

T.C.
EGE ÜNİVERSİTESİ
Fen Bilimleri Enstitüsü

**SERBEST FORMLU YÜZEYLERİN LAZERLE
SERTLEŞTİRİLMESİNİN TERMAL MODELLENMESİ VE
DOĞRULANMASI**

Nagihan DİDİN

Danışman: Prof.Dr.İ.Etem SAKLAKOĞLU

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Makine Mühendisliği Yüksek Lisans Programı

İzmir
2023

Nagihan DİDİN tarafından Yüksek Lisans tezi olarak sunulan “SERBEST FORMLU YÜZEYLERİN LAZERLE SERTLEŞTİRİLMESİNİN TERMAL MODELLENMESİ VE DOĞRULANMASI” başlıklı bu çalışma EÜ Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği ile EÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Eğitim ve Öğretim Yönergesi’nin ilgili hükümleri uyarınca tarafımızdan değerlendirilerek savunmaya değer bulunmuş ve 03.05.2023 tarihinde yapılan tez savunma sınavında aday oybirliği/oyçokluğu ile başarılı bulunmuştur.

Jüri üyeleri

İmza

Jüri Başkanı :

Raportör Üye :

Üye :

EGE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ETİK KURALLARA UYGUNLUK BEYANI

EÜ Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin ilgili hükümleri uyarınca Yüksek Lisans Tezi / Doktora Tezi olarak sunduğum “Serbest Formlu Yüzeylerin Lazerle Sertleştirilmesinin Termal Modellenmesi Ve Doğrulanması” başlıklı bu tezin kendi çalışmam olduğunu, sunduğum tüm sonuç, doküman, bilgi ve belgeleri bizzat ve bu tez çalışması kapsamında elde ettiğimi, bu tez çalışmasıyla elde edilmeyen bütün bilgi ve yorumlara atıf yaptığımı ve bunları kaynaklar listesinde usulüne uygun olarak verdiğimi, tez çalışması ve yazımı sırasında patent ve telif haklarını ihlal edici bir davranışımın olmadığını, bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya diğer bir üniversitede başka bir tez çalışması içinde sunmadığımı, bu tezin planlanmasından yazımına kadar bütün safhalarda bilimsel etik kurallarına uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul edeceğimi beyan ederim.

16/01/2023

İmzası

Nagihan DİDİN

ÖZET**SERBEST FORMLU YÜZEYLERİN LAZERLE SERTLEŞTİRİLMESİNİN TERMAL
MODELLENMESİ VE DOĞRULANMASI**

DİDİN, Nagihan

Yüksek Lisans Tezi, Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Prof.Dr.İbrahim Etem SAKLAKOĞLU

Mayıs 2023, 70 sayfa

Lazer ile yüzey sertleştirme yöntemi, sıcak iş takım çelikleri, soğuk iş takım çelikleri, sac metal levhalar, kesme, plastik enjeksiyon, hafif metal enjeksiyon, derin çekme ve büküm kalıplarının bölgesel olarak sertleştirilmesine imkan sağlayan bir sertleştirme yöntemidir. Yöntemin en büyük avantajı sertleştirme işleminin lokal olarak yapılması ve sonrasında parça üzerinde şekil değişimi meydana gelmemesidir. Bu sayede, kalıplarda ve sac levhalarda geleneksel sertleştirme işlemleri sonrası yapılmak zorunda olan son işlem operasyonlarına ihtiyaç duyulmamaktadır.

Sürekli gelişen endüstride metallerin yüksek hız, yüksek performans ve yüksek işlem hızlarında sertleştirilebilmesi talep edilmektedir. Lazer ile yüzey sertleştirme işlemi, karmaşık geometrilere lokal olarak uygulanabilmesi, proses girdilerinin lazer gücü, lazer ilerleme hızı, odak mesafesi, lazer ışın çapı vb. parametreler ile kolayca kontrol edilebilmesi gibi avantajları ile son dönemlerde oldukça yaygın hale gelmektedir. Bu çalışmada, çeliklerin lazer ile sertleştirilmesinde, lazer ile çelik malzeme arasındaki etkileşim incelenmiştir. Aynı parametrelerin farklı çelikler üzerindeki etkilerini gözlemlemek amacıyla 1.2344 (H13), 1.2379 (D2), 1.6523 (8620) olmak üzere üç farklı malzeme seçimi yapılmıştır.

Seçilen malzemelerden 55x40x40 boyutlarında prizmatik numuneler hazırlanarak 3 farklı lazer gücü, 3 farklı lazer ilerleme hızı ve 2 farklı lazer ışın çapı ile 18 parametre kombinasyonu yapılmış ve numuneler bu parametreler ile işlenmiştir. İşleme sonrasında lazer tarama çizgileri üzerinden yüzey sertliği, sertlik derinliği ölçümleri yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar doğrultusunda optimum parametre belirlenmiş ve bu parametre ile 8 farklı örtüşme oranı ile yeni numuneler işlenmiştir. İşlenen numuneler yeniden sertlik ölçümüne tabii tutulmuş ve tarama çizgilerinin örtüşen bölgelerinde maksimum sertlik değerini veren parametre seçilmiştir.

Belirlenen tüm optimum parametreler, yöntemin endüstriyel alanda kullanılabilirliğini doğrulamak amacıyla serbest formlu bir numune üzerinde uygulanmıştır. İşleme sonrası yöntemin numune üzerindeki etkileri incelenerek serbest formlarda da uygulanabilirliği hakkında görüşler belirtilmiştir.

Anahtar sözcükler: Lazer ile yüzey sertleştirme, martenzit yapı, serbest formlu yüzey, sertlik, mikroyapı, sertlik derinliği, örtüşme oranı, parametre optimizasyonu



ABSTRACT**THERMAL MODELLING AND VALIDATION OF LASER HARDENING FOR FREE
FORM SURFACES**

DIDIN, Nagihan

MSc in Department of Mechanical Eng.

Supervisor: Prof. Dr. Ibrahim Etem SAKLAKOGLU

May 2023, 70 pages

Laser hardening method is a hardening method that provides local hardening of hot work tool steels, cold work tool steels, sheet metals, cutting, plastic load, light metal load, deep drawing and bending dies. The biggest advantage of the method is that the hardening process is done locally and then there is no deformation in the part. In this way, after conventional hardening processes on the mold and sheet metal, the necessary finishing operations are eliminated.

In the constantly developing industry, it is demanded that metals can be hardened at high speed, high performance and high processing speeds. Surface hardening with laser, local application to complex geometries, process inputs such as laser power, laser advance speed, focal distance, laser beam diameter, etc. It has become very common in recent years with its advantages such as being easily controlled with parameters. In this study, the interaction between laser and steel material was investigated in laser hardening of steels. In order to observe the effects of the same parameters on different steels, three different material selections were made: 1.2344 (H13), 1.2379 (D2), 1.6523 (8620).

Prismatic samples of 55x40x40 dimensions were prepared from the selected materials and 18 parameter combinations were made with 3 different laser powers, 3 different laser advance speeds and 3 different laser focus distances, and the samples were processed with these parameters. After processing, surface hardness and hardness depth were made on laser scanning lines. In accordance with the results obtained, the optimum parameter was determined and new samples were processed with 8 different overlap ratios with this parameter. The processed samples were subjected to the hardness measurement again and the parameter giving the maximum hardness value in the overlapping regions of the scan lines was selected.

All determined optimum parameters were applied on a freeform sample to verify the usability of the method in the industrial field. The effects of the method on the sample were examined and opinions were expressed about its applicability in freeform surfaces.

Keywords: Laser hardening, martensite structure, freeform surface, hardness, microstructure, hardness depth, overlap rate, parameter optimization .



ÖNSÖZ

Serbest yüzeylerde lazer ile yüzey sertleştirme yöntemi, birçok parametreyi bütün olarak ele alan bir yüzey sertleştirme tekniğidir. Yöntemin temeli, bir ısı girdisi ile malzemenin ergime noktasının altına ısıtılması ve kendi kendine soğuma yöntemi ile hızlı şekilde soğumasıdır. Kalıp teknolojisi gibi bünyesinde karmaşık geometrileri barındıran alanlarda yerel olarak işleme imkanı sağlaması ve işlem sonrasında herhangi bir ek operasyona ihtiyaç duyulmaması bu yöntemi daha da kullanışlı hale getirmektedir. Lazerle yüzey sertleştirme yönteminde kullanılan parametrelerin malzemenin mekanik yapısına etkisi oldukça önemlidir. Bahsedilen avantajlarıyla günümüzde bir çok endüstriyel alanda yaygın olarak kullanılabilecek bu yöntem için parametre-malzeme etkileşimini termal modelleme ile önceden tahmin edebilmek ve yalnızca düz yüzeylerde değil serbest yüzeylerde de yöntemin etkili olduğunu doğrulayabilmek üzerine çalışma ihtiyacı görülmüştür. Belirlenen parametreler ile üretilen numuneler üzerinde sertlik, sertlik derinliği ölçümleri ve mikroyapı incelemeleri laboratuvar ortamında gerçekleştirilerek sonuçlar yorumlanmıştır.

İZMİR

01/05/2023

Nagihan DİDİN

İÇİNDEKİLER

Sayfa

İÇ KAPAK	ii
KABUL VE ONAY SAYFASI	iii
ETİK KURALLARA UYGUNLUK BEYANI	v
ÖZET	vii
ABSTRACT	ix
ÖNSÖZ	xii
İÇİNDEKİLER	xiv
ŞEKİLLER DİZİNİ	xviii
ŞEKİLLER DİZİNİ	xxii
SİMGELER VE KISALTMALAR	xxii
1. GİRİŞ	1
2. LAZER	3
2.1 Lazer'in Çalışma Prensibi	3
2.2 Lazer Türleri	4
3. LAZER İLE YÜZEY SERTLEŞTİRME YÖNTEMİ	6
3.1 Lazer İle Yüzey Sertleştirme Mekanizması	7
3.3.1.1 Martenzit Yapı Oluşumu	7
3.2 Lazer İle Yüzey Sertleştirme Parametreleri	8
3.3.2.1 Güç Yoğunluğu	8
3.3.2.2 Tarama Hızı	8
3.3.2.3 Absorbsiyon	8
3.3.2.4 Örtüşme (Overlapping)	9
4. LİTERATÜR TARAMASI	10
4.1 1.2344 (AISI H13) Çeliği Üzerine Çalışmalar	10
4.2 1.2379 (AISI D2) Çeliği Üzerine Çalışmalar	11
4.3 1.6523 (AISI 8620) Çeliği Üzerine Çalışmalar	12
4.4 Örtüşme Oranı (Overlap) Üzerine Çalışmalar	13

4.5	Lazer ile Yüzey Sertleştirme Üzerine Farklı Alanlarda Yapılan Çalışmalar	14
5.	TERMAL MODELLEME	16
5.1	Lazer Işın Çapı Hesabı	16
5.2	Malzeme ve Geometri Tanımlama	17
6.	MATERYAL VE YÖNTEM	19
6.1	Deneyin Amacı	19
6.2	Malzeme Özellikleri	19
6.6.2.1	1.2344 (AISI H13) Malzeme Özellikleri	19
6.6.2.2	1.2379 (AISI D2) Malzeme Özellikleri	20
6.6.2.3	1.6523 (AISI 8620) Malzeme Özellikleri	20
6.3	Numunelerin Hazırlanması	20
6.4	Numunelerin Lazerle İşlenmesi	21
6.5	Lazerle Tarama Deney Parametrelerinin Belirlenmesi	22
6.6	Örtüşme (Overlap) Uygulamasında Deney Parametrelerinin Belirlenmesi	23
6.7	Karakterizasyon Metodları	25
6.6.7.1	Stereo Mikroskop ile İnceleme	25
6.6.7.2	Sertlik Ölçümleri	25
6.8	Serbest Formlu Yüzeylerde Lazer ile Yüzey Sertleştirme Uygulaması	27
6.9	Mikroyapı İncelemeleri	28
6.6.9.1	Numune Hazırlama	28
6.6.9.2	Mikroskop ile Görüntü Analizi	29
6.6.9.3	Sertlik Derinliği Ölçümü	29
7.	BULGULAR VE TARTIŞMA	31
7.1	Termal Modelleme Sonuçları	31
7.2	Yüzey Sertlik Ölçümleri	43
7.3	Faz 2: Örtüşme Uygulaması Sertlik ölçümü Sonuçları	46
7.4	Mikroyapı İncelemeleri	47
7.7.4.1	Mikroskop Görüntüleri	47
7.5	X-Işını Difraktometresi (XRD) Analizi	49
7.6	Serbest Formlu Yüzeylerde Lazer ile Yüzey Sertleştirme Sonuçları	50
8.	SONUÇ VE ÖNERİLER	53
	KAYNAKLAR DİZİNİ	56

TEŞEKKÜR	58
EKLER	59



ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
2..1 Uyarılmış Işıma Şeması	3
2..2 Lazer Işını Oluşumunun Şematik Gösterimi	4
2..3 Lazer Türlerinin sınıflandırılması	5
3..1 Lazer Işını ile Yüzey Sertleştirme Prensibi	6
3..2 Hızlı soğuma esnasında HMT kafes yapısına sıkışan karbon atomunun şematik gösterimi	7
3..3 Örtüşen lazerle sertleştirilmiş numunelerin görüntüsü	9
5..1 Parça geometrisinin ağ yapısı	18
6..1 1.2344 malzeme özellikleri tablosu	20
6..2 1.2349 malzeme özellikleri tablosu	20
6..3 8620 malzeme özellikleri tablosu	20
6..4 Lazer ile işlenecek numune ölçüleri	21
6..5 LASERAL ABB IRB2600 robot + 2kW CW Lazer Sistem	21
6..6 Lazer Enerji Yoğunluğu Denklemi	22
6..7 1.2344 (AISI H13) numuneleri üzerine uygulanan örtüşmeli lazer ile tarama işlemi	24
6..8 1.2379 (AISI D2) numuneleri üzerine uygulanan örtüşmeli lazer ile tarama işlemi .	24
6..9 1.6523 (AISI 8620) numuneleri üzerine uygulanan örtüşmeli lazer ile tarama işlemi	25
6..10 Nikon SMZ745T model stereo mikroskop	25
6..11 Yüzey sertlik ölçümlerinin yapıldığı HARDWAY MHVD 10IS Model sertlik ölçüm cihazı (Mekatest Laboratuvar'ın İzniyle	26
6..12 Yüzey sertlik değerleri ölçüm noktalarının şematik gösterimi	26
6..13 Serbest formlu numune	27
6..14 Serbest formlu numune üzerinde oluşturulan tarama yolları	27
6..15 Zımparalama ve parlatma işlemlerinin yapıldığı METKON FORCIMAT 2V model cihaz	28
6..16 Dağlama işlemi sonrası lazer tarama çizgilerinin kesit görüntüsü	29

6..17 Mikroyapı incelemeleri ve görüntü alma için kullanılan Nikon DS-Fi2 model optik mikroskop	29
6..18 Sertlik derinliği ölçümlerinde kullanılan Shimadzu HVM-2 model Vickers mikro-sertlik cihazı	30
6..19 Sertlik derinliği ölçümünün mikroskop altındaki görüntüsü	30
7..1 L1-1600 W-10 mm/s-2,063 mm odak mesafesi parametresi analiz grafikleri a)- b)Maksimum sıcaklık noktasında numune üzerindeki ısı etkisi altındaki alan c) Zamana bağlı sıcaklık grafiği (K)	32
7..2 Lazer ışını altında ısıdan etkilenen bölgenin simülasyonu; d)1800 W-10 mm/s- 2,063 mm, e)2000 W-10 mm/s-2,063 mm, f)1600 W-15 mm/s-2,063 mm, g)1800 W-15 mm/s-2,063 mm, h)2000 W-15 mm/s-2,063 mm, i)1600 W-20 mm/s-2,063 mm, j)1800 W-20 mm/s-2,063 mm, k)2000 W-20 mm/s-2,063 mm, l)1600 W-10 mm/s-2,338 mm, m)1800 W-10 mm/s-2,338 mm, n)2000 W-10 mm/s-2,338 mm, o)1600 W-15 mm/s-2,338 mm, o)1800 W-15 mm/s-2,338 mm, p)2000 W-15 mm/s-2,338 mm, r)1600 W-20 mm/s-2,338 mm, s)1800 W- 20 mm/s-2,338 mm, t)2000 W-20 mm/s-2,338 mm	35
7..3 Lazer ışını altında ısıdan etkilenen bölgenin simülasyonu (kontur dağılım grafiği); a)1800 W-10 mm/s-2,063 mm, b)2000 W-10 mm/s-2,063 mm, c)1600 W-15 mm/s-2,063 mm, d)1800 W-15 mm/s-2,063 mm, e)2000 W-15 mm/s-2,063 mm, f)1600 W-20 mm/s-2,063 mm, g)1800 W-20 mm/s-2,063 mm, h)2000 W- 20 mm/s-2,063 mm, i)1600 W-10 mm/s-2,338 mm, j)1800 W-10 mm/s-2,338 mm, k)2000 W-10 mm/s-2,338 mm, l)1600 W-15 mm/s-2,338 mm, m)1800 W- 15 mm/s-2,338 mm, n)2000 W-15 mm/s-2,338 mm, o)1600 W-20 mm/s-2,338 mm, p)1800 W-20 mm/s-2,338 mm, r)2000 W-20 mm/s-2,338 mm	39
7..4 Zaman-Sıcaklık değişim grafiği a)1800 W-10 mm/s-2,063 mm, b)2000 W-10 mm/s- 2,063 mm, c)1600 W-15 mm/s-2,063 mm, d)1800 W-15 mm/s-2,063 mm, e)2000 W-15 mm/s-2,063 mm, f)1600 W-20 mm/s-2,063 mm, g)1800 W-20 mm/s-2,063 mm, h)2000 W-20 mm/s-2,063 mm, i)1600 W-10 mm/s-2,338 mm, j)1800 W-10 mm/s-2,338 mm, k)2000 W-10 mm/s-2,338 mm, l)1600 W-15 mm/s-2,338 mm, m)1800 W-15 mm/s-2,338 mm, n)2000 W-15 mm/s-2,338 mm, o)1600 W-20 mm/s-2,338 mm, p)1800 W-20 mm/s-2,338 mm, r)2000 W- 20 mm/s-2,338 mm	42

7.5 Ölçülen sertlik derinliği ile modelleme sonuçlarının kıyaslanması a) 1.2344 çeliği b)1.2379 çeliği	42
7.6 Lazer ile yüzey sertleştirme sonucu yüzey sertlik değerleri a)1.2344 malzemeye ait sertlik değerleri grafiği b) 1.2379 malzemeye ait sertlik değerleri grafiği c)1.6523 malzemeye ait sertlik değerleri grafiği	44
7.7 Sürekli soğuma (CCT) eğrileri a) 1.2344 çeliği, b)1.2379 çeliği	45
7.8 Lazer ile işleme sonucu meydana gelen sertlik derinlik değerlerinin karşılaştırılması	46
7.9 Faz 2: Örtüşme uygulaması sonrası örtüşme yüzeylerinde sertlik değişimi sonuçları a)1.2344 malzeme b)1.2379 malzeme c)1.6523 malzeme	47
7.10 Lazer ile yüzey sertleştirme işlemi uygulanmış 1.2344 numunelerin farklı büyütme- lerde mikroskop görüntüleri a-b) İşlem görmemiş numune, c-d) L4 parametresi (1600 W-15 mm/s-d=2,063 mm) ile yüzey sertleştirilmiş numune, e-f) P4 (1,00 mm) örtüşme parametresi ile işlenmiş numune	48
7.11 İşlem görmemiş (grafik 1), L4 parametresi ile yüzey sertleştirilmiş (grafik 2) ve P4 örtüşme parametresi ile yüzey sertleştirilmiş (grafik 3) 1.2344 çeliğin kesit yüzeylerinden alınmış XRD profilleri	49
7.12 Kristalit boyutu analizi. İşlem görmemiş (grafik 1), L4 parametresi ile yüzey sertleştirilmiş (grafik 2) ve P4 örtüşme parametresi ile yüzey sertleştirilmiş (grafik 3)	50
7.13 Lazer ile yüzey sertleştirme sonrası serbest formlu numunenin ölçeklendirilmiş görüntüsü, a) Ön görünüş, b) Sol yan görünüş	51
7.14 Lazer ile taranmış bölgenin mikroskop görüntüsü	51
7.15 Lazer ile taranmış bölgenin derinlik ölçümü	52

SİMGELER VE KISALTMALAR

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
$^{\circ}\text{C}$	Santigrat
λ	Dalga boyu
J	Joule
μs	Mikrosaniye
cm	Santimetre
nm	Nanometre
s	Saniye
Hz	Hertz
A	Soğurma Katsayısı
P	Lazer Gücü
v	Tarama Hızı
d	Lazer Işını Odak Çapı
R	Lazer Işını Odak Yarıçapı
w_1	Lazer Işını-Numune Yüzeyi Mesafesi
w_0	Lazer Işını Bel Çapı
M^2	Işın Kalitesi

θ	Iraksanan Işın Yarı Açısı
μm	Mikrometre
mm	Milimetre
m	Metre
K	Kelvin
ϕ	Pi Sayısı
kW	KiloWatt
W	Watt
rad	Radyan
Nd:YAG	Neodim Katkılı İttriyum Alüminyum Garnet
CO ₂	Karbondioksit
XRD	X-Işını Difraktometresi
SEM	Taramalı Elektron Mikroskobu

1. GİRİŞ

Lazer ile yüzey sertleştirme yöntemi, lazer ışınının iş parçası üzerinde belli bir hız parametresi ile ilerleyerek yüzeyi hızlı bir şekilde ısıtmasıyla meydana gelen dönüşüm esaslı bir sertleştirme tekniğidir. Kendine özgü parametreleri bulunan bir ısı girdisi ile yeterli karbon oranına sahip çelik ve dökme demir malzemelerin bölgesel olarak sertleştirilmesine imkan sağlayan bir yöntemdir. Yöntemin en büyük avantajları karmaşık geometrilerde ve küçük çaplı deliklerde dahi sertleştirme işleminin lokal olarak yapılabilmesi ve sonrasında parça üzerinde şekil değişimi meydana gelmemesidir. Bu sayede, otomotiv, kalıpcılık, dişli üretimi vb. gibi endüstriyel alanlarda oldukça kullanışlı bir yöntemdir.

Lazer ile yüzey sertleştirme bir ısı girdisi ile malzemeyi östenit sıcaklığı yakınında bir sıcaklığa ısıttıktan sonra kendi kendine hızlı bir şekilde soğuması ile yüzeyde martenzit yapının meydana geldiği bir mekanizmaya dayanmaktadır. Lazer gücü, lazer ilerleme hızı, odak mesafesi, lazer ışın çapı vb. parametreler ile proses kolayca kontrol edilebilir.

Endüstride yaygın hale gelen bu yöntemde, seçilen malzeme için en iyi sertlik ve sertlik derinliği değerlerinin termal modelleme yöntemi ile önceden belirlenmesi, seçilen parametrelerin malzemeye uygulanabilirliği açısından oldukça önemlidir.

Bu çalışmada, çeliklerin lazer ile sertleştirilmesinde, lazer ile çelik malzeme arasındaki etkileşim 3 farklı çelik üzerinde incelenmiştir. Lazer gücü, lazer ilerleme hızı ve lazer ışın çapı parametrelerinin farklı kombinasyonları ile numunelere önce termal analiz uygulanmış sonrasında ise deneyler gerçekleştirilmiştir. Deney sonuçlarında elde edilen değerler ile termal modelleme sonuçları karşılaştırılmıştır. Deneyler için kalıpcılık ve dişli üretimi sektöründe yaygın olarak kullanılan 1.2344 (H13), 1.2379 (D2), 1.6523 (8620) çelikleri seçilerek uygulamanın pratikte kullanılabilirliği değerlendirilmiştir.

Seçilen malzemelerden 55x40x40 boyutlarında prizmatik numuneler hazırlanarak 3 farklı lazer gücü, 3 farklı lazer ilerleme hızı ve 2 farklı lazer ışın çapı ile 18 parametre kombinasyonu yapılmış ve numuneler bu parametreler ile işlenmiştir. İşleme sonrasında lazer tarama çizgileri üzerinden yüzey sertliği, tarama çizgilerinin kesitleri üzerinden ise sertlik derinliği ve mikroyapı incelemeleri yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar doğrultusunda optimum parametre belirlenerek 8

farklı örtüşme oranı ile yeni numuneler işlenmiş ve her malzeme için en uygun örtüşme oranının tespit edilmesi hedeflenmiştir.

Örtüşme oranları arasında da optimum parametrenin belirlenmesi sonucunda uygulamanın endüstriyel alanda kullanımını test etmek üzere, üçüncü bir boyutu içeren serbest formlu numune üzerinde lazerle yüzey sertleştirme yöntemi uygulanmış ve sonuçları incelenmiştir.



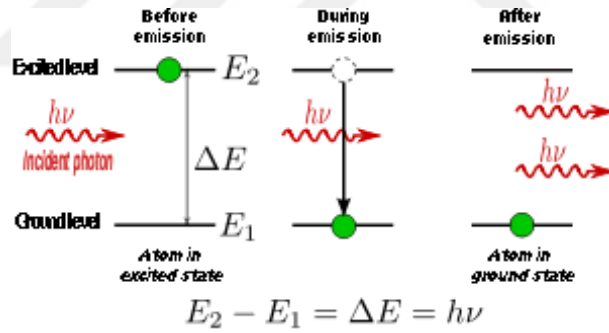
2. LAZER

Lazer terimi “Light amplification by Stimulated Emission of Radiation” kelimelerinin baş harflerinden oluşmaktadır. Uyarılmış ışınım yayılımı ile ışığın yoğunlaştırılması anlamına gelen bu terim kısaca yoğunlaştırılmış ışık anlamını taşır. (Nobet, E., 2019)

Lazerin prensipleri 1927 yılında Einstein tarafından ortaya konulan kuantum kavramına dayanmaktadır. 1954 yılında Townes ve arkadaşları Colombia Üniversitesinde bu kavramı Maser (Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation) şeklinde uygulamaya başlamışlardır. 1960 yılında Theodore Maiman ilk lazer aletini geliştirmiştir. (Boyras, I., 2017)

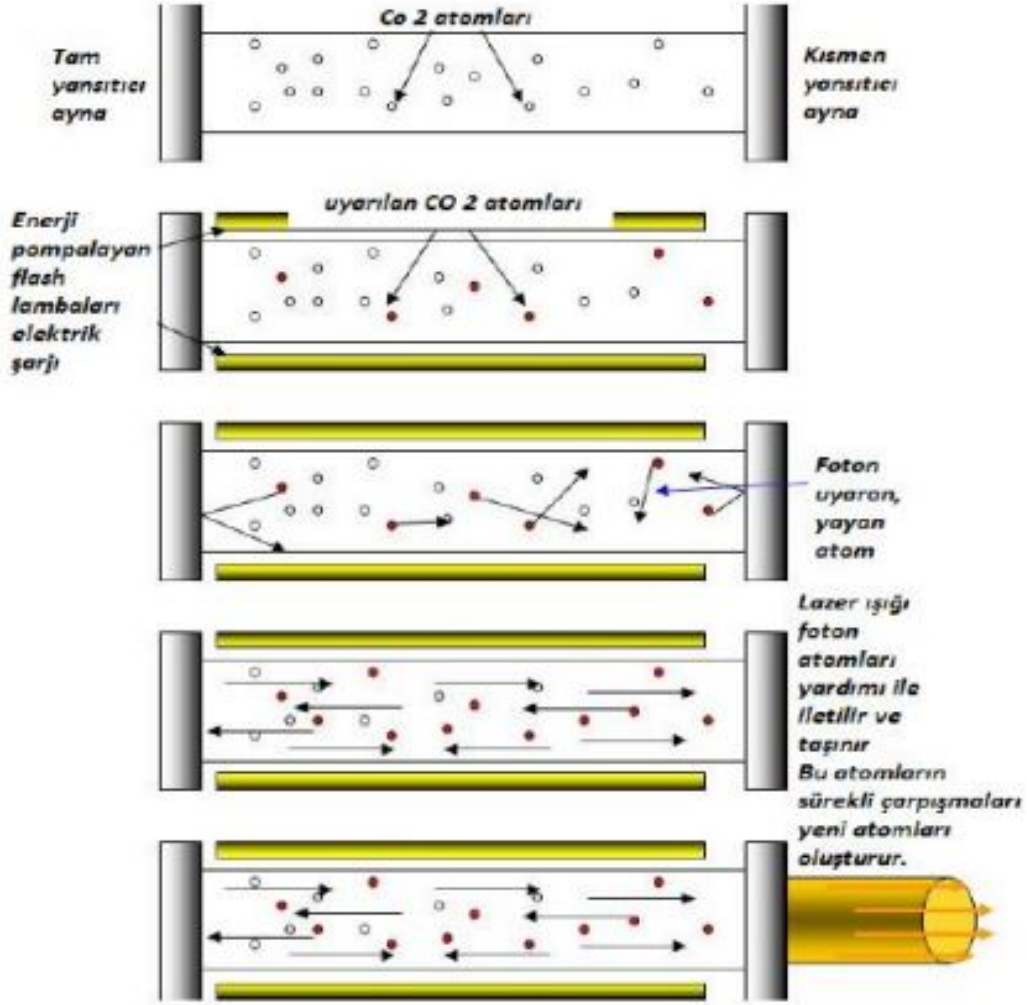
2.1 Lazer’in Çalışma Prensibi

Atomların, iyonların ve moleküllerin bir foton tarafından uyarılarak, yüksek enerji konumundan düşük enerji konumuna geçmesi sonucunda lazer ışını oluşmaktadır. Soğurma sürecinin tersi olan bu mekanizma “uyarılmış ışık” olarak adlandırılmaktadır. Uyarılmış geçişte ışık soğurulmadığı gibi tam tersine klonlanarak güçlenmiş olarak dışarı çıkar.



Şekil 2..1: Uyarılmış Işıma Şeması

Lazer ışınlarını elde etmek için radyasyon emisyonu sağlayacak aktif bir ortam (katı, sıvı, gaz), enerji kaynağı, elektron hareketlerini hızlandırmak için rezonans ayna sistemi ve fiber-optik bir iletken gereklidir (Güner, 2019). Bir lazer ışınının elde edilmesi sırasında birinci foton atomu uyarır ve uyarılma sonucunda meydana gelen ikinci fotonla birlikte aynadan yansıyarak geri döner. Ortaya çıkan (yayılan) fotonlar iki ayna arasında bulunan diğer atomları da uyardıkça çoğalırlar ve böylece lazer ışını meydana gelir. Yayılan fotonların hepsinin özellikleri aynıdır. Günümüzde lazer ışınları endüstride çeşitli alanlarda kullanılmaktadır. Şekil 2.2’de lazer ışınının oluşumu şematik olarak gösterilmiştir. (İloğlu, M., 2010)



Şekil 2..2: Lazer Işını Oluşumunun Şematik Gösterimi

2.2 Lazer Türleri

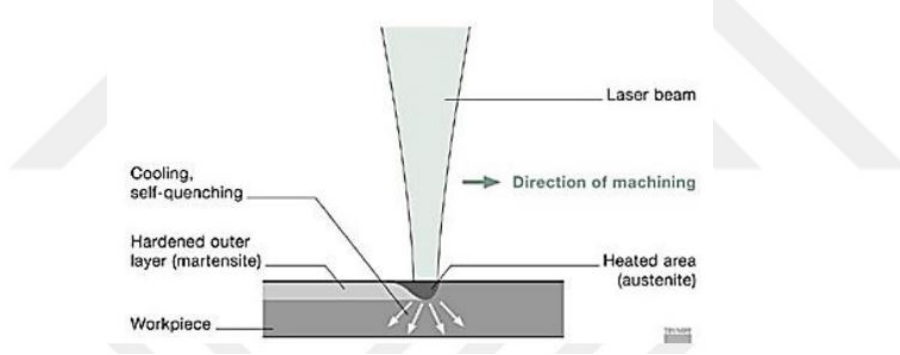
Lazer türleri gaz lazerler, katı-hal lazeri, sıvı lazer, yarı-iletken lazerler ve diğer lazerler olmak üzere 5 ana başlık altında toplanırlar.



Şekil 2..3: Lazer Türlerinin sınıflandırılması

3. LAZER İLE YÜZEY SERTLEŞTİRME YÖNTEMİ

Sürekli gelişen endüstrinin son trendlerinde, bir makine parçasının yüksek hız, yüksek performans ve yüksek işleme hızı ile sertleştirilmesi gerekmektedir (Shin, H.J., 2008). Bu nedenle, mekanik çalışma için gerekli parçalar sadece yüksek mukavemete değil, aynı zamanda iyi bir tokluğa, aşınma direncine ve korozyon direncine de sahip olmalıdır. Lazer ile yüzey sertleştirme, malzemeyi kimyasal değişime uğratmadan uygulanan yüzey sertleştirme yöntemidir. Böylece malzemenin iç tokluğundan ödün vermeden bir yüzeyi sertleştirmek için kullanılan en iyi yöntemlerden biridir. Lazer ile yüzey sertleştirme, geleneksel olarak uygulanan yüzey sertleştirme metodları ile karşılaştırıldığında yüzey kalitesi, işlem hızı ve proses kontrolünün daha kolay sağlanması gibi bir çok avantaja sahiptir. Yine onu diğer geleneksel yöntemlerden ayıran en önemli avantajlardan biri ise sertleşmiş yüzeyin herhangi bir ek soğutma işlemine ihtiyaç duyulmadan, malzemenin kendi kendine soğuması ile oluşmasıdır. Şekil 3.1’de lazer ışınının yüzey sertleştirme prensibi şematik olarak gösterilmiştir (Nobet, E., 2019).



Şekil 3.1: Lazer Işını ile Yüzey Sertleştirme Prensibi

Lazer ile yüzey sertleştirme yönteminin geleneksel yöntemlere göre diğer avantajları;

- Bu yöntemde soğutma işleminin kendi kendine gerçekleşmesi sebebiyle işlem sonrası iş parçalarını yıkamaya ve temizlemeye ihtiyaç yoktur.
- Lazer ile yüzey sertleştirme sonrası iş parçasında herhangi bir ek prosese ihtiyaç duyulmaz.
- Karmaşık geometrilere ve küçük deliklere sahip iş parçaları için uygun bir yöntemdir.
- İşlem esnasında enerji girdisi lazer gücü, tarama hızı, odak mesafesi vb. gibi parametrelerle kontrol edilebilir.

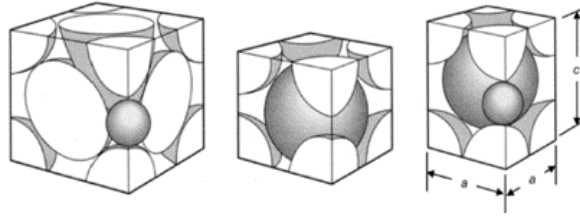
- Malzemenin lokal olarak sertleştirilmesine imkan sağlar.
- Kimyasal kullanılmaması sebebi ile çevre dostu bir uygulamadır.

3.1 Lazer İle Yüzey Sertleştirme Mekanizması

Lazer yüzey sertleştirme, yeterli karbon oranına sahip çeliklerin yüzeyinde bölgesel sertleştirme için uygun bir yöntemdir. İşlem sırasında malzemede ergime olmadan bir faz dönüşümü gerçekleşir (Nobet, E., 2019). Malzeme, östenit sıcaklığının hemen altındaki bir sıcaklık değerine ısıtılır. Yüksek sıcaklık tesiri altında parçanın atomlarının kafes yapısında değişimler meydana gelir ve östenitik yapılar oluşur. Lazer ışını ısıtılmış bölgeyi terk ettikten sonra iş parçasının hala soğuk olan iç kısmına doğru ısı transferi gerçekleşir. Yüzeyde meydana gelen bu ani ve hızlı soğuma malzemenin kafes yapısının eski haline dönmesine engel olmaktadır. Böylece yüzeyde martenzitik yapı oluşur.

3.3.1.1 Martenzit Yapı Oluşumu

Çelik malzemelerde, östenit sıcaklığına ulaşıldıktan sonra hızlı bir şekilde soğumaya maruz kaldığında denge fazlarının oluşumu gerçekleşmemektedir. Denge fazlarının dönüşümleri sırasında malzemenin yüzey merkezli kübik (YMK) kafes yapıları arasında meydana gelen hacim merkezli tetragonal (HMT) yapı meydana gelir ve HMT kafes yapısının da boyca kısalarak hacim merkezli kübik (HMK) kafes yapısına dönüşmesi beklenir. Ancak kafeste karbonun arayer atomu olarak bulunması durumunda, bu arayer atomu HMT yapının bir kenarında kalır ve birim hücrenin kısalarak tam kübik kristale ulaşmasına engel olur. Yüksek soğuma hızlarında ortaya çıkan bu faza martenzit adı verilir.



Şekil 3.2: Hızlı soğuma esnasında HMT kafes yapısına sıkışan karbon atomunun şematik gösterimi

3.2 Lazer İle Yüzey Sertleştirme Parametreleri

Lazer ile yüzey sertleştirme işleminde, istenen lazer-malzeme etkileşimini elde edebilmek için kullanılan parametrelerin iyi takip edilmesi son derece önem taşımaktadır. Bu nedenle, uygulanan parametreler arasında optimum parametreyi belirlemek üzere deneyler yapılmalı ve çıkan sonuçlar karşılaştırılarak en iyi sertlik veya sertlik derinliği değerini veren parametreler uygulanmalıdır.

Bağımlı değişkenler sertlik, sertlik derinliği, ısıdan etkilenen bölge geometrisi ve ısı işlem görmüş bölge metalurjik özellikleridir. Çelik yüzeyinin özellikleri ve sıcaklık, güç yoğunluğuna ve lazer ışınının hareket hızına bağlıdır (Nobet, E., 2019).

3.3.2.1 Güç Yoğunluğu

Lazer ile yüzey sertleştirme işleminde güç yoğunluğunun artması, sertlik derinliğini de artırır. Bu sertlik derinliği değeri malzeme cinsine göre değişmekle birlikte her malzeme için bir maksimum değer vardır ve bu maksimum noktadan sonra artan güç yoğunluğu ile bu değer artırılamaz. Maksimum noktadan sonra güç yoğunluğunun artması malzeme yüzeyinde erimeye neden olur (Nobet, E., 2019).

3.3.2.2 Tarama Hızı

Tarama hızı, malzeme ile lazer etkileşim süresini belirleyen parametredir. Tarama hızı çok yüksek olduğu takdirde lazer-malzeme etkileşimi daha az olacağı için sertlik derinliği değeri düşecektir. Tarama hızının çok düşük olduğu uygulamalarda ise malzeme yüzeyinde erime meydana gelir ve sertlik değeri düşer. Bu nedenle tarama hızı sertlik ve sertlik derinliğinin belirlenmesinde önemli bir parametredir.(Nobet, E., 2019).

3.3.2.3 Absorbsiyon

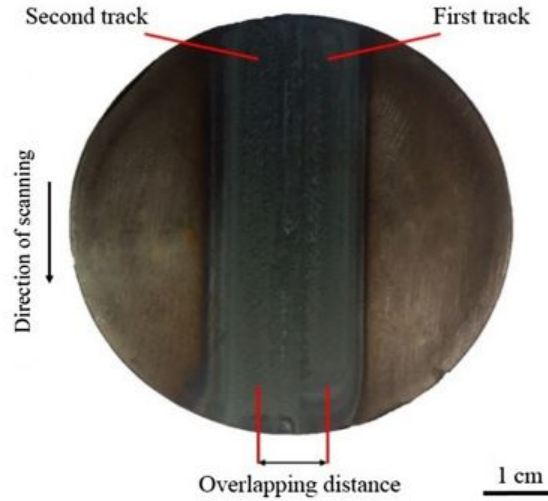
Işık enerjisinin soğurulması ısı transferine bağlıdır. Yaklaşık 16 mikrometre dalga boyuna sahip CO2 lazerin soğurma özelliği CO2 lazerin dalga boyunun yüksek olması nedeniyle yaklaşık 1,06 mikrometre dalga boyuna sahip Nd-YAG lazere göre daha düşüktür (Nobet, E., 2019).

Absorbsiyonu artırmak için kaplama teknolojisine başvurulur. Kaplamanın kalınlığı, kaplama malzemesinin tane boyutu, kaplamanın yapışma miktarı, gibi parametreler absorbsiyonun kalitesini etkiler. Sodyum ve potasyum silikat kaplamaların soğurma miktarının artmasında önemli bir etken olduğu bilinmektedir. Absorbsiyonu artırmak amacıyla kaplama kullanılması CO2 lazerler için geçerli bir yöntemdir. Daha kısa dalga boyu ve daha kaliteli selfabsorptivite miktarı nedeniyle Nd-YAG lazere gerek yoktur (Nobet, E., 2019).

3.3.2.4 Örtüşme (Overlapping)

Örtüşme, yüzeyin lazer ile taranması sırasında tarama çizgilerinin üst üste binmesi durumudur. Örtüşme sonrasında tarama çizgisinin sertleşen yüzeyinde yeniden tavlama meydana gelir ve bu durum yüzeyde yumuşama sorunlarına sebebiyet verir. İki tarama çizgisi arasındaki örtüşme oranı aşağıdaki denklem ile ifade edilir. Şekil 3.3’de örtüşmeli lazerle yüzey sertleştirme uygulamasının bir örneği gösterilmektedir (Moradi, M., 2019).

$$\text{ÖrtüşmeOranı} = \frac{d - f}{d} \times 100(\%) \quad (3.1)$$



Şekil 3.3: Örtüşen lazerle sertleştirilmiş numunelerin görüntüsü

4. LİTERATÜR TARAMASI

4.1 1.2344 (AISI H13) Çeliği Üzerine Çalışmalar

(Jae-Ho et al., 2009), AISI H13 takım çeliğinin yüzey sertliğini ve aşınma özelliklerini iyileştirmek üzere, 200 W fiber lazer kullanarak çeliğin mikroyapısını iyileştirme girişiminde bulunmuşlardır. Lazer ısı girdisinin ergitme bölgesi üzerindeki etkisini belirlemek için tarama koşullarını kontrol etmişlerdir. Testler sonucunda, hiç işlem görmemiş AISI H13 takım çeliğinin sertliğinin yaklaşık Hv 240 olduğunu ve lazerle yüzey sertleştirme işleminden sonraki sertliğin Hv 480-510 civarında olduğunu gözlemlemişlerdir. Uygulanan ısı girdisinin artmasıyla, sertlik derinliğinin ve genişliğin de arttığı sonucuna varmışlardır.

(Telasang et al., 2014), çalışmalarında, yüksek güçlü sürekli dalga diyot lazer ile yüzey sertleştirme ve lazer ergitme metodları uygulanmış AISI H13 çeliğinde malzeme yapısı-özellik arasındaki korelasyonu ele almışlardır. Çalışmalarında farklı işlem parametrelerine sahip lazer ışını kullanarak su verilmiş ve temperlenmiş AISI H13 takım çeliğini işlemişlerdir. Yüzeyin hem erimesine hem de sertleşmesine sebep olarak ortaya çıkan bileşenlerin mikroyapı, kalıntı gerilme, sertlik ve çekme dayanımı gibi mekanik özelliklerini incelemeyi amaçlamışlardır. Uygulanan işlemler sonucunda optimum parametrenin $62,5 \text{ J/mm}^2$ 'lik lazer enerji yoğunluğu olduğu sonucuna varmışlardır. Ayrıca aynı enerji yoğunluğunun maksimum %3,6'lık bir uzama ile 1460 MPa'lık daha da yüksek akma dayanımı sağladığını gözlemlemişlerdir. Sertleştirilmiş ve temperlenmiş AISI H13 takım çeliğine kıyasla lazer ile sertleştirilmiş ve lazer ergitilmiş yüzeyde daha yüksek akma mukavemeti sonuçlarının yanı sıra, lazer ile sertleştirmenin, yüksek akma mukavemeti ile (%3,6) ergitmeden daha yüksek uzama kombinasyonu (%0,97) verdiğini ve bu nedenle daha iyi bir yöntem olduğunu kabul etmişlerdir.

(Oh, S. and Ki, H., 2019), çalışmalarında AISI H13 takım çeliğinin lazer ile yüzey sertleştirme sonucu sertlik dağılımını tahmin etmek için derin öğrenme metodunu sunmuşlardır. Modellerinde girdi olarak 3 boyutlu sıcaklık dağılımını sertlik dağılımına dönüştürerek kullanmışlardır. Diğer tahminleme modellerinden farklı olarak, yüzey sıcaklığının maksimum değere ulaştığı yalnızca bir sıcaklık dağılımı kullanılarak sertlik tahmini yapılabilmesidir. Numunelere uygulanan lazer işlemi için 2 kW'lık çok modlu bir fiber lazer sistemi kullanılmıştır. İşleme sonrası yapılan sertlik ölçümleri modelleme için bir zemin oluşturmuştur. Tahminlerin ortalama

doğruluğu %94,4'tür olarak sonuçlanmıştır.

(Telasang et al., 2015), çalışmalarında AISI H13 çeliği için lazer ile yüzey işleme (sertleştirme ve eritme) parametrelerinin mikroyapı ve aşınma direnci üzerine etkilerini incelemişlerdir. Lazer ile yüzey sertleştirilmiş bölgenin mikro yapısı, martensit çıtalar arasında dağılmış çok ince karışık karbürlerden ($M_{23}C_6$, M_7C_3 , MC veya M_2C) oluşurken, lazerle yüzey eritilmiş bölgenin mikroyapısı östenit, martensit, dönüştürülmüş ledeburit ve dendritik bölgede çökelten ince karbürlerden oluşmaktadır. Mikrosertlik değeri 480-500 Hv olan sertleştirilmiş ve temperlenmiş numune ile kıyasladığında lazerle yüzeyi sertleştirilmiş numunenin mikrosertlik değeri 650-810 Hv değerlerine kadar artmıştır. Lazerle yüzey ergitme yöntemi (770 ± 10 VHN), lazerle yüzey sertleştirme yöntemine (660 ± 10 VHN) kıyasla daha yüksek bir sertlik değeri vermiştir. Lazer ile işleme sonrası numunelerin aşınma direnci hem balon diski hem de sürtünme aşınması test cihazları tarafından değerlendirilmiş ve lazer ile yüzey sertleştirmede, sertleştirme ve temperleme yönteminin aşınma durumuna göre önemli bir gelişme olduğu gözlemlenmiştir. Sertlik değerindeki artışa da bağlı olarak, lazer ile ergitme yöntemi aşınma test düzenekleri altında üstün direnç göstermiştir. Enerji yoğunluğu 75 J/mm^2 ile işlenen numuneler, aşınma direncinde maksimum gelişme göstermiştir.

4.2 1.2379 (AISI D2) Çeliği Üzerine Çalışmalar

(Lesyk et al., 2019), çalışmalarında lazer ile yüzey işleme (LHT), ultrasonik darbe ile işleme (UIT) ve ikisinin kombinasyonu olan (LHT+UIT) yöntemin AISI D2 takım çeliğine uygulanmasını ve sertleştirilmiş yüzey katmanlarının aşınma ve sürtünme direncine olan etkisini araştırmışlardır. Aşınma testleri sonucu başlangıç değeri ile kıyaslandığında aşınma direncinin sırasıyla LHT, UIT ve LHT+UIT yöntemlerinde %68, %41 ve %77 oranında azaldığı gözlemlenmiştir.

(Liu et al., 2022), AISI D2 çeliği ile yaptıkları çalışmada lazer ile yüzey parlatma ve sertleştirme işlemlerinin yüzey topografyası ve mikrosertliği üzerinde karşılaştırmalı bir yaklaşımda bulunmuşlardır. Lazer ile sertleştirme metodunun yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisi önemsiz kabul edilirken, lazer parlatma ve lazer parlatma-sertleştirme işlemlerinin %74,6 ve %80,9 oranında etki ettiğini tespit etmişlerdir. Bunun yanı sıra yüzey pürüzlülüğü açısından lazer ile parlatma-sertleştirme yönteminin lazerle parlatma yöntemine kıyasla 10 kat daha iyi olduğunu

ifade etmişlerdir. Sertlik iyileştirme açısından, LH ve LPH numunelerinin yüzeye yakın mikrosertlik değerlerinin sırasıyla 1,5 kat ve 1,3 kat arttığını, ve etkili sertleştirilmiş bölge (EHZ) derinliğinin sırasıyla 0,42 mm ve 0,24 mm olduğunu gözlemlemişlerdir. Bu iki lazer işleme yönteminin D2 takım çeliğinin enine kesit mikrosertliği üzerinde uygulanabilir bir işlem olduğunu gözlemlemişlerdir.

4.3 1.6523 (AISI 8620) Çeliği Üzerine Çalışmalar

(Gupta, H. S., 2019), çalışmalarında SAE 8620 çeliğin mekanik ve tribolojik özelliklerini geliştirmek için lazerle yüzey sertleştirme tekniğini kullanmışlardır. Lazer gücü ve tarama hızı gibi işleme parametrelerinin mikroyapı ve mikrosertlik üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Lazer gücünün malzemenin mikroyapısı üzerinde en etkili parametre olduğunu ve parçanın servis ömrünü artırdığını gözlemlemişlerdir. Bu nedenle lazer ile yüzey sertleştirme işleminin otomotiv sektöründe kullanılan dişliler için servis ömrünü artıracak düşük maliyetli bir teknik olduğunu önermişlerdir. Tüm deneyler 50-250 W lazer gücü aralığında gerçekleştirilmiştir. Tüm deneyleri gerçekleştirmek için etkili bir lazer ışını nokta boyutu ve tarama hızı kombinasyonu alınmıştır. Lazer yüzey sertleştirme işleminden elde edilen mikro sertlik değerleri, geleneksel karbonitrasyon ısıl işlemi sertlik değerleri ile karşılaştırılmış ve karşılaştırmalı olarak daha iyi değerler elde edilmiştir.

(Roy et al., 2017), AISI 8620 çelik ile yaptıkları çalışmada proses esnasında kullanılan farklı koruyucu gazların ve (azot, argon ve hava) ve farklı tarama hızlarının (70-110 in./min) elde edilen “kalıntı östenit”(RA) miktarına etkisini incelemişlerdir. Bu incelemenin amacı, aşırı yüksek kalıntı östenit seviyeleri durumunda karşılaşılan zayıf aşınma direnci ve boyutsal stabilite sorunlarından kaçınmak için numuneler üzerinde orta ile düşük %RA ile sonuçlanan parametreleri kullanmaktır. Lazer ile tarama işlemi CNC kontrollü sürekli dalga CO² lazer ile gerçekleştirilmiştir. Lazer gücü, ışın çapı ve tarama hızı, lazer malzeme-etkileşimini belirleyen en önemli parametreler olarak kabul edilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde, uygun güç yoğunluğu ve tarama hızı seçimi ile RA seviyelerini %10'un altında kontrol etmenin mümkün olduğunu gösterdi. İşleme sonucunda üretilen %RA, daha düşük tarama hızında ve koruyucu gaz olarak hava ve nitrojen ile argona kıyasla daha yüksektir. Daha düşük tarama hızı ile birlikte hava ve nitrojen korumalı ortamlar, daha derin etkileşim hacmi ve daha yüksek ısı girişi kombinasyonu nedeniyle daha yüksek bir sertlik sağlamaktadır.

4.4 Örtüşme Oranı (Overlap) Üzerine Çalışmalar

(, 2022), çalışmalarında bir Rofn Sinar FL010 fiber lazer ve iki boyutlu (2D) optik sistem kullanarak AISI 1045 orta karbon çeliği ve AISI D2 yüksek kromlu takım çeliği üzerinde tarayıcı tabanlı lazer dönüşüm sertleştirmesini uygulamışlardır. Uygulama esnasında %10, %25 ve %40 oranlarında örtüşen çoklu lazer tarama izleri oluşturmuşlardır. Çeşitli örtüşme oranlarına sahip büyük ölçekli metal parçaların lazer yüzey sertleştirilmesi için bilgisayar destekli sayısal kontrol programları geliştirmişlerdir. İncelenen çelikler için 400 µm bindirme derinliği elde etmek için bindirme oranının %20–25 olarak seçilmesi gerektiğini ortaya koymuşlardır. Karbon çeliğinin (AISI 1045) aksine takım çeliğinde (AISI D2) lazerle temperleme sonucu yüzey sertliği sağlanmıştır ancak çok pimli UIT işleminin uygulanması karbon çeliğinin de yüzey sertliğinde artışa sebep olmuştur. Çelik parçaların LHT ile sertleştirilmiş bölgesinde hem sertlik hem de sertleştirme derinliği sağlamak için, lazer tarama parametrelerinin optimizasyonu ve lazer tavlamanın ardından çok pimli UIT dövme uygulamasını da sonraki çalışmalar için planlanmışlardır.

(Karamimoghadam et al., 2022), çalışmalarında düşük karbonlu ve paslanmaz çeliklerde lazer tarama esnasında tarama çizgilerinde örtüşmenin etkisini incelemişlerdir. Numune olarak AISI 4130 düşük karbonlu ve AISI 410 paslanmaz çelik kullanılmış ve %50 örtüşme oranı ile lazerle yüzey sertleştirme işlemi uygulanmıştır. Sonuçlara göre AISI 4130 çeliğin örtüşme bölgelerinde sertlik değeri 762 HV değerine çıkarken AISI çeliğin örtüşme bölgelerinde sertlik değeri 675 HV değerine çıkmıştır. Çalışmanın amacı lazer ile örtüşmeli tarama işleminden sonra ferrit dönüşümünün etkisini göstermektir. Lazerle ile sertleştirilmiş izlerin kenarlarındaki ferrit yüzdesi oranında önemli ölçüde azalma olduğu görülmüştür. AISI 4130 ve AISI 410'da örtüşme işleminden önce ferrit yüzdesi sırasıyla %9,92 ve %8,7 iken örtüşmeden sonra %0,27 ve %0,95 değerlerine gerilemiştir. Örtüşme işlemi, lazer ile yüzey sertleştirme esnasında ikinci izden sonraki ferrit fazının azalmasında olumlu bir etkiye sahiptir.

(Cordovilla et al., 2016), çelik yüzeylerin aşınma ve yorulma özelliklerini iyileştirmek için lazer ile yüzey sertleştirme işlemi üzerine çalışmışlardır. Ayrıca çalışmada örtüşme parametrelerinin optimizasyonu üzerine yoğunlaşmışlardır. Literatürde mevcut olan bir lazerle sertleştirme sıcaklıkları/oksidasyon birleştirilmiş modeli, ilk kez bir örtüşen proses durumuna uygulanarak, birincinin martenziti üzerinde ikinci hattın tavlmasını hesaba katarak prosesin

kapasitesini genişletmek hedeflenmiştir. Çalışma, daha önce yazarlar tarafından geliştirilen lazer yüzey sertleştirme modelini yenilikçi bir şekilde, örtüşen izlerle sürecin incelenmesine uygular.

4.5 Lazer ile Yüzey Sertleştirme Üzerine Farklı Alanlarda Yapılan Çalışmalar

(Karamimoghadam, M., 2021), çalışmalarında lazer tarama çizgilerinde meydana gelen örtüşmenin (overlapping) düşük karbonlu çelikler ve paslanmaz çelikler üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Analiz edilen numuneler %50 örtüşme oranına sahip AISI 4130 düşük karbonlu çelik ve AISI 410 paslanmaz çeliklerdir. Sürekli dalga ve maksimum 2 kW güce sahip endüstriyel yüksek güçlü bir diyot lazer kullanmışlardır. Her iki numuneye uygulanan lazerle yüzey sertleştirme işleminde parametreler ve ortam koşulları aynıdır. Uygulanan işlemler sonrası numunelerin sertlikleri, sertlik derinliği ve genişliğini test etmişler ve optik mikroskop ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile mikroyapı analizi yapmışlardır. Çalışmanın sonucu, örtüşme alanındaki her iki numune için sertliğin AISI 4130 için 762 Hv ve AISI 410 için 675 Hv değerlerine kadar arttığını göstermektedir. Ayrıca, her iki numunede de ferrit fazı miktarının azaldığını gözlemlemişlerdir.

(Bouquet et al., 2016), enjeksiyon kalıplama yönteminde elyaf takviyeli plastik malzemelerin kullanımının artması sonucu kalıp bileşenlerinin ömrünün azalmasına çözüm olarak, enjeksiyon nozülleri üzerinde işleme ve lazerle sertleştirme yöntemlerinin kombinasyonunu uygulamışlardır. Kalıplara hem işleme hem de lazerle sertleştirme işlemlerinin tek bir setup ile gerçekleştirilmesine olanak sağlamaktadırlar. Optimum sertleştirme parametresini seçebilmek için termal modelleme ve deneysel olarak doğrulanmasını amaçlamışlardır. Çalışmalarında ilk olarak düz numuneler için deneysel olarak doğruladıkları termal modellemeyi açıklamışlardır. Daha sonra ise 40° eğimli yüzeylerde yaptıkları termal modellemeyi deneysel sonuçlar ile ilişkilendirmişlerdir. Bu aşamalardan sonra güncelledikleri termal modellemeyi kullanarak Ø1 mm ve 40°'lik enjeksiyon nozülünün sertleştirilmesi için en uygun parametreyi araştırmışlardır. Enjeksiyon nozülü üzerinde deneysel doğrulama ile çalışmalarını sonlandırmışlardır. Çalışma sonucunda bir enjeksiyon nozülü dairesel takım yolu kullanılarak yaklaşık 8 saniyede sertleştirilmiş ve sertlik değeri 810 HV100'ün üzerine kadar çıkmıştır.

(Aborkin et al., 2015), önceden ısıtılmış H11 (4Kh5MFS) çeliğine uygulanan lazerle yüzey sertleştirme malzeme yapısı, lazer etki bölgesi boyutları, yüzey mikrosertliği, derinlik

boyunca mikrosertlikteki değişim ve işlenmiş yüzey kalitesi üzerindeki etkisi incelenmiştir. 300°C’de düşük sıcaklıkta tavlamanın bir lazerle sertleştirme bölgesinin boyutu ve mikrosertliği üzerindeki etkisi için de tahminler elde edilmiştir. Lazer gücünün 650-750 W ve tarama hızının 8-10 mm/s olduğu işlem aralığında sertlik derinliğinin 0,64-0,86, mikrosertlik değerinin 675-750 ve yüzey pürüzlülüğünün 0,6–1,2 mikron değerinde olduğu tespit edilmiştir.

(Kucuk et al., 2023), ferritik (GJS 400) ve perlitik (GJS 700) sfero döküm (DCI) numunelerin lazer yüzey sertleştirme sonrası aşınma davranışları karşılaştırmalı olarak incelemiştir. Çalışmada 20×5 mm² lazer darbe alanı ile tek geçişli lazer yüzey sertleştirme (LSH) işlemini, ısı gradyan kaynaklı artık gerilme oluşumu nedeniyle aşınma direncinde azalma ve bindirme oranından dolayı yumuşama etkisi gibi sınırlamaları ortadan kaldırmak için kullanmışlardır. Böylece karşılaştırmalı analizlerin daha güvenilir bir şekilde değerlendirilmesini hedeflemiştir. Sertleştirme işleminden sonra numunelerin sertlik değeri işlenmemiş haldeki sertlik değerlerine göre 4.3 kat artmıştır. Lazerle işlenmiş perlitik numunelerin mikroyapısında, az miktarda kalıntı östenite ek olarak martenzit fazın baskın olduğu görülmüştür. Ferritik numunelerde ise ledeburit ve martenzit fazları tespit edilmiştir. Çalışma sonucunda lazerle işlenmiş ferritik ve perlitik numunelerinin aşınma hacmi kayıplarında, işlenmemiş numunelere göre sırasıyla yaklaşık %26,6 ve %30,7 oranında azalma elde etmişlerdir.

5. TERMAL MODELLEME

Bu tez çalışmasında, COMSOL Multipysics yazılımı kullanılarak, belirlenen lazer parametrelerinin numuneler üzerinde meydana getireceği sıcaklık değişimi ve sertlik derinliği değerlerinin incelemek üzere termal modelleme gerçekleştirilmiştir. Modellemede kullanılan deney parametreleri Tablo 6.1’de verilmiştir. Lazer gücü (W), lazer tarama hızı (mm/s) ve lazer ışın çapı (mm) parametreleri belirlendikten sonra Şekil 6.6’da denklemi verilen enerji yoğunluğu değeri hesaplanmış ve analizde ısı girdisi olarak kullanılmıştır.

5.1 Lazer Işın Çapı Hesabı

Model tasarımında 2 farklı lazer kafası durma mesafesi (odak mesafesi) parametresi seçilmiş ve buna bağlı olarak her iki mesafedeki ışın çapı değerleri hesaplanmıştır. Işın çapını hesaplamak için Denklem 5.1 ile ifade edilen standart ışın yayılma denklemi kullanılmıştır.

$$\left[\left(\frac{M^2 \lambda z_1}{\pi w_0^2} \right)^2 + 1 \right]^{\frac{1}{2}} x w_0 \quad (5.1)$$

Burada z_1 parametresi, lazer kafası ile iş parçasının yüzeyi arasındaki mesafeyi, M^2 ışın kalite faktörünü, w_o ışın bel yarıçapını ve λ lazerin dalga boyunu ifade etmektedir.

$$w_o = \frac{BBP}{\theta} \quad (5.2)$$

Burada BBP değeri (Beam Parameter Product) ışın parametresi ürün değeri, θ ıraksanan ışın yarı açısıdır. Lazer ışın kalite faktörü M^2 , ışın kalitesinin yaygın bir ölçüsüdür. Lazer ışınının mükemmel Gauss dağılımlı lazer ışın yoğunluğuna ne kadar yakın olduğunu gösteren bu değer Denklem 5.3 ile ifade edilmektedir.

$$M^2 = \frac{\pi \theta w_0}{\lambda} \quad (5.3)$$

Gerekli değerler formülde yerine konulduktan sonra iki farklı durma mesafesine göre lazer ışın çapları Tablo 5.1’deki gibi elde edilir.

Lazer Işını Odak Mesafesi (mm)	Lazer Işını Çapı (mm)
340	2,063
350	2,338

Tablo 5..1: Lazer odak mesafesine bağlı ışın çapı değerleri

Değişken	Değer
Absorptivite (emicilik)	0.25
Emisivite (yansıtıcılık)	0.7
Isı transfer katsayısı (W/m ² .K)	10
Numune genişliği (mm)	0.016
Numune yüksekliği (m)	0.004
Işın çapı w_z1 (mm)	2,063
Işın çapı w_z2 (mm)	2,338
Ortam sıcaklığı (K)	273.1
Lazer ilerleme hızı (m/s)	0.010/0.015

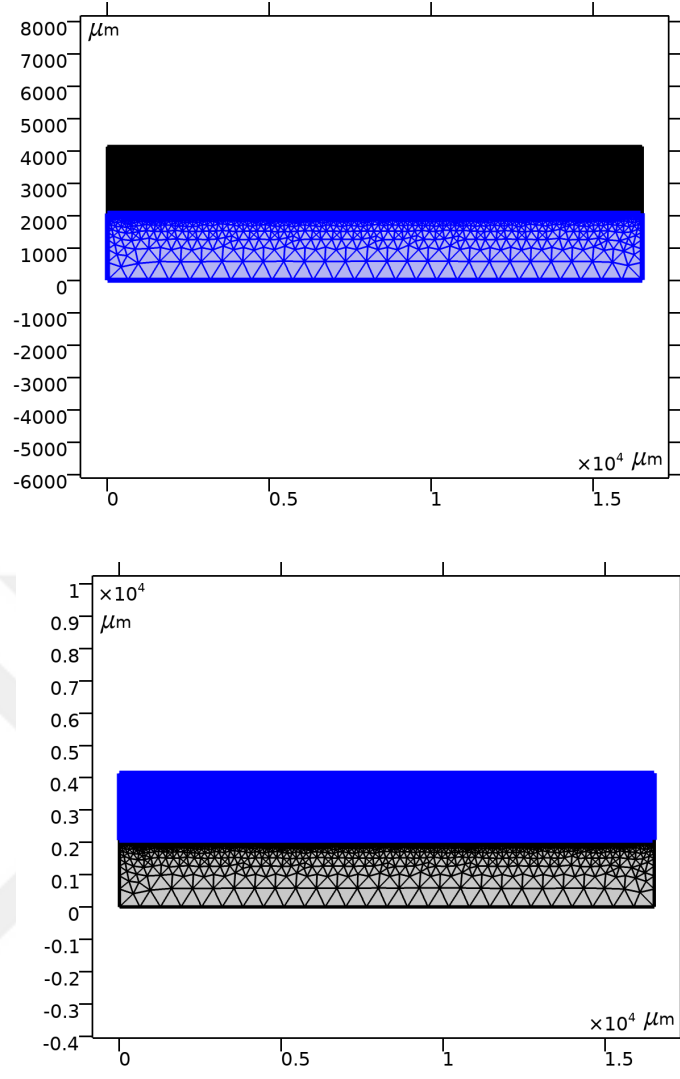
Tablo 5..2: Termal modelleme girdileri

5.2 Malzeme ve Geometri Tanımlama

Modelleme için bir diğer adım, lazer uygulaman malzemenin seçimidir. Yöntemin uygulanacağı malzeme yazılım kütüphanesinden tanımlanmıştır. Burada malzemeye ait karakteristik veriler programın veri tabanından elde edilmektedir.

Işın çapı değeri ve malzeme tanımlama işlemleri sonrası modelleme esnasında lazer ışınının ve malzemenin karakteristiğini belirleyen temel parametreler tablo 5.2’de ifade edilmiştir. Tablodaki absorptivite, emisivite, ısı transfer katsayısı, numune genişliği, numune yüksekliği parametreleri malzeme özelliklerini; ışın çapı, ortam sıcaklığı ve lazer ilerleme hızı ise lazer ışınının özelliklerini belirlemektedir.

Gerekli parametreler tanımlandıktan sonra, parça geometrisi tanımlanmış ve ince yapılı ağ örgüsü (fine mesh) uygulanmıştır. Lazer ile yüzey sertleştirme işleminin yüzeyi ve yüzeye yakın bölgeleri etkilemesi sebebi ile bu bölgelere daha ince mesh uygulanmıştır.



Şekil 5..1: Parça geometrisinin ağ yapısı

6. MATERYAL VE YÖNTEM

6.1 Deneyin Amacı

Bu tez çalışmasında literatür taramaları sonucunda belirlenen üç farklı çelik malzeme (1.2344 (H13), 1.2379 (D2), 1.6523 (8620)) üzerinde, COMSOL Multiphysics yazılımı ile yapılan termal modelleme sonucunda 3 farklı lazer gücü, 3 farklı tarama hızı ve 2 farklı lazer ışın çapı parametresinin kombinasyonu olmak üzere 18 adet (3x3x2) parametre uygulanması amaçlanmıştır. Modelleme sonucu ortaya çıkan parametrelerin deneysel olarak doğrulanması için, seçilen 3 farklı malzeme ile hazırlanan iş parçaları lazer ile yüzey tarama yöntemi ile işlenmiştir. Bu aşama tez çalışmasında Faz 1 olarak adlandırılacaktır. Faz 1’de yapılan lazerle yüzey işleme sonrası yapılan sertlik ve sertlik derinliği ölçümleri sonucunda, uygulanan 18 farklı parametreden üç farklı malzeme için en iyi sertlik değerini veren optimum parametre elde edilmiştir.

Elde edilen optimum parametre, yeni numuneler hazırlanarak, 8 farklı örtüşme (overlap) oranı ile yeniden uygulanmıştır. Bu aşama ise bu tez çalışmasında Faz 2 olarak adlandırılacaktır. Faz 2’de yapılan işleme sonrası örtüşme yüzeylerinde sertlik ölçümleri ve mikroyapı analizleri ile en iyi sonucu veren örtüşme parametresinin seçilmesi amaçlanmıştır.

6.2 Malzeme Özellikleri

6.6.2.1 1.2344 (AISI H13) Malzeme Özellikleri

Ana alaşım bileşenleri olarak krom, molibden ve vanadyum içeren 1.2344 çeliği, aşınma dayanımı ve ısı iletkenliği yüksek bir sıcak iş takım çeliğidir. Endüstride sıcak şekillendirme kalıplarında yaygın olarak kullanılan bir malzemedir. Alüminyum enjeksiyon kalıpları, dövme kalıpları, plastik enjeksiyon kalıpları, sıcak çekme bıçakları vb. alanlarda kullanılır. Yüksek tokluğa sahip bu malzeme ısı ısıtma ve nitrasyona uygundur. Aşağıdaki çizelgede numune olarak kullanılan DIN 1.2344 (AISI H13) malzemesinin Volt Elektrik Motorları San. Tic. A.Ş. firmasında yapılan spektral analiz ve Mekatest Laboratuvar, Endüstriyel kontrol ve Belgelendirme Hizmetleri San. Tic. Ltd. Şti.’de yapılan sertlik ölçümü sonucunda elde edilen kimyasal bileşimleri ve Vickers cinsinden sertlik değeri belirtilmiştir.

Malzeme	Sertlik Değeri (Hv)	C [%]	Si [%]	Mn [%]	P [%]	S [%]	Cr [%]	V [%]	Mo [%]
1.2344	205,9	0,29	1,06	0,35	0,018	0,0035	4,91	0,88	1,11

Şekil 6..1: 1.2344 malzeme özellikleri tablosu

6.6.2.2 1.2379 (AISI D2) Malzeme Özellikleri

Ana alaşım bileşenleri olarak krom mobilden ve vanadyum içeren ve yapısında %12 krom bulunan 1.2379 çeliği yüksek aşınmaya dayanıklılığı ve yüksek tokluğa sahip olması ile bilinen bir malzemedir. Endüstride kesme ve form verme kalıplarında, delme, zımbalama, kıvrırma, bükme, ezme, şişirme ve şekillendirme kalıplarında kullanılmaktadır.

Malzeme	Sertlik Değeri (Hv)	C [%]	Si [%]	Mn [%]	P [%]	S [%]	Cr [%]	V [%]	Mo [%]
1.2379	210,4	1,41	0,44	0,39	0,016	<0,0015	11,9	0,76	0,72

Şekil 6..2: 1.2349 malzeme özellikleri tablosu

6.6.2.3 1.6523 (AISI 8620) Malzeme Özellikleri

8620 çeliği, düşük karbon içeriği sayesinde sementasyon ve nitrasyona uygun bir malzemedir. Çekirdekte tokluğun istenildiği, yüzeyde ise sert ve aşınmaya dayanıklı olan ve darbeli yerlerde tercih edilen sünek bir sementasyon çeliğidir. Makine ve otomobillerde, dişli çark, pim, mil, şalter kovanı, piston pimleri, zincir baklaları ve benzeri parçalarda kullanılır.

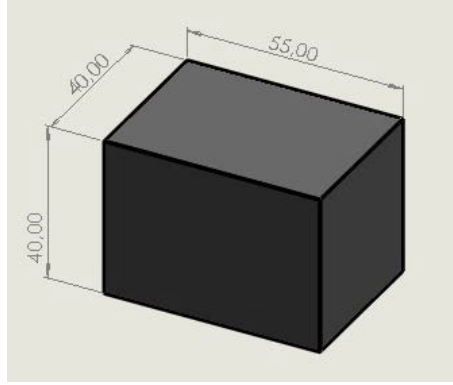
Malzeme	Sertlik Değeri (Hv)	C [%]	Si [%]	Mn [%]	P [%]	S [%]	Cr [%]	V [%]	Mo [%]
AISI 8620	211	0,2	0,21	0,83	0,008	0,009	0,56	-	0,18

Şekil 6..3: 8620 malzeme özellikleri tablosu

6.3 Numunelerin Hazırlanması

Faz 1 için, Volt Elektrik Motorları San.Tic.Aş.'de, AISI H13, AISI D2 ve AISI 8620 çeliklerinden 55x40x40 mm ölçülerinde birer adet numune hazırlanmıştır. Numune hazırlamak üzere tedarik edilen çelikler testere tezgahında kesilmiş ve taşlama tezgahında belirlenen ölçülerde taşlanmıştır.

Faz 2’de yapılacak deneylerde kullanılmak üzere 30x30x30 mm ölçülerinde prizmatik numuneler testere ile kesilmiş ve lazer ile tarama yapılacak yüzeyleri taşlanarak prosese hazır hale getirilmiştir.



Şekil 6.4: Lazer ile işlenecek numune ölçüleri

6.4 Numunelerin Lazerle İşlenmesi

Hazırlanan numunelerin lazer ile yüzeylerinin işlenmesi Laseral Endüstriyel Lazer Sistemleri San. ve Tic. Ltd. Şti. tarafından sertleştirme, kaplama, kaynak ve kesme gibi çeşitli işlemlerde kullanılan ABB IRB2600 robot sistemi ile gerçekleştirilmiştir.



Şekil 6.5: LASERAL ABB IRB2600 robot + 2kW CW Lazer Sistem

6.5 Lazerle Tarama Deney Parametrelerinin Belirlenmesi

Belirlenen 3 farklı güç, 3 farklı hız ve 2 farklı ışın çapı parametresinin kombinasyonları yapılarak her bir numuneye 18 adet çizgisel tarama uygulanmıştır. Güç değerleri 2 kW üzerinden %100, %90, %80 oranlarında seçilmiştir. Numune yüzeyi ile lazer kafası arasındaki odak mesafesi 340 mm'dir. Lazer ışını çapı bu odak mesafesi için 2,063 mm'dir. Lazer kafasının +10 mm yukarı kaldırıldığı durumda ise lazer ışını çapı 2,338 mm olarak hesaplanmıştır.

Lazer gücü (kW), lazer ilerleme hızı (mm/s) ve odak mesafesine bağlı olarak lazer ışını çapı (mm) parametreleri doğrudan lazer enerji yoğunluğunu (J/mm^2) etkilemektedir. Lazer enerji yoğunluğu (J/mm^2) aşağıda verilen denklem ile ifade edilmektedir (Telasang et al., 2014).

$$\text{Laser energy density (J/mm}^2\text{)} = \frac{\text{Laser power (W)}}{\text{Processing speed (mm/s)} \times m \text{ (mm)}}$$

Şekil 6..6: Lazer Enerji Yoğunluğu Denklemi

	Lazer Gücü (W)	İlerleme Hızı (mm/s)	Odak Mesafesi (mm)	d (mm)	Enerji yoğunluğu (J/mm ²)
L1	1600	10	340	2,063	77,7
L2	1800	10	340	2,063	87,4
L3	2000	10	340	2,063	97,1
L4	1600	15	340	2,063	51,8
L5	1800	15	340	2,063	58,3
L6	2000	15	340	2,063	64,7
L7	1600	20	340	2,063	38,8
L8	1800	20	340	2,063	43,7
L9	2000	20	340	2,063	48,5
L10	1600	10	350	2,338	68,7
L11	1800	10	350	2,338	77,3
L12	2000	10	350	2,338	85,8
L13	1600	15	350	2,338	45,8
L14	1800	15	350	2,338	51,5
L15	2000	15	350	2,338	57,2
L16	1600	20	350	2,338	34,3
L17	1800	20	350	2,338	38,6
L18	2000	20	350	2,338	42,9

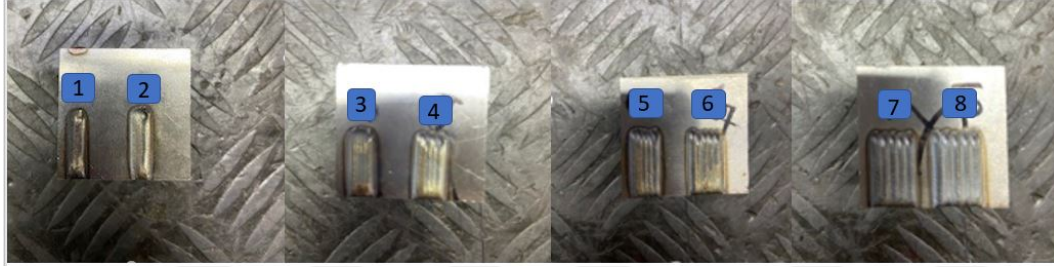
Tablo 6..1: Lazer ile yüzey sertleştirme için belirlenen parametreler ve enerji yoğunluğu değerleri

6.6 Örtüşme (Overlap) Uygulamasında Deney Parametrelerinin Belirlenmesi

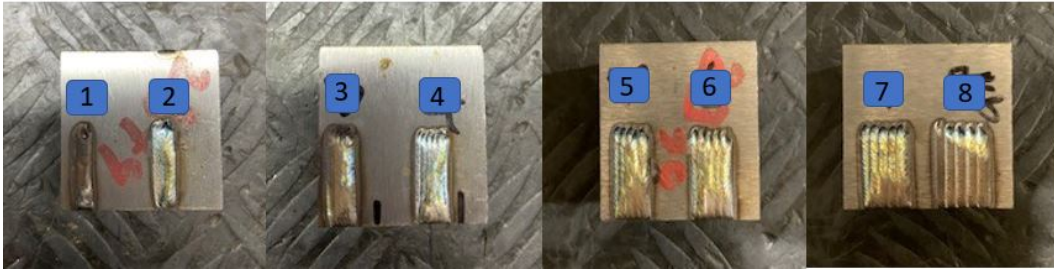
Tablo 6.1’de verilen parametreler 3 malzeme üzerine de uygulanmış ve yapılan ölçümler sonucunda istenilen sertlik değerini veren parametre seçilmiştir. Seçilen parametre ile Tablo 6i.2’de verilen parametreler ile farklı örtüşme oranlarında numuneler işlenmiştir.

Parametre	İki Tarama Çizgisi Arasında Yer Değişimi (mm)	Tarama Çizgileri Uzunluğu (mm)
P1	0,25	15
P2	0,50	15
P3	0,75	15
P4	1,00	15
P5	1,25	15
P6	1,50	15
P7	1,75	15
P8	2,00	15

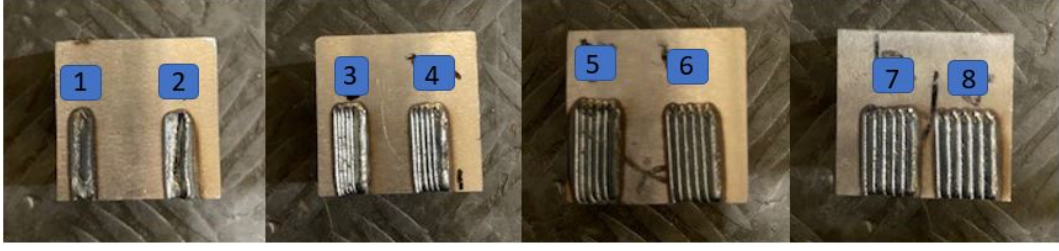
Tablo 6..2: Örtüşme uygulaması parametreleri



Şekil 6..7: 1.2344 (AISI H13) numuneleri üzerine uygulanan örtüşmeli lazer ile tarama işlemi



Şekil 6..8: 1.2379 (AISI D2) numuneleri üzerine uygulanan örtüşmeli lazer ile tarama işlemi



Şekil 6..9: 1.6523 (AISI 8620) numuneleri üzerine uygulanan örtüşmeli lazer ile tarama işlemi

6.7 Karakterizasyon Metodları

6.6.7.1 Stereo Mikroskop ile İnceleme

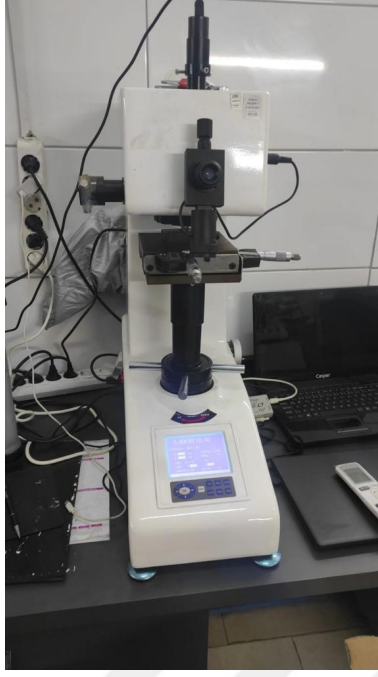
Lazer ile işlenen numune yüzeyinin incelenmesi amacıyla Nikon SMZ745T marka mikroskop ile tarama çizgileri üzerinden görüntü alınmıştır.



Şekil 6..10: Nikon SMZ745T model stereo mikroskop

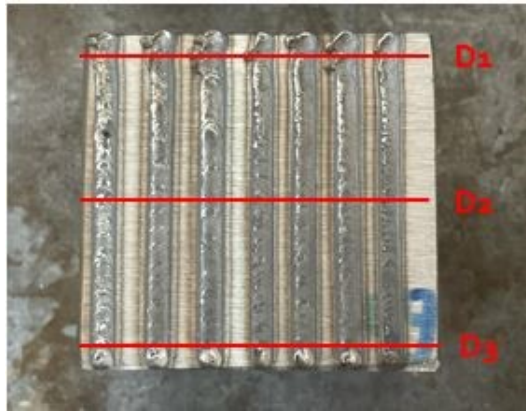
6.6.7.2 Sertlik Ölçümleri

Numune yüzeylerinde lazer ile tarama yapılan bölgelerin sertlik değerleri ölçümü Meka-test Laboratuvar, Endüstriyel Kontrol VE Belgelendirme Hizmetleri SAN. TİC. LTD. ŞTİ.'de HARDWAY MHVD 10IS Model cihaz ile yapılmıştır.



Şekil 6..11: Yüzey sertlik ölçümlerinin yapıldığı HARDWAY MHVD 10IS Model sertlik ölçüm cihazı (Mekatest Laboratuvar'ın İzniyle)

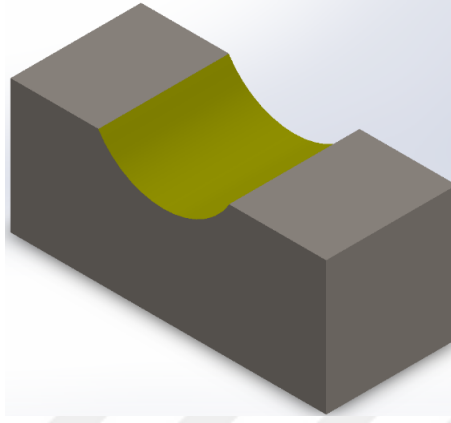
Sertlik ölçümü öncesi tarama çizgilerin üzerinden 600 grid zımpara kağıdı ile zımparalama işlemi yapılarak ölçüm yüzeyindeki pürüzlülükler giderilmiştir. Sertlik ölçümleri Vickers metodu ile 136 derece elmas piramit uç, 98,07 N kuvvetle 5 saniye batırılarak yapılmıştır. Her bir tarama çizgisi üzerinden lazer ışınının başlangıç noktası, orta nokta ve bitiş noktası olmak üzere 3 bölge belirlenmiş ve bu noktalardan ölçüm alınmıştır.



Şekil 6..12: Yüzey sertlik değerleri ölçüm noktalarının şematik gösterimi

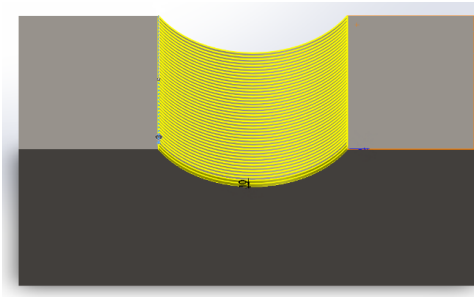
6.8 Serbest Formlu Yüzeylerde Lazer ile Yüzey Sertleştirme Uygulaması

Lazer ile yüzey sertleştirme işleminin yalnızca iki boyutlu yüzeylerde değil, üçüncü bir boyutu da içeren serbest formlu yüzeylere uygulanabilirliğini test etmek üzere Şekil 6.13’de gösterilen formda bir adet numune hazırlanmıştır.



Şekil 6..13: Serbest formlu numune

Yüzey sertleştirme işlemi, Şekil 6.5’te verilen LASERAL ABB IRB2600 robot + 2kW CW Lazer Sistem ile gerçekleştirilmiştir. Parça tasarımında, taranacak eğrisel yüzey üzerinde tarama yolları oluşturulmuştur (Şekil 6.14). Tarama yollarını içeren tasarım, lazer ünitesinin entegre edildiği robot yazılımına aktarılmıştır. Eğrisel yüzeyin taranması esnasında odak mesafesinin sabit kalması için odaklayıcı lazer kafası ile eğri yüzey arasındaki dikey mesafe sabitlenmiştir. Odak çapı 2.063 mm, tarama aralığı 1 mm, lazer gücü 1600 watt ve tarama hızı 15 mm/s olarak ayarlanmıştır. Tarama esnasında parça sabit tutulmuş olup sadece robotun 6 eksenli kullanılmıştır.



Şekil 6..14: Serbest formlu numune üzerinde oluşturulan tarama yolları

6.9 Mikroyapı İncelemeleri

6.6.9.1 Numune Hazırlama

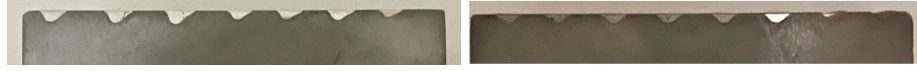
Faz 1 için; sertlik ölçümü sonrası numuneler, mikroyapıda meydana gelen değişimleri incelemek üzere tel erozyon yöntemi ile ortadan kesilmiştir. Kesilen yüzeyler METKON FORCIMATE 2V model zımparalama ve parlatma cihazında sırasıyla 400,600,800,1000, 1200 ve 2000 grid zımpara kağıdı ile zımparalanmış ve ardından 6 µm, 3 µm ve 1 µm elmas süspansiyon ile parlatılmıştır.

Parlatma sonrası numune yüzeyi %5 nitrik asit (HNO_3), %95 etil alkol içeren nital çözeltisi ile daldırma yöntemi kullanılarak dağlanmıştır. Dağlama sırasında numune 5 saniye çözelti içerisinde bekletildikten sonra etil alkol ile yıkanp kurutularak takip edilmiştir. Bu işlem toplamda 4 kez tekrar edilmiştir.

Faz 2 sonrası işlenen numuneler tel erozyon ile 10x10x5 mm boyutlarında kübik numuneler haline getirilmiş ve kesitleri alınmıştır. Kesilen numuneler bakalite alınarak zımparalama ve parlatma işlemleri gerçekleştirilmiştir. Zımparalama işlemi 400,600,800,1000, 1200 ve 2000 grid zımpara kağıdı ile yapılmış ve ardından 6 µm, 3 µm ve 1 µm elmas süspansiyon ile parlatılarak %5'lik nital çözeltisi ile dağlama işlemine tabii tutulmuştur.



Şekil 6..15: Zımparalama ve parlatma işlemlerinin yapıldığı METKON FORCIMATE 2V model cihaz



Şekil 6..16: Dağlama işlemi sonrası lazer tarama çizgilerinin kesit görüntüsü

6.6.9.2 Mikroskop ile Görüntü Analizi

Parlatma ve dağlama yapılmış numunelerin lazer ile işlenmiş bölgelerinin kesitleri üzerinden Nikon DS-Fi2 model optik mikroskop ile mikroyapıda meydana gelen değişimler görüntülenmiştir.



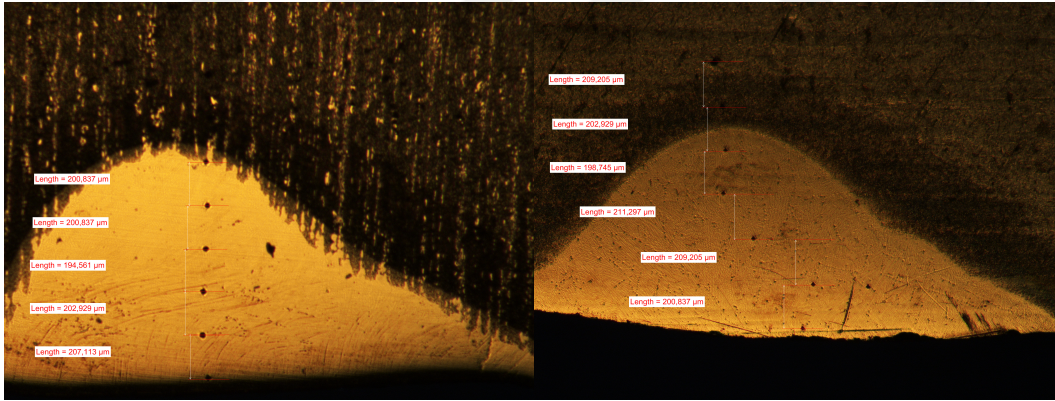
Şekil 6..17: Mikroyapı incelemeleri ve görüntü alma için kullanılan Nikon DS-Fi2 model optik mikroskop

6.6.9.3 Sertlik Derinliği Ölçümü

Numunelere uygulanan lazerle yüzey sertleştirme sonucunda lazer parametrelerinin yüzeyi kaç mm derinliğinde sertleştirdiğini belirlemek amacıyla sertlik derinliği ölçümü yapılmıştır. Ölçümler Shimadzu HMV-2 model Vickers mikrosertlik cihazında 136 derece elmas piramit uç, 1,961 N kuvvetle 10 saniye batırılarak gerçekleştirilmiştir. Ölçüm yüzeye en yakın noktadan başlatılıp 200 μ m aralıklarla düşey eksenle ilerletilerek, sertlik değerinin ana malzeme sertlik değerine düştüğü noktaya kadar devam etmiştir.



Şekil 6..18: Sertlik derinliği ölçümlerinde kullanılan Shimadzu HMV-2 model Vickers mikrosertlik cihazı



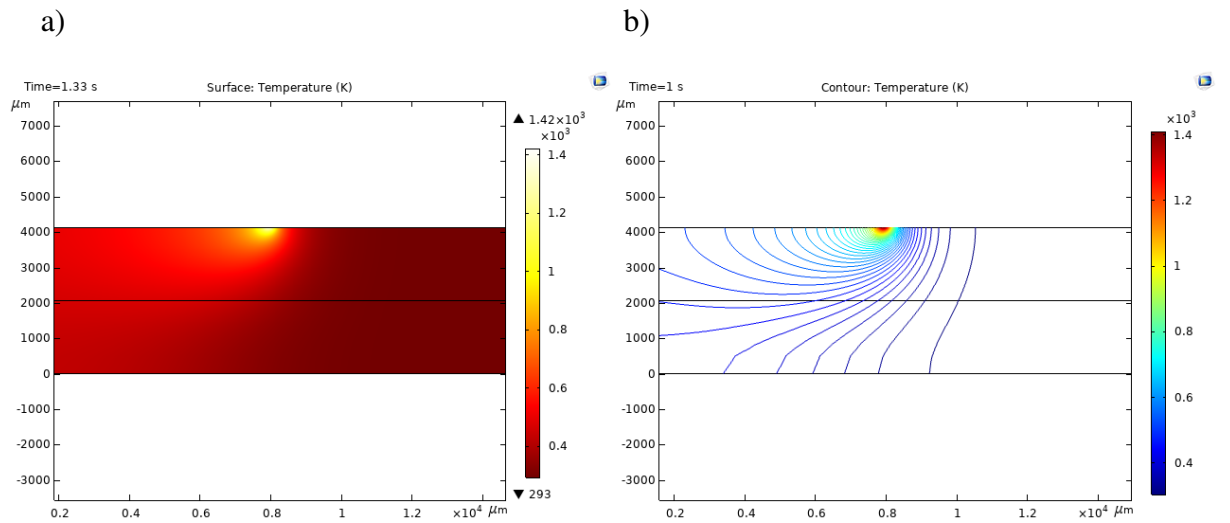
Şekil 6..19: Sertlik derinliği ölçümünün mikroskop altındaki görüntüsü

7. BULGULAR VE TARTIŞMA

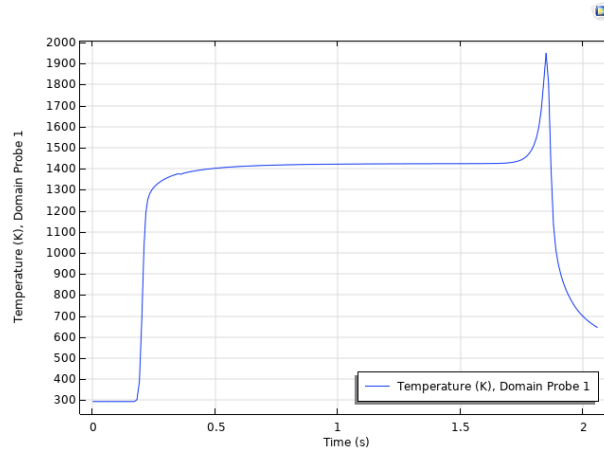
COMSOL Multiphysics yazılımı ile yapılan termal modelleme sonucunda lazer ile işleme esnasında numune üzerinde meydana gelen sıcaklık değişimi ve ısı etkisi altındaki bölgeyi gösteren simülasyon ve grafikler elde edilmiştir. Modelleme sonucunda lazer enerji girdisi ile meydana gelen ısıdan etkisi altındaki bölgenin derinliği bir görüntü işleme programı desteği ile ölçülmüştür. Modelleme sonrasında yapılan deneysel çalışmalar sonucunda (Faz 1), lazer ile yüzey sertleştirme işlemi sonrası yüzey sertlik ölçümü ve sertlik derinliği ölçümleri yapılmıştır. Modellemeden elde edilen sertlik derinliği değerleri ile deneysel ölçüm sonuçları kıyaslanmıştır. Ayrıca tarama çizgilerinin kesitlerinde mikroyapı incelemesi yapılarak tane boyutlarında meydana gelen değişimler incelenmiştir. Yüzey sertliği ve sertlik derinliği ölçüm sonuçları, lazer gücü, lazer ilerleme hızı ve lazer ışın çapının etkilediği lazer enerji yoğunluğu değerleri ile ele alınarak değerlendirilmiştir. Örtüşme uygulamasından sonra (Faz 2) tarama çizgilerinden kesit alınarak örtüşme bölgelerinden sertlik ölçümleri alınmıştır. En yüksek ve en düşük sertlik değerlerini veren numunelerin mikroyapılarında meydana gelen değişim X-Işını Kırınım yöntemi (XRD) ve Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) yöntemleri ile incelenmiştir. Ölçüm sonuçları iki boyutlu olarak grafiklendirilmiştir.

7.1 Termal Modelleme Sonuçları

Bu bölümde yapılan termal modelleme sonucunda, uygulanan her bir parametre için ısıdan etkilenen bölgeyi gösteren ve maksimum sıcaklık değerini belirten grafikler gösterilmiştir.



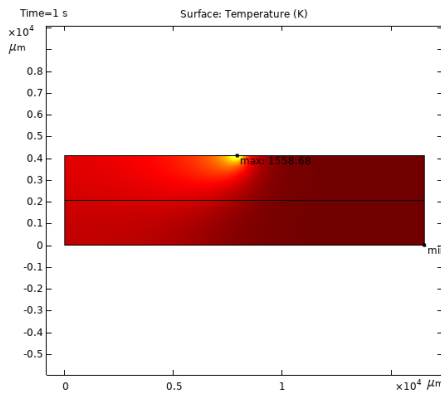
c)



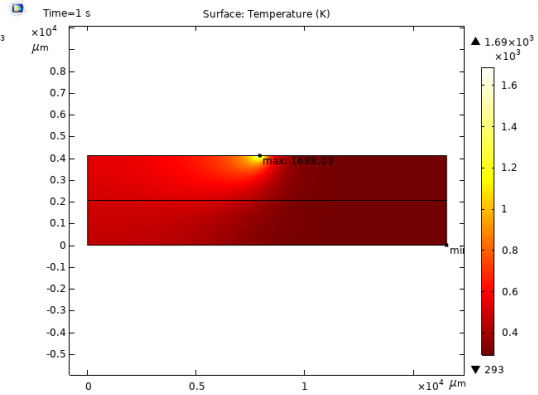
Şekil 7.1: L1-1600 W-10 mm/s-2,063 mm odak mesafesi parametresi analiz grafikleri a)-b)Maksimum sıcaklık noktasında numune üzerindeki ısı etkisi altındaki alan c) Zamana bağlı sıcaklık grafiği (K)

Şekil 7.1-c)'de verilen sıcaklık zaman grafiği incelendiğinde, lazer ile yüzey sertleştirme esnasında numune üzerinde maksimum sıcaklığın 1422 K (1149°C) olduğu görülmüştür. Grafik üzerinde zaman (s) ekseninde 1,5-2 saniye aralığında sıcaklığın pik yapmasının sebebi olarak, lazer ışını numuneyi terkettikten sonra sistem kapanmadan önce bir enerji birikimi meydana gelmesi ve bu birikim sonucunda sıcaklık değerinin pik yapmasından kaynaklandığı gözlemlenmiştir. Bu sebeple meydana gelen pik sıcaklık değeri maksimum sıcaklık olarak değerlendirilmemektedir.

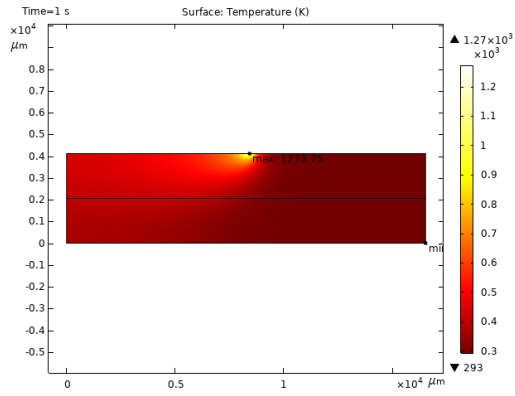
d)



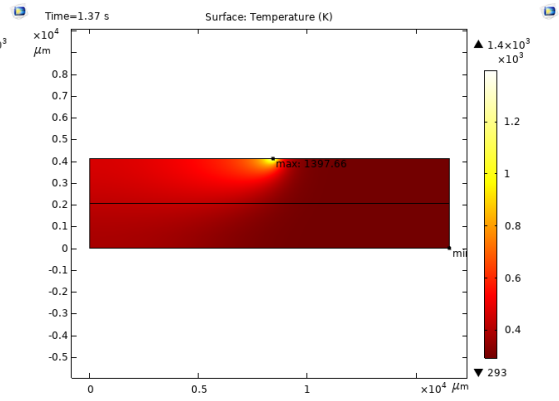
e)



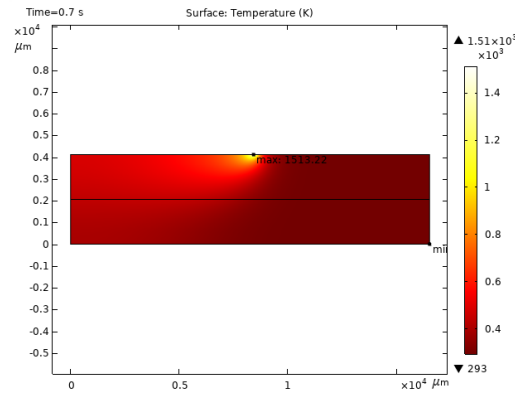
f)



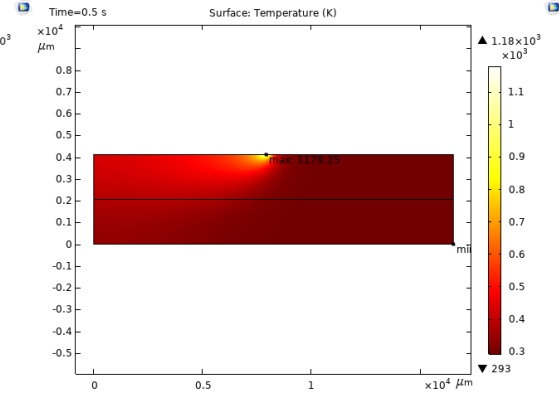
g)



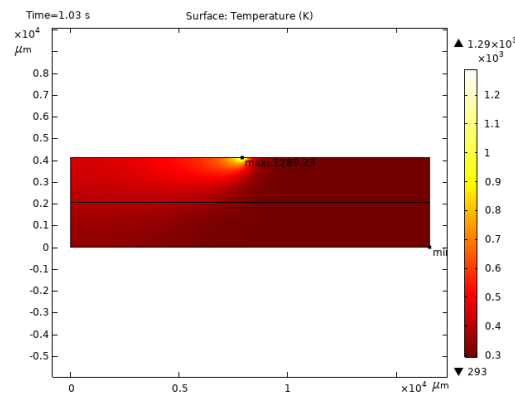
h)



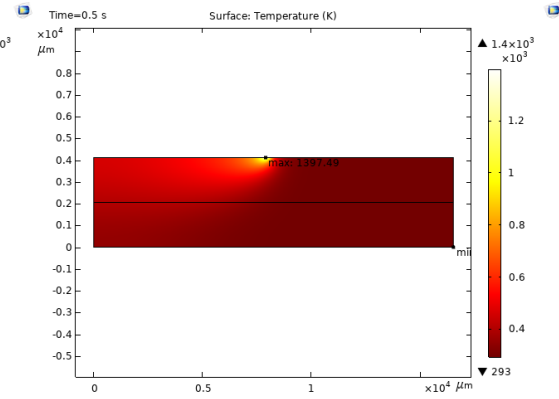
i)



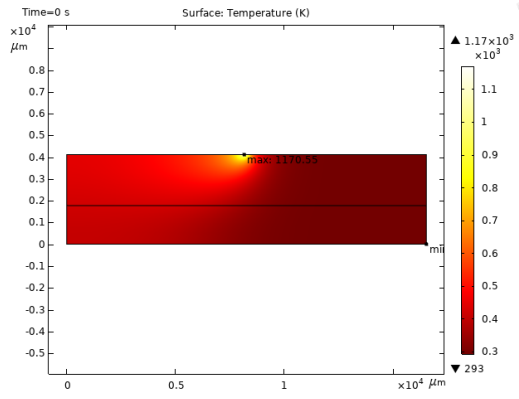
j)



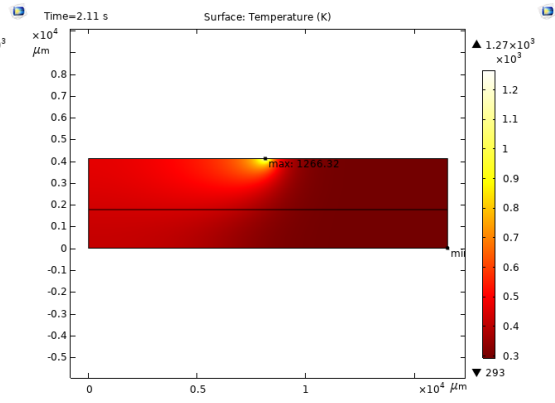
k)



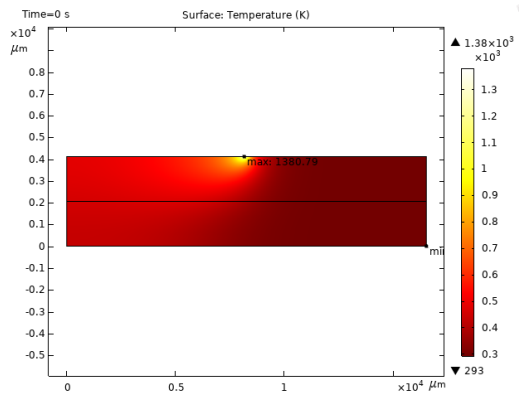
l)



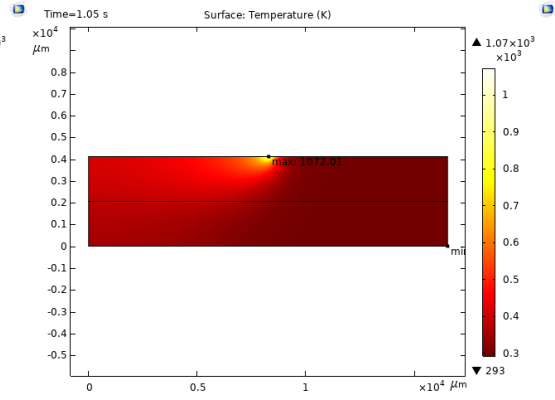
m)



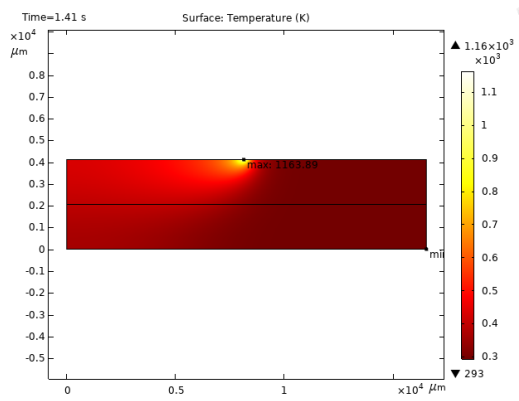
n)



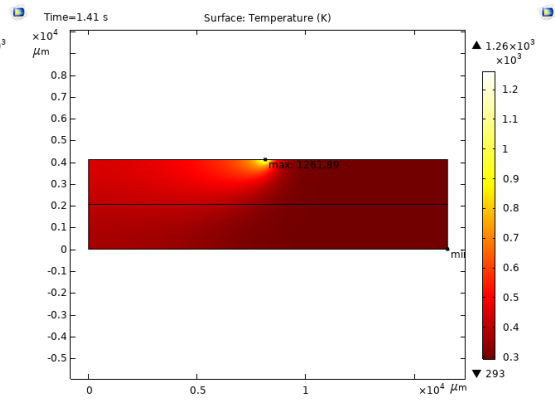
o)



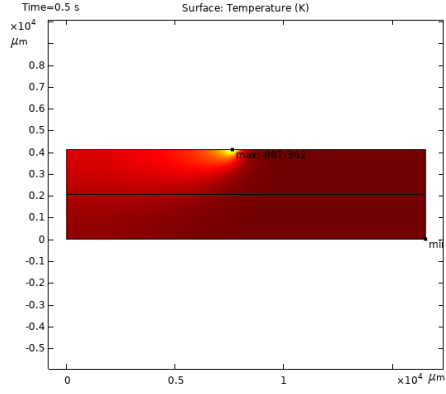
p)



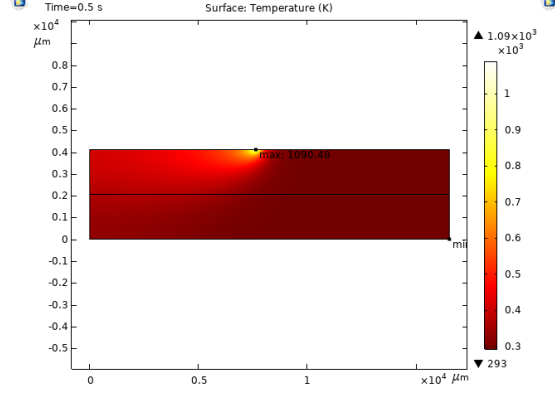
p)



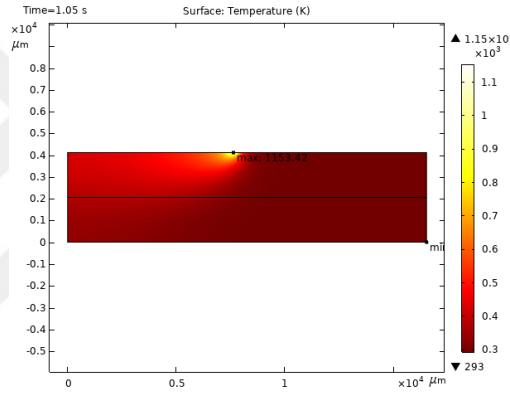
r)



s)



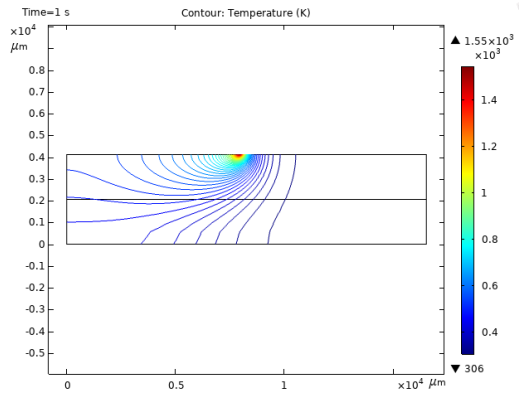
u)



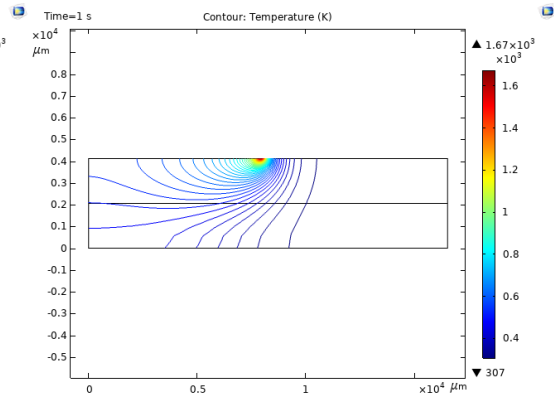
Şekil 7.2: Lazer ışını altında ısıdan etkilenen bölgenin simülasyonu; d)1800 W-10 mm/s-2,063 mm, e)2000 W-10 mm/s-2,063 mm, f)1600 W-15 mm/s-2,063 mm, g)1800 W-15 mm/s-2,063 mm, h)2000 W-15 mm/s-2,063 mm, i)1600 W-20 mm/s-2,063 mm, j)1800 W-20 mm/s-2,063 mm, k)2000 W-20 mm/s-2,063 mm, l)1600 W-10 mm/s-2,338 mm, m)1800 W-10 mm/s-2,338 mm, n)2000 W-10 mm/s-2,338 mm, o)1600 W-15 mm/s-2,338 mm, p)1800 W-15 mm/s-2,338 mm, q)2000 W-15 mm/s-2,338 mm, r)1600 W-20 mm/s-2,338 mm, s)1800 W-20 mm/s-2,338 mm, t)2000 W-20 mm/s-2,338 mm

Şekil 7.2’de gösterilen grafiklerde modelleme esnasında lazer ışınının numune üzerinde ilerlediği sırada meydana gelen sıcaklık değişimi ve ısıdan etkilenen bölge üzerindeki sıcaklık dağılımı görülmektedir. Aynı değişim Şekil 7.3’te kontur grafikleri ile daha detaylı biçimde ele alınmıştır.

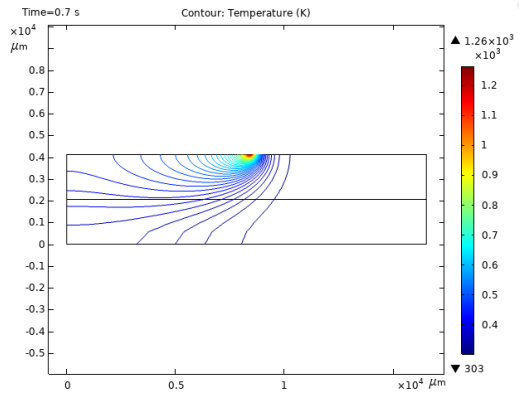
a)



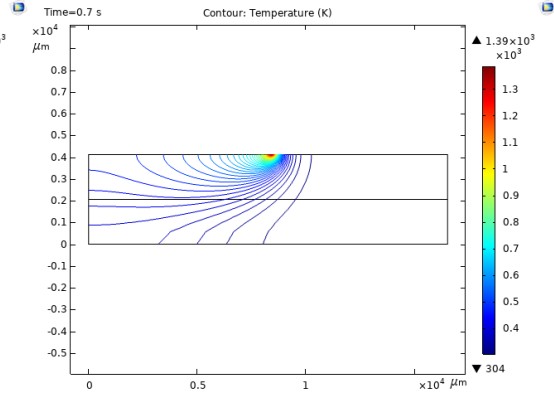
b)



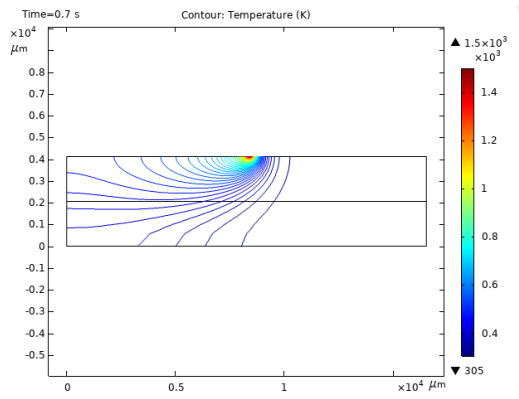
c)



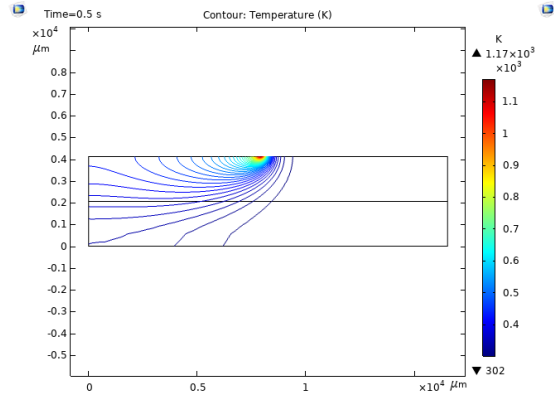
d)



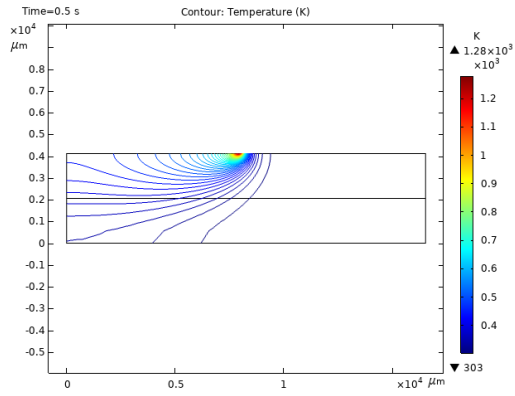
e)



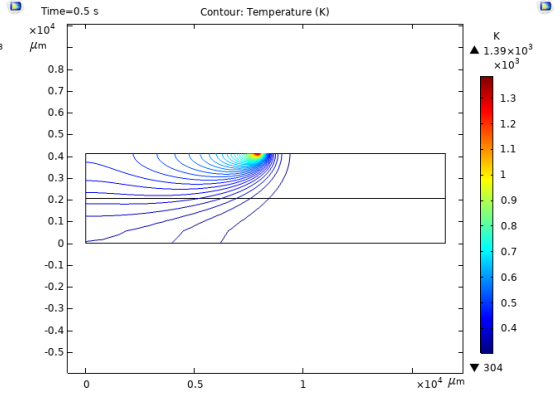
f)



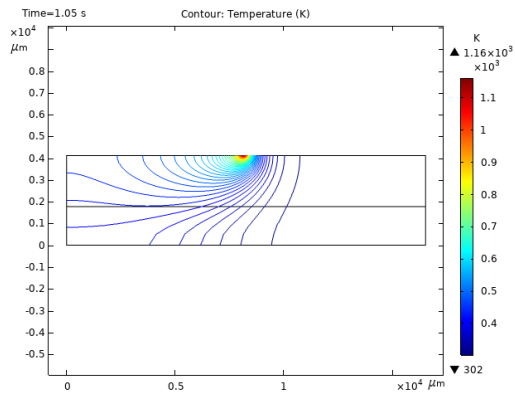
g)



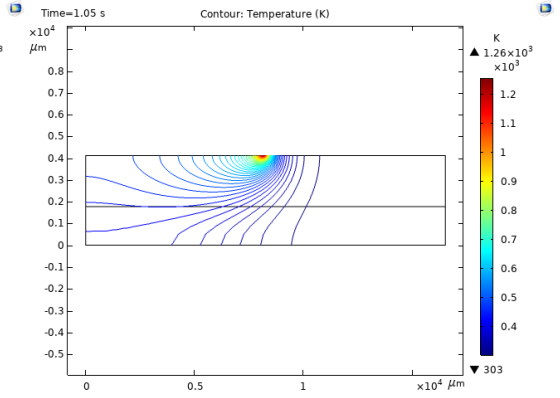
h)



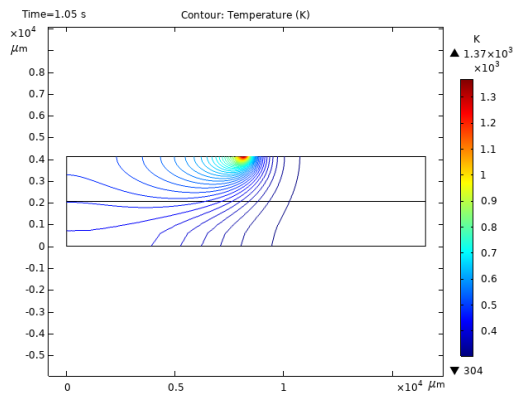
i)



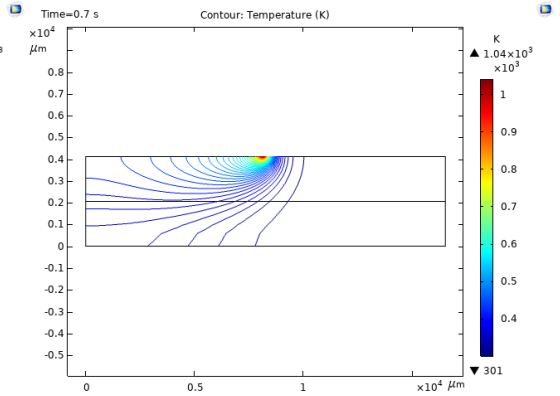
j)



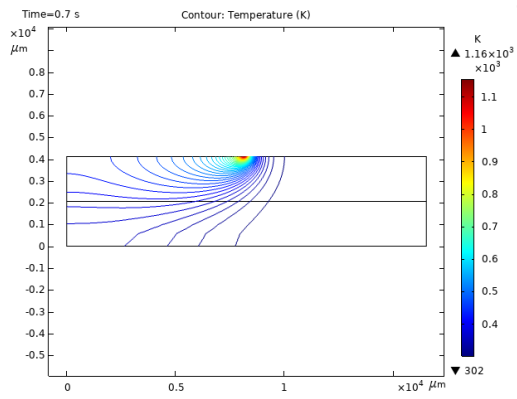
k)



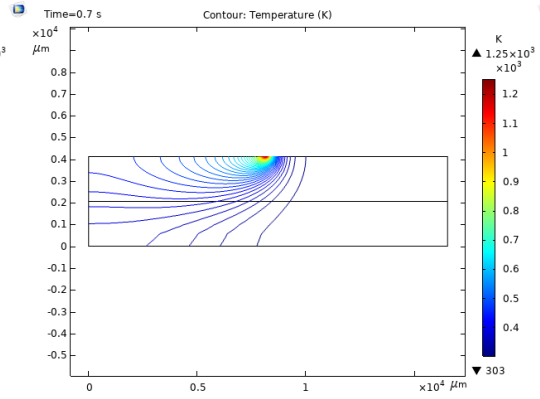
l)



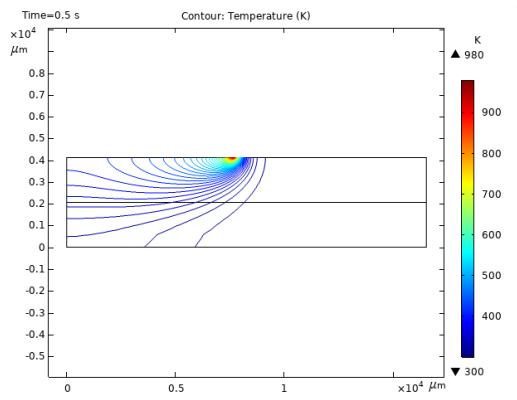
m)



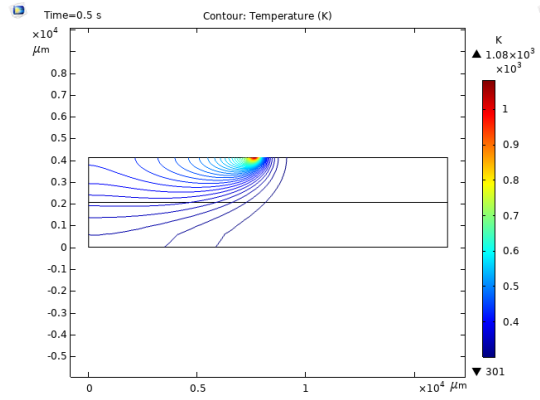
n)



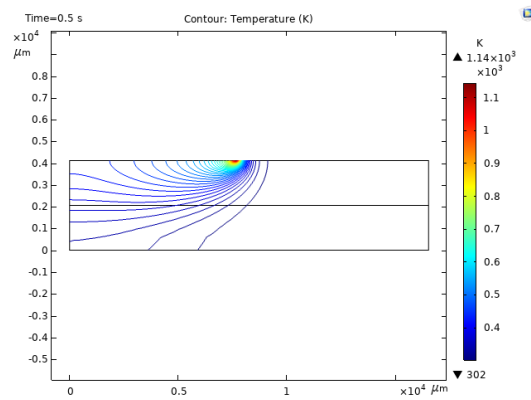
o)



p)

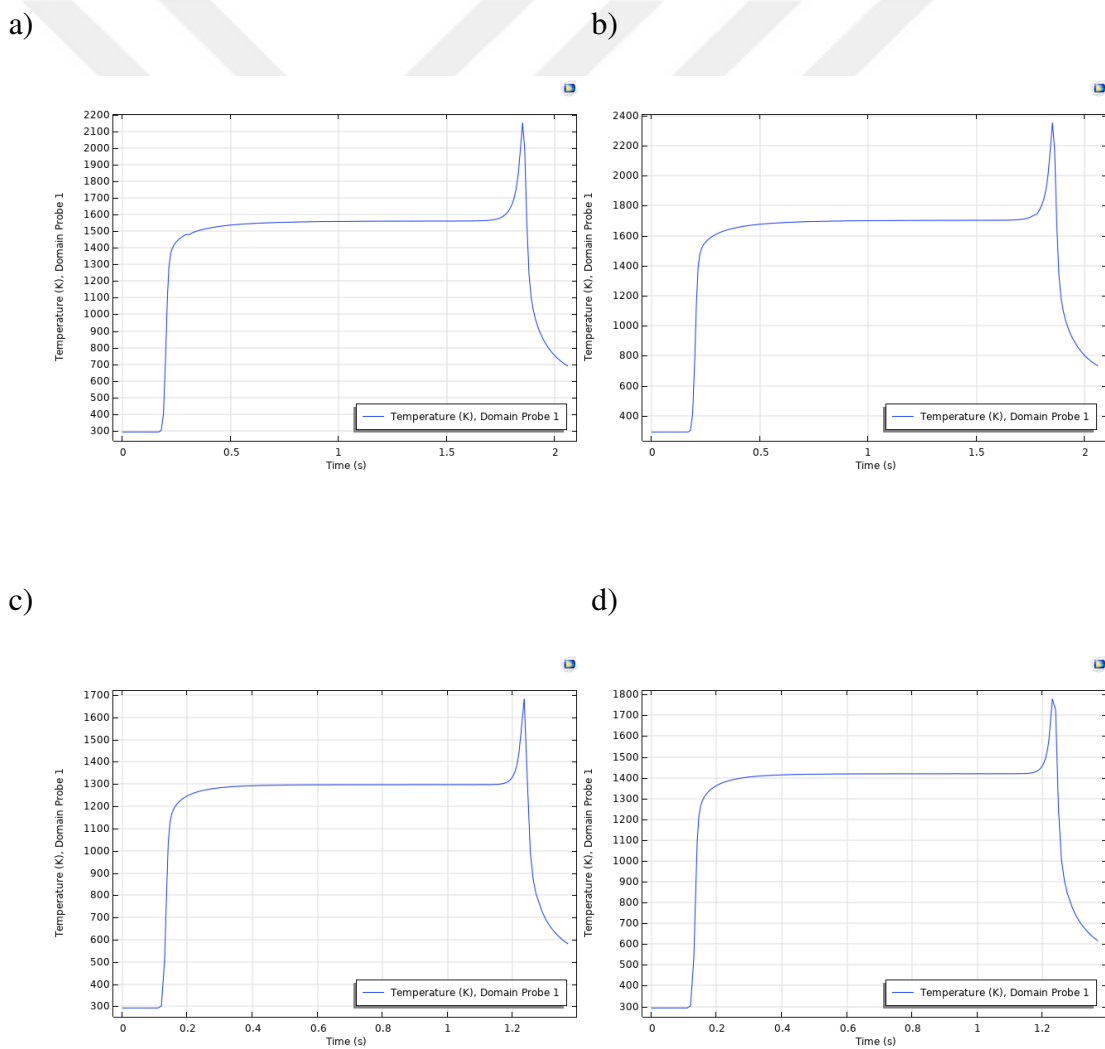


r)

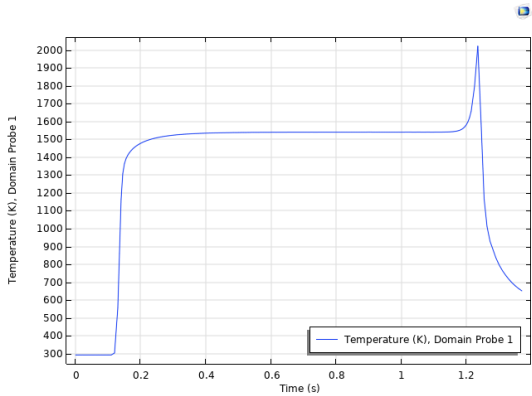


Şekil 7.3: Lazer ışını altında ısıdan etkilenen bölgenin simülasyonu (kontur dağılım grafiği); a)1800 W-10 mm/s-2,063 mm, b)2000 W-10 mm/s-2,063 mm, c)1600 W-15 mm/s-2,063 mm, d)1800 W-15 mm/s-2,063 mm, e)2000 W-15 mm/s-2,063 mm, f)1600 W-20 mm/s-2,063 mm, g)1800 W-20 mm/s-2,063 mm, h)2000 W-20 mm/s-2,063 mm, i)1600 W-10 mm/s-2,338 mm, j)1800 W-10 mm/s-2,338 mm, k)2000 W-10 mm/s-2,338 mm, l)1600 W-15 mm/s-2,338 mm, m)1800 W-15 mm/s-2,338 mm, n)2000 W-15 mm/s-2,338 mm, o)1600 W-20 mm/s-2,338 mm, p)1800 W-20 mm/s-2,338 mm, r)2000 W-20 mm/s-2,338 mm

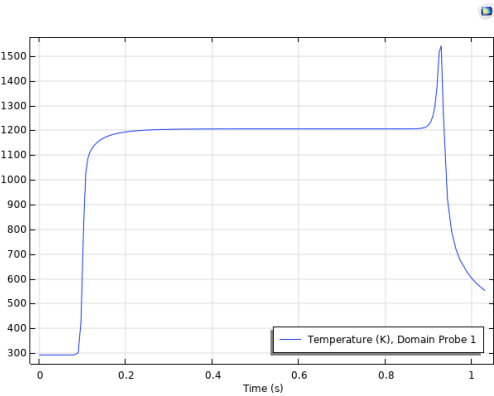
Şekil 7.3'te verilen kontur grafikleri incelendiğinde, işlem esnasında maksimum sıcaklığın yüzeyde, lazer ışının temas ettiği noktada meydana geldiği görülmektedir. Numune yüzeyinden iç kısmına doğru ilerlediğimizde sıcaklık değerinin azalan değerler gösterdiği görülmüştür.



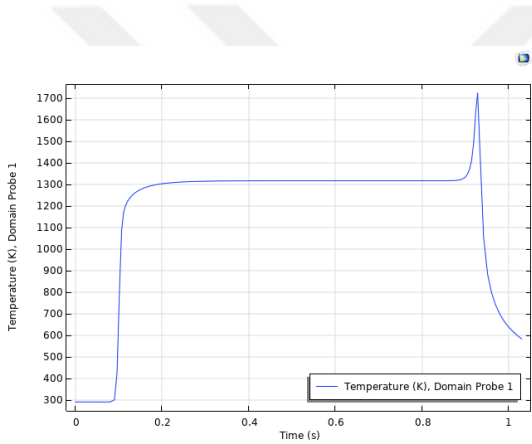
e)



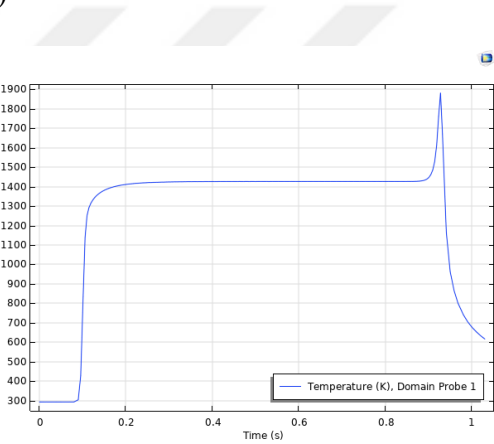
f)



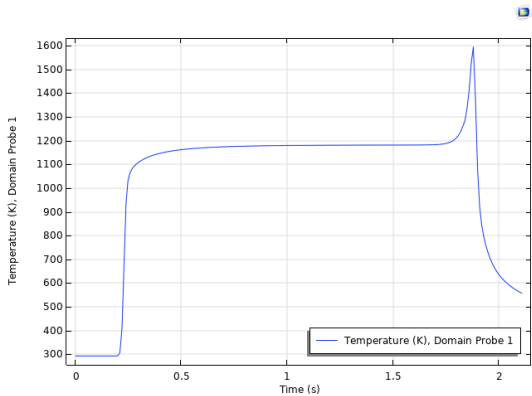
g)



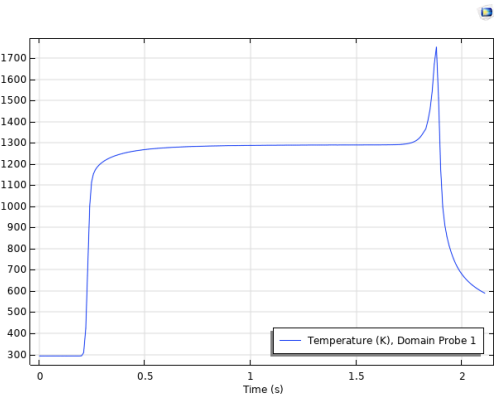
h)



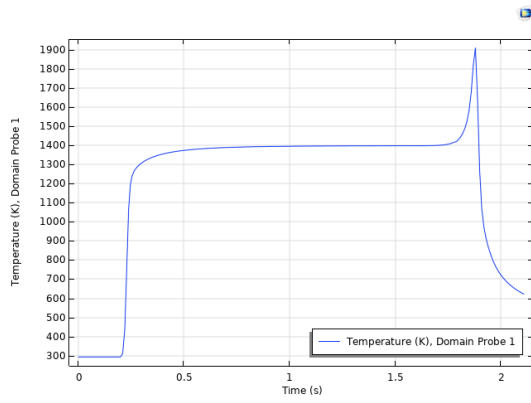
i)



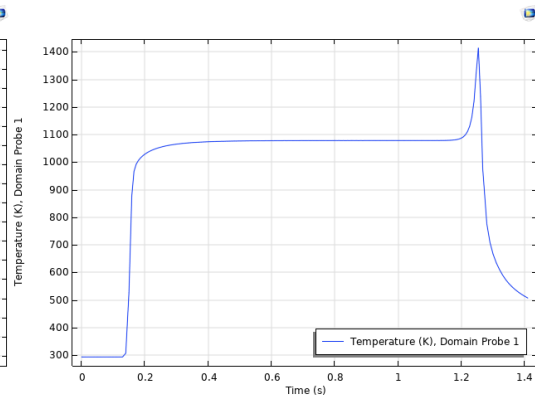
j)



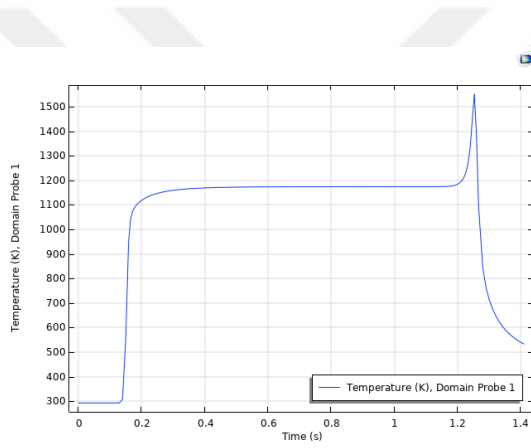
k)



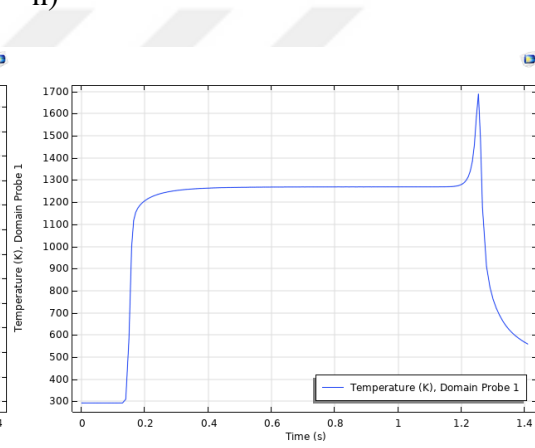
l)



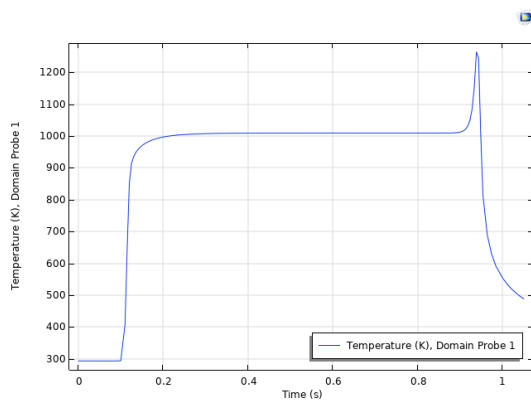
m)



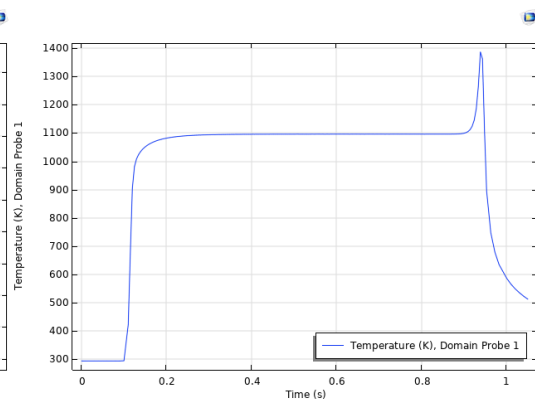
n)



o)



p)

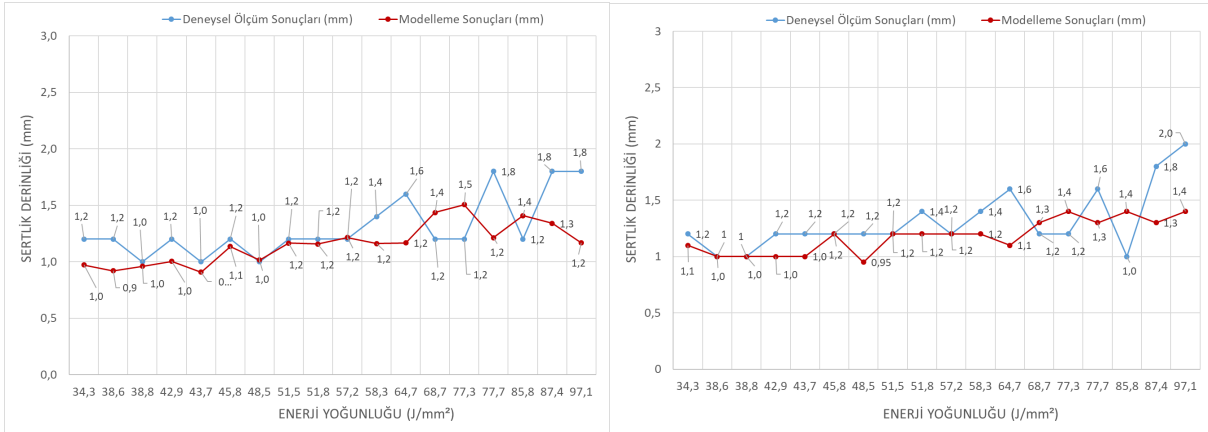


Şekil 7.4: Zaman-Sıcaklık değişim grafiği a)1800 W-10 mm/s-2,063 mm, b)2000 W-10 mm/s-2,063 mm, c)1600 W-15 mm/s-2,063 mm, d)1800 W-15 mm/s-2,063 mm, e)2000 W-15 mm/s-2,063 mm, f)1600 W-20 mm/s-2,063 mm, g)1800 W-20 mm/s-2,063 mm, h)2000 W-20 mm/s-2,063 mm, i)1600 W-10 mm/s-2,338 mm, j)1800 W-10 mm/s-2,338 mm, k)2000 W-10 mm/s-2,338 mm, l)1600 W-15 mm/s-2,338 mm, m)1800 W-15 mm/s-2,338 mm, n)2000 W-15 mm/s-2,338 mm, o)1600 W-20 mm/s-2,338 mm, p)1800 W-20 mm/s-2,338 mm, r)2000 W-20 mm/s-2,338 mm

Şekil 7.4'te verilen zaman-sıcaklık değişim grafikleri incelendiğinde maksimum sıcaklık değerlerinin enerji yoğunluğu girdisi ile doğru orantılı olduğu gözlemlenmiştir. Lazer ile yüzey sertleştirme mekanizmasında; sertlik elde edilebilmesi için malzemenin östenit sıcaklığında bir sıcaklık değeri elde edilmelidir. Bu nedenle sıcaklık değeri arttıkça malzeme yüzeyinde ergimenin meydana gelebileceği ve sertlik değerinin düşebileceği düşünülmektedir. Bu durum 1.2344 çeliğin sıcaklık-zaman grafiklerini incelediğimizde en büyük enerji yoğunluğu olan $97,1 \text{ J/mm}^2$ değerinde maksimum sıcaklık değerinin 1415°C 'ye çıkması ve malzemenin östenit sıcaklığını aşması ile görülmektedir. Aynı durum 1.2379 malzemenin sıcaklık-zaman grafiklerinde en büyük enerji yoğunluğunda 1492°C sıcaklık değeri elde edildiğinde de gözlemlenmiştir.

a)

b)



Şekil 7.5: Ölçülen sertlik derinliği ile modelleme sonuçlarının kıyaslanması a) 1.2344 çeliği b)1.2379 çeliği

Şekil 7.5'de verilen grafikler incelendiğinde modelleme sonucunda elde edilen sertlik derinliği değerleri ile ölçüm sonuçları kıyaslanmıştır. 1.2344 çeliği grafiğine bakıldığında modelleme sonucu ile deneysel ölçüm sonucu arasında en yüksek fark %33,3 oranında 77,7 J/mm^2 ve 97,1 J/mm^2 değerlerinde görülmüştür. 1.2379 çeliği grafiğine baktığımızda ise

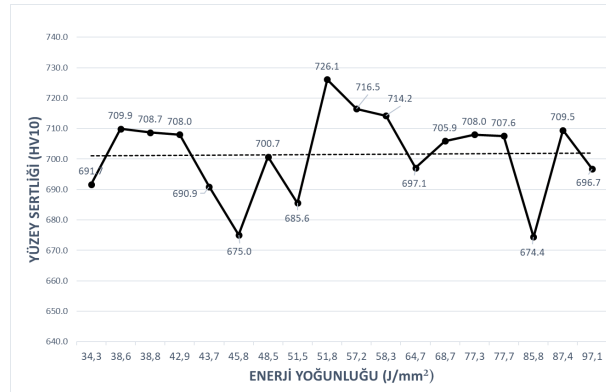
modelleme sonucu ile deneysel ölçüm sonucu arasındaki fark %30 oranında 97,1 J/mm² değerinde görülmüştür.

7.2 Yüzey Sertlik Ölçümleri

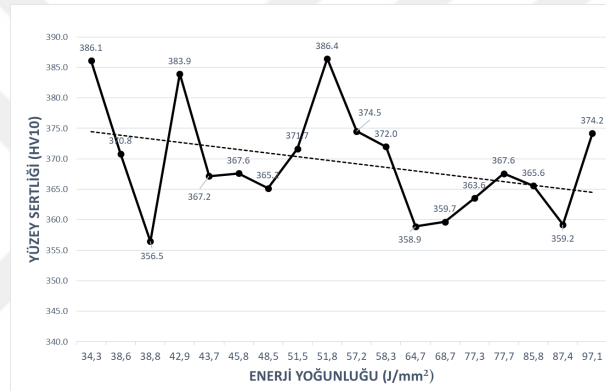
Enerji Yoğunluğu (J/mm ²)	Yüzey Sertlik Değerleri		
	1,2344 (LSH)	1,2379 (LSH)	8620 (LSH)
L1-77,7	707,6	386,1	389,0
L2-87,4	709,5	370,8	434,7
L3-97,1	696,7	356,5	406,3
L4-51,8	726,1	386,4	398,7
L5-58,3	714,2	367,2	401,7
L6-64,7	697,1	367,6	399,3
L7-38,8	708,7	365,2	407,0
L8-43,7	690,9	371,7	409,3
L9-48,5	700,7	383,9	407,0
L10-68,7	705,9	374,5	384,3
L11-77,3	708,0	372,0	406,0
L12-85,8	674,4	358,9	397,3
L13-45,8	675,0	359,7	399,7
L14-51,5	685,6	363,6	422,0
L15-57,2	716,5	367,6	430,0
L16-34,3	691,7	365,6	422,3
L17-38,6	709,9	359,2	396,3
L18-42,9	708,0	374,2	435,3

Tablo 7..1: Yüzey sertlik değerleri ölçüm sonuçları

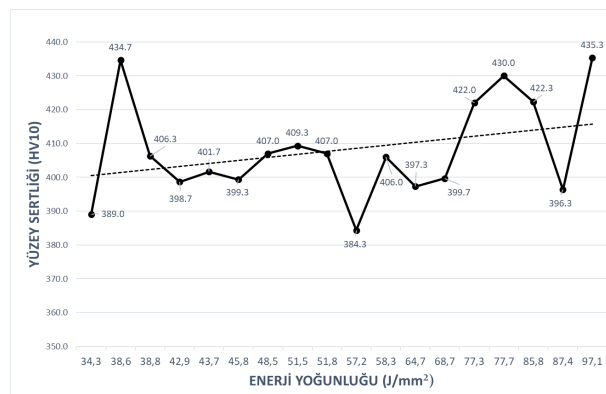
a)



b)



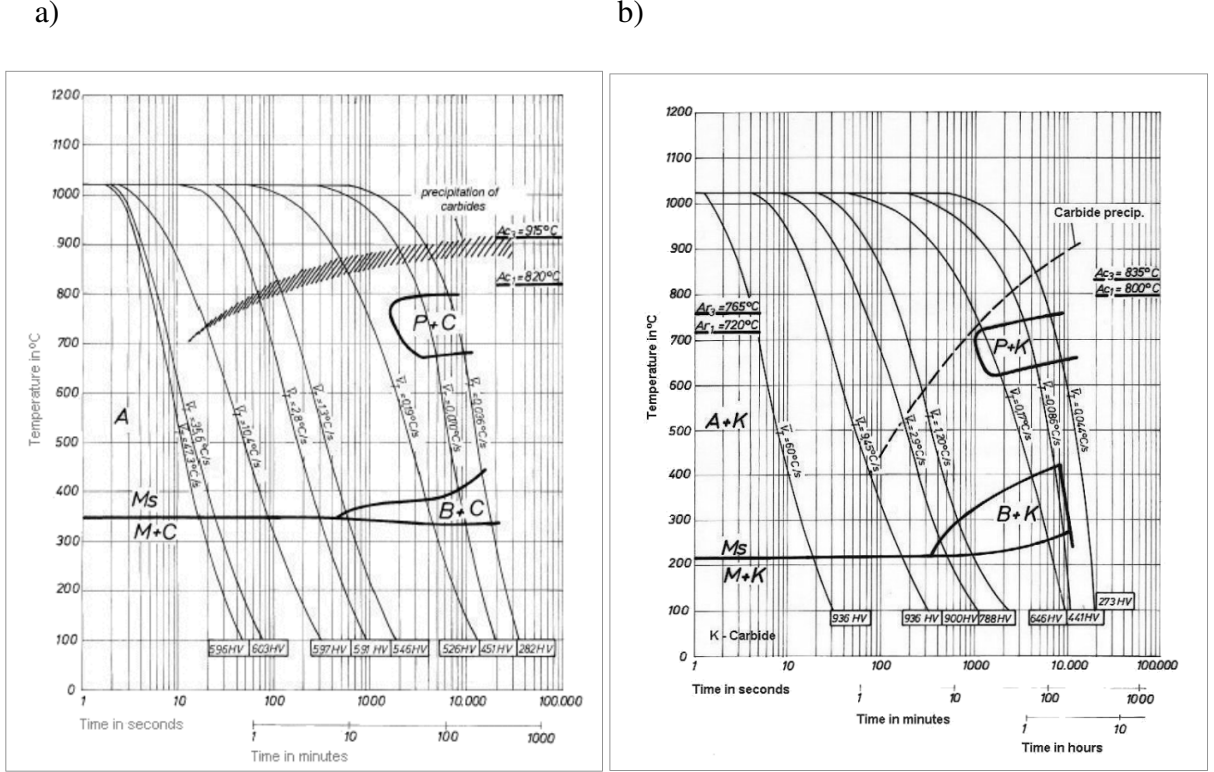
c)



Şekil 7.6: Lazer ile yüzey sertleştirme sonucu yüzey sertlik değerleri a)1.2344 malzemeye ait sertlik değerleri grafiği b) 1.2379 malzemeye ait sertlik değerleri grafiği c)1.6523 malzemeye ait sertlik değerleri grafiği

Ortalama yüzey sertlik değerleri Şekil 7.6'da gösterilmektedir. Verileri incelediğimizde 1.2344 ve 1.2379 malzemelerinde en iyi sertlik değerlerini veren enerji yoğunluğunun 51,8

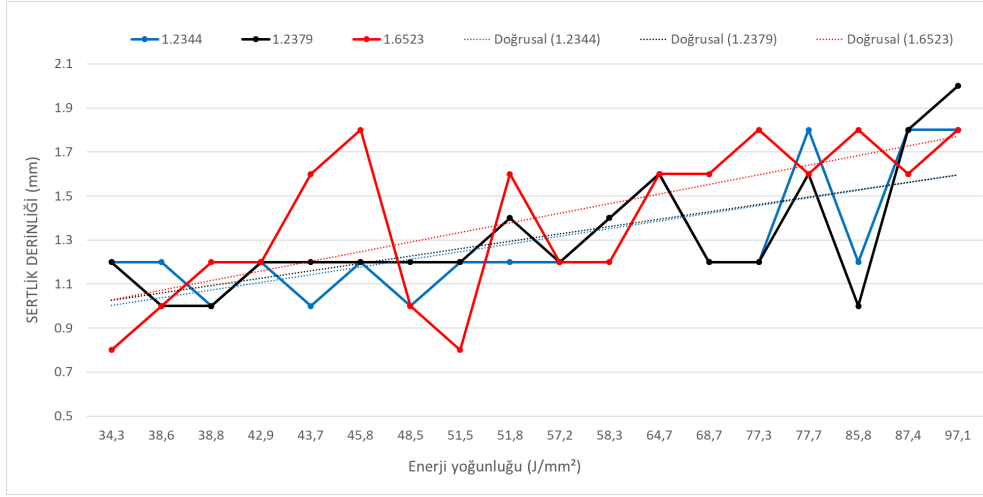
J/mm² olduğu görülmüştür. 1.6523 malzeme için ise en yüksek sertliği veren değerin 97,1 J/mm² olduğu görülmüştür. Bu durumun malzemelerin sürekli soğuma eğrilerinin farklılıklarından kaynaklandığı düşünülmektedir.



Şekil 7.7: Sürekli soğuma (CCT) eğrileri a) 1.2344 çeliği, b) 1.2379 çeliği

1.2344 ve 1.2379 çeliklerinde aynı enerji yoğunluğunda sertleşme görülmesine rağmen, ölçülen sertlik değerlerinin birbirinden farklı olması, malzemelerin sürekli soğuma eğrileri ile ilişkilendirilmektedir. Şekil 7.7’de verilen sürekli soğuma eğrileri incelendiğinde, her iki malzemenin soğuma hızı oranlarının farklı olduğu görülmektedir.

Her malzeme için yüzey sertlik değerlerinin birbirine yakın değerleri izlemesi sebebiyle optimum parametrenin belirlenebilmesi için sertlik derinliği ölçümlerinin de dikkate alınması gerekmektedir. Şekil 7.8’da üç farklı malzeme için de verilen sertlik derinliği grafiği incelendiğinde, sertlik derinliklerinin ışın çapı ve tarama hızının artış gösterdiği parametrelerde azalan bir eğri izlediği görülmektedir. Yüzey sertlik ölçüm sonuçları ve sertlik derinlikleri değerlerini irdelediğimizde Faz 1’de yapılan deneyler sonucunda Faz 2 için optimum parametre 1600 W lazer gücü, 15 mm/s tarama hızı ve 2,063 mm ışın çapına sahip parametre seçilmiştir.

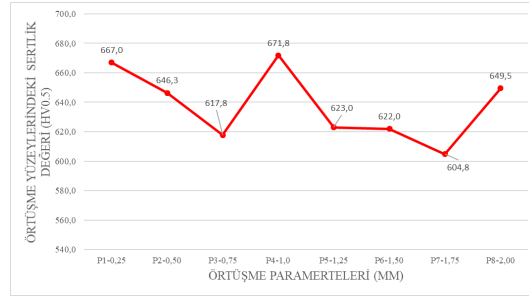


Şekil 7..8: Lazer ile işleme sonucu meydana gelen sertlik derinlik değerlerinin karşılaştırılması

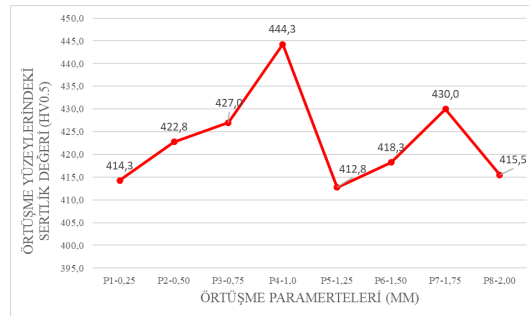
Bunun sebebi, 1.2344 ve 1.2379 malzemelerde maksimum yüzey sertliğini vermesi ve bu parametrede elde edilen 1,2 mm ile 1,6 mm arasındaki sertlik derinliğinin hem kalıpcılık hem de dişli üretimi uygulamaları için yeterli olduğunun düşünülmesidir.

7.3 Faz 2: Örtüşme Uygulaması Sertlik ölçümü Sonuçları

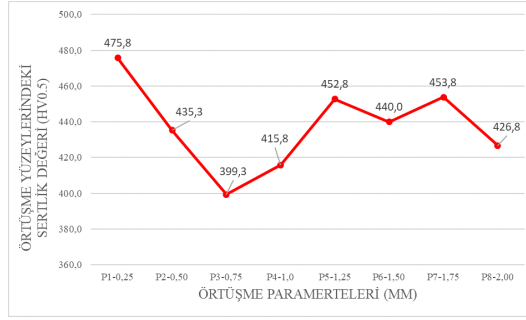
a)



b)



c)



Şekil 7.9: Faz 2: Örtüşme uygulaması sonrası örtüşme yüzeylerinde sertlik değişimi sonuçları a)1.2344 malzeme b)1.2379 malzeme c)1.6523 malzeme

Şekil 7.9’da verilen örtüşme yüzeyleri sertlik ölçümü sonuçları incelendiğinde 1.2344 malzeme için maksimum sertlik değerini P4, minimum sertlik değerini ise P7 parametrelerinin verdiği gözlemlenmiştir. 1.2379 malzeme için ise maksimum değer yine P4, minimum değer P5; 1.6523 malzeme için maksimum değer P1, minimum değer P3 parametresinden alındığı görülmektedir. Ortaya çıkan farklı örtüşme parametrelerinin malzemelerin mikroyapısı üzerine etkisi incelemek üzere numuneler X-Işını Kırınım yöntemi (XRD) analizleri ile incelenecektir.

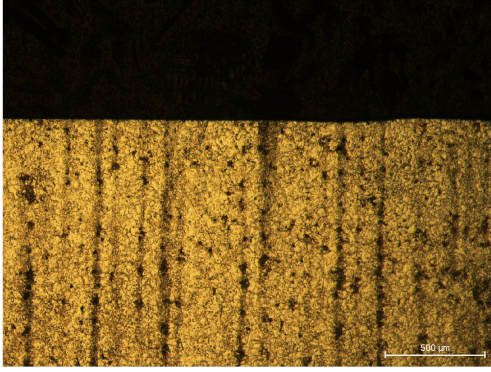
7.4 Mikroyapı İncelemeleri

7.7.4.1 Mikroskop Görüntüleri

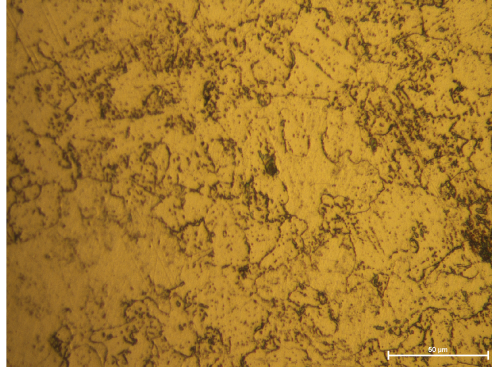
Bölüm 7.2 ve 7.3’te verilen yüzey sertliği ve sertlik derinliği sonuçları değerlendirildiğinde, 1.2344 çeliğin hiç işlem görmemiş sertlik değerinin 205,9 HV10 iken lazer ile yüzey işleme sonrası 690-716,5 HV10 (60-61 HRC) değerine, 1.2379 çeliğin sertlik değeri 210,4 HV10 iken 356,5-386,4 HV10 (36-40 HRC) değerine ve 1.6523 çeliğin sertlik değeri 211 HV10 iken 384,3-435,3 HV10 (39-44 HRC) değerine ulaştığı görülmüştür. Bu sonuçlar birbiri ile kıyaslandığında sertlik değerlerindeki artışın en iyi 1.2344 malzemede gerçekleştiği görülmüştür. 1.2344 malzemenin örtüşme uygulamasını ele aldığımızda ise yine kendi içinde en iyi sertlik değerini veren örtüşme parametresi P4 (1,00 mm)’dir.

Şekil 7.10’da verilen mikroyapı görüntülerini incelediğimizde lazer ile yüzey sertleştirme sonucu oluşan ısı etkisi altındaki bölgelerin tane yapılarında incelmeye meydana geldiği gözlemlenmiştir. Tane yapısındaki değişimler detaylı olarak bölüm 7.5’te incelenmiştir.

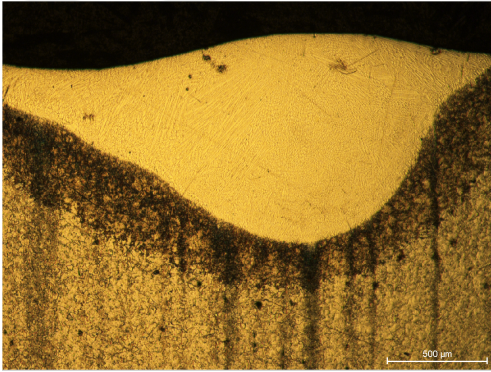
a)



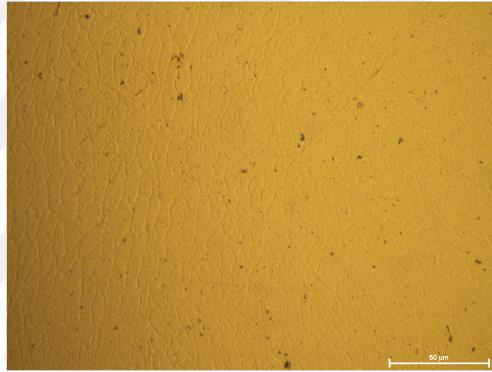
b)



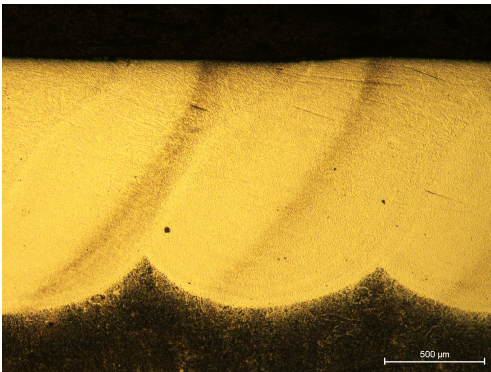
c)



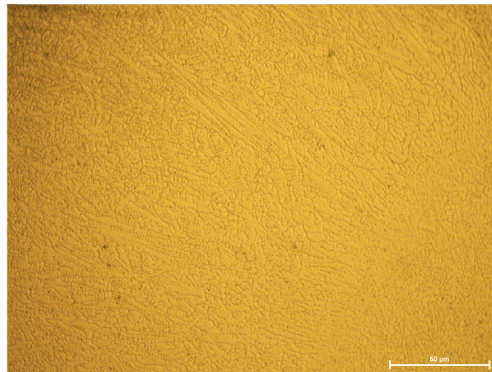
d)



e)



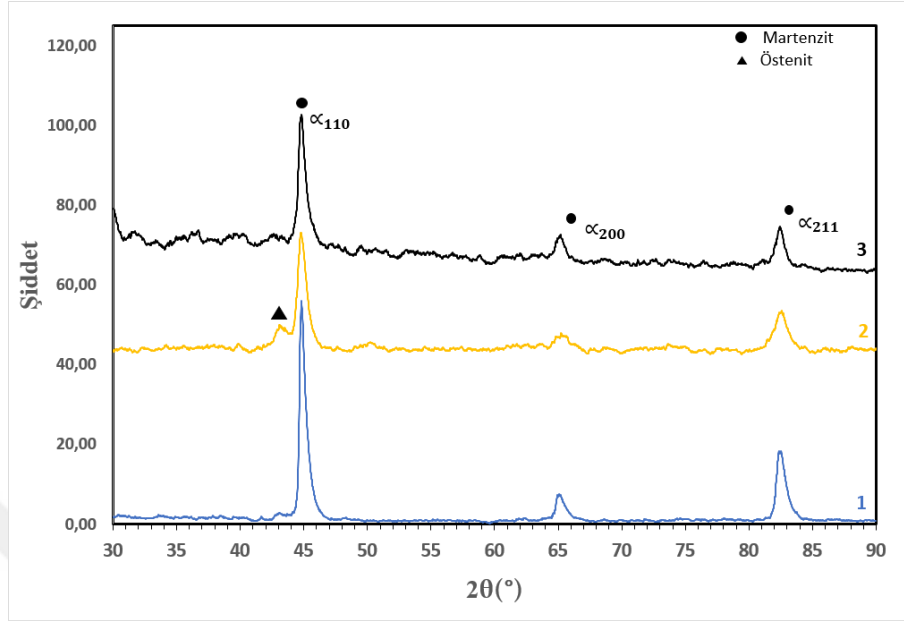
f)



Şekil 7..10: Lazer ile yüzey sertleştirme işlemi uygulanmış 1.2344 numunelerin farklı büyütmelerde mikroskop görüntüleri a-b) İşlem görmemiş numune, c-d) L4 parametresi (1600 W-15 mm/s-d=2,063 mm) ile yüzey sertleştirilmiş numune, e-f) P4 (1,00 mm) örtüşme parametresi ile işlenmiş numune

7.5 X-Işını Difraktometresi (XRD) Analizi

a)



Şekil 7..11: İşlem görmemiş (grafik 1), L4 parametresi ile yüzey sertleştirilmiş (grafik 2) ve P4 örtüşme parametresi ile yüzey sertleştirilmiş (grafik 3) 1.2344 çeliğin kesit yüzeylerinden alınmış XRD profilleri

İşlem görmemiş XRD profili ile lazerle yüzey sertleştirilmiş profiller incelendiğinde, L4 parametresi ile 51,8 J/mm² enerji yoğunluğunda düşük seviyede kalıntı östenit bulunduğu ve 2 ile 3 numaralı profillerin piklerinde 1 numaralı profile kıyasla genişleme meydana gözlemlenmiştir. Piklerde meydana gelen genişleme, yüzey sertleştirme sonrası malzemenin mikroyapısında meydana gelen kristalit boyutunda küçülmeler ile ilişkilendirilmiştir. Lazer ile yüzey sertleştirme sonucunda kristalit yapıda meydana gelen değişimler Scherrer denklemi kullanılarak hesaplanmıştır.

$$D = \frac{K\lambda}{\beta \cos \theta} \quad (7..1)$$

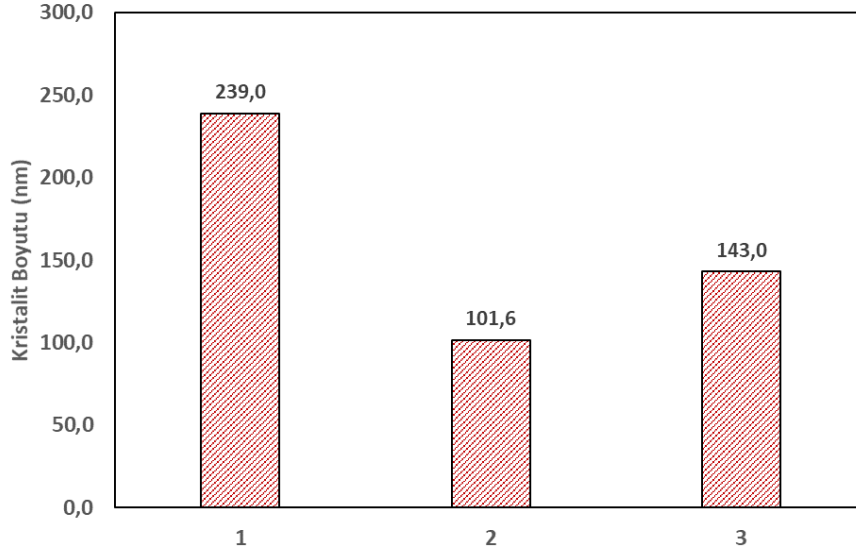
D = Kristalit boyutu (nm)

K = Scherrer sabiti (0.9)

λ = X-ray ışınının dalga boyu

β = Yarı maksimum değerin tam genişliği (FWHM) (radyan)

θ = Pik pozisyonu (radyan)



Şekil 7.12: Kristalit boyutu analizi. İşlem görmemiş (grafik 1), L4 parametresi ile yüzey sertleştirilmiş (grafik 2) ve P4 örtüşme parametresi ile yüzey sertleştirilmiş (grafik 3)

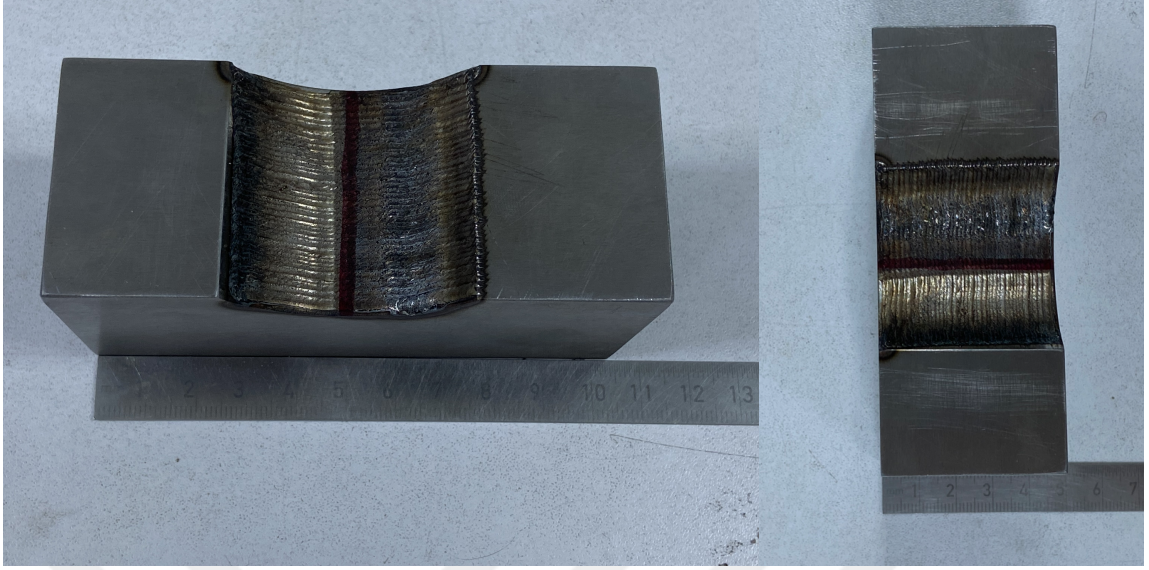
Şekil 7.12’de verilen kristalit boyutu verileri incelendiğinde hiç işlem görmemiş 1.2344 çeliğin kristalit boyutu 239,0 nm iken, lazer ile yüzey sertleştirme işlemi sonrasında L4 parametresine ait kristalit boyutunun 101,6 nm, P4 örtüşme parametresine ait kristalit boyutunun 143,0 nm olduğu ve buna bağlı olarak kristalit boyutlarında küçülme meydana geldiği görülmüştür. 2 ve 3 numaralı yüzey sertleştirilmiş numuneler arasında, örtüşme parametresi uygulanmış olan 3 numaralı profilin kristalit boyutunun 2 numaralı profile kıyasla daha büyük olmasının sebebi olarak, örtüşme uygulamasında üst üste binen tarama çizgilerinde tavlamaya bağlı yumuşamaların meydana geldiği düşünülmektedir (Moradi, M., 2019). Analiz sonuçlarının literatür ile uyumlu olduğu görülmüştür (Telasang et al., 2014).

7.6 Serbest Formlu Yüzeylerde Lazer ile Yüzey Sertleştirme Sonuçları

Yapılan termal modelleme ve deneysel çalışmalar sonucunda belirlenen optimum parametrelerin serbest formlu yüzeyler üzerinde vereceği sonuçları test etmek üzere 1.2344 çeliği ile bir numune hazırlanmıştır. Lazer ile yüzey sertleştirme işlemi sonrasında numune orta noktasından kesilmiş ve kesit görüntüleri incelenmiştir.

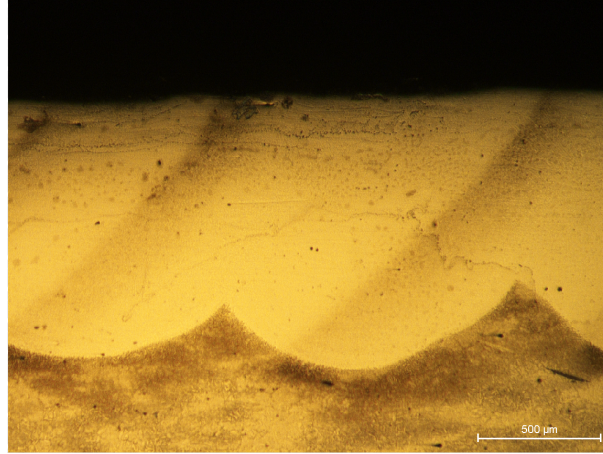
a)

b)



Şekil 7.13: Lazer ile yüzey sertleştirme sonrası serbest formlu numunenin ölçeklendirilmiş görüntüsü, a) Ön görünüş, b) Sol yan görünüş

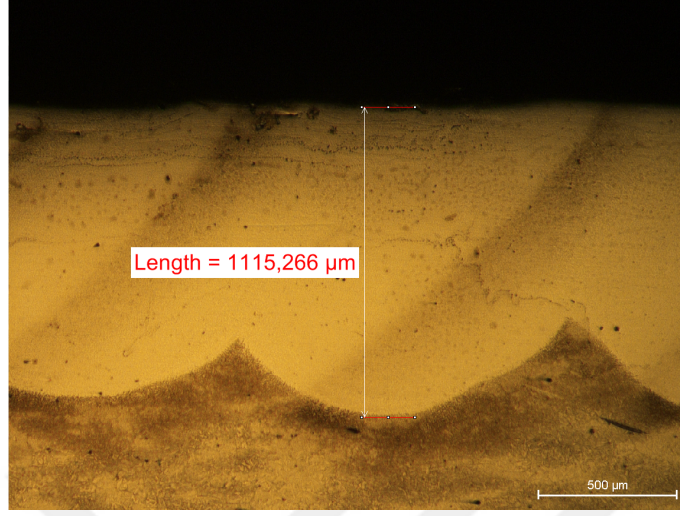
Şekil 7.14'te lazer ile taranmış bölgenin mikroskop altındaki kesit görüntüsü verilmiştir. Yapılan incelemede serbest formlu yüzeyde yapılan sertleştirme işlemi sonucunda ısıdan etkilenen bölgenin meydana geldiği görülmüştür.



Şekil 7.14: Lazer ile taranmış bölgenin mikroskop görüntüsü

Tarama yüzeyinin kesiti üzerinden her bir ısıdan etkilenen bölgenin derinliği ölçülmüştür. Ölçüm sonuçlarında derinlik değerlerinin 1-1,3 mm aralığında değiştiği tespit edilmiştir. Bu sonuçlara göre, bölüm 7.2'de de belirtildiği üzere, 1-1,3 mm sertlik derinliğinin kalıpcılık

ve dişli uygulamaları için yeterli bulunması sebebiyle yöntemin uygulanabilir olduğu kabul edilmiştir.



Şekil 7..15: Lazer ile taranmış bölgenin derinlik ölçümü

8. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında seçilen lazer ile yüzey sertleştirme parametrelerinin malzemenin mekanik etkileri üzerindeki etkisini incelemek amacı ile 3 farklı çelik seçimi yapılmıştır. Seçilen çelikler arasından 1.2344 (AISI H13), 1.2379 (AISI D2) ve 1.6523 (AISI 8620) çelikleri ile yapılan çalışmalar 3 aşamada gerçekleştirilmiştir;

- Seçilen çelikler üzerinde modelleme yapmak ve deneylerde kullanmak üzere, 3 farklı lazer gücü (W), 3 farklı lazer tarama hızı (mm/s) ve 2 farklı ışın çapının kombinasyonları olan işlem parametreleri belirlenmiştir.
- Seçilen parametreler ile termal modelleme gerçekleştirilmiş ve modelleme sonucunda her bir parametre için maksimum sıcaklık değeri ve ısıdan etkilenen bölgenin derinlik değeri elde edilmiştir.
- Numuneler aynı parametreler ile lazerle yüzey sertleştirme işlemine tabii tutulmuştur. Lazerle işleme sonrası sertlik ölçümü, sertlik derinliği ölçümü ve mikroyapı incelemeleri yapılmıştır.
- Elde edilen sonuçlar yorumlanarak, en iyi sertlik değerini veren parametre seçilmiştir.
- Seçilen parametre ile 8 farklı örtüşme parametresi ile yeni numuneler işlenmiştir.
- İşlenen numunelerin örtüşme yüzeylerinde sertlik ölçümleri yapılarak maksimum sertlik değerini veren parametre belirlenmiştir.
- Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda Faz 1 ve Faz 2’de en iyi sertlik değerlerini veren numunelerin mikroyapılarındaki değişimler mikroskop altında ve X-Işını Kırınım yöntemi (XRD) analizleri ile incelenmiştir.
- Yapılan termal modelleme sonucunda, lazerle yüzey işleme esnasında enerji yoğunluğu ile yüzeydeki maksimum sıcaklık değerinin doğru orantılı olduğu tespit edilmiştir.
- Modelleme esnasında açığa çıkan maksimum sıcaklık değerinin malzemenin östenit sıcaklığına ulaştığı görülmüştür. Burada yüzeyde meydana gelecek ergimeleri önleyebilmek amacıyla maksimum sıcaklık değerini -östenit sıcaklığı aralığında kalmak şartıyla- azaltmak üzere parametrelerde iyileştirmeler yapılabilir.
- Modelleme sonuçlarında elde edilen sertlik derinliği ile deneysel çalışmada yapılan ölçüm sonuçları incelendiğinde, 1.2344 çeliği için, iki yöntem arasındaki en yüksek farkın

%33,3 oranında 77,7 J/mm² ve 97,1 J/mm² değerlerinde meydana geldiği görülmüştür. 1.2379 çeliği grafiğine baktığımızda ise modelleme sonucu ile deneysel ölçüm sonucu arasındaki fark %30 oranında 97,1 J/mm² değerinde görülmüştür.

- Yüzey sertliği ve sertlik derinliği sonuçları değerlendirildiğinde, 1.2344 çeliğin hiç işlem görmemiş sertlik değerinin 205,9 HV10 iken lazer ile yüzey işleme sonrası 690-716,5 HV10 (60-61 HRC) değerine, 1.2379 çeliğin sertlik değeri 210,4 HV10 iken 356,5-386,4 HV10 (36-40 HRC) değerine ve 1.6523 çeliğin sertlik değeri 211 HV10 iken 384,3-435,3 HV10 (39-44 HRC) değerine ulaştığı görülmüştür. Bu sonuçlar birbiri ile kıyaslandığında sertlik değerlerindeki artışın en iyi 1.2344 malzemede gerçekleştiği görülmüştür.
- 1.2344 malzeme için maksimum sertlik değerini veren parametre 1600 W-15 mm/s-d=2,063 mm parametresidir.
- 1.2344 malzemenin örtüşme uygulamasını ele aldığımızda ise yine kendi içinde en iyi sertlik değerini veren örtüşme parametresi P4 (1,00 mm)'dir.
- Mikroskop görüntüleri incelendiğinde lazer ile yüzey sertleştirme sonrası ısı etkisi altında kalan bölgenin mikroyapısında meydana gelen değişimler görülmüştür.
- XRD analizi sonucunda kristalit boyutu verileri analiz edildiğinde hiç işlem görmemiş 1.2344 çeliğin kristalit boyutunda (239,0 nm) lazer ile yüzey sertleştirme işlemi sonrasında küçülme meydana geldiği görülmüştür (101,6 nm/143,0 nm). 2 ve 3 numaralı yüzey sertleştirilmiş numuneler arasında, örtüşme parametresi uygulanmış olan 3 numaralı profilin kristalit boyutunun (143,0 nm) 2 numaralı profile kıyasla daha büyük olmasının sebebi olarak, örtüşme uygulamasında üst üste binen tarama çizgilerinde tavlama kaynağı yumuşama meydana geldiği düşünülmektedir.
- Faz 1'de yapılan yüzey sertleştirme işlemlerinin sonucunda sertlik derinliği değerleri 1-1,2 mm aralığında ölçülmüştür. Bu değerlerin kalıpcılık ve dişli üretimi uygulamaları için yeterli olması sebebiyle seçilen optimum parametre uygulanabilir pratikte uygulanabilir kabul edilmiştir.
- Serbest formlu yüzeyde optimum parametreler ile yapılan sertleştirme işleminde de ısıdan etkilenen bölge derinliğinin 1-1,3 mm aralığında olması yöntemin ve seçilen parametrenin uygulanabilirliğini doğrulamıştır.
- İşlem esnasında kullanılan argon gazı basıncının işlenmiş bölgenin geometrisinde ve işleme sonrası yüzey topografisi üzerinde önemli ölçüde etkisi olduğu gözlemlenmiştir.

- Her üç malzeme için de endüstriyel alanlarda kullanımı yaygınlaştırmak üzere farklı parametre değerleri uygulanarak daha iyi sonuçların elde edilmesi üzerine çalışılması önerilmektedir.



Kaynaklar

- Boyras, I., Yıldız, A. (2017). Lazer Çeşitleri ve yüksek yoğunluklu lazer kullanımı. Çağdaş Tıp Dergisi, 6(1-Ek (Olgu Sunumları)), 104-109.
- Nobet, E., Nofar, M. (2019). EFFECT OF LASER SURFACE HARDENING PARAMETERS ON IMPACT SLIDING WEAR BEHAVIOR OF A HOT WORK TOOL STEEL. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, 2019.
- Güner, E. (2019). 4140 çeliğinin mekanik aşınma özelliklerine lazerle yüzey sertleştirme işleminin etkisinin incelenmesi (Master's thesis, Bartın Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü).
- İloğlu, M. E. (2010). Farklı özelliklerdeki çelik malzemelerin lazer ile kesilmesinde elde edilen kesme aralığının karakterizasyonu. Lisans tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 26-52.
- Shin, H. J., Yoo, Y. T. (2008). Microstructural and hardness investigation of hot-work tool steels by laser surface treatment. Journal of materials processing technology, 201(1-3), 342-347.
- Moradi, M., Karami Moghadam, M. (2019). High power diode laser surface hardening of AISI 4130; statistical modelling and optimization. Optics Laser Technology, 111, 554-570.
- Karami Moghadam, M., Moradi, M., Azami, M. (2021). A comparative investigation of different overlaps of the diode laser hardening in low-Carbon steel and stainless steel. Optik, 168093.
- Gupta, H. S., Hussain, M., Singh, P. K., Kumar, V., Kumar, S., Das, A. K. (2019). Laser Surface Modification of SAE8620 HVD Material for Transmission Gear. Materials Today: Proceedings, 11, 813-817
- Jae-Ho, L.E.E., Jeong-Hwan, J.A.N.G., Byeong-Don, J.O.O., Young-Myung, S. O. N., Young-Hoon, M. O. O. N. (2009). Laser surface hardening of AISI H13 tool steel. Transactions of nonferrous metals society of China, 19(4), 917-920.
- Telasang, G., Majumdar, J. D., Padmanabham, G., Manna, I. (2014). Structure–property correlation in laser surface treated AISI H13 tool steel for improved mechanical properties. Materials Science and Engineering: A, 599, 255-267.
- Oh, S., Ki, H. (2019). Deep learning model for predicting hardness distribution in laser heat treatment of AISI H13 tool steel. Applied Thermal Engineering, 153, 583-595.

- Telasang, G., Majumdar, J. D., Padmanabham, G., Manna, I. (2015). Wear and corrosion behavior of laser surface engineered AISI H13 hot working tool steel. *Surface and Coatings Technology*, 261, 69-78.
- Lesyk, D. A., Martinez, S., Mordyuk, B. N., Dzhemelinskyi, V. V., Lamikiz, A., Prokopenko, G. I., ... Tkachenko, I. V. (2018). Laser-hardened and ultrasonically peened surface layers on tool steel AISI D2: correlation of the bearing curves' parameters, hardness and wear. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 27, 764-776.
- Liu, Z., Zhou, J., Wang, H., Wang, Q., Liang, Q., Li, Y. (2022). A comparative study on surface topography and microhardness of laser polished-hardened AISI D2 tool steel. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 122(1), 499-512.
- Lesyk, D. A., Alnusirat, W., Martinez, S., Dzhemelinskyi, V. V., Mordyuk, B. N., Lamikiz, A. (2022). Enhancing hardness in overlapping scanner-based laser area of carbon and tool steel by multi-pin ultrasonic impact peening. *Lasers in Manufacturing and Materials Processing*, 9(3), 292-311.
- Roy, S., Zhao, J., Shrotriya, P., Sundararajan, S. (2017). Effect of laser treatment parameters on surface modification and tribological behavior of AISI 8620 steel. *Tribology International*, 112, 94-102.
- Bouquet, J., Van Camp, D., Malek, O., Ten Haaf, P., Vanmeensel, K., Lauwers, B. (2016). Aiming for improved lifetime of die and mold components through an integrated laser hardening operation, combining machining and a selective heat treatment in one setup. *Procedia CIRP*, 46, 541-544.
- Karamimoghadam, M., Moradi, M., Azami, M. (2022). A comparative investigation of different overlaps of the diode laser hardening in low-carbon steel and stainless steel. *Optik*, 251, 168093.
- Aborkin, A. V., Vaganov, V. E., Shlegel', A. N., Bukarev, I. M. (2015). Effect of laser hardening on die steel microhardness and surface quality. *Metallurgist*, 59, 619-625.
- Cordovilla, F., García-Beltrán, Á., Sancho, P., Domínguez, J., Ruiz-de-Lara, L., Ocaña, J. L. (2016). Numerical/experimental analysis of the laser surface hardening with overlapped tracks to design the configuration of the process for Cr-Mo steels. *Materials Design*, 102, 225-237.
- Kucuk, Y., Altas, E., Topcu, M. E. (2023). A comparative analysis of the effect of laser surface treatment on the dry sliding wear behavior of ductile cast irons with different microstructures. *Optik*, 170540.

TEŞEKKÜR

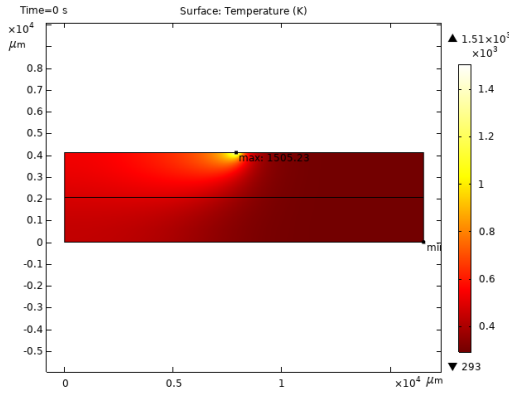
Bu tez çalışması kapsamında birlikte çalışma imkanı bulduğum değerli danışman hocam sayın Prof.Dr.İbrahim Etem SAKLAÇOĞLU'na sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Çalışmalarım esnasında bana yol gösteren ve her zaman destek veren sayın Arş. Gör. Müh. Fırat MAVİ hocama teşekkürü bir borç bilirim. Çalışmalarım esnasında verdikleri desteklerinden dolayı Volt Elektrik Motorları San. ve Tic. A.Ş.'ye ve firmada çalışan teknik ekibe, bu süreçte benden manevi desteklerini esirgemeyen ve tecrübelerini paylaşan, benimle birlikte Ar-Ge ekibinde görev yapan arkadaşlarıma teşekkür ederim. Çalışmam süresince her türlü desteği sağlayan, emeği geçen Ege Üniversitesi Makina Mühendisliği Akademik ve Teknik personellerine teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmalarım boyunca benden manevi desteğini esirgemeyen canım aileme, makine mühendisliği kariyerimde beni her zaman cesaretlendiren, destekleyen ve gururlanan kıymetli babam rahmetli Ömer DİDİN'e ve bu süreçte bana en büyük desteği sağlayan değerli eşim Veysel EVİN'E sonsuz teşekkür ederim.

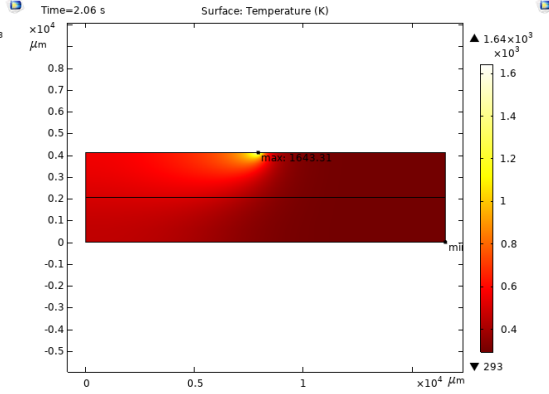
EKLER

EK-1 1.2379 çeliği lazer ışını altında ısıdan etkilenen bölgenin simülasyonu; a)1600 W-10 mm/s-2,063 mm, b)1800 W-10 mm/s-2,063 mm, c)2000 W-10 mm/s-2,063 mm, d)1600 W-15 mm/s-2,063 mm, e)1800 W-15 mm/s-2,063 mm, f)2000 W-15 mm/s-2,063 mm, g)1600 W-20 mm/s-2,063 mm, h)1800 W-20 mm/s-2,063 mm, i)2000 W-20 mm/s-2,063 mm, j)1600 W-10 mm/s-2,338 mm, k)1800 W-10 mm/s-2,338 mm, l)2000 W-10 mm/s-2,338 mm, m)1600 W-15 mm/s-2,338 mm, n)1800 W-15 mm/s-2,338 mm, o)2000 W-15 mm/s-2,338 mm, p)1600 W-20 mm/s-2,338 mm, r)1800 W-20 mm/s-2,338 mm, s)2000 W-20 mm/s-2,338 mm

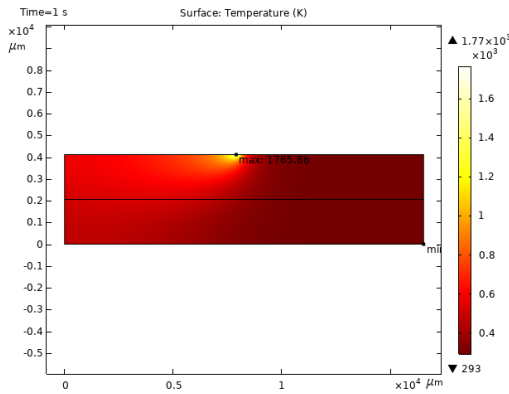
a)



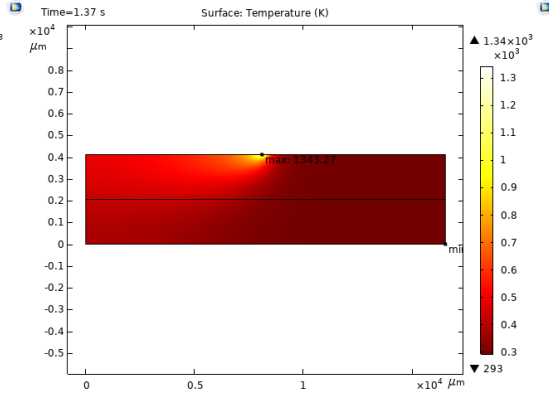
b)



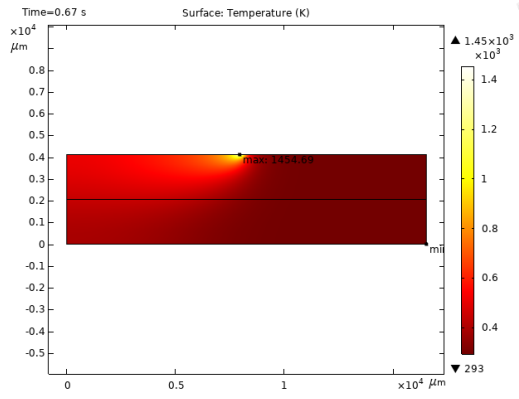
c)



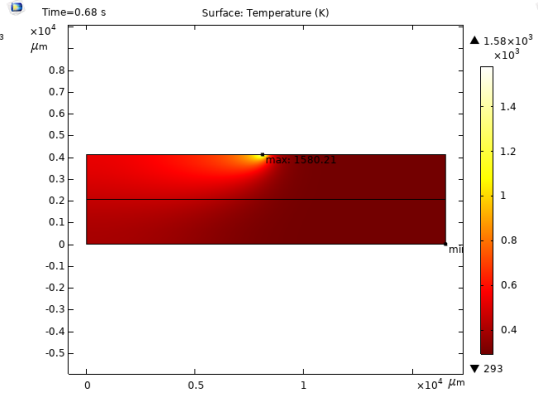
d)



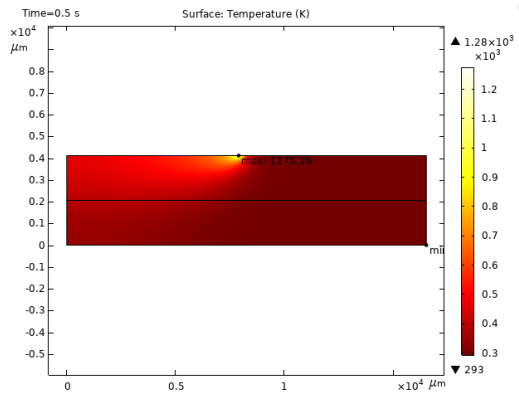
e)



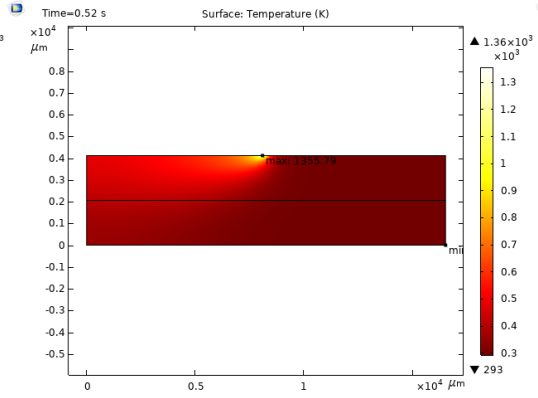
f)



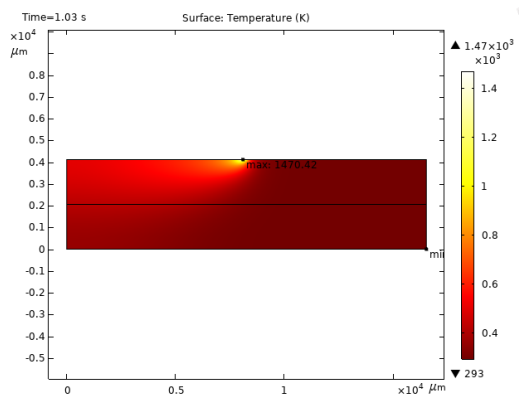
g)



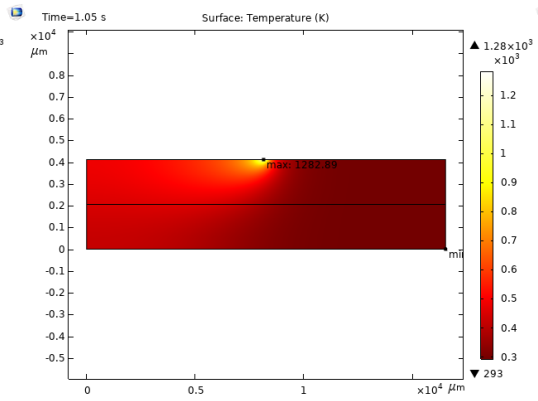
h)



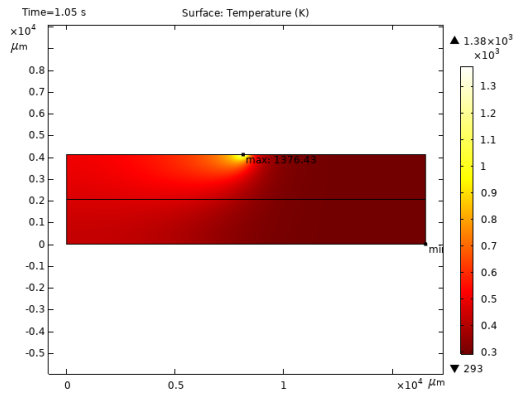
i)



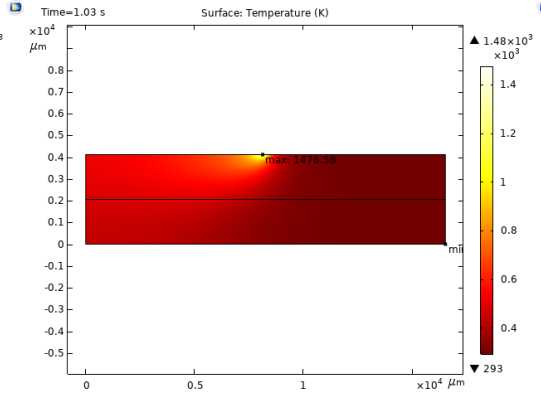
j)



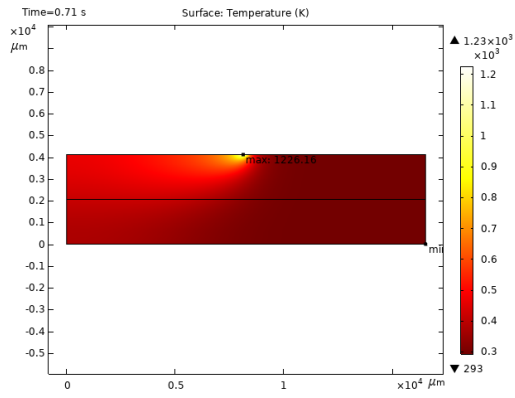
k)



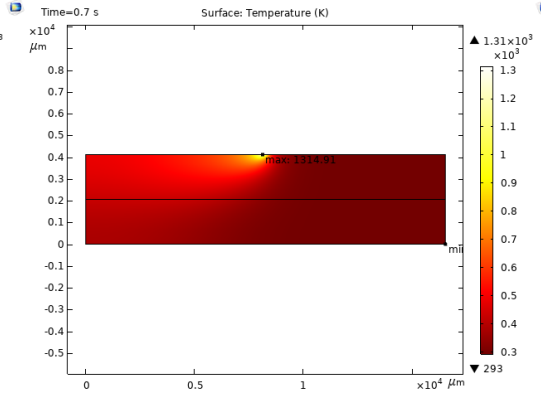
l)



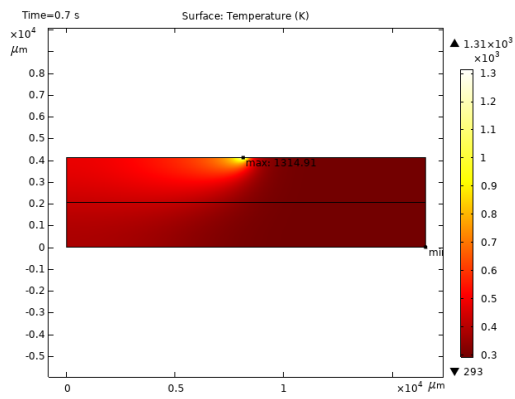
m)



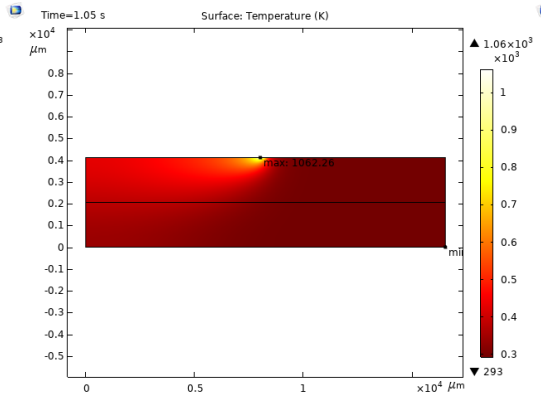
n)



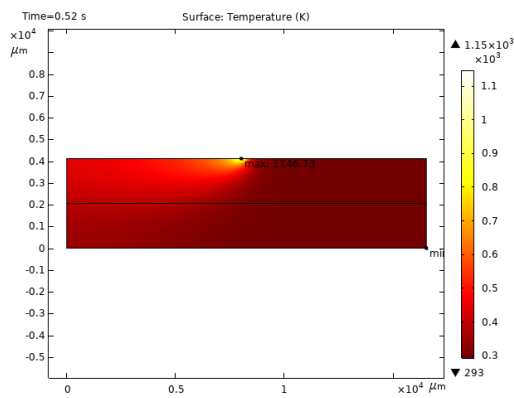
o)



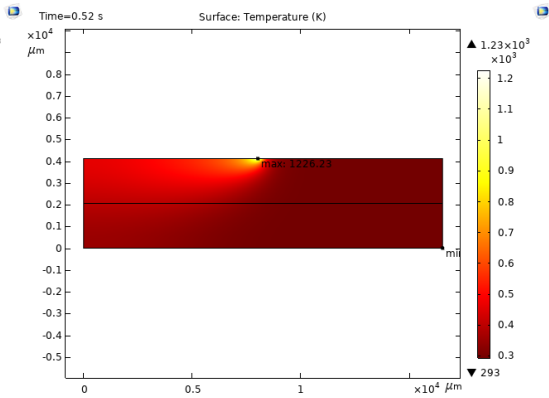
p)



r)

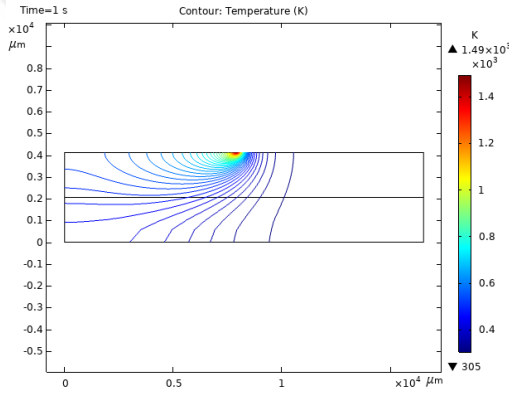


s)

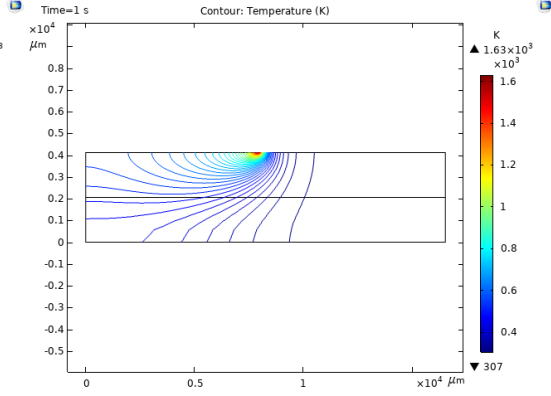


EK-2 1.2379 çeliği lazer ışını altında ısıdan etkilenen bölgenin sim ulasyonu kontur da gılım grafi gi; a)1600 W-10 mm/s-2,063 mm, b)1800 W-10 mm/s-2,063 mm, c)2000 W-10 mm/s-2,063 mm, d)1600 W-15 mm/s-2,063 mm, e)1800 W-15 mm/s-2,063 mm, f)2000 W-15 mm/s-2,063 mm, g)1600 W-20 mm/s-2,063 mm, h)1800 W-20 mm/s-2,063 mm, i)2000 W-20 mm/s-2,063 mm, j)1600 W-10 mm/s-2,338 mm, k)1800 W-10 mm/s-2,338 mm, l)2000 W-10 mm/s-2,338 mm, m)1600 W-15 mm/s-2,338 mm, n)1800 W-15 mm/s-2,338 mm, o)2000 W-15 mm/s-2,338 mm, p)1600 W-20 mm/s-2,338 mm, r)1800 W-20 mm/s-2,338 mm, s)2000 W-20 mm/s-2,338 mm

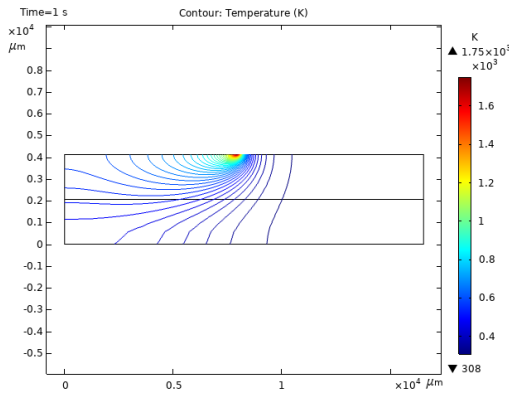
a)



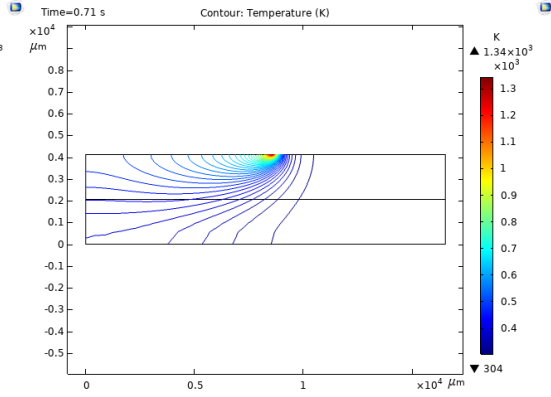
b)



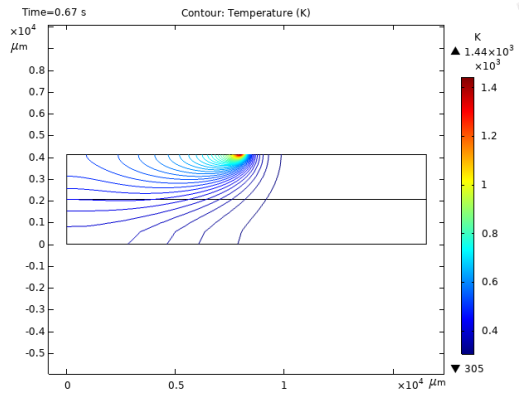
c)



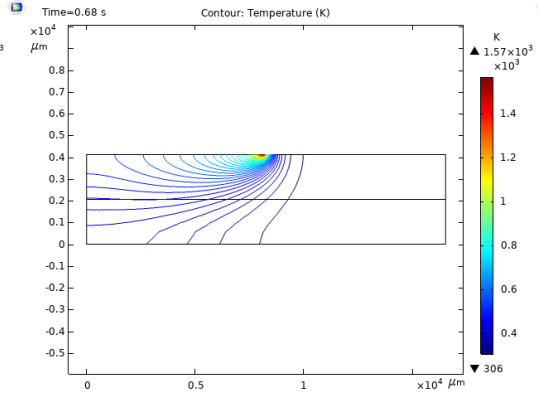
d)



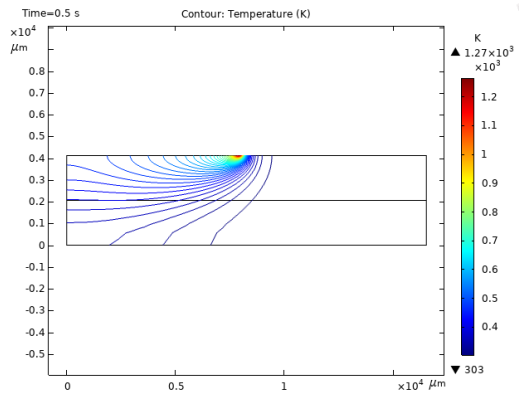
e)



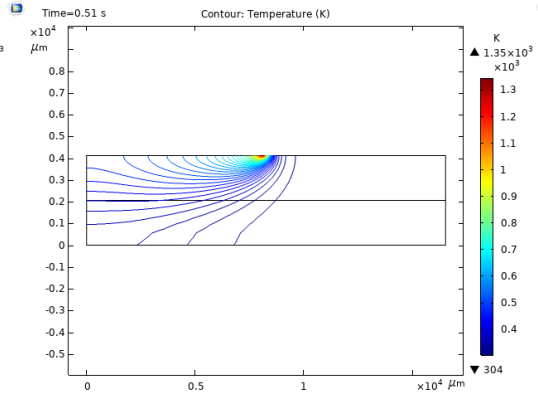
f)



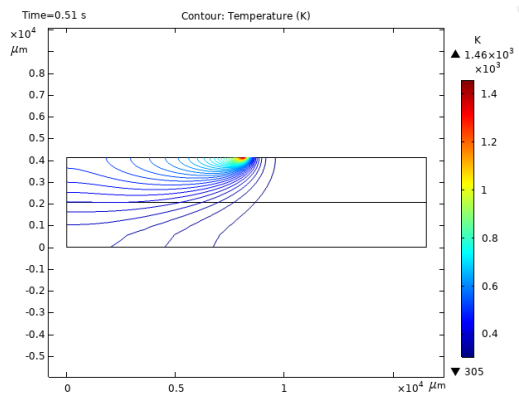
g)



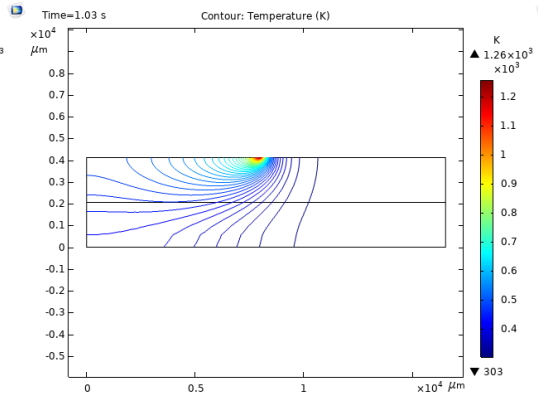
h)



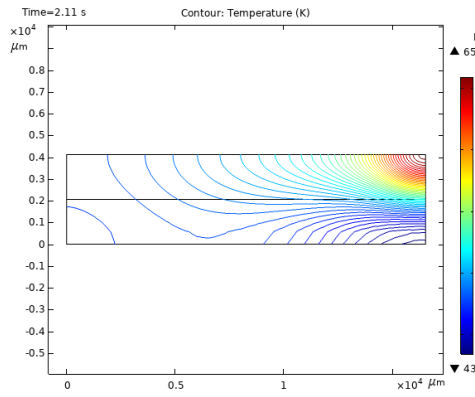
i)



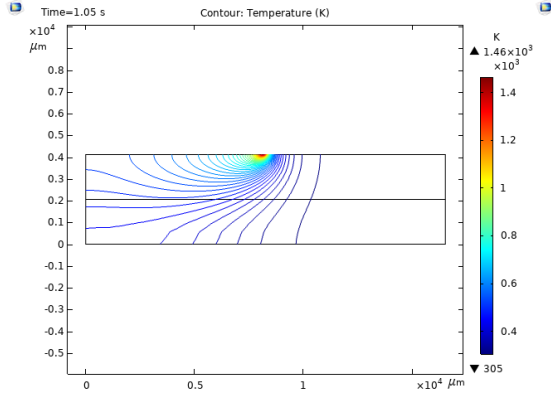
j)



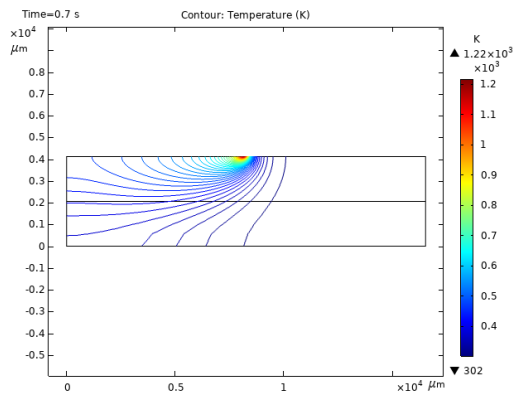
k)



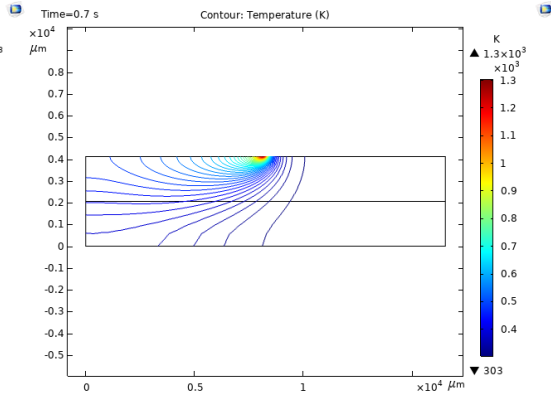
l)



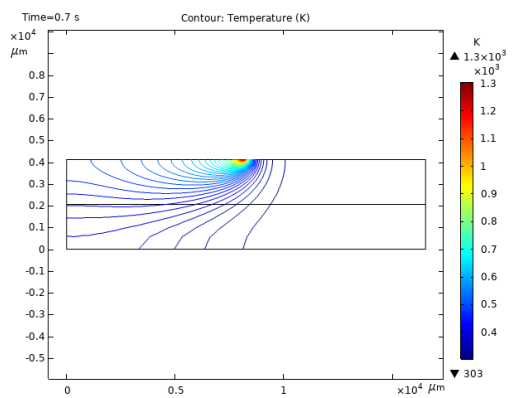
m)



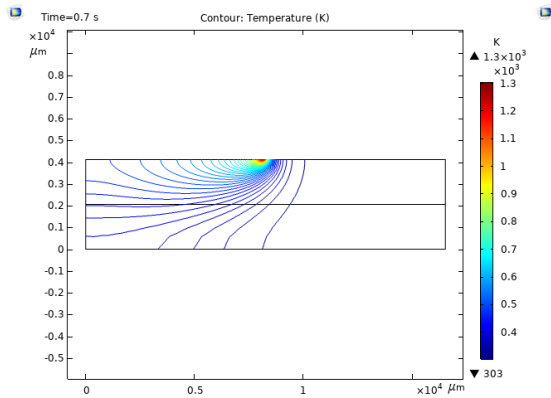
n)



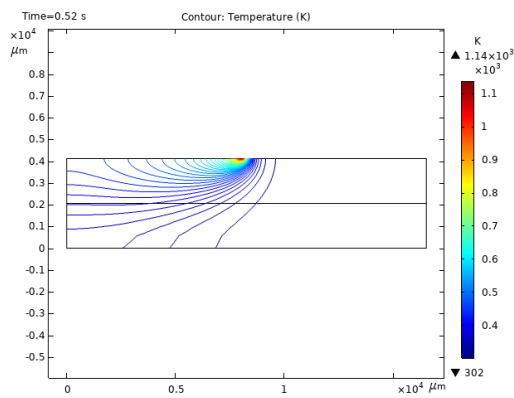
o)



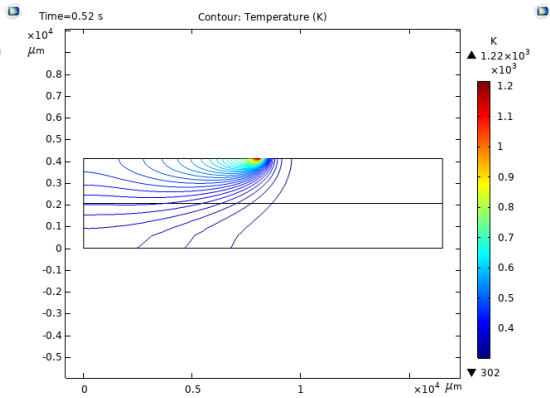
p)



r)

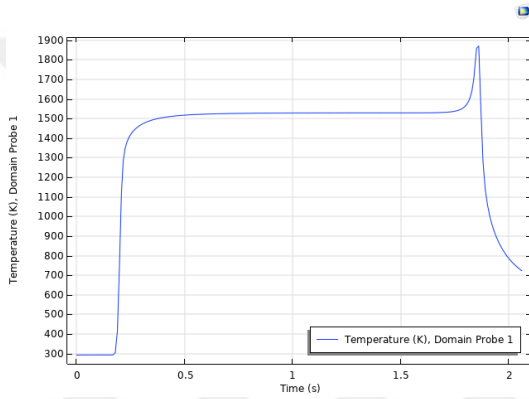


s)

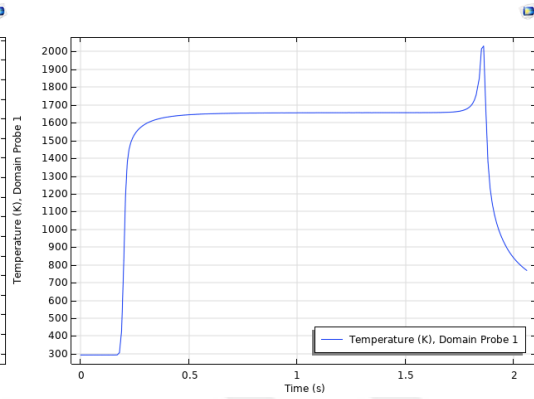


EK-3 1.2379 çeliği termal modelleme zaman-sıcaklık değişim grafiği a)1600 W-10 mm/s-2,063 mm, b)1800 W-10 mm/s-2,063 mm, c)2000 W-10 mm/s-2,063 mm, d)1600 W-15 mm/s-2,063 mm, e)1800 W-15 mm/s-2,063 mm, f)2000 W-15 mm/s-2,063 mm, g)1600 W-20 mm/s-2,063 mm, h)1800 W-20 mm/s-2,063 mm, i)2000 W-20 mm/s-2,063 mm, j)1600 W-10 mm/s-2,338 mm, k)1800 W-10 mm/s-2,338 mm, l)2000 W-10 mm/s-2,338 mm, m)1600 W-15 mm/s-2,338 mm, n)1800 W-15 mm/s-2,338 mm, o)2000 W-15 mm/s-2,338 mm, p)1600 W-20 mm/s-2,338 mm, r)1800 W-20 mm/s-2,338 mm, s)2000 W-20 mm/s-2,338 mm

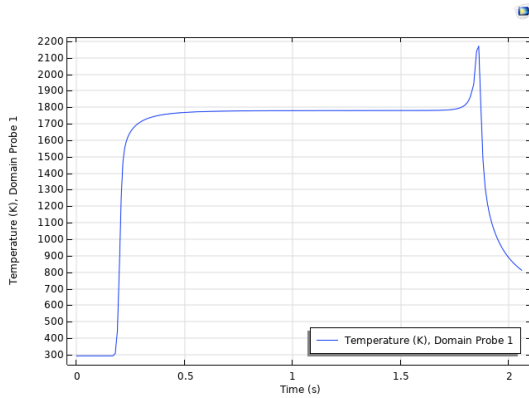
a)



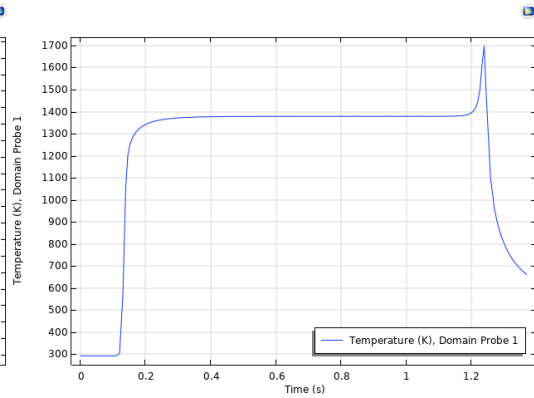
b)



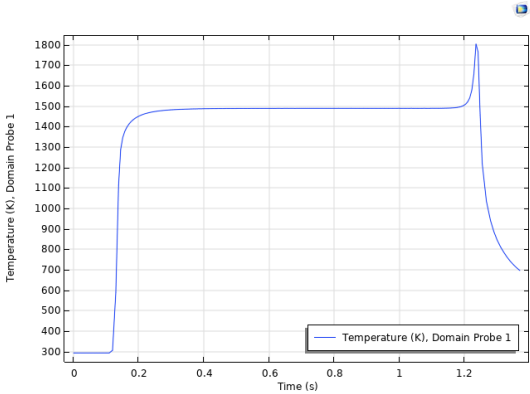
c)



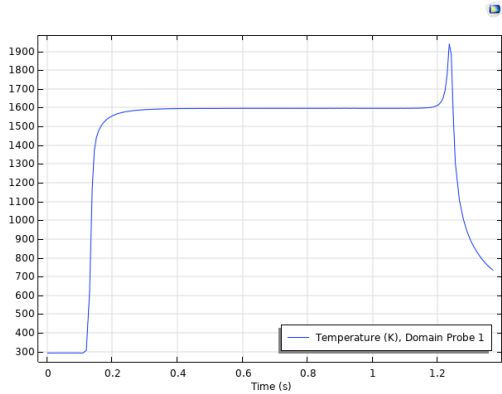
d)



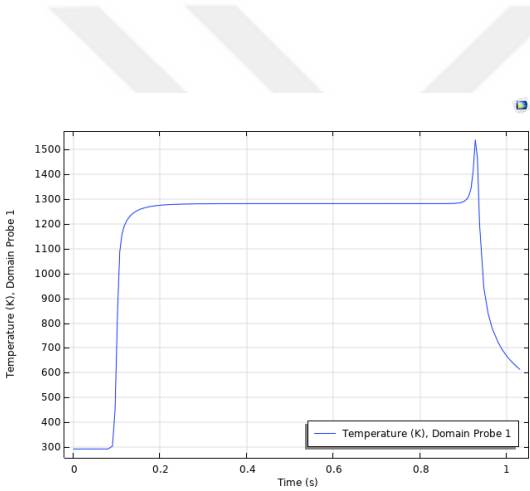
e)



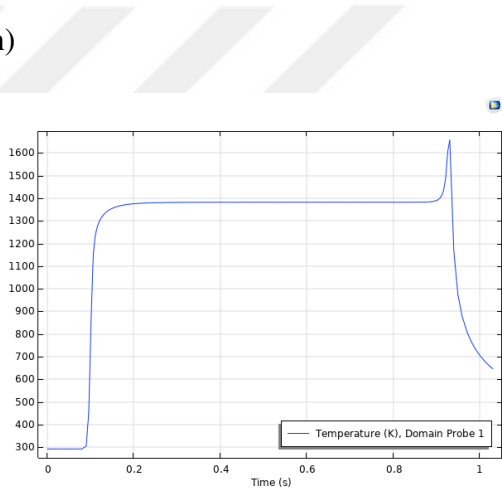
f)



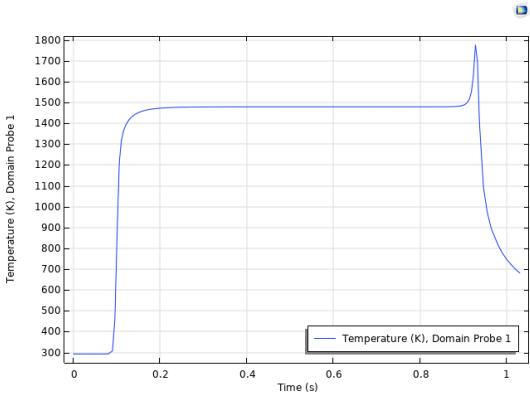
g)



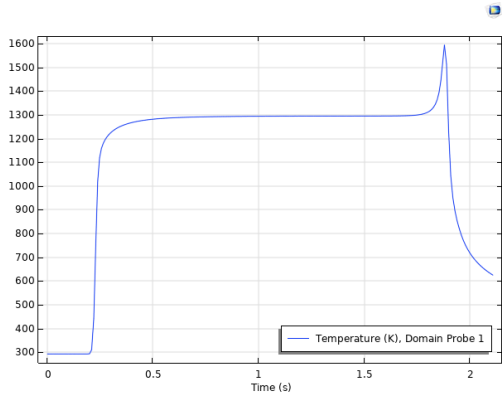
h)



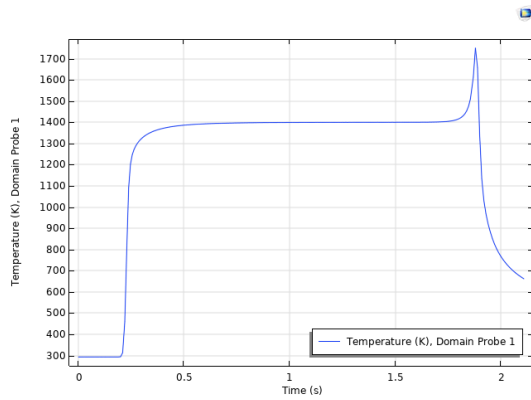
i)



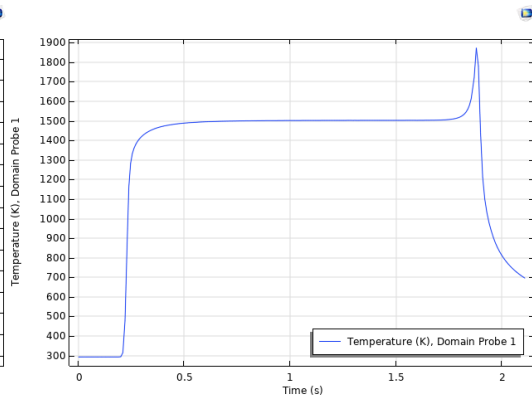
j)



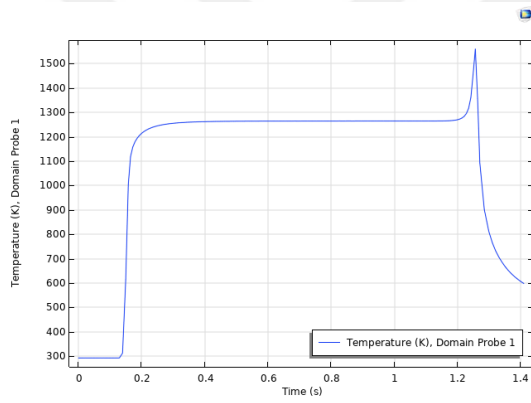
k)



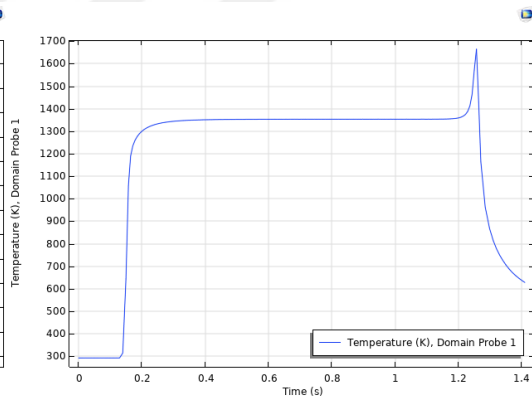
l)



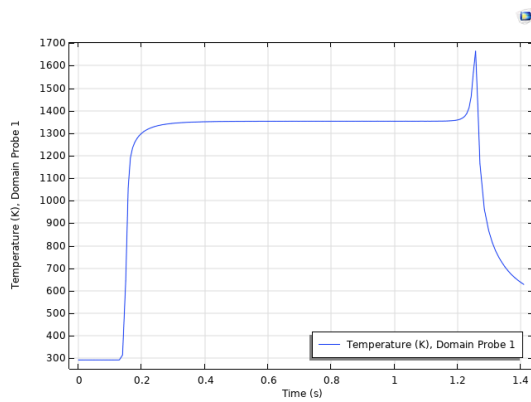
m)



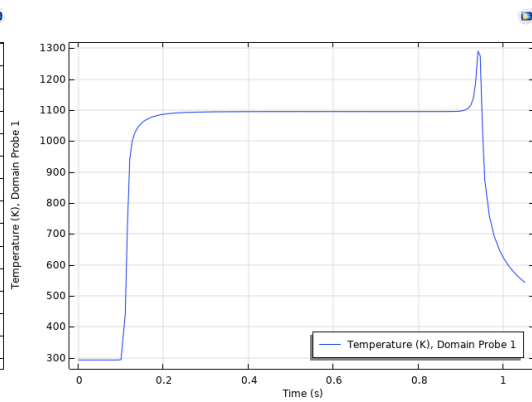
n)



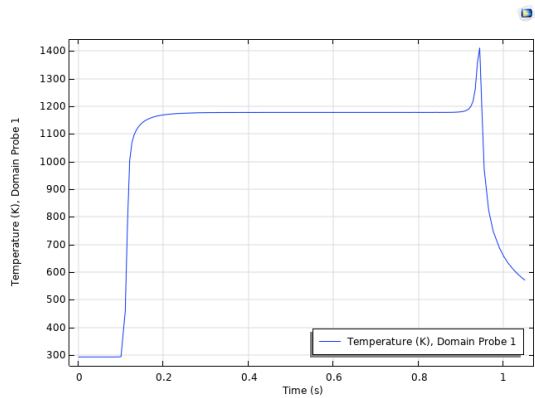
o)



p)



r)



s)

