Üst Radius	Alt Radius	Derinlik
1	371,0	342,9	362,8	362,0	362,8
2	368,6	360,6	364,2	364,4	362,9
3	365,4	369,6	367,4	365,1	364,0
4	361,2	374,8	365,7	367,0	366,6
5	356,8	375,0	362,8	364,4	366,6
Delta	14,2	32,1	4,6	5,0	3,8
Rank	2	1	4	3	5

Çizelge 3.11.'de S/N oranına ve Çizelge 3.12.'de ortalama göre sonuçları incelediğimizde lazer hızının lazer sertleştirme prosesinde en etkili parametre olarak karşımıza çıkmaktadır. Ayrıca Şekil 3.3. ve Şekil 3.4. baktığımızda her bir parametre için belirlenen aralıklarda seviye değerlerinin etkileri görülmektedir. Bu grafik bize uygun seviye aralıklarını belirlememizde yardımcı olacaktır. Bu grafiklere bakarak parametrelerin lazer sertleştirme prosesindeki etkileri sırasıyla; lazer gücünün 600kW, lazer hızının 12 mm/s, üst radius 2 mm, alt radius 1.3 mm ve derinlik değerinin 0.8 mm seviyelerinde olduğu görülmektedir.

Taguchi deney tasarım yönteminde elde ettiğimiz sonuçları desteklemek ve kesin sonuçlara ulaşabilmek için Anova analiz yöntemi ve Yanıt yüzey yöntemi kullanılmıştır. Yanıt Yüzey yöntemi ile Regresyon analizi yapılarak bir matematiksel model kurulmuştur. Bu kurulan model üzerinden optimizasyon çalışması yapılmıştır.



Şekil 3.3. S/N oranına göre parametrelerin lazer sertleşmeye etkisi ve etkinlik dereceleri



Şekil 3.4. Ortalamaya göre parametrelerin lazer sertleşmeye etkisi ve etkinlik dereceleri

3.5.2. Anova Analiz Yöntemi

Anova analiz yöntemi istatistiksel olarak kullanılan en yaygın yöntemlerden birisidir. Anova analizi üç ve daha fazla bağımsız değişkenin ortalama arasındaki farkın hesaplanmasında kullanılır. Anova tek başına üç veya daha fazla grubun aritmetik ortalamalarını kümülatif olarak karşılaştırır; bu karşılaştırmalardan en az birisi anlamlı olduğunda Anova sonucu da anlamlı bulunur (Sarıkaya ve Güllü 2014).

Bu durumda hipotezler; yüzde 95 güven aralığında parametrelerin anlamlılık düzeyi test edilir. Burada p değerinin 0.05 altında olduğu değerler bizim için anlamlıdır. Lazer sertleştirme prosesine etki dereceleri sırasıyla lazer hızı (%74.98), lazer gücü (%13.46), üst radius (%1.65), derinlik (%1.49) ve alt radiustur (%1.34).

Çizelge 3.13. Ortalama

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value	Contribution
Lazer Gücü	4	648,86	648,86	162,22	1,90	0,274	13,46%
Lazer Hızı	4	3613,15	3613,15	903,29	10,59	0,021	74,98%
Üst Radius	4	79,71	79,71	19,93	0,23	0,906	1,65%
Alt Radius	4	64,35	64,35	16,09	0,19	0,932	1,34%
Derinlik	4	71,89	71,89	17,97	0,21	0,920	1,49%
Error	4	341,11	341,11	85,28			7,08%
Total	24	4819,08					

3.5.3. Yanıt Yüzey Yöntemi

Yanıt Yüzey yöntemi bir dizi matematiksel mühendislik problemlerini şekillendiren, analiz eden, süreçleri geliştiren, iyileştiren ve optimize eden istatistiksel bir tekniktir. Yanıt Yüzey metodunun sunduğu avantajlar, bağımsız değişkenler arasındaki etkileşimin belirlenmesi, sistemin matematiksel olarak modellenmesi ve deneme sayısını azaltarak zamandan ve maliyetten tasarruf sağlamaktadır. Bununla birlikte, Yanıt Yüzey yönteminin en önemli dezavantajı, deney verilerinin ikinci dereceden bir polinom modeline yerleştirilmesidir. Eğriliği olan tüm sistemlerin ikinci dereceden bir polinom modeliyle uyumlu olduğunu söylemek doğru değildir. Ayrıca, modeldeki tahmini değerlerin deneysel olarak doğrulanması mutlaka yapılmalıdır (Derdour ve ark. 2018).

Yanıt Yüzey Yöntemi Birinci Uygulama

Daha önceki uygulamış olduğumuz Taguchi deney tasarımı yöntemi ile problem tanımı, bağımlı ve bağımsız değişkenlerin tanımlanması, seviyelerin belirlenmesi ve uygun tasarım modeli seçilerek deneyler yapılmıştı. Sonraki aşama olan modelin değerlendirilmesi aşamasında Regresyon analizi yapılarak devam edilmiştir. Regresyon analizi, bir grup test faktörü ile objektif fonksiyonlar arasındaki ilişkiyi matematiksel modelle tanımlamamıza ve ölçmemize yarayan yöntemdir. Regresyon analizi ile parametreler arasındaki ilişki yüzde 95 güven aralığında test edilmiştir.

Çizelge 3.14 Regresyon Analizin Varyansı

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	20	4800,74	240,037	52,37	0,001
Linear	5	1944,98	388,997	84,87	0,000
lazer gücü	1	52,17	52,170	11,38	0,028
lazer hızı	1	826,44	826,436	180,30	0,000
üst radius	1	6,47	6,471	1,41	0,300
alt radius	1	5,33	5,327	1,16	0,342
derinlik	1	55,27	55,269	12,06	0,026
Square	5	367,29	73,458	16,03	0,009
lazer gücü*lazer gücü	1	15,56	15,558	3,39	0,139
lazer hızı*lazer hızı	1	48,40	48,403	10,56	0,031
üst radius*üst radius	1	9,02	9,020	1,97	0,233

Çizelge 3.14 Regresyon Analizin Varyansı (devamı)

alt radius*alt radius	1	34,66	34,657	7,56	0,051
derinlik*derinlik	1	41,43	41,425	9,04	0,040
2-Way Interaction	10	369,32	36,932	8,06	0,030
lazer gücü*lazer hızı	1	32,66	32,663	7,13	0,056
lazer gücü*üst radius	1	1,60	1,597	0,35	0,587
lazer gücü*alt radius	1	21,85	21,845	4,77	0,094
lazer gücü*derinlik	1	47,16	47,161	10,29	0,033
lazer hızı*üst radius	1	7,14	7,143	1,56	0,280
lazer hızı*alt radius	1	2,15	2,150	0,47	0,531
lazer hızı*derinlik	1	0,40	0,397	0,09	0,783
üst radius*alt radius	1	0,93	0,926	0,20	0,676
üst radius*derinlik	1	22,43	22,427	4,89	0,091
alt radius*derinlik	1	37,59	37,595	8,20	0,046
Error	4	18,33	4,584		
Total	24	4819,08			

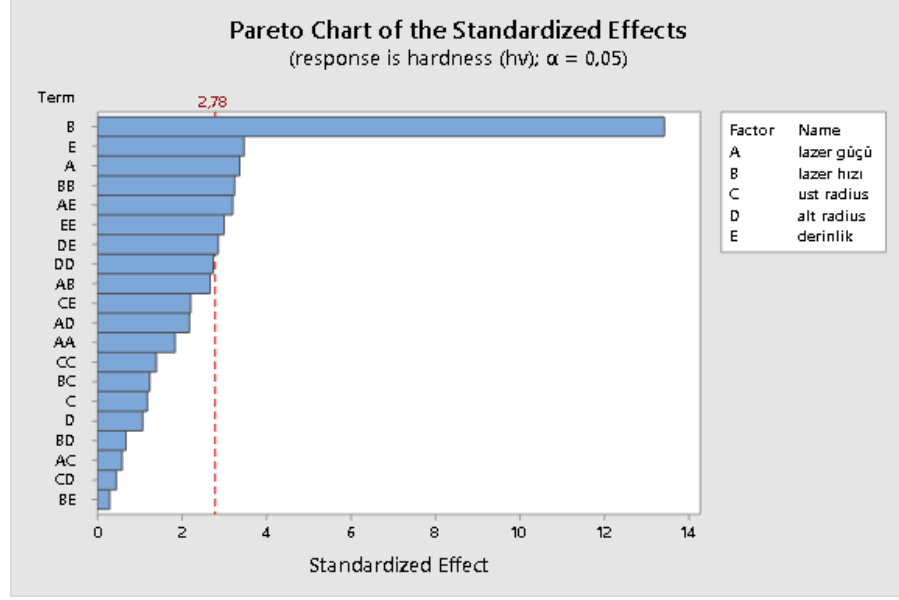
Yukarıdaki Regresyon analizi sonunda 0.05 değerinden daha düşük olan koyu renkli olarak gösterilen her bir değer lazer sertleştirme prosesine etki etmektedir. Regresyon analizi oluştururken kullanılan ikinci dereceden Yanıt Yüzey modeli denklemi aşağıdaki gibidir (Derdour ve ark. 2018).

$$y = b_o + \sum_{i=1}^n b_i x_{iu} + \sum_{i=1}^n b_{ii} x_{iu}^2 + \sum_{i=1}^n \sum_{i < j} b_{ij} x_{iu} x_{ju} + \varepsilon \quad (3.2)$$

Yukarıdaki denklemde kullanılan tanımlamalar: y yanıtı, x_{iu} x_{ju} parametreleri, b_o Regresyon denkleminin sabiti, b_i doğrusal katsayıları, b_{ij} etkileşim katsayılarını, b_{ii} kuadratik katsayıları ε uygun hatayı temsil eder. Bu parametreleri kullanarak Regresyon analizi sonrasında yüzey sertleştirme prosesine etki eden parametreler arasındaki ilişkiyi matematiksel modelle tanımlamış bulunmaktayız (Derdour ve ark. 2018). Lazer sertleştirme prosesinin matematiksel modeli aşağıda gösterildiği şekildedir.

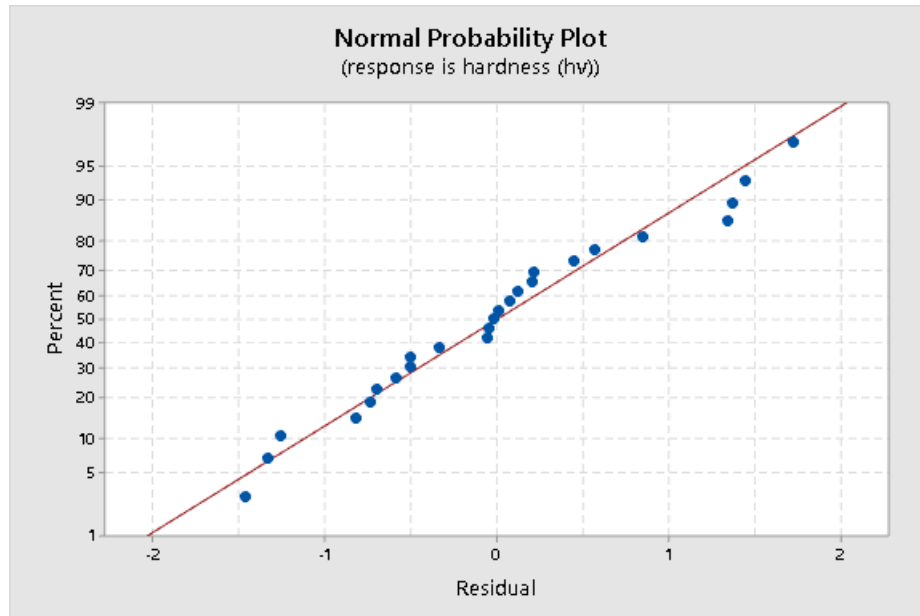
Hardness = 1005 - 0,937 lazer gücü - 6,9 lazer hızı - 80,8 ust radius + 101,1 alt radius-
(hv) 516 derinlik+ 0,000336 lazer gücü*lazer gücü - 0,771 lazer hızı*lazer hızı+
14,2 ust radius*ust radius+60,6 alt radius*alt radius+169,3 derinlik*derinlik+
0,02396 lazer gücü*lazer hızı0,0253 lazer gücü*ust radius-0,1430 lazer gücü
*alt radius+ 0,409 lazer gücü*derinlik+ 2,78 lazer hızı*ust radius+ 0,426lazer hızı
*alt radius+ 0,52 lazer hızı*derinlik- 6,8 ust radius*alt radius+ 18,14 ust radius
*derinlik- 135,8 alt radius*derinlik

Regresyon analizi sonrasında elde edilen Şekil 3.5'teki pareto grafine bakıldığında lazer hızının lazer sertleştirme prosesinde en etkili parametre olduğu ortaya çıkmaktadır.



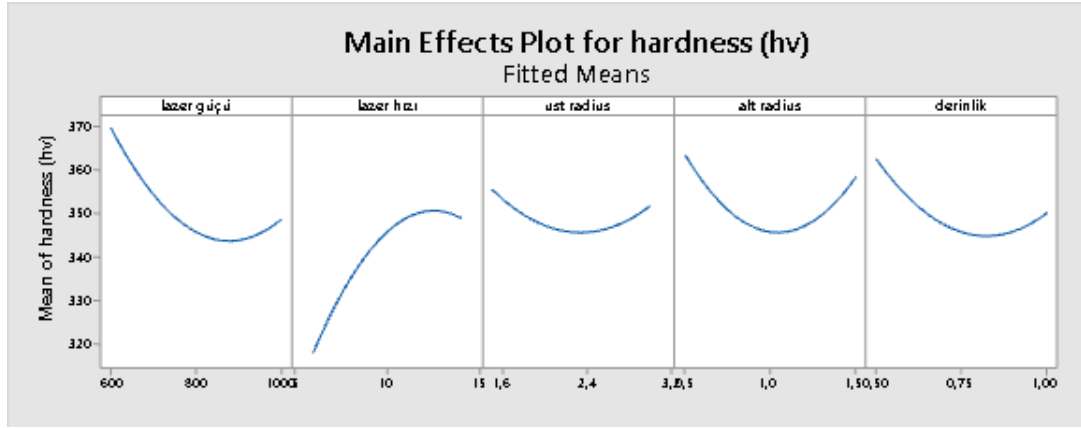
Şekil 3.5. Pareto grafine göre parametrelerin lazer sertleşmeye etki sıralaması

Regresyon analizi sonrasında oluşan lazer sertleştirme prosesi için normal dağılımı aşağıda gösterildiği gibidir.



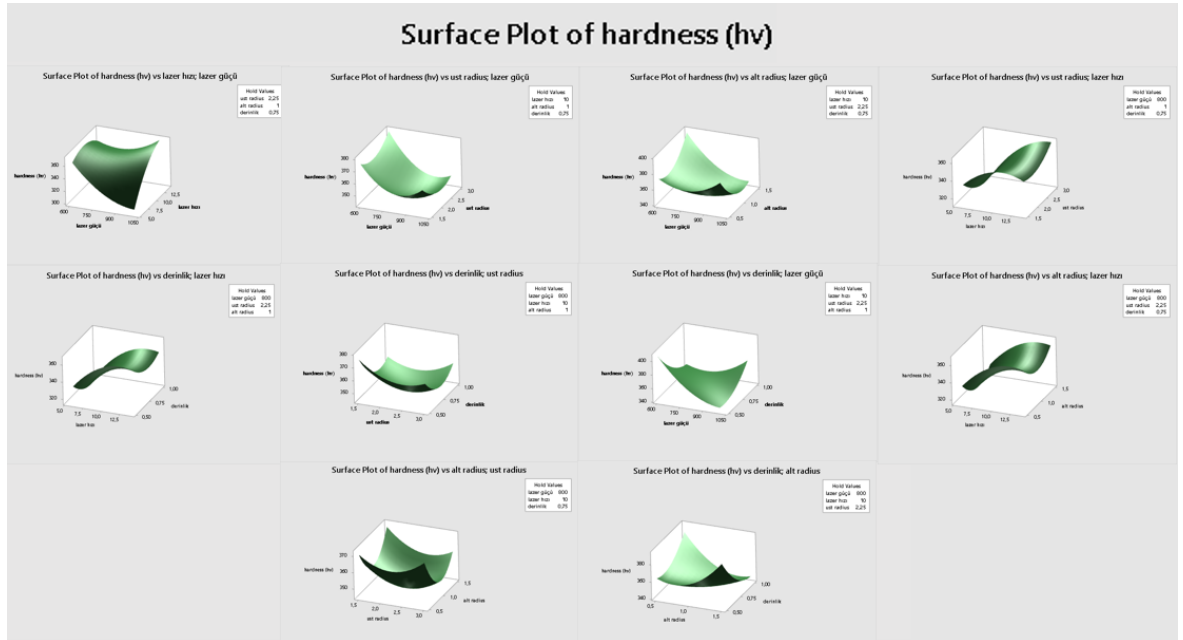
Şekil 3.6. Normal dağılımı

Lazer sertleştirme prosesine etki eden parametreler ortamaya göre Şekil 3.7’de nasıl değiştiği gözlenmektedir.

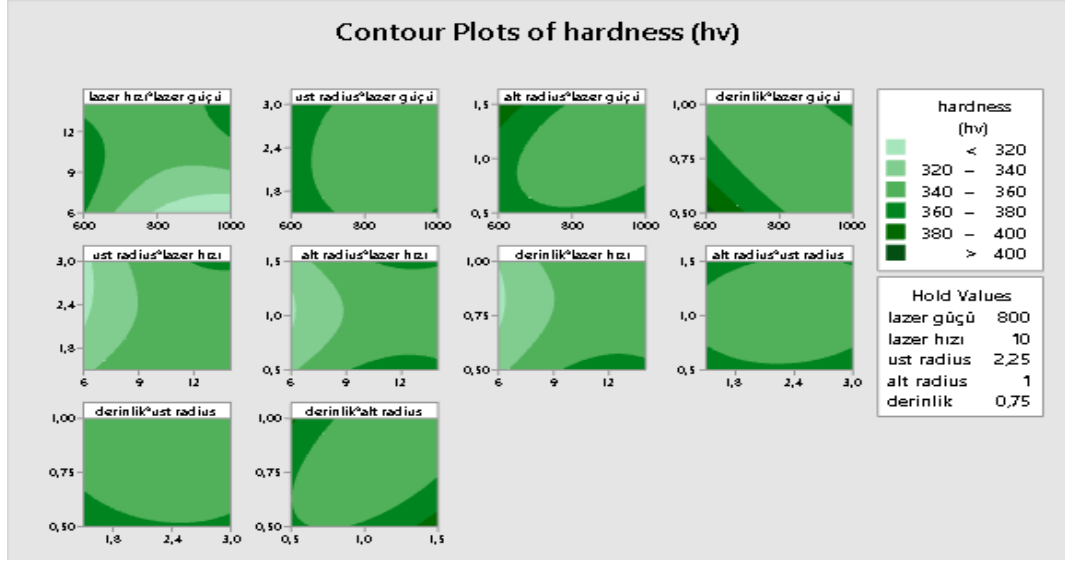


Şekil 3.7. Lazer sertleştirme prosesine etki eden parametreler ortamaya göre değişimi

Yanıt Yüzey metodu ile geliştirilen matematiksel model üzerinde lazer sertleştirme prosesine etki eden parametrelerin birbiri arasındaki ilişkisi incelenmiştir. Bu parametrelerin birbiri üzerindeki etkileri, 3D yüzey ve kontur grafikler Şekil 3.8’de detaylı olarak gösterilmiştir.



Şekil 3.8. Lazer sertleştirme prosesine etki eden parametrelerin birbiri arasındaki ilişkiyi gösteren 3D yüzey grafiği



Şekil 3.9. Lazer sertleştirme prosesine etki eden parametrelerin birbiri arasındaki ilişkiyi gösteren kontur grafiği

Yanıt Yüzey Yöntemi Optimizasyon Çalışması

Kurulan Yanıt Yüzey modeli üzerinden sonraki aşama olan modelin optimize edilmesi aşamasına geçilmiştir. Bu model ile optimizasyon çalışmasında amaç fonksiyonu olarak, seçilen malzemede sertlik değerinin 375 hv, martenzitik dönüşüm %100 sağlanması ve akma mukavemet değerinin maksimize edilmesi olarak kurulmuştur.

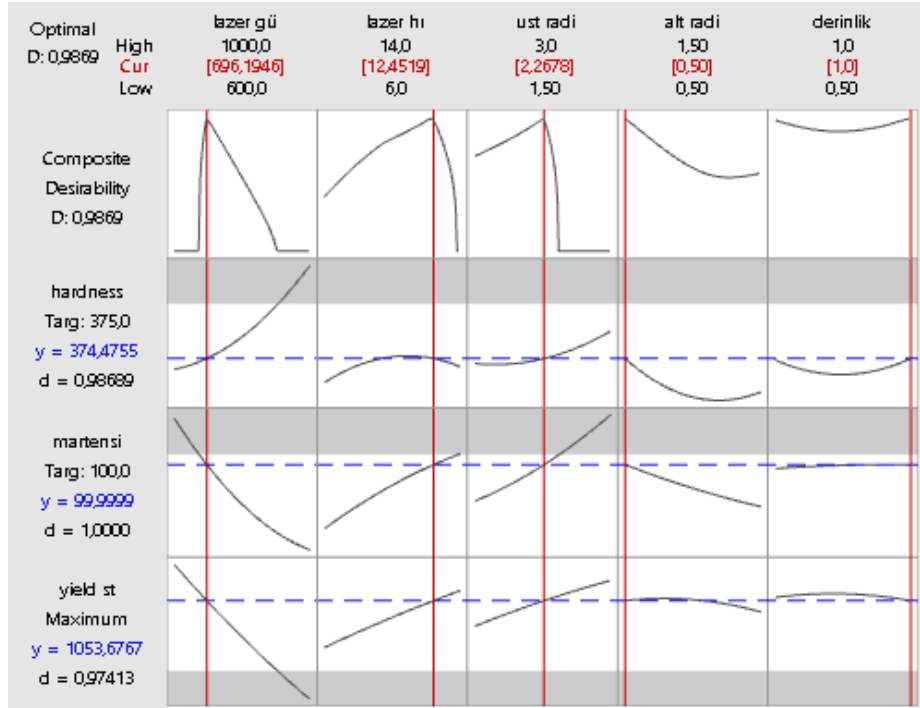
Çizelge 3.15 Yanıt Yüzey Yöntemi parametreleri (hardness (hv); martensite %; yield stress(mpa))

Response	Goal	Lower	Target	Upper	Weight	Importance
Hardness (hv)	Target	335	375	412,5	1	1
Martensite %	Target	0	100	110,0	1	1
Yield stress (mpa)	Maximum	665	1064		1	1

Çizelge 3.16 Yanıt Yüzey Yöntemi sonuçları

Lazer gücü	Lazer hızı	Üst radius	Alt radius	Derinlik	Hardness (hv) Fit	Martensite % Fit	Yield stress (mpa) Fit	Composite desirability
696,195	12,4519	2,2678	0,5	1	374,476	100,000	1053,68	0,986948

Yapılan optimizasyon sonucu incelendiğinde: Lazer gücünün yaklaşık 700 kW, lazer hızının 12 mm/s, üst radius değerinin 2.2 mm, alt radius 0.5 mm ve derinlik değerinin 1mm olduğu ortaya çıkmıştır. Seçilen malzemenin optimizasyon sonrasında belirlenen parametre değerleri ile sertliğin 374.5 martenzitik dönüşümün %100 ve akma mukavemet değeri maksimum 1053 mpa değerine ulaştığı görülmektedir. Şekil 3.10'da sertlik, martenzitik dönüş ve akma mukavemet değerine göre parametrelerin değişimi gösterilmektedir.



Şekil 3.10. Parametrelerin sertlik, martenzitik dönüşüm ve akma mukavemet değerine göre değişimi

Lazer sertleştirme prosesine etki eden parametrelerden lazer torcunun etki yüzeyini ve derinliğinde optimum değerlere ulaşmıştık. Bu aşamada lazer gücü, lazer hızı, soğuma süresi ve malzeme tipi değiştirerek soğuma süresinin ve malzeme cinsinin lazer sertleştirme prosesine etkisini görmeye çalışacağız.

3.5.3.2. Yanıt Yüzey Yöntemi İkinci Uygulama

Bu yöntemi önceki bölümlerde detaylı incelemiştik. Bu aşamada belirlenen 4 parametre ve 5 seviye olacak şekilde Bölüm 3.2’de belirtilen numune üzerinde 25 adet analiz çalışması yapılmıştır. Çizelge 3.17’de her bir numune için gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 3.17. Yanıt Yüzey deneysel tasarım tablosu

Test No	Lazer Gücü [W]	Lazer Hızı [mm/s]	Soğuma Süresi [$w/m^2 * K$]	Malzeme Tipi
1	600	10	20	1
2	600	15	100	2
3	600	20	500	3
4	600	25	1000	4
5	600	30	20000	5
6	700	10	500	5
7	700	15	1000	1
8	700	20	20000	2
9	700	25	20	3
10	700	30	100	4
11	800	10	20000	4
12	800	15	20	5
13	800	20	100	1
14	800	25	500	2
15	800	30	1000	3
16	900	10	100	3
17	900	15	500	4
18	900	20	1000	5
19	900	25	20000	1
20	900	30	20	2
21	1000	10	1000	2
22	1000	15	20000	3
23	1000	20	20	4
24	1000	25	100	5
25	1000	30	500	1

Çizelge 3.17’de belirtilen testler sonrasında elde edilen sertlik değerleri sonuçları ile kurulan model üzerinden Regresyon analizi çalışması yapılmıştır. Bu yapılan Regresyon analizi ile parametreler arasındaki ilişki yüzde 95 güven aralığında test edildi.

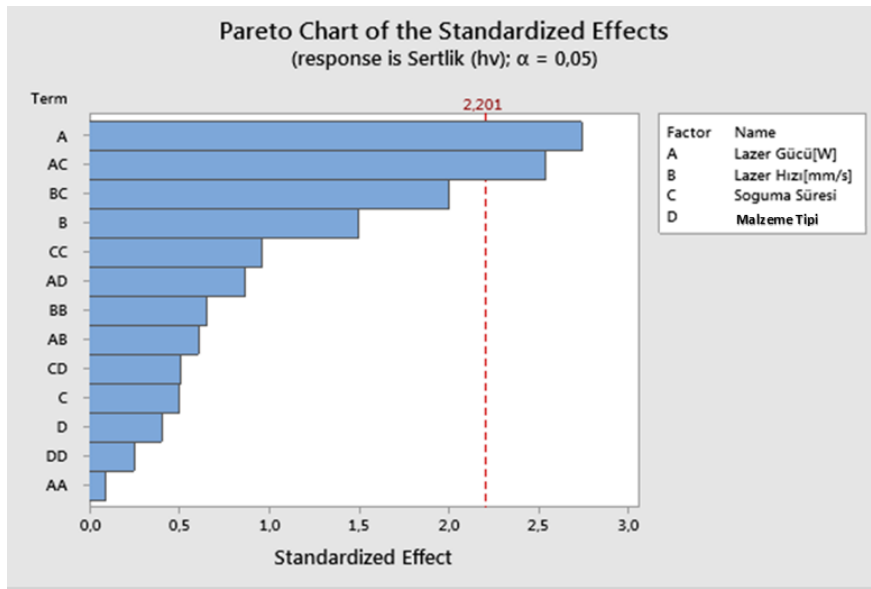
Çizelge 3.18 Regresyon Analizin Varyansı

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	13	222180	17090,8	1,80	0,167
Linear	4	132128	33032,0	3,48	0,045
Lazer Gücü[W]	1	71171	71171,1	7,50	0,019
Lazer Hızı[mm/s]	1	21297	21297,1	2,25	0,162
Soğuma Süresi[W/m ² * K]	1	2365	2365,0	0,25	0,627
Malzeme Tipi	1	1547	1547,1	0,16	0,694
Square	4	12913	3228,3	0,34	0,845
Lazer Gücü[W]*Lazer Gücü[W]	1	79	79,1	0,01	0,929
Lazer Hızı[mm/s]*Lazer Hızı[mm/s]	1	4049	4048,9	0,43	0,527
Soğuma Süresi[W/m ² * K]*Soğuma Süresi[W/m ² * K]	1	8742	8742,3	0,92	0,358
Malzeme Tipi*Malzeme Tipi	1	592	591,7	0,06	0,807
2-Way Interaction	5	86470	17293,9	1,82	0,189
Lazer Gücü[W]*Lazer Hızı[mm/s]	1	3500	3500,1	0,37	0,556
Lazer Gücü[W]*Soğuma Süresi[W/m ² * K]	1	61232	61232,5	6,46	0,027
Lazer Gücü[W]*Malzeme Tipi	1	7050	7049,5	0,74	0,407
Lazer Hızı[mm/s]*Soğuma Süresi[W/m ² * K]	1	37839	37838,8	3,99	0,071
Soğuma Süresi[W/m ² * K]*Malzeme Tipi	1	2456	2455,9	0,26	0,621
Error	11	104336	9485,1		
Total	24	326516			

Yukarıdaki Regresyon Analizi sonunda 0.05 değerinden daha düşük olan koyu renkli olarak gösterilen her bir değer lazer sertleştirme prosesine etki etmektedir. Burada lazer gücünün lazer sertleştirme prosesine en etkili parametre olduğu ortaya çıkmaktadır. Ayrıca lazer gücü ve soğuma süresi arasında anlamlı bir ilişki mevcuttur. Yapılan Regresyon analizin sonucunda lazer sertleştirme prosesinin matematiksel modeli aşağıda gösterildiği şekildedir.

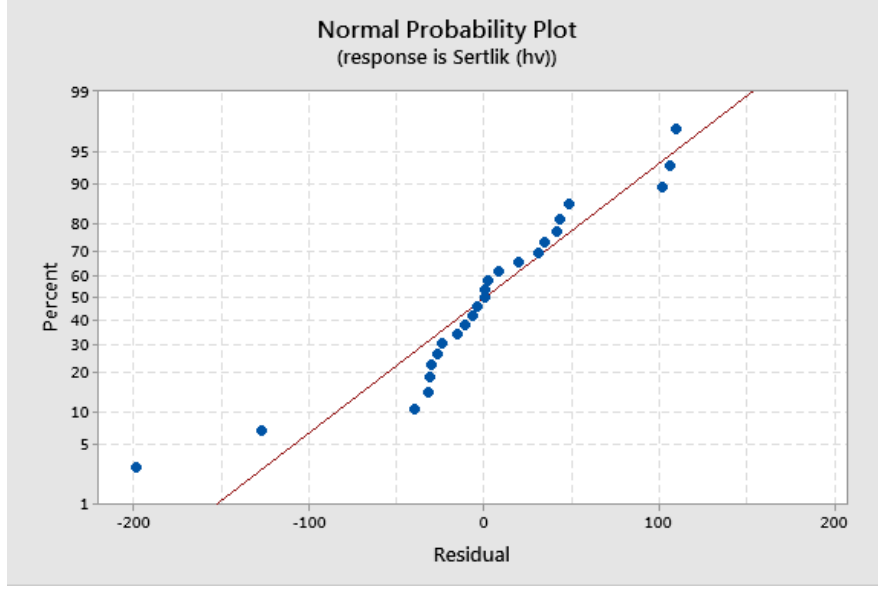
$$\begin{aligned}
\text{Sertlik} = & 1101 - 0,53 \text{ Lazer Gücü[W]} - 37,8 \text{ Lazer Hızı[mm/s]} - 0,0187 \text{ Soğuma Süresi} \\
(\text{hv}) & [\text{W/m}^2 * \text{K}] - 93 \text{ Malzeme Tipi} - 0,00012 \text{ Lazer Gücü[W]} * \text{Lazer Gücü[W]} \\
& + 0,402 \text{ Lazer Hızı[mm/s]} * \text{Lazer Hızı[mm/s]} - 0,000003 \text{ Soğuma Süresi} \\
& [\text{W/m}^2 * \text{K}] * \text{Soğuma Süresi[W/m}^2 * \text{K}] - 4,6 \text{ Malzeme Tipi} * \text{Malzeme Tipi} + \\
& 0,0217 \text{ Lazer Gücü[W]} * \text{Lazer Hızı[mm/s]} + 0,000063 \text{ Lazer Gücü[W]} * \\
& \text{Soğuma Süresi [W/m}^2 * \text{K}] + 0,121 \text{ Lazer Gücü[W]} * \text{Malzeme Tipi} \\
& + 0,001200 \text{ Lazer Hızı[mm/s]} * \text{Soğuma Süresi[W/m}^2 * \text{K}] + 0,00136 \text{ Soğuma} \\
& \text{Süresi[W/m}^2 * \text{K}] * \text{Malzeme Tipi}
\end{aligned}$$

Regresyon analizi sonrasında elde edilen pareto grafiğine bakıldığında lazer hızının lazer sertleştirme prosesinde en etkili parametre olduğu ortaya çıkmaktadır.



Şekil 3.11. Pareto grafiğine göre parametrelerin lazer sertleşmeye etki sıralaması

Regresyon analizi sonrasında oluşan lazer sertleştirme prosesi için normal dağılımı Şekil 3.12'de gösterildiği gibidir.



Şekil 3.12: Normal dağılımı

Yanıt Yüzey Yöntemi Optimizasyon Çalışması

Yapılan çalışmalar neticesinde 25 farklı analizden elde edilen sonuçlar incelendiğinde maksimum sertlik değerinin 488 hv değerine ulaştığını gözlemlemiştik. Amaç foksiyonumuzu sertlik değerini 488 hv değeri olarak belirleyip optimizasyon modelimizi oluşturduk.

Çizelge 3.19 Optimizasyon hedef ve sınırlarının belirlenmesi

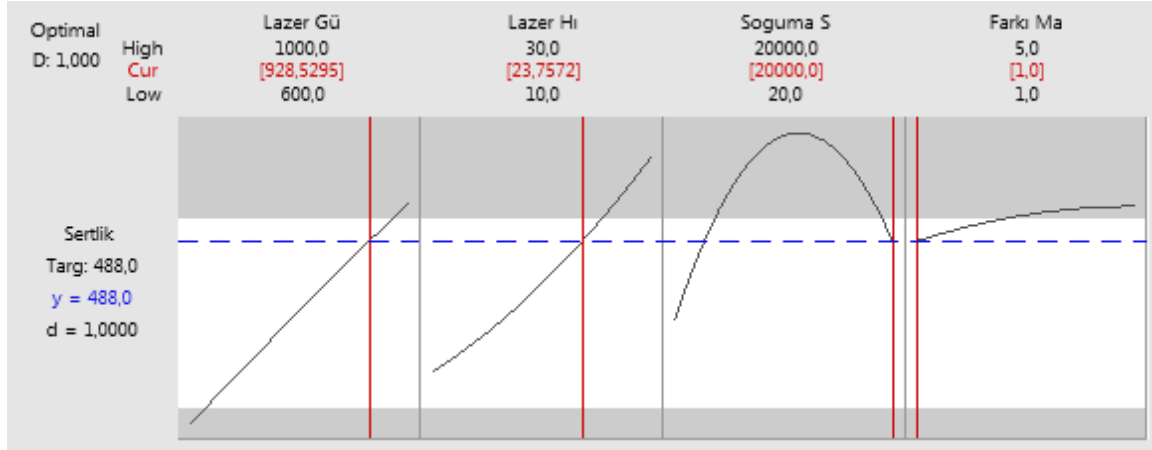
Response	Goal	Lower	Target	Upper	Weight	Importance
Sertlik (hv)	Target	135	488	536,8	1	1

Yapılan optimasyon sonucunda beş farklı malzeme arasından optimum çıkan malzeme birinci malzeme olduğu görülmektedir. Amaçlanan sertlik değerine yaklaşık olarak 930 W lazer gücü, 24 mm/s lazer hızı, 20000 soğuma süresinin olduğu görülmektedir.

Çizelge 3.20 Optimizasyon sonucu

Solution	Lazer Gücü[W]	Lazer Hızı[mm/s]	Soguma Süresi [W/m ² * K]	Malzeme Tipi	Sertlik (hv)	Composite Desirability
1	928,53	23,7572	20000,0	1,00000	488,000	1,00000

Lazer sertleştirme prosesine etki eden parametrelerin belirlenen seviyelerdeki değişimleri aşağıda gösterildiği şekildedir.



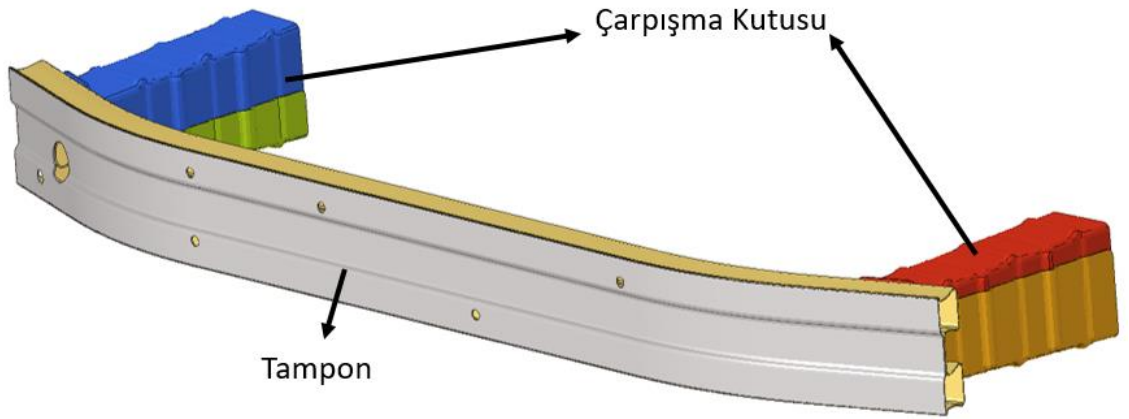
Şekil 3.13. Parametrelerin belirlenen seviyelerdeki değişimi

4. BULGULAR

Numuneler üzerinden yapılan çalışmalar sonucunda parametrelerde optimum değerlere ulaşılmıştı. Bu bölümde elde edilen parametre değerlerini kullanılarak otomotivde kullanılan farklı dayanım özelliklerine sahip malzemelerden oluşan 2 farklı parça analiz edilecektir. İlk olarak akma dayanımı 355 N/mm^2 ve sertlik değeri 150 Hv sahip malzemedan üretilen çarpışma kutusu analiz edilecek. İkinci olarak akma dayanımı 1400 N/mm^2 ve sertlik değeri 275 Hv sahip malzemedan üretilen salıncak kolu parçası analiz edilecektir.

4.1. Çarpışma Kutusu Üzerinde Lazer Sertleştirme Çalışması

Araç güvenlik sisteminin en önemli elemanlarından biri olan çarpışma kutusu pasif güvenlik sisteminin bir elemanıdır. Çarpışma kutusu, kaza anında ortaya çıkan çarpışma enerjisini sönmüleyerek aracın, sürücünün ve yolcuların zarar görmesini önlemek için tasarlanmış yapısal elemanlardır. Aşağıdaki şekilde gösterildiği gibi araç üzerinden tamponun hemen arkasında bulunur.

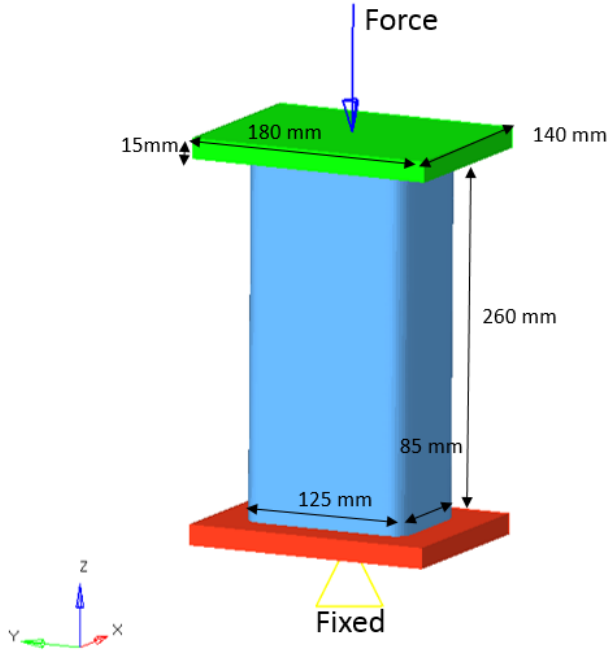


Şekil 4.1. Çarpışma kutusu

Bu çalışmada, dayanımı daha düşük malzeme özelliklerine sahip sac metal malzemenin üzerine lazer sertleştirme yöntemi uygulanarak çarpışma kutusu çarpışma performansının artırılması üzerine çalışılmıştır. Çarpışma kutusu parça üzerinde uygulanacak bölgesel

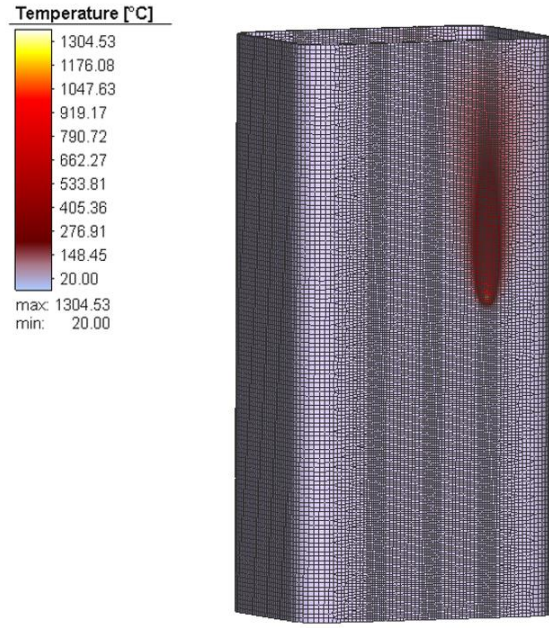
lazer sertleştirme prosesi sayesinde istenilen bölgelerde daha yüksek mukavemetli yapılara sahip olunacaktır. Lazer sertleştirme prosesi ile anizotropik bir yapı elde edilerek, çarpışma kutusu çarpışma davranışının yönlendirilmesi sağlanmıştır.

Çarpışma kutusunun ölçüleri ve sınır koşulları Şekil 4.2’de gösterildiği gibidir. Çarpışma kutusu için kullanılan malzeme özellikleri lazer sertleştirme prosesinde optimize ettiğimiz akma dayanımı 355 N/mm^2 ve sertlik değeri 150 Hv sahip malzemedir.

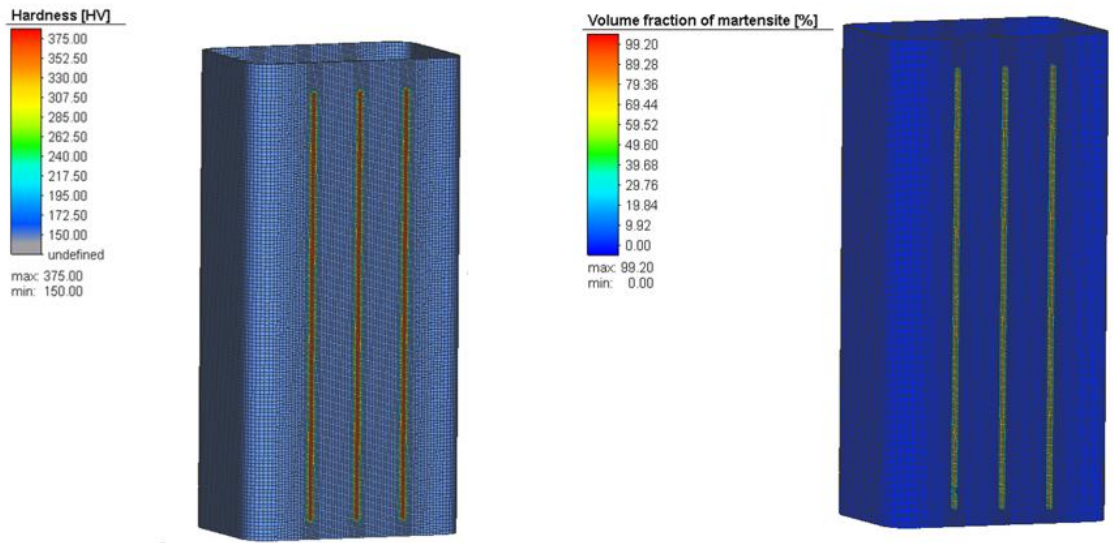


Şekil 4.2 Çarpışma kutusu ölçüleri ve sınır koşulları

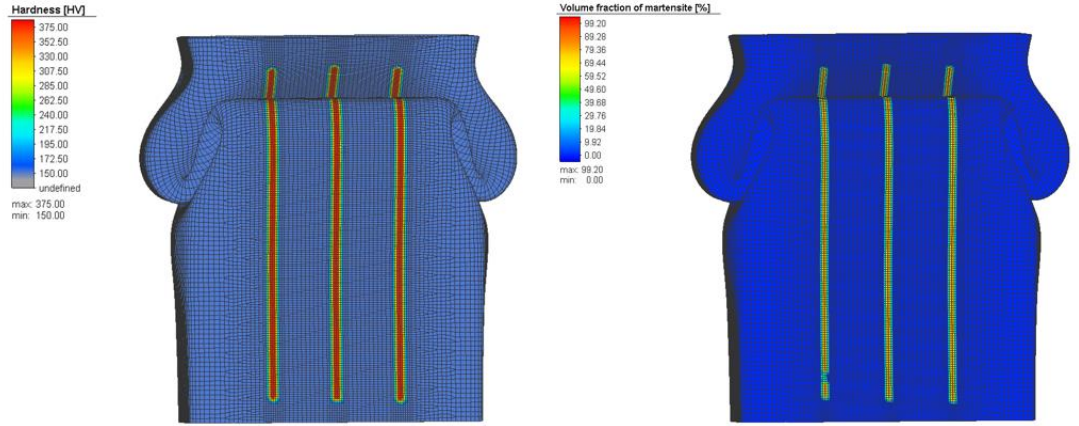
Parametre optimizasyonu sonucunda belirlenen lazer gücünün 700 W, lazer hızının 12 mm/s, üst radius değerinin 2.2 mm, alt radius 0.5 mm ve derinlik değerinin 1 mm olduğu parametreler ile çarpışma kutusu üzerinde yapılan sanal analiz sonuçları aşağıdaki görsellerdeki gibidir. Lazer sertleştirme analiz çalışmalarını ‘Simufact Welding’ yazılımı kullanılarak yapılmıştır.



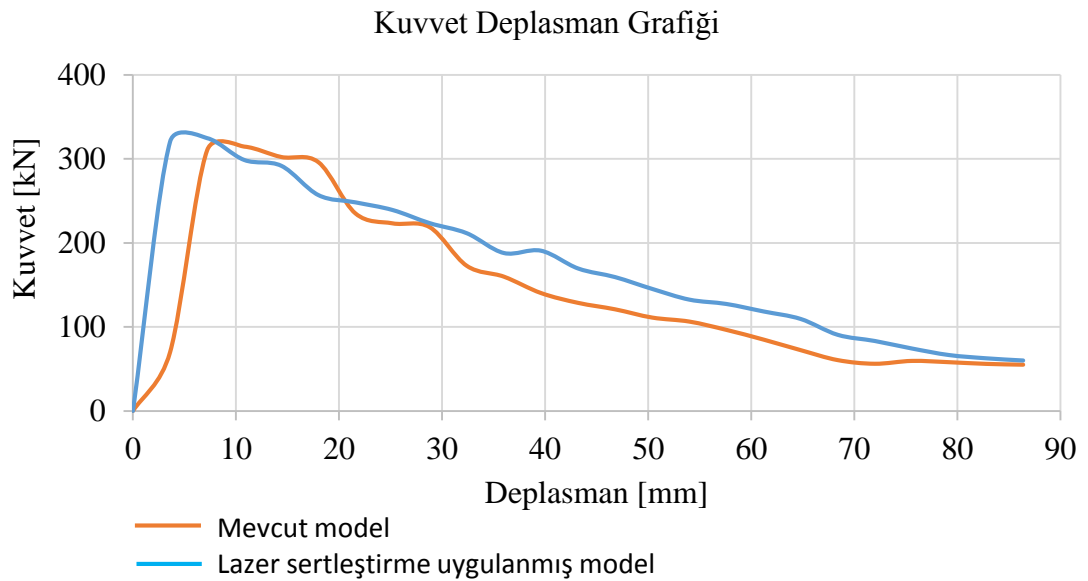
Şekil 4.3. Çarpışma kutusu üzerine lazer sertleştirme prosesi uygulaması



Şekil 4.4. Lazer sertleştirme prosesi sonrası martenzitik dönüşüm ve sertlik değerleri



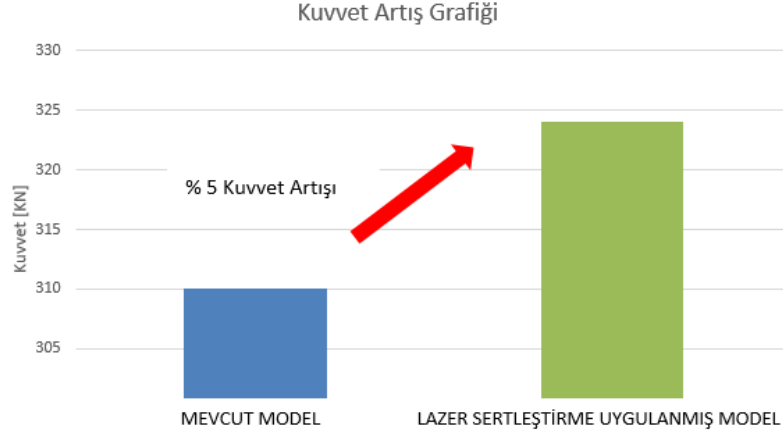
Şekil 4.5. Lazer sertleştirme uygulanmış çarpışma kutusunun çarpışma sonrasındaki görüntüsü



Şekil 4.6. Mevcut ve lazer sertleştirme uygulanmış model kuvvet deplasman grafiği

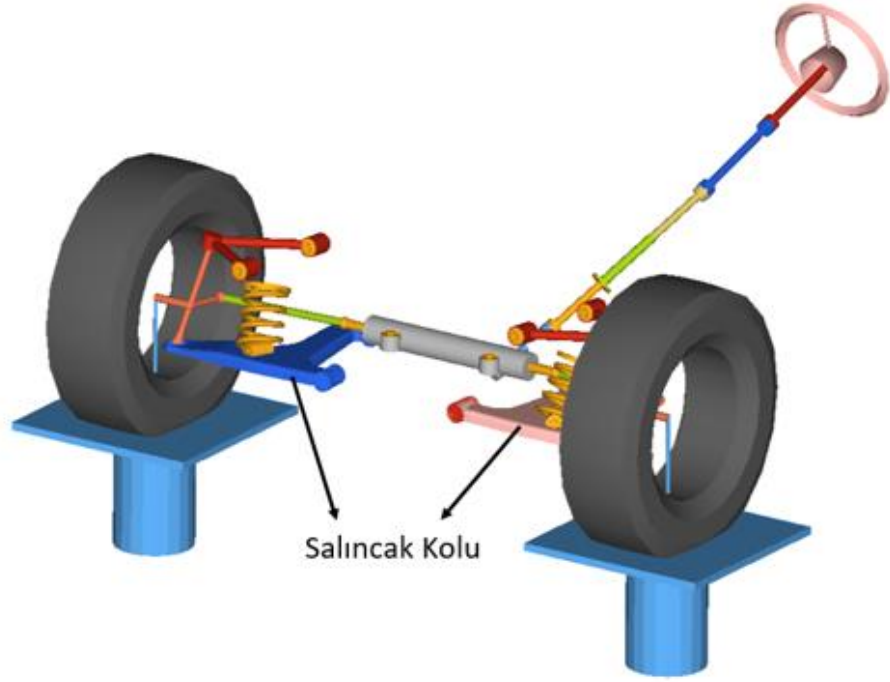
Çarpışma kutusu üzerinde mevcut durum ve lazer sertleştirme prosesi sonrasında yapılan çarpışma simülasyonu sonucunda oluşturulan kuvvet deplasman grafiği yukarıda gösteriliği şekildedir. Maksimum kuvvet değeri Çizelge 4.1’de gösterildiği şekilde %5 artış göstermektedir. Ayrıca enerji sönüm oranı 12.533 joule (j) değerinden 14.990 joule (j) değerine yükselmiş ve yaklaşık olarak %20 artış göstermiştir.

Çizelge 4.1. Maksimum kuvvet değerinin yüzde olarak artışı



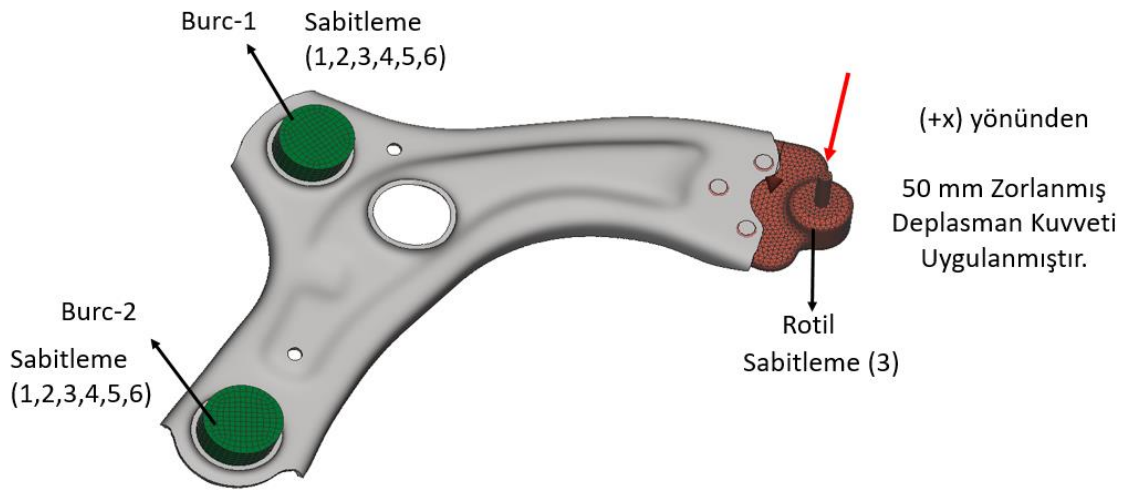
4.2. Salıncak Kolu Üzerinde Lazer Sertleştirme Çalışması

Salıncak kolları, ön ve arka olmak üzere araçlarda çift olarak bulunan şasi ve süspansiyon sisteminin elemanlardan bir tanesidir. Araçta ivmelenme, frenleme ve yoldan gelen yükleri ve yanal hareketleri sönmülme gibi önemli görevleri vardır. Bu nedenle sürüş konforu ve sürüş karakteristikleri açısından önemli bir yapısal elemandır. Salıncak kolları farklı araç ve markalara göre değişmekle birlikte üretim olarak döküm, dövme ve birkaç parçadan oluşan sac parçalar olarak üretilmektedir. Ağırlık azaltma ve karbon emisyonlarındaki ciddi hedefler doğrultusunda salıncak kollarının üretiminde yüksek mukavemetli sac malzemelerin kullanımı ile tek katlı sactan salıncak kollarının geliştirilmesi konusunda yoğun Ar-ge çalışmaları yürütülmeye başlatılmıştır. Ancak sac mukavemeti ne kadar arttırılsa arttırılsın kaynak bölgelerindeki yorulma performansı, mukavemeti ve yapının yorulma dayanımları sınırlı kalmaktadır. Yorulma dayanımından ödün vermeden malzeme, tasarım ve proses değişikliği ile alternatif çalışmalar yürütülmektedir. Buradan yola çıkarak salıncak kolu üzerinde yüksek mukavemet beklenen bölgelere lazer sertleştirme yöntemi uygulanarak parçanın dayanım performansı üzerinde iyileştirme çalışmaları yapılmıştır.



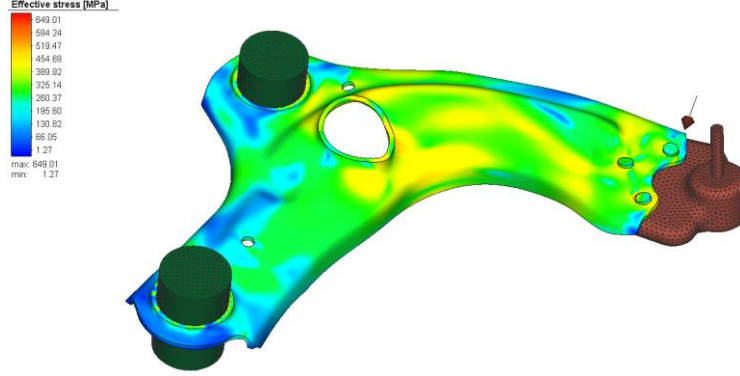
Şekil 4.7. Salıncak kolunun araç üzerindeki gösterimi

Üzerinde çalışma yaptığımız salıncak kolunu tasarımı ve sınır koşulları Şekil 4.8’de gösterildiği gibidir. Salıncak kolu için kullanılan malzeme özellikleri lazer sertleştirme prosesinde optimize ettiğimiz akma dayanımı 1400 N/mm^2 ve sertlik değeri 275 Hv sahip malzemedir. Salıncak kolu üzerinde burulma davranışı modellemek için salıncak kolunun rotül bölgesinden 50 mm zorlanmış deplasman kuvveti uygulanmıştır.



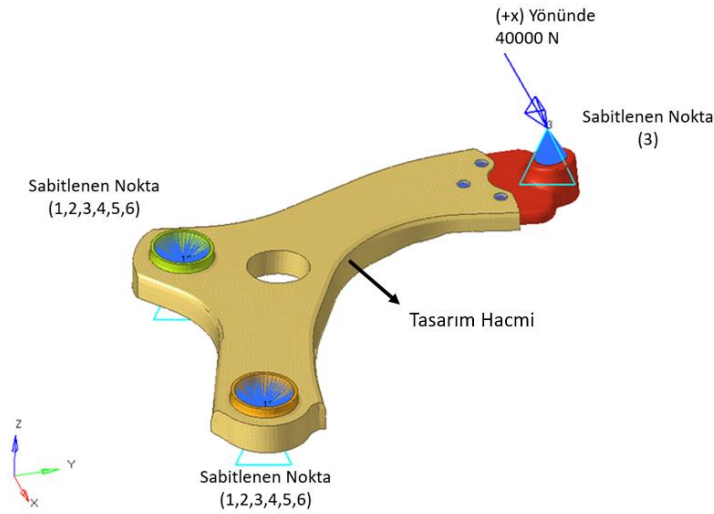
Şekil 4.8. Salıncak kolu statik analiz sınır koşulu

Yapılan statik analiz sonucunda oluşan gerilme değeri aşağıdaki görselde gösterildiği şekildedir.



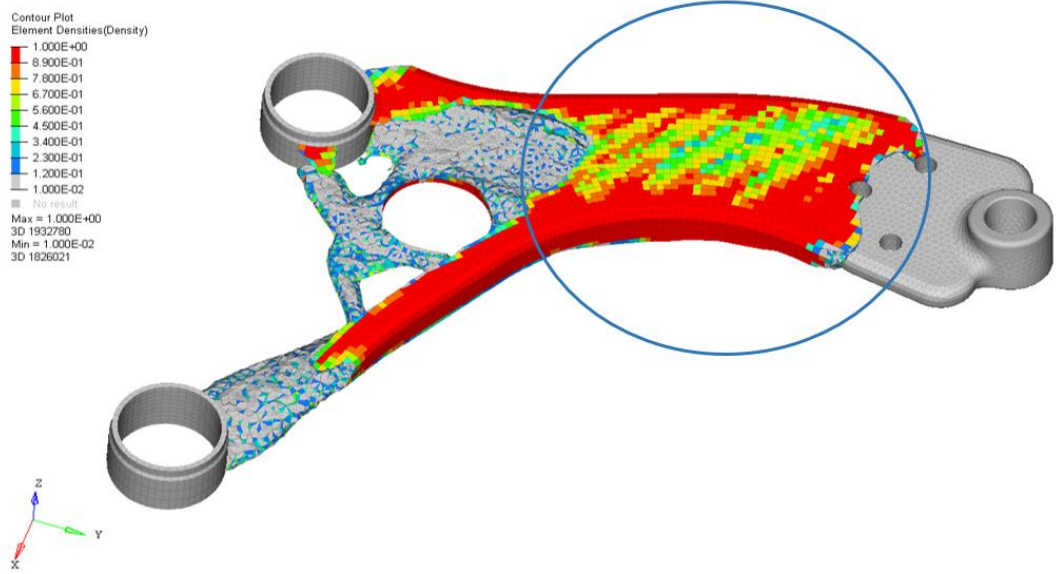
Şekil 4.9. Statik analiz sonucunda oluşan gerilme değeri

Salıncak kolu üzerinden lazer sertleştirme uygulayacağımız bölgeyi tam olarak belirlemek için öncelikle parçanın tasarım hacmini oluşturarak önceden belirlenen sınır koşulları altında parça üzerinde topology optimizasyon çalışması yapılmıştır. Maksimum mukavemet beklenen bölgelerden boşaltma az yapılacağı için bize lazer sertleştirme yapmamız gerek bölge hakkında bilgi verecektir. Tasarım hacmi oluşturulan salıncak kolu üzerinde optimizasyon koşulları aşağıda görselde gösterildiği şekildedir. Burada amaç foksiyonu olarak belirlenen sınır koşulları altında tasarım hacminde % 40 boşaltma işlemi yapacaktır. Topology optimizasyon çalışması ‘Hyperwork 2019.1’ yazılımı kullanılarak yapılmıştır.



Şekil 4.10. Salıncak kolu topology optimizasyon koşulları

Topology optimizasyonu sonucunda yapı üzerinde %40 boşaltma işlemi yapılmıştır. Şekil 4.11'de görüldüğü üzere boşaltma yapılmayan bölge yapı için mukavemet beklentisinin yüksek olduğu bölgedir. Yani lazer sertleştirme prosesi yapmamız gereken bölge aşağıda mavi renkli daire içerisine alınan bölgedir.

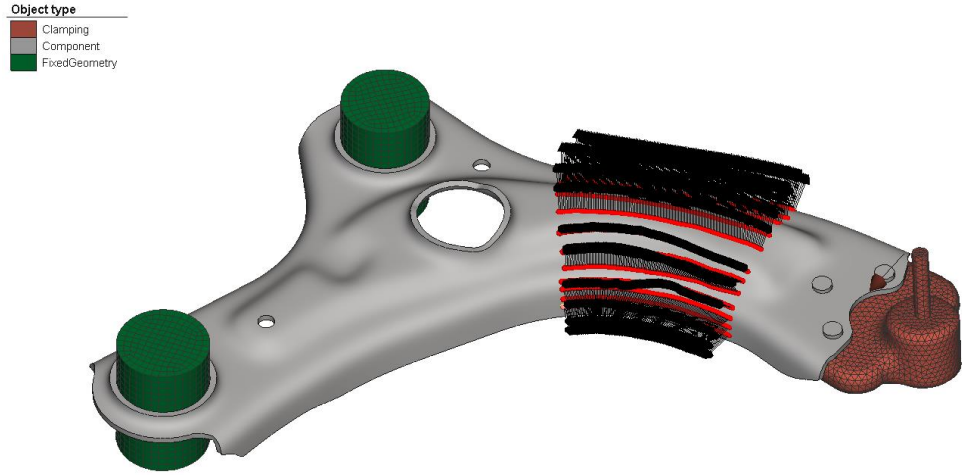


Şekil 4.11. Salıncak kolu topology optimizasyon sonucu

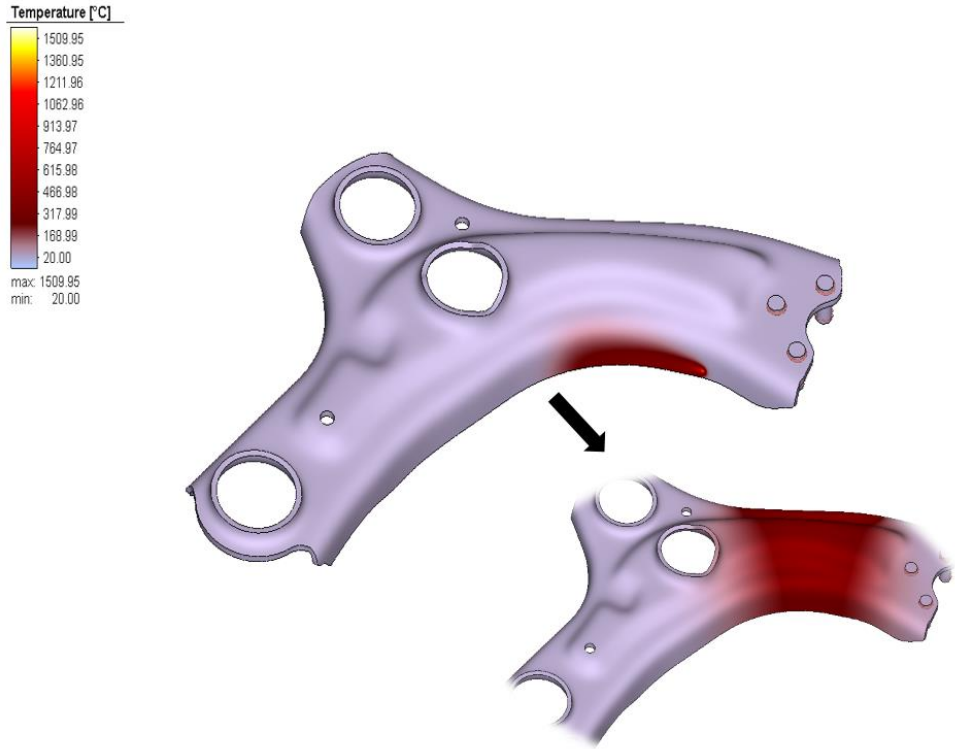
Yapılan parametre optimizasyon çalışmaları sonucunda belirlenen lazer gücünün 923 W, lazer hızının 23 mm/s, üst radius değerinin 2.2 mm, alt radius 0.5 mm ve derinlik değerinin 1 mm ve soğuma süresinin $20000 \text{ W/m}^2 * K$ olduğu parametreler ile salıncak kolu üzerinde lazer sertleştirme çalışması uygulanmıştır. Burada lazer sertleştirme çalışması parça üzerinden belirlenen bölge yöne bağlı olarak iki farklı şekilde uygulanmıştır. Birinci model kuvvet yönüne dik olarak şekilde ve ikinci model kuvvet yönüne paralel olarak şekilde uygulanmıştır.

Birinci Model Lazer Sertleştirme Çalışması

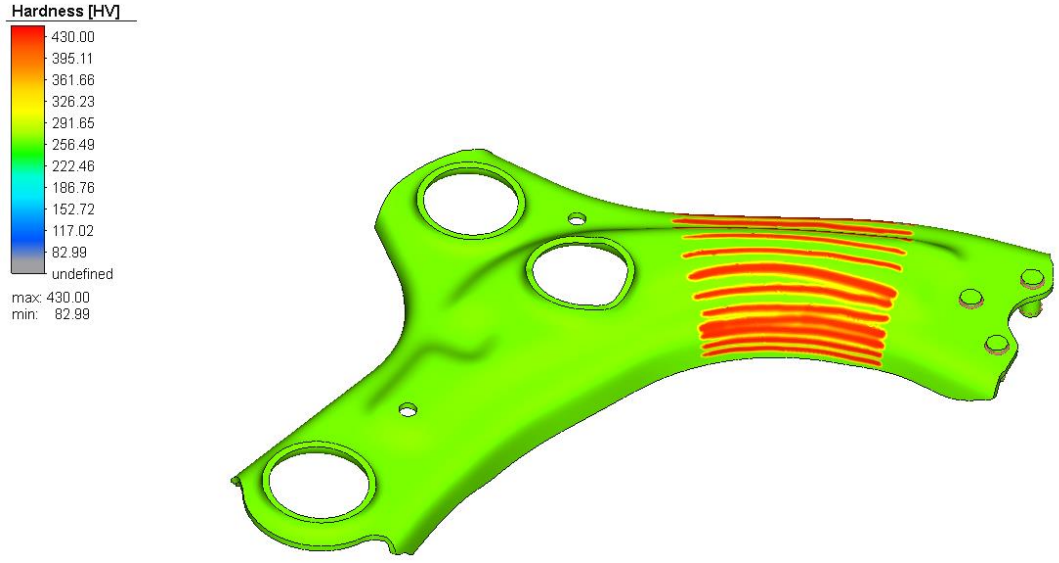
Lazer sertleştirme prosesi belirtilen parametre değerlerinde kuvvet yönüne dik olacak şekilde aşağıdaki görselde görüldüğü gibi modelleme yapılmıştır.



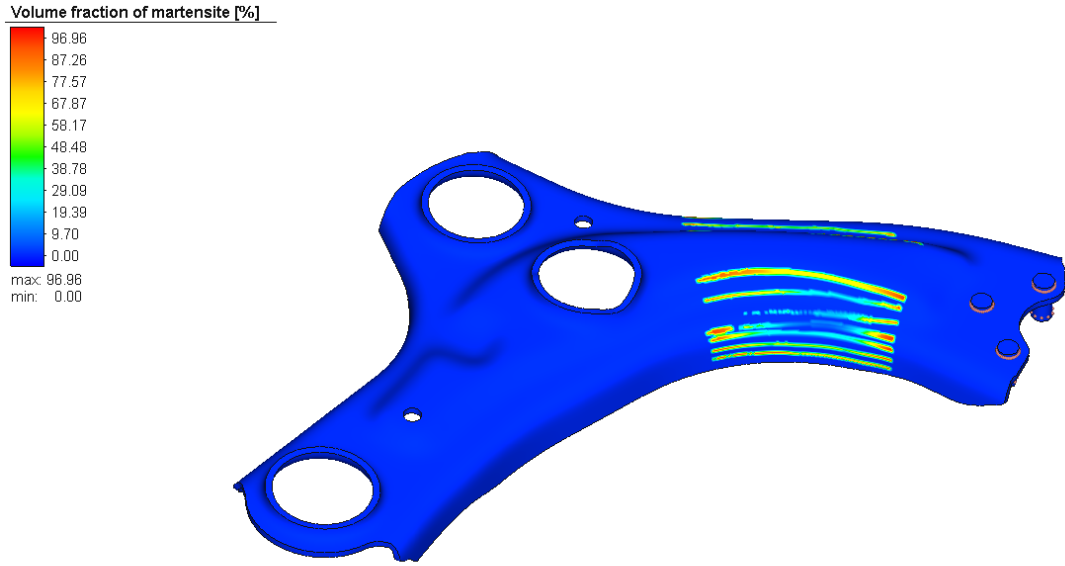
Şekil 4.12. Birinci model lazer sertleştirme prosesinin modellenmesi



Şekil 4.13. Birinci model üzerinde lazer sertleştirme prosesinin uygulanması

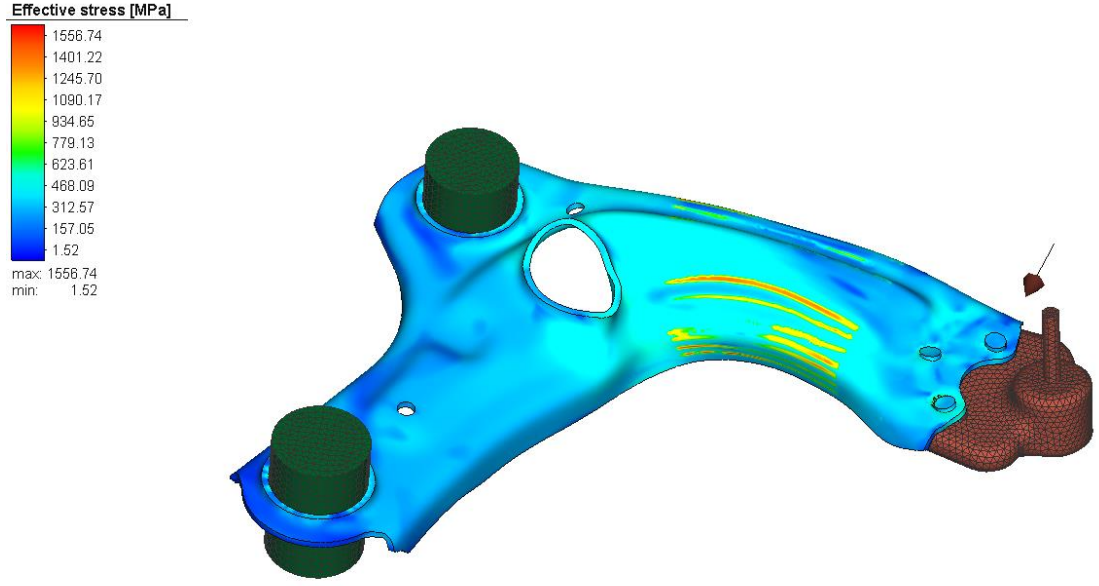


Şekil 4.13. Birinci model üzerinde lazer sertleştirme sonrası sertlik değeri



Şekil 4.14. Birinci model üzerinde lazer sertleştirme sonrası martenzitik dönüşüm sonucu

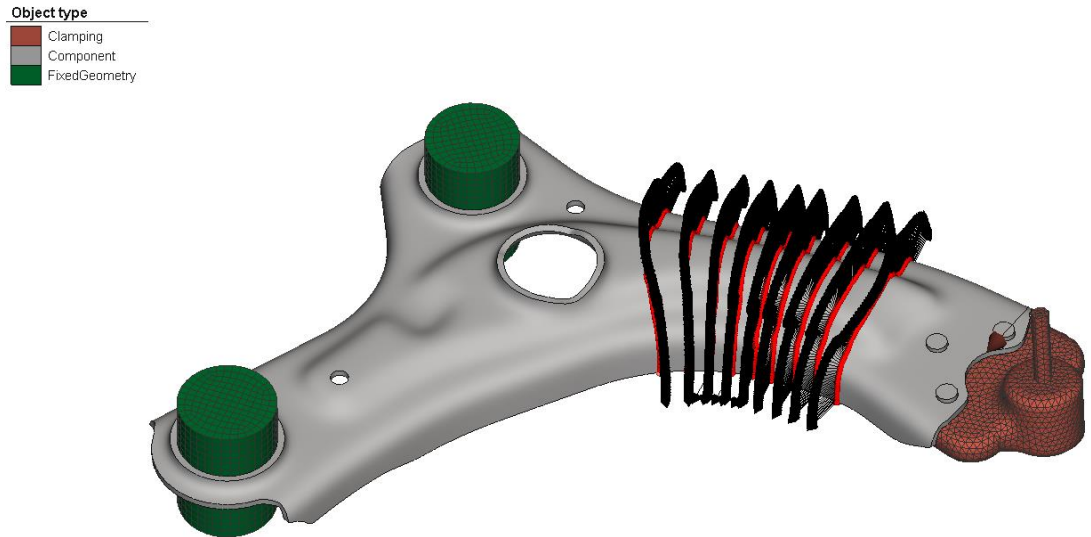
Lazer sertleştirme işlemi yapılmış model üzerine (+x) yönünde zorlanmış deplasman kuvveti verilerek salıncak kolu üzerindeki deformasyon bölgelerini ve maksimum kuvvet değerleri belirlenmiştir.



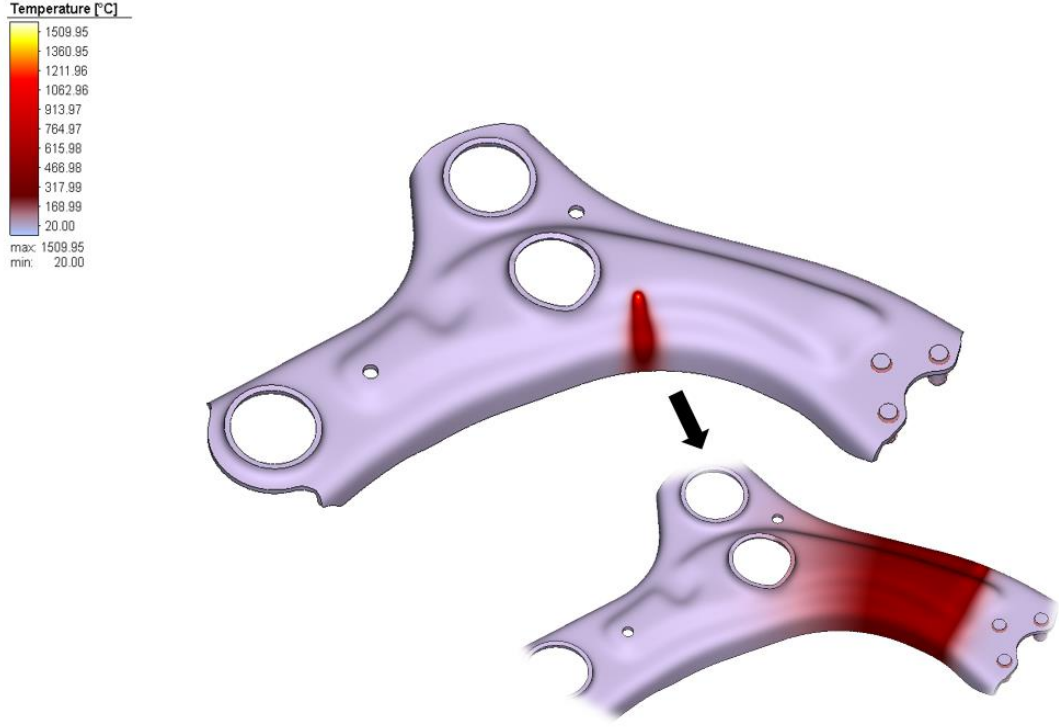
Şekil 4.15. Birinci model üzerinde lazer sertleştirme sonrası yapılan statik analiz sonucunda oluşan gerilme değerleri

İkinci Model Lazer Sertleştirme Çalışması

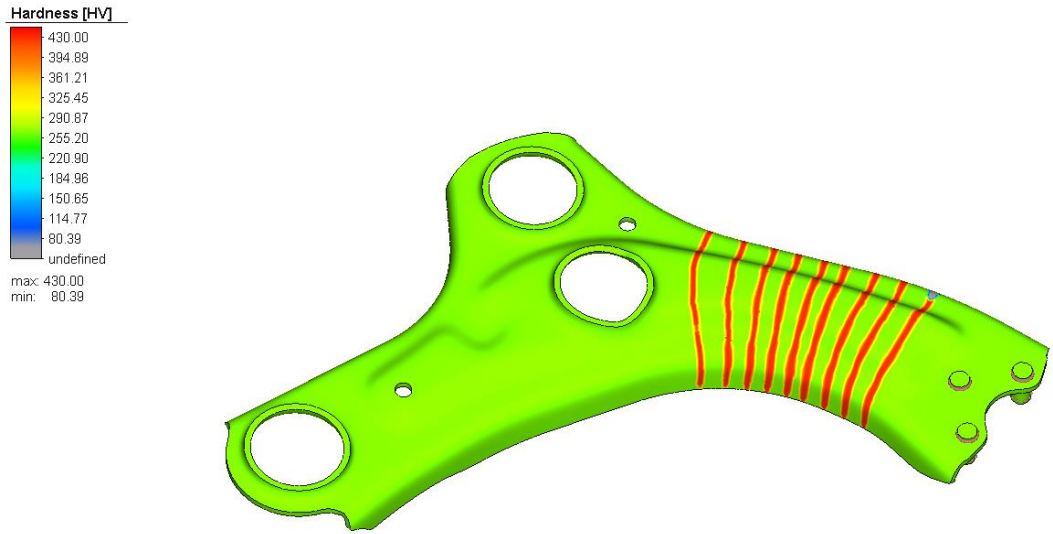
Lazer sertleştirme prosesi belirtilen parametre değerlerinde kuvvet yönüne dik olacak şekilde aşağıdaki görselde görüldüğü gibi modelleme yapılmıştır.



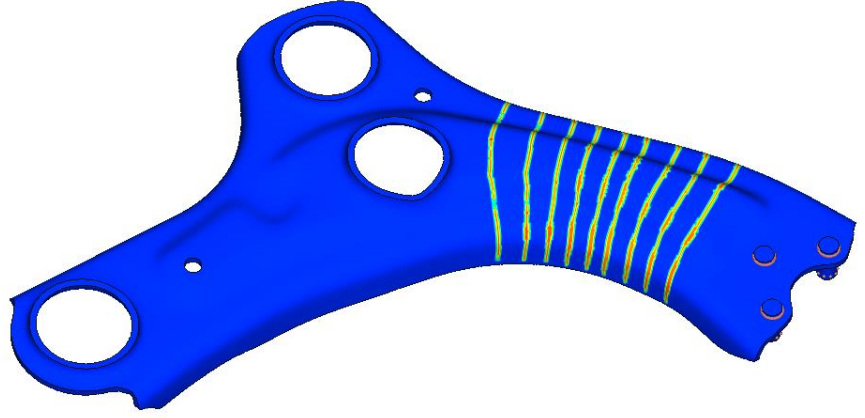
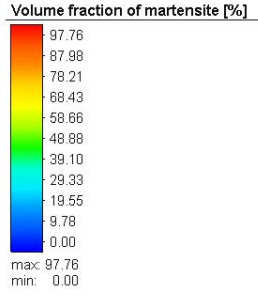
Şekil 4.16. İkinci model lazer sertleştirme prosesinin modellenmesi



Şekil 4.16. İkinci model üzerinde lazer sertleştirme prosesinin uygulanması

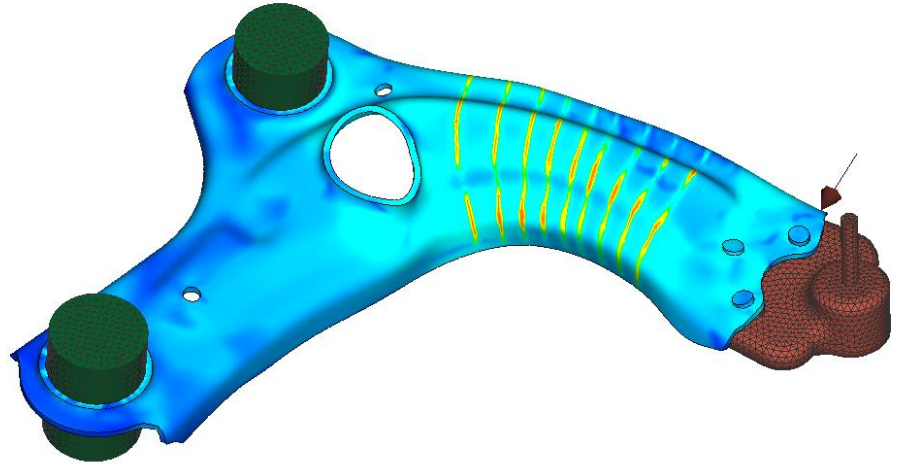
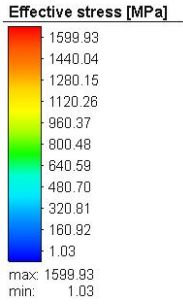


Şekil 4.17. İkinci model üzerinde lazer sertleştirme sonrası sertlik değeri



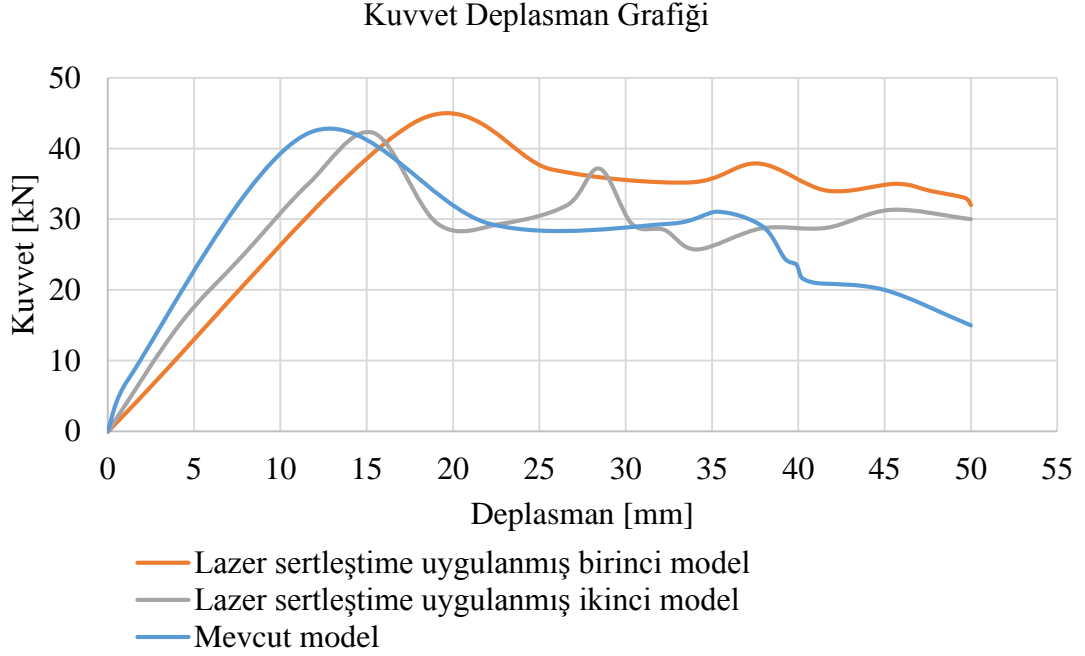
Şekil 4.18. İkinci model üzerinde lazer sertleştirme sonrası martenzitik dönüş sonucu

Lazer sertleştirme işlemi yapılmış model üzerine (+x) yönünde zorlanmış deplasman kuvveti verilerek salıncak kolu üzerindeki deformasyon bölgelerini ve maksimum kuvvet değerleri belirlenmiştir.



Şekil 4.19. İkinci model üzerinde lazer sertleştirme sonrası yapılan statik analiz sonucunda oluşan gerilme değerleri

Yapılan analizler sonucunda mevcut model ve lazer sertleştirme uygulanmış birinci ve ikinci modelin kuvvet deplasman grafiği oluşturulmuştur.



Şekil 4.20. Mevcut ve lazer sertleştirme uygulanmış modellerin kuvvet deplasman grafiği

Yukarıdaki kuvvet deplasman grafiği incelendiğinde maksimum kuvvet değerleri sırasıyla; lazer sertleştirme uygulanmış birinci model 43.5 kN, lazer sertleştirme uygulanmış ikinci model 42.2 kN ve mevcut model 42 kN'dir. Enerji sönüm oranları sırasıyla; lazer sertleştirme uygulanmış birinci model 1.57 joule (j), lazer sertleştirme uygulanmış ikinci model 1.41 joule (j) ve mevcut model 1.35 Joule (j)'dür.

Lazer sertleştirme uygulanmış birinci modelde maksimum kuvvet artışı %3, Lazer sertleştirme uygulanmış ikinci modelde % 0.4 bir kuvvet artışı görülmektedir.

Lazer sertleştirme uygulanmış birinci modelde enerji sönüm oranında %16, lazer sertleştirme uygulanmış ikinci modelde enerji sönüm oranında %5'lik bir artış vardır.

5. TARTIŞMA ve SONUÇ

Lazer sertleştirme yöntemini beş farklı karbon oranına sahip malzemeler üzerinde lokal sertleştirme işlemi uygulanmıştır. Sertleştirme işleminde lazer sertleştirme prosesine etki eden parametreler sırası ile lazer gücü, lazer hızı, lazer torcunun parça üzerindeki penetrasyonu değeri, derinlik değeri, soğuma süresi ve malzeme tipidir. Bu parametreler baz alınarak iki farklı optimizasyon çalışması yapılmıştır. Yapılan çalışmalar neticesinde lazer sertleştirme prosesinde en etkili parametre lazer hızı olarak ortaya çıkmıştır. Martenzitik dönüşüm ve sertlik artışından karbon oranı etkili bir parametre olduğu ortaya çıkmıştır. Karbon oranı arttıkça sertlik değeri ve martenzit dönüşüm oranı artmaktadır.

Optimizasyon sonunda elde edilen değerler sırası ile çarpışma kutusu ve salıncak kolu parçaları üzerinde uygulanmıştır. Çarpışma kutusu üzerinden yapılan analiz sonucunda maksimum kuvvet değerinde yüzde 5 artış olurken, enerji sönüm oranında yüzde 20 artış göstermiştir. Salıncak kolu üzerinden yapılan analiz sonucunda maksimum kuvvet değerinde yüzde 3 artış olurken, enerji sönüm oranında yüzde 16 artış göstermiştir.

Lazer sertleştirme işlemi uygulanacak olan parçaların sınır koşulları dikkate alınarak lazer sertleştirme uygulanması gerekmektedir. Lazer ışınının yönüne bağlı olarak dayanım özelliklerindeki artış oranları değişmektedir.

Yapılan incelemelerde lazer sertleştirme işlemi yapılan bölgelerde akma mukavemet değerinin arttığı ancak malzemenin o bölgede uzama davranışının azaldığı yapılan simülasyon çalışmalarında görülmüştür.

Lazer sertleştirme prosesinin parçanın dayanım performansını arttırmada etkili olduğu ortaya çıkmıştır. Ancak yapılan lazer işleminden sonra parça üzerinde yorulma performansı incelenmemiştir. Lazer sertleştirme işlemi yapılacak olan parçanın seçiminde tekrarlı yüklere maruz kalan parçalarda yorulma performansını dikkate alarak analizleri ve testleri gerçekleştirmek gerekmektedir.

KAYNAKLAR

- Altair Hyperwork 2019 Tutorials, 2019.** https://altairuniversity.com/learning-library/?type=learninglibraryitem&search=&filter_resource_type=Tutorials&filter_discipline=&filter_language=&filter_source=- (Erişim tarihi:10.06.2020)
- Anonim, 2019.** <https://www.metalurjimalzeme.net/martenzit-nedir> (Erişim tarihi: 15.06.2020)
- Anonim, 2020.** [https://slideplayer.biz.tr/slide/2798476/-](https://slideplayer.biz.tr/slide/2798476/)(Erişim tarihi:20.07.2020)
- Ameri, M. H., Ghaini, F. M., Torkamany, M. J. 2018.** Investigation into the Efficiency of a Fiber Laser in Surface Hardening of ICD-5 Tool Steel. *Optics and Laser Technology*, 107, 150–157. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2018.05.030>
- Aran, A. 2008.** Malzeme Bilgisi. İstanbul Teknik Üniversitesi, Makina Fakültesi, Ders Notları, İstanbul.
- Çolak, A., Ayık, M. 2020.** Açık Ders Malzemeleri Isı Tekniği. Ankara Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Tarım Makinaları ve Teknolojileri Mühendisliği, Ders Notları, Ankara
- Derdour, F. Z., Kezzar, M., Khochemane, L. 2018.** Optimization of Penetration Rate in Rotary Percussive Drilling Using Two Techniques: Taguchi Analysis and Response Surface Methodology (RMS). *Powder Technology*, 339, 846–853. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2018.08.030>
- Elektrik Elektronik Robotik Biyomedikal, 2020.** [https://diyot.net/lazer-diyot/-](https://diyot.net/lazer-diyot/)(Erişim tarihi: 08.06.2020)
- Gökçe, B., Tasgetiren, S. 2009.** Kalite için Deney Tasarımı. *Electronic Journal of Machine Technologies* Vol: 6, No: 1, 71-83.
- Jahn, A., Heitmanek, M., Standfuss, J., Brenner, B., Wunderlich, G., Donat, B. 2011.** Local Laser Strengthening of Steel Sheets for Load Adapted Component Design in Car Body Structures. *Physics Procedia*, 12 (PART 1), 431–441. <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2011.03.054>
- Long, J., Huang, W., Xiang, J., Guan, Q., Ma, Z. 2018.** Parameter Optimization of Laser Welding of Steel to Al With Pre-Placed Metal Powders Using the Taguchi Response Surface Method. *Optics and Laser Technology*, 108, 97–106. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2018.06.026>
- Moradi, M., KaramiMoghadam, M. 2019.** High Power Diode Laser Surface Hardening of AISI 4130; Statistical Modelling and Optimization. *Optics and Laser Technology*, 111:554–570. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2018.10.043>
- Nöbet, E. 2019.** Effect Of Laser Surface Hardening Parameters on Impact Sliding Wear Behavior of a Hot Work Tool Steel. *M.Sc. Thesis*, İstanbul Technical University, Department of Material and Metallurgical Engineering, Materials Engineering Programme, İstanbul.
- Pürçek, G. 2014.** Metalik Malzemelere Uygulanan Mekanik Deneyler. Karadeniz Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makina Mühendisliği, Ders Notları, Trabzon.
- Sarikaya, M., Güllü, A. 2014.** Taguchi Design and Response Surface Methodology Based Analysis of Machining Parameters in CNC Turning Under MQL. *Journal of Cleaner Production*, 65:604–616. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.08.040>
- Simufact Welding 8 Tutorials, 2018.** https://www.academia.edu/27824607/Video_tutorials_on_welding_simulation_available (Erişim tarihi: 02.03.2019)

Syed, B., Shariff, S. M., Padmanabham, G., Lenka, S., Bhattacharya, B., Kundu, S. 2017. Influence of Laser Surface Hardened Layer On Mechanical Properties of Re-Engineered Low Carbon Steel Sheet. *Materials Science and Engineering*, 685:168–177
<https://doi.org/10.1016/j.msea.2016.12.124>

Wagner, M., Jahn, A., Beyer, E., Balzani, D. 2016. Design and Optimization of Steel Car Body Structures via Local Laser-Strengthening. *Engineering*, 08(05):276–286.
<https://doi.org/10.4236/eng.2016.85024>

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Ahmet ONAYLI
Doğum Yeri ve Tarihi : Düziçi/Osmaniye – 15/09/1992
Yabancı Dil : İngilizce

Eğitim Durumu

Lise : ÇEAŞ Anadolu lisesi, 2010
Lisans : Uludağ Üniversitesi Otomotiv Mühendisliği, 2016
: Uludağ Üniversitesi Endüstri Mühendisliği, 2016
Yüksek Lisans : Uludağ üniversitesi otomotiv mühendisliği, 2020

Çalıştığı Kurum/Kurumlar :

Coskunöz Kalıp Makina /Ar-Ge (02.2018-)

Cae Solutions Bilgisayar Destekli Mühendislik Hizmetleri, Araştırma ve Geliştirme Ltd.Şti./Ar-ge (10.2016-01.2017)

İletişim (e-posta) : ahmetonayli92@gmail.com

1. Yayınları :

Bilir, O., Onaylı, A., Başer, T., Erişir E., Bayram, A., Karşı, A., Çallı, M., 2020. Characterization Of A Novel Press Hardened Steel For Chassis And Suspension Parts. EuroBLECH Digital Innovation Summit, 27-30 October 2020, Messen, Germany.

Çallı, M., Onaylı, A., Karagöz, T., Bıyıklı, M., 2020. An Application of Directed Energy Deposition Manufacturing Method on an Automotive Component. 5nd International Conference on Material Science and Technology in Cappadocia (IMSTEC 20), 16-18 October 2020, Nevşehir, Turkey.

Küçükoglu, İ., Onaylı, A., Yağmahan, B., Çayhan, E., Ünal, M., 2016. Hybrid Multi-Criteria Decision Making Approach Based On Fuzzy AHP And Fuzzy TOPSIS methods for the stock area selection problem. Proceedings of the Global Joint Conference on Industrial Engineering and Its Application Areas, 14-15 July 2016 Istanbul, Turkey.

Onaylı, A., Özbay, C., Çallı, M., 2018. Bir Otomobil Darbe Sönümleyicisinin Lazer Sertleştirme Yöntemi ile Performans İyileştirme Çalışması. 3rd International Conference on Material Science and Technology in Cappadocia (IMSTEC 18), 17-19 Eylül 2018, Nevşehir, Turkey.

Onaylı, A., Çallı, M., Bayram, A., Ergin, D., 2019. Karbon Fiber Katkılı Pa Plastik Toz Katkılı Malzemedeki Çarpışma Kutusu Tasarımı ve Analizi. Altair Teknoloji Konferansı, 13 Kasım 2019, Bursa, Turkey.

Onaylı, A., Tekelioğlu, O., alı, M., 2020. Investigation Of The Effect Of Welding Operations On Crash Performance For Front Structure Produced By Rollform Process. 5nd International Conference on Material Science and Technology in Cappadocia (IMSTEC 20), 16-18 October 2020, Nevşehir, Turkey.

Onaylı, A., Akyel, O., alı, M., 2020. Prediction of Laser Welding Distortion Behavior with Virtual Analysis. 5th International Mediterranean Science and Engineering Congress (IMSEC 2020) 20-22 April 2020, Antalya, Turkey.

Tekelioğlu, O., Onaylı, A., Özbay, C., alı, M., Sürtünme Karıştırma Nokta Kaynağı ile Birleştirilen Alüminyum-elik iftlerinin Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi, 2018. 3rd International Conference on Material Science and Technology in Cappadocia (IMSTEC 18), 17-19 Eylül 2018, Nevşehir, Turkey.