

**KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

FİZİK ANABİLİM DALI

DOKTORA TEZİ

**NANOSANIYE LAZER DEMETİYLE METAL
MALZEMELERİN ETKİLEŞİMİNİN SAYISAL VE DENEYSEL
İNCELENMESİ**

PINAR DEMİR

KOCAELİ 2014

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

FİZİK ANABİLİM DALI

DOKTORA TEZİ

NANOSANIYE LAZER DEMETİYLE METAL
MALZEMELERİN ETKİLEŞİMİNİN SAYISAL VE DENEYSEL
İNCELENMESİ

PINAR DEMİR

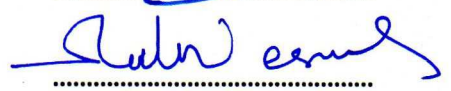
Doç.Dr. Elif KAÇAR
Danışman, Kocaeli Üniv.

Prof.Dr. Arif DEMİR
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniv

Prof.Dr. Serdal PAMUK
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniv.

Prof.Dr. Kadir ESMER
Jüri Üyesi, Marmara Üniv.

Doç.Dr. Emine CAN
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniv.



Tezin Savunulduğu Tarih: 21.01.2014

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Nanosaniye lazer demetiyle metal malzemelerin etkileşiminin sayısal ve deneysel incelenmesi konusunda gerçekleştirdiğim doktora tez çalışmamın hazırlanmasında, sabır ve titizlikle verdiği tüm emekler ve geleceğe yönelik kazandırdığı bilimsel bakış açısı için sayın hocam Doç. Dr. Elif KAÇAR'a teşekkür eder, saygılarımı sunarım.

Doktora tez çalışmam süresince yol göstericiliği ile çalışmalarımın bu noktaya gelmesinde büyük önemi olan değerli hocam Prof. Dr. Arif DEMİR'e teşekkür eder, saygılarımı sunarım.

Doktora tez çalışmalarım sırasında yaptığı yol gösterici değerlendirmeler ile önemli katkılar sağlayan sayın hocam Prof. Dr. Serdal PAMUK'a teşekkür eder, saygılarımı sunarım.

Aileme, doktora tez çalışmalarım süresince gösterdikleri sabır ve destek için teşekkür eder, saygılarımı sunarım.

Ocak - 2014

Pınar DEMİR

İÇİNDEKİLER

| | |
|---|------|
| ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR..... | i |
| İÇİNDEKİLER..... | ii |
| ŞEKİLLER DİZİNİ..... | iv |
| TABLolar DİZİNİ..... | vi |
| SİMGELER DİZİNİ VE KISALTMALAR..... | vii |
| ÖZET..... | viii |
| ABSTRACT..... | ix |
| GİRİŞ..... | 1 |
| 1. GENEL BİLGİLER..... | 3 |
| 1.1. Lazerle Aşındırma ve Uygulamaları..... | 3 |
| 1.2. Malzeme İçinde Lazer Işınının Soğurulması..... | 7 |
| 1.3. Lazerle Metal Malzemelerin Etkileşim Mekanizması..... | 8 |
| 1.4. Deneysel ve Teorik Çalışmalar..... | 9 |
| 1.5. Sonuçlar..... | 11 |
| 2. LAZER MALZEME ETKİLEŞİMİNİN MATEMATİKSEL MODELLEMESİ..... | 13 |
| 2.1. Nanosaniye Lazerle Metal Malzeme Etkileşimi İçin Isı İletim Problemi..... | 14 |
| 2.1.1. Isı iletim denklemi..... | 16 |
| 2.1.2. Başlangıç ve sınır koşulları..... | 17 |
| 2.1.3. Faz değişimi..... | 18 |
| 2.2. Sayısal Çözüm Yöntemi..... | 20 |
| 2.2.1. Sonlu fark denklemleri..... | 21 |
| 2.2.2. İleri fark yöntemi ile çözüm..... | 25 |
| 2.2.3. Geri fark yöntemi ile çözüm..... | 27 |
| 2.2.4. Uzay adımından bağımsızlık testi..... | 28 |
| 2.3. Sonuçlar..... | 37 |
| 3. TEK ATIM NANOSANİYE LAZER DEMETİ İLE TİTANYUM VE ÇİNKO METALLERİNİN ETKİLEŞİMİ..... | 38 |
| 3.1. Nanosaniye Lazer Demeti ile Metallerin Etkileşiminde Meydana Gelen Fiziksel Süreçler..... | 38 |
| 3.2. Çalışmanın Önemi ve Amacı..... | 41 |
| 3.3. Nanosaniye Lazer Demeti ile Ti ve Zn Metallerinin Etkileşiminde Meydana Gelen Fiziksel Süreçler İçin Sayısal Hesaplamalar ve Elde Edilen Sonuçlar..... | 41 |
| 3.4. Sonuçlar..... | 54 |
| 4. GALVANİZE ÇELİK VE PASLANMAZ ÇELİK MALZEMELERİN LAZERLE AŞINDIRILMASINA DAYANAN DENEYSEL VE SAYISAL ÇALIŞMALAR..... | 55 |
| 4.1. Galvanize Çelik Malzemenin LIBS Tekniği ile Derinlik Çözünürlüğünün Elde Edilmesinde Parametrelerin Optimizasyonu İçin Sayısal Hesaplamalar..... | 55 |

| | |
|--|----|
| 4.1.1. Çalışmanın önemi ve amacı..... | 56 |
| 4.1.2. Deneyle ilgili hesaplamalar ve elde edilen sonuçlar..... | 57 |
| 4.2. Paslanmaz Çelik Malzemenin Tek Atım Nd:YAG Lazerle Aşındırılmasının Deneysel ve Sayısal İncelenmesi..... | 63 |
| 4.2.1. Çalışmanın önemi ve amacı..... | 64 |
| 4.2.2. Deney ve hesaplamalardan elde edilen sonuçlar..... | 64 |
| 4.3. Sonuçlar..... | 69 |
| 5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER..... | 70 |
| KAYNAKLAR..... | 73 |
| KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER..... | 83 |
| ÖZGEÇMİŞ..... | 85 |

ŞEKİLLER DİZİNİ

| | | |
|-------------|---|----|
| Şekil 1.1. | Lazerle malzeme etkileşiminde meydana gelen ısı süreçlerinin şematik gösterimi..... | 4 |
| Şekil 1.2. | Atımlı lazerle depolama uygulamasının şematik gösterimi..... | 5 |
| Şekil 1.3. | Lazerle oluşturulan plazma spektroskopisi uygulamasının şematik gösterimi..... | 6 |
| Şekil 1.4. | Lazerle malzeme işleme uygulamasının şematik gösterimi..... | 7 |
| Şekil 2.1. | Faz değişiminin şematik gösterimi..... | 18 |
| Şekil 2.2. | İleri fark yönteminde örgü noktaları..... | 23 |
| Şekil 2.3. | Geri fark yönteminde örgü noktaları..... | 24 |
| Şekil 2.4. | Açık şema için farklı anlarda malzeme yüzeyindeki sıcaklığın hücre sayısına göre değişimi..... | 29 |
| Şekil 2.5. | Açık şema için farklı anlarda malzeme yüzeyinden 1 µm derinlikteki sıcaklığın hücre sayısına göre değişimi..... | 29 |
| Şekil 2.6. | Açık şema için farklı anlarda malzeme yüzeyinden 2 µm derinlikteki sıcaklığın hücre sayısına göre değişimi..... | 30 |
| Şekil 2.7. | Açık şema için farklı hücre sayıları için malzeme yüzeyindeki sıcaklığın zamana göre değişimi..... | 30 |
| Şekil 2.8. | Açık şema için farklı hücre sayıları için malzeme yüzeyinden 1 µm derinlikteki sıcaklığın zamana göre değişimi..... | 31 |
| Şekil 2.9. | Açık şema için farklı hücre sayıları için malzeme yüzeyinden 2 µm derinlikteki sıcaklığın zamana göre değişimi..... | 31 |
| Şekil 2.10. | Kapalı şema için farklı anlarda malzeme yüzeyindeki sıcaklığın hücre sayısına göre değişimi..... | 32 |
| Şekil 2.11. | Kapalı şema için farklı anlarda malzeme yüzeyinden 1 µm derinlikteki sıcaklığın hücre sayısına göre değişimi..... | 32 |
| Şekil 2.12. | Kapalı şema için farklı anlarda malzeme yüzeyinden 2 µm derinlikteki sıcaklığın hücre sayısına göre değişimi..... | 33 |
| Şekil 2.13. | Kapalı şema için farklı hücre sayıları için malzeme yüzeyindeki sıcaklığın zamana göre değişimi..... | 34 |
| Şekil 2.14. | Kapalı şema için farklı hücre sayıları için malzeme yüzeyinden 1 µm derinlikteki sıcaklığın zamana göre değişimi..... | 34 |
| Şekil 2.15. | Kapalı şema için farklı hücre sayıları için malzeme yüzeyinden 2 µm derinlikteki sıcaklığın zamana göre değişimi..... | 35 |
| Şekil 2.16. | Açık ve kapalı şema çözüm yöntemleri için hücre sayısı 2000 olduğu durumda yüzey sıcaklığının zamanla değişimi..... | 36 |
| Şekil 2.17. | Açık şema çözüm yöntemi ile farklı anlarda hesaplanan sıcaklığın konuma göre değişimi..... | 36 |
| Şekil 2.18. | Kapalı şema çözüm yöntemi ile farklı anlarda hesaplanan sıcaklığın konuma göre değişimi..... | 37 |
| Şekil 3.1. | a) Zn ve b) Ti metalleri için farklı lazer akı değerlerine karşılık maksimum yüzey sıcaklığı..... | 43 |

| | | |
|-------------|---|----|
| Şekil 3.2. | a) Zn ve b) Ti metalleri için farklı lazer akı değerlerine karşılık buhar derinliği..... | 45 |
| Şekil 3.3. | a) Zn ve b) Ti için gelen lazer akısına göre yüzey sıcaklığının zamansal değişimi..... | 46 |
| Şekil 3.4. | a) Zn ve b) Ti için 2.5 J/cm^2 akı değerinde yüzeydeki ve iç noktalardaki sıcaklığın zamansal değişimi..... | 48 |
| Şekil 3.5. | a) Zn ve b) Ti için gelen lazer akısına göre erime derinliğinin zamansal değişimi..... | 49 |
| Şekil 3.6. | a) Zn ve b) Ti için gelen lazer akısına göre buhar derinliğinin zamansal değişimi..... | 51 |
| Şekil 3.7. | a) Zn ve b) Ti için farklı zaman anlarında 2.5 J/cm^2 lazer akı değeri için yüzeyden uzaklığın bir fonksiyonu olarak sıcaklık dağılımı..... | 52 |
| Şekil 4.1. | Galvanize çelik levha yüzey sıcaklığının farklı lazer akı değerleri için zamanla değişimi..... | 58 |
| Şekil 4.2. | Lazer akı değeri 1 J/cm^2 için galvanize çelik levha yüzeyinde ve iç noktalarında zamana göre sıcaklık dağılımı..... | 59 |
| Şekil 4.3. | Farklı akı değerleri için galvanize çelik levhada erime derinliğinin zamanla değişimi..... | 60 |
| Şekil 4.4. | Farklı akı değerleri için galvanize çelik levhada buhar derinliğinin zamanla değişimi..... | 60 |
| Şekil 4.5. | Deneysel koşullar için yapılan hesaplama sonucunda elde edilen galvanize çelik levhada erime ve buhar derinliklerinin zamanla değişimi..... | 62 |
| Şekil 4.6. | Hedef ile mercekle arasındaki farklı uzaklık değerlerinde farklı lazer enerjileri için paslanmaz çelik malzemede lazerle işlenen yüzeylerin optik mikroskop görüntüleri, a) 100 mm, 20 mJ; b) 100 mm, 50 mJ; c) 100 mm, 200 mJ; d) 90 mm, 20 mJ; e) 90 mm, 50 mJ; f) 90 mm, 200 mJ..... | 65 |
| Şekil 4.7. | Mercekle ile hedef arasındaki uzaklığın 100 mm olduğu durumda 20 mJ lazer enerji değeri için paslanmaz çelik malzemede lazerle işlenen yüzeylerin profilometre görüntüsü..... | 66 |
| Şekil 4.8. | Mercekle ile hedef arasındaki uzaklığın 100 mm olduğu durumda 200 mJ lazer enerji değeri için paslanmaz çelik malzemede lazerle işlenen yüzeylerin profilometre görüntüsü..... | 67 |
| Şekil 4.9. | Paslanmaz çelik malzemede farklı lazer akı değerlerine göre buhar derinliğinin değişimi..... | 68 |
| Şekil 4.10. | Paslanmaz çelik malzemede farklı lazer akı değerlerine karşılık yüzey sıcaklığının zamanla değişimi..... | 68 |

TABLolar DİZİNİ

| | |
|--|----|
| Tablo 3.1. Hesaplamalarda kullanılan lazer parametrelerinin değerleri..... | 42 |
| Tablo 3.2. Ti ve Zn metallerinin fiziksel özellikleri..... | 42 |

SİMGELER DİZİNİ VE KISALTMALAR

| | |
|---------------|---|
| c_p | : Öz ısısı, (J/kg.K) |
| I | : Işın şiddeti, (W/m ²) |
| L_b | : Erime ısısı, (J/kg) |
| L_e | : Buharlaşma ısısı, (J/kg) |
| m_k | : Katı kütlesi, (kg) |
| m_e | : Sıvı kütlesi, (kg) |
| \mathcal{R} | : Yansıtıcılık katsayısı |
| T | : Sıcaklık, (K) |
| t | : Zaman, (s) |
| T_b | : Buharlaşma sıcaklığı, (K) |
| T_e | : Erime sıcaklığı, (K) |
| T_k | : Termodinamik kritik sıcaklık, (K) |
| x | : Konum, (m) |
| α | : Soğrulma katsayısı, (m ⁻¹) |
| ΔV | : Diferansiyel eleman hacmi, (m ³) |
| ΔU | : Enerji değişimi, (J) |
| δ | : Soğrulma derinliği, (m) |
| κ | : Isıl iletkenlik, (W/m.K) |
| ρ | : Kütle yoğunluğu, (kg/m ³) |
| τ | : Zamansal yarı maksimumdaki tam çizgi genişliği, (s) |
| χ_e | : Erimiş kütle oranı |
| χ_b | : Buharlaşmış kütle oranı |

Kısaltmalar

| | |
|--------|--|
| LIBS | : Laser Induced Breakdown Spectroscopy (Lazerle Oluşturulan Plazma Spektroskopisi) |
| Nd:YAG | : Neodymium doped Yttrium-Aluminium-Garnet (Neodimyum katkılı İttriyum-Alüminyum-Garnet) |
| PLD | : Pulsed Laser Deposition (Atımlı Lazerle Depolama) |

NANOSANIYE LAZER DEMETİYLE METAL MALZEMELERİN ETKİLEŞİMİNİN SAYISAL VE DENEYSEL İNCELENMESİ

ÖZET

Gelişen teknolojiyle lazerler günümüzde endüstri, sağlık gibi çeşitli alanlarda lazerle aşındırma sürecine dayanan birçok uygulamada kullanılmaktadır. Bu uygulamaların kontrol edilebilmesi ve geliştirilebilmesi için lazer-malzeme etkileşimi sırasında meydana gelen ısınma, erime ve buharlaşma süreçlerinin detaylı olarak araştırılması gerekir. Bu tez kapsamında lazerle malzeme etkileşimini içeren farklı uygulamalar için lazerle aşındırma işleminde meydana gelen ısıl süreçler sayısal ve deneysel olarak incelendi. Tez çalışmasında Gauss formunda şiddet dağılımına sahip nanosaniye süreli bir lazer demetinin bir metal yüzeye uygulanması sürecinde lazer demeti ile katı malzemenin etkileşimi sırasında meydana gelen ısınma, erime ve buharlaşma süreçlerini sayısal olarak incelemek için matematiksel bir model ele alındı. Ele alınan matematiksel model kullanılarak farklı uygulamalar için lazerle aşındırma işleminde meydana gelen ısıl mekanizmalara bir öngörü sağlamak amacıyla hesaplamalar gerçekleştirildi. Deneysel ve sayısal sonuçların lazerle aşındırma işlemi için ısı iletiminin incelenmesine ışık tuttuğu ve yüzey buharlaşmasından kaynaklanan malzeme aşınımı için bir tahmin verebildiği sonucuna varıldı.

Anahtar Kelimeler: Isı İletimi, Lazerle Aşındırma, Lazerle Malzeme Etkileşimi, Matematik Modelleme.

NUMERICAL AND EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF NANOSECOND LASER BEAM INTERACTION WITH METAL MATERIALS

ABSTRACT

Lasers are used in many applications based on laser ablation in several areas such as industry, medical area through the technological advances. Detailed investigations of laser heating, melting and vaporization processes occurred during laser-material interaction are necessary to control and develop these applications. In the scope of this thesis, thermal processes occurred during laser ablation were studied numerically and experimentally for several applications based on interaction of laser with material. In the thesis study, a mathematical model was considered to numerically investigate laser heating, melting and vaporization processes occurred in the interaction of laser beam with solid material during irradiating a metal surface by nanosecond laser beam with Gaussian intensity distribution. Using the considered mathematical model, calculations were performed for different applications to get an insight to the thermal mechanisms taking place in the laser ablation process. It was concluded that experimental and numerical results provide an insight for investigation of heat conduction for laser ablation process, and give an estimation for material removal caused by surface vaporization.

Keywords: Heat Conduction, Laser Ablation, Laser Interaction with Material, Mathematical Modeling.

GİRİŞ

İlk lazerin 1960'ta T. H. Maiman tarafından yakut kristali ile elde edilmesinden bu yana gelişen endüstri ve teknolojiyle lazerler günümüzde birçok uygulamada kullanılan bir araç haline gelmiştir. Lazerler endüstriyel uygulamalarda geleneksel yöntemlere göre birçok avantaj sağladığından geleneksel yöntemlerin yerini almaktadır. Bu uygulamalarda lazerlerin kullanılmasının sağladığı en önemli avantajlarından birisi lazerlerle büyük miktarda enerjinin sınırlı çok küçük alanlara hassas bir şekilde odaklanabilir olması ve depolanan enerji oranının hassas bir şekilde kontrol edilebilir olmasıdır. Bu kontrol istenen malzeme işleme sürecinin elde edilmesi için lazer işlem parametrelerinin uygun bir şekilde seçilmesiyle yapılır [1-6].

Günümüzde lazerle malzeme etkileşimi sonucu meydana gelen lazerle aşındırma süreci içeren birçok uygulama bulunur. Lazerlerin yüksek şiddette ışın üretmesi ısınma, erime ve buharlaşmayı içeren birçok uygulamanın gelişmesine olanak sağlamıştır. Geniş uygulamalarından dolayı katı malzemelerin atımlı lazerle aşındırılması sürecinin araştırılmasına artan bir ilgi vardır. Nanosaniye atımlı lazerlerle malzeme etkileşimine dayanan uygulamalar ve bu uygulamalarda meydana gelen süreçlerle işlem sonrası oluşan yapıların incelenmesi için deneysel ve teorik çalışmalar yapılmaktadır [1-6].

Lazer kullanılarak malzeme yüzeyinin erimesi ve ardından buharlaşması endüstri, sağlık gibi birçok alanda geniş çaplı uygulamalarda yer alır. Metal malzemelerin lazerle işlenmesi lazer-malzeme etkileşim mekanizmasının detaylı olarak araştırılmasını gerektirir. Çünkü malzemelerin lazerle işlenmesinin, erime ve buharlaşma oranlarına oldukça bağlı olması nedeniyle lazerle işlemeyle ortaya çıkan ürünün geliştirilmesi erime ve buharlaşma süreçlerinin araştırılmasını gerektirir [1].

Lazerle malzeme işleme süreci genellikle karmaşık ve lazer şiddeti, lazer atım uzunluğu gibi lazer parametreleri ile malzeme özelliklerine bağlı olduğundan lazer

malzeme etkileşimi süreci sırasında farklı türde fiziksel mekanizmalar meydana gelebilir. Bu sebeple lazerle aşındırma sürecine dayanan uygulamalara ışık tutması, bu uygulamaların kontrol edilebilmesi ve geliştirilebilmesi açısından bu süreçte meydana gelen fiziksel olayların mekanizmasının hem deneysel hem de teorik olarak incelenmesi gerekir. Ayrıca, lazerle etkileşim sürecinin matematiksel modellenmesi deneysel maliyeti azaltır ve meydana gelen fiziksel olayların daha iyi anlaşılmasını sağlar [1].

Belirtilen sebeplere dayanarak bu tez çalışmasında Gauss formunda şiddet dağılımına sahip nanosaniye süreli bir lazer demetinin bir metal yüzeye uygulanması sürecinde, lazer demeti ile katı malzemenin etkileşimi sırasında meydana gelen ısınma, erime ve buharlaşma süreçlerini sayısal olarak incelemek için matematiksel bir model ele alındı. Bu süreçlerin modellenmesi için ısı iletimi ve faz değişimi denklemleri kullanıldı. Denklemlerin çözümünde sonlu fark yaklaşımına dayanan sayısal çözüm yöntemi kullanıldı. Sayısal çözüm için oluşturulan algoritma Fortran programlama dili kullanılarak yazıldı. Lazerle aşındırma sürecine dayanan farklı uygulamalar dikkate alınarak deneysel incelemeler yapıldı. Lazerle etkileşen malzemeler içinde sıcaklık dağılımı, erime derinliği ve yüzey buharlaşma derinliğini elde etmek için yazılan sayısal çözüm algoritmasıyla hesaplamalar yapıldı. Deneysel sonuçlar ve yapılan hesaplamalardan elde edilen sonuçlar değerlendirilerek bu incelemelerin lazerle aşındırma işleminde meydana gelen ısıl mekanizmalara bir öngörü ve anlayış sağladığı ve yüzey buharlaşmasından kaynaklanan malzeme aşınımı için bir tahmin verebildiği sonucuna varıldı.

1. GENEL BİLGİLER

Lazer (laser) sözcüğü “Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation” (ışmanın uyarılmış yayılımı ile ışığın güçlendirilmesi) kelimelerinin baş harflerinden oluşur. Albert Einstein 1917’de uyarılmış yayılma sürecinin varlığını göstermiştir. İlk lazer ise 1960’ta T. H. Maiman tarafından yakut kristali ile elde edilmiştir [1]. Yakut lazeri ile ilk çalışmalardan bu yana lazer ışınıyla malzemenin belirli bir etkileşimi ile malzemenin özelliklerinde başka yöntemlerle elde edilemeyen bazı kalıcı değişimler meydana gelebileceği anlaşılmıştır. Lazer ışımalarının malzemenin bölgesel kimyasal özelliklerinde, bölgesel kristal yapısında ve bölgesel morfolojisinde değişikliklere yol açabileceği gösterilmiştir [2-6].

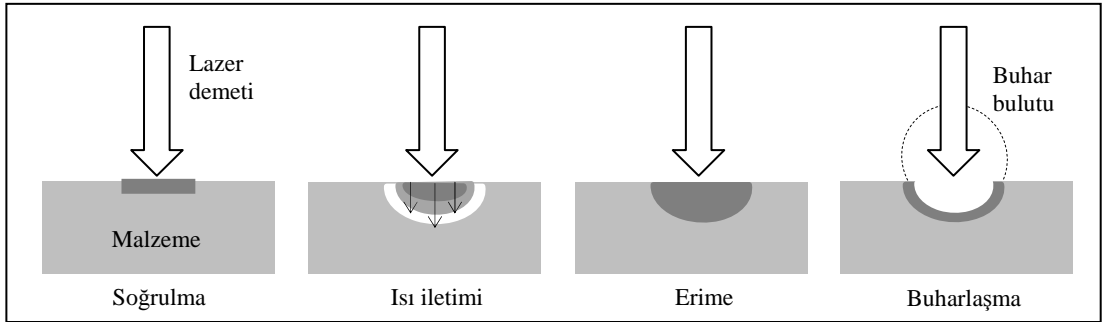
Günümüzde lazerle malzeme etkileşimine dayanan birçok uygulama yaygın olarak kullanılmaktadır. Geleneksel uygulamalara göre lazerlerin birçok avantajı bulunur. Lazerle işlemede araç olarak kullanılan lazerin en önemli avantajlarından birisi malzemenin hangi bölgesine hangi oranda enerji depolanacağını hassas bir şekilde kontrol edilebilir olmasıdır. Bu kontrol, istenen malzeme modifikasyonunun elde edilmesi için lazer işlem parametrelerinin uygun bir şekilde seçilmesiyle yapılır [6]. Ayrıca, lazerlerle büyük miktarda enerji, sınırlı çok küçük alanlara hassas bir şekilde odaklanabilir. Böylece diğer ısı kaynaklarına göre birim alana yüksek değerlerde enerji gönderilir. Bunun yanı sıra, lazerle işleme her atmosfer ortamında yapılabilir. İşlenen malzeme ile lazer arasında mekanik temas yoktur ve böylece kirlilik problemleri en aza indirgenir. Malzemedeki işlem yapılan bölge etrafında ısıdan etkilenen bölge küçük olur. Lazerle sert, kırılmalı veya ısıya dirençli malzemelerle kolayca çalışılabilir. Ulaşılması güç bölgelere lazer demeti kolayca ulaşılabilir [1].

1.1. Lazerle Aşındırma ve Uygulamaları

Lazerle aşındırma, bir hedef malzeme yüzeyine bir lazer demeti odaklanması sonucunda hedef yüzeyinden malzeme tahliyesi işlemidir [7]. Lazerlerin yüksek şiddette ışın üretmesi ısınma, erime ve buharlaşmayı içeren birçok lazerle

aşındırma uygulamasının gelişmesine olanak sağlamıştır. Metal malzemelerin lazerle işlenebilmesi, lazerin malzeme üzerinde odaklandığı belirli bir bölgede birim alana yüksek güç uygulayabilmesinin bir sonucudur. Geleneksel ısı kaynakları birim alana daha düşük değerlerde güç uygularlar ve bu iyi derecede odaklanamaz. Burada önemi olan, toplam güç miktarı değil, bu gücün birim alanda yüksek değerlerde güç elde edilecek şekilde noktasal bir bölgeye odaklanabilmesidir [1].

Lazer ışınması bir hedef malzeme yüzeyine odaklandığında, bir kısmı malzeme tarafından soğrulur ve bir kısmı ise yansıtılır. Soğrulan enerji hedef yüzeyini ısıtmaya başlar. Hedef malzeme yüzeyinde birim alana düşen lazer gücüne bağlı olarak malzeme katı halde kalabilir ve lazerle ısınma süreci boyunca faz değişimi gerçekleşmeyebilir. Eğer yüksek şiddette lazer ışınması uygulanırsa, yüksek şiddetli lazer ışınmasının malzeme tarafından soğrulmasıyla meydana gelen ısınma süreci sonucu yüzey sıcaklığı hızlıca malzemenin erime sıcaklığına ulaşır. Önemli ölçüde bir derinliğe sahip erimiş malzeme üretildikten sonra yüzey buharlaşmaya başlar. Böylece katıdan sıvıya faz değişimi veya katıdan sıvıya ve ardından sıvıdan gazıya faz değişimi yani buharlaşma gerçekleşebilir. Kısa zaman aralığında yüksek şiddette lazer atımının hedef malzeme yüzeyine odaklanmasıyla malzeme yüzeyinde aşındırma meydana gelebilir [1]. Şekil 1.1’de, gerçekleşen fiziksel süreçler şematik olarak görülmektedir.

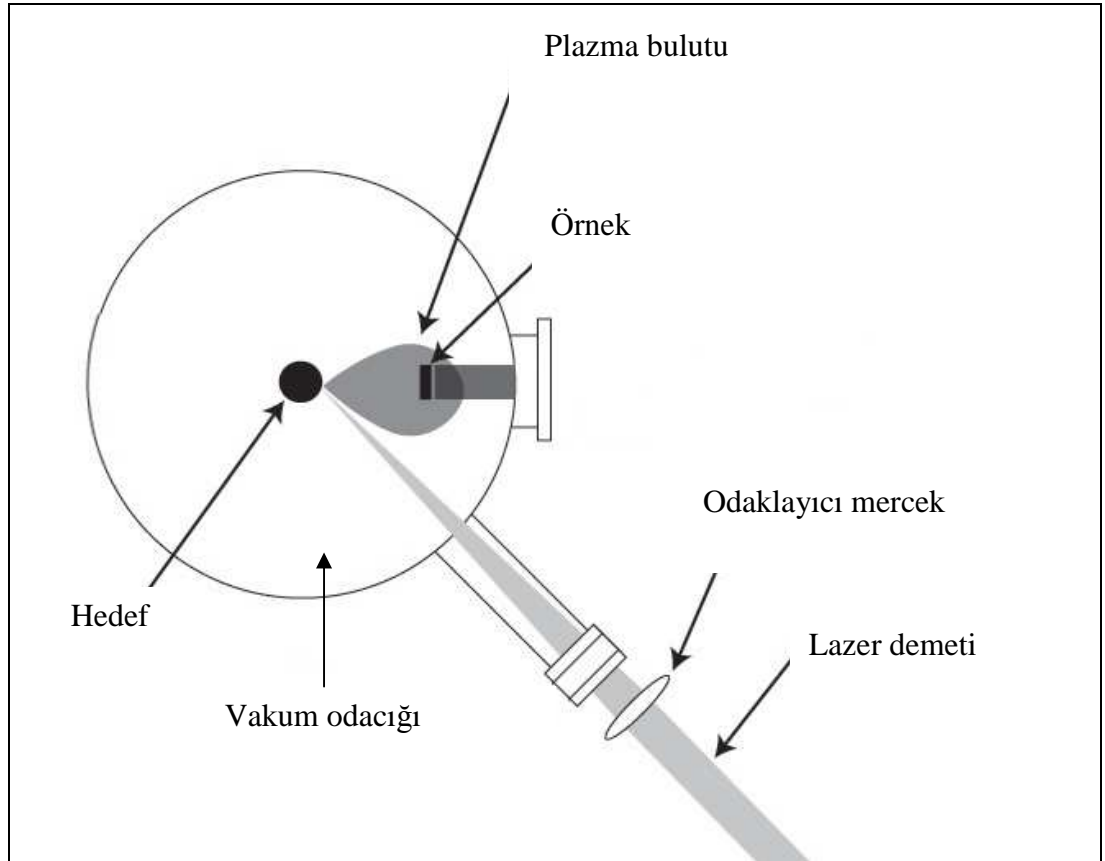


Şekil 1.1. Lazerle malzeme etkileşiminde meydana gelen ısı süreçlerinin şematik gösterimi

Lazerle malzeme etkileşimi sonucu meydana gelen lazerle aşındırma sürecini içeren birçok uygulama bulunur. Bunlara örnek olarak lazerle delme, kesme, kaynak gibi işlemleri içeren lazerle malzeme işleme uygulamaları [8, 9, 10]; medikal cihazlar, mikrosensörler, mikroelektronik gibi yapıların üretimini içeren lazerle mikro-işleme

uygulamaları [11, 12]; lazerle oluşturulan plazma spektroskopisini de içeren kimyasal analiz uygulamaları [13-16]; nano-yapı üretimi [17]; film depolama [18-21] gibi uygulamalar verilebilir. Bu uygulamalarda lazerlerin geleneksel yöntemlere göre avantajlarının olması lazer uygulamalarını ilgi çekici hale getirir.

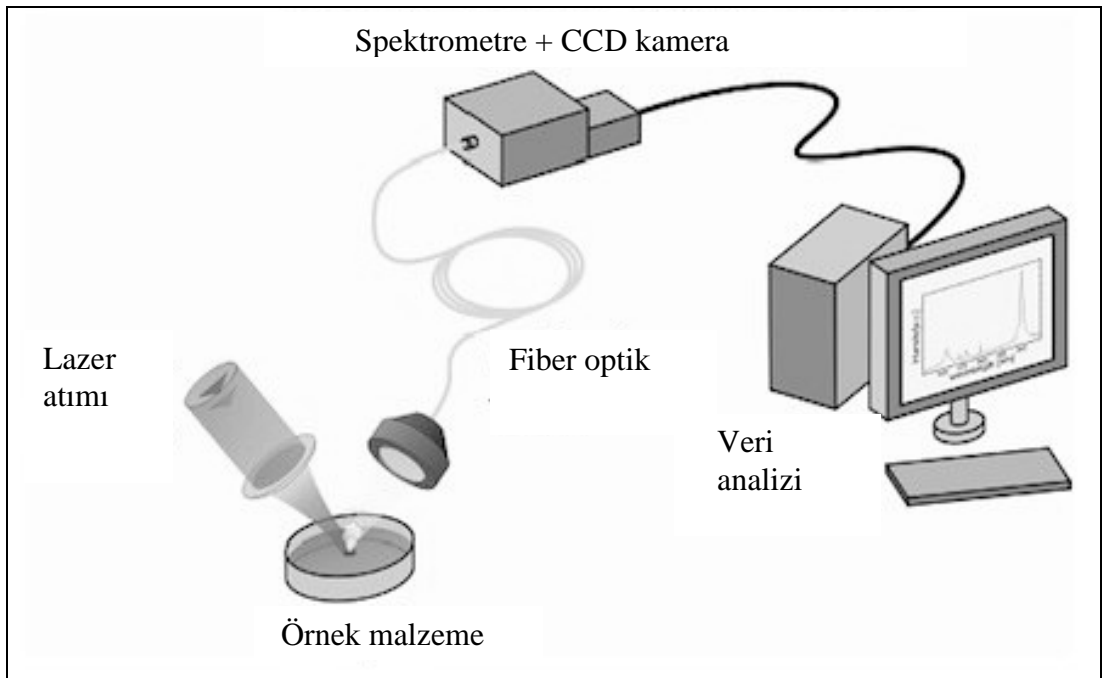
Atımlı lazerle depolama (Pulsed Laser Deposition – PLD) tekniğinde atımlı lazer demeti hedef malzeme yüzeyine odaklanır. Lazer enerjisinin hedef malzeme tarafından soğurulması ile hedef yüzeyi hızlıca buharlaşır. İçerisinde uyarılmış ve iyonlaşmış parçacıklar bulunan buharlaşmış malzeme vakum ortamında hızlı bir şekilde genişler. Böylece hedef yüzeyinde oluşan plazma, hedefe paralel şekilde yerleştirilen bir örnek malzeme üzerine depolanarak örnek yüzeyinde ince bir film oluşturulur [22]. Şekil 1.2’de PLD mekanizması şematik olarak görülmektedir.



Şekil 1.2. Atımlı lazerle depolama uygulamasının şematik gösterimi [23]

Lazerle oluşturulan plazma spektroskopisi (Laser Induced Breakdown Spectroscopy – LIBS) tekniğinde örnek malzemenin çok küçük bir miktarı düşük enerjili bir lazer atımıyla buharlaştırılarak plazma oluşturulur. Plazmadaki uyarılmış parçacıklardan

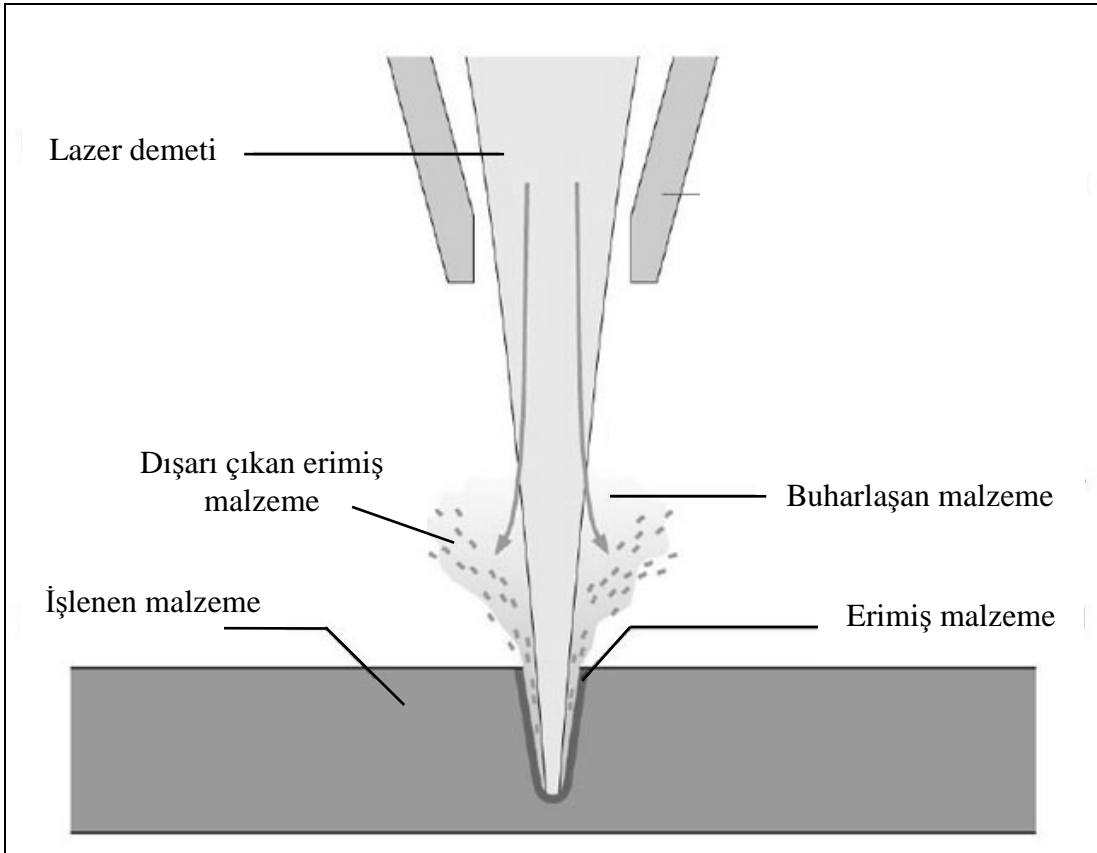
ve çoğunlukla atomlardan yayılan spektrum nicel ve nitel analitik bilgi geliştirmek için kullanılır. Hedef malzeme olarak; gazlar, sıvılar, aerosoller ve özellikle katılar kullanılır. LIBS tekniğinin birçok uygulaması vardır. Uygulamalar; çevresel parçacıklar, su kirliliği, arkeolojik çalışmalar, sanat eseri tarihlendirme ve temizleme, bakteri ve spor içeren biyolojik malzemelerin örneklendirilmesi, patlayıcıların, biyolojik ve kimyasal savaş araçlarının analizini içeren ülke güvenliği gibi alanları kapsar. LIBS'in teorik ve analitik incelemesine büyük ilgi, LIBS'in çok sayıda ve geniş kapsamlı uygulamalarının yanı sıra; çoklu-element kapasitesi, hemen hemen tüm örnek tiplerine uygulanabilirliği, düşük örnek gereklilikleri (neredeyse tahribatsız olması), ölçüm hızı, örnek hazırlama gerektirmemesi gibi başlıca nedenlere dayanır [24, 25]. Şekil 1.3'te lazerle oluşturulan plazma spektroskopisi uygulaması şematik olarak görülmektedir.



Şekil 1.3. Lazerle oluşturulan plazma spektroskopisi uygulamasının şematik gösterimi [26]

Lazerlerin bir diğeri uygulaması ise delme, kesme, kaynak ve mikroişleme uygulamalarıdır. Bu uygulamalarda lazerler geleneksel yöntemlere göre sahip olduğu avantajlardan dolayı tercih edilir. Lazerle mikroişleme birçok endüstriyel uygulamalarda özellikle işlenmesi zor malzemelerin işlenmesinde mekanik aşındırma yöntemlerinin yerini almıştır [27]. Lazerle işleme ısıl bir süreçtir. Bu sürecin etkinliği

işlenecek malzemenin mekanik özelliklerinden ziyade ısı ve optik özelliklerine bağlıdır. Bu nedenle yüksek derecede kırılğan ya da sert malzemeler lazerle işleme için özellikle uygundur [28]. Lazerle işleme temassız bir süreçtir. Lazerle malzeme arasındaki enerji iletimi ışın yoluyla gerçekleşir. Böylece malzemeye mekanik etkilerden kaynaklanan zararlar gelmez. Lazerler hızlı, temiz, hassas ve etkili işlem sağladığından dolayı elektronik, biyomedikal, havacılık alanlarında üretim endüstrilerinde özellikle küçük parçaların üretiminde yaygın olarak kullanılır [29]. Şekil 1.4'te lazerle malzeme işleme uygulaması şematik olarak görülmektedir.



Şekil 1.4. Lazerle malzeme işleme uygulamasının şematik gösterimi [30]

1.2. Malzeme İçinde Lazer Işınının Soğrulması

Lazer ışını malzeme yüzeyine çarptığında bir kısmı yüzeyden yansıtılır ve geriye kalan kısım malzeme tarafından soğrulur. Malzeme içinde soğrulma, malzemenin soğrulma katsayısı α ile belirlenen oranda bir derinlikte lazer ışın şiddetinin düşmesine sebep olur. Genel olarak α , dalgaboyu ve sıcaklığın bir fonksiyonudur

fakat sabit α değeri için Şiddet I , Beer-Lambert yayasına göre z derinliği ile üstel (eksponansiyel) olarak azalır ve,

$$I(z) = I_0 e^{-\alpha z} \quad (1.1)$$

Şeklinde ifade edilir. Burada I_0 , yansıma ile kayıp dikkate alındıktan sonra yüzeydeki Őiddettir. Şiddet gradyanının büyüklüğü, $\alpha I_0 e^{-\alpha z}$ Şeklinde hacimsel enerji depolama oranını verir. Soğrulma derinliği veya optik penetrasyonu $\delta = 1/\alpha$ Şeklinde tanımlamak uygundur. Bu, malzeme içine iletilen ışık Şiddetinin, başlangıçta yüzeydeki değerinin $1/e$ katına düŐtüęü derinliktir [6].

1.3. Lazerle Metal Malzemelerin Etkileşim Mekanizması

Soğrulma katsayısı α , ışığın derinliğin bir fonksiyonu olarak soğrulmasını belirler. Bununla birlikte soğrulmayla meydana gelen belirli mekanizmalar malzemenin tipine ve lazer atım süresine bağlıdır. Metallerde lazer ıŐımasının enerjisi elektronlarla etkileşim aracılığıyla soğrulur. Yeterli güce sahip bir lazer demeti bir metal malzeme ile etkileştiğinde elektronlar enerji kazanır. Bir foton bir elektron tarafından soğrulur ve bu elektron iletim bandında daha yüksek bir enerji seviyesine çıkar. Uyarılmış elektronlar örgü fononlarıyla çarpışmalar gerçekleştirirler. Elektronlar ile örgü yapı arasında gerçekleşen çarpışmalar aracılığıyla elektron enerjisinin bir kısmı örgü yapıya aktarılır ve sonuç olarak örgü yapının enerjisi yükselir. Böylece soğrulan enerji örgüye aktarılmıŐ olur. Bu rg yapı enerjisi fonon relaksasyonu aracılığıyla iletilir. Metallerde enerji relaksasyon zamanı 10^{-13} s civarında olduğundan [19, 31], atım süresi nanosaniye (10^{-9} s) mertebesinde olan atımlı lazerle aşındırma için optik enerjinin hızlıca ısıya dönüştüğü kabul edilebilir. Bunun sonucunda, elektron ve örgü sıcaklıkları özdeş olur [32]. Bu nedenle sıcaklık ve ısı iletimi kavramları

uygulanabilir [31]. Lazerle katı malzemenin etkileşimi için birçok model katı malzemenin ısınması, ardından erime ve buharlaşmasını içeren ısıl süreçlere dayanır. Bu modeller lazer ile katı malzeme etkileşimini makroskopik düzeyde yani ısı iletim denklemleri ile tanımlarlar [33, 34]. Bu yaklaşım nanosaniye lazer atımı ile metallerin etkileşmesi için doğrudur. Atım süresi pikosaniye (10^{-12} s) ve femtosaniye (10^{-15} s) mertebesinde olan atımlı lazerlerle malzeme etkileşimi için elektron enerjisinin

hızlıca ısıya dönüştüğü kabul edilemez ve elektron sıcaklığı ile örgü sıcaklığını tanımlayan iki sıcaklıklı bir modele ihtiyaç duyulur [35, 36].

1.4. Deneysel ve Teorik Çalışmalar

Nanosaniye atımlı lazerlerle malzeme etkileşimine dayanan uygulamalar ve bu uygulamalarda meydana gelen süreçlerle işlem sonrası oluşan yapıların incelenmesi için deneysel ve teorik çalışmalar yapılmaktadır. Geniş uygulamalarından dolayı katı malzemelerin atımlı lazerle aşındırılması sürecinin araştırılmasına artan bir ilgi vardır [37].

Tunna ve diğerleri [38] 1064, 532 ve 355 nm dalgaboylarında, nanosaniye süreli Neodymium katkılı İttriyum-Alüminyum-Garnet (Neodymium doped Yttrium-Aluminium-Garnet – Nd:YAG) lazer atımları kullanarak bakır levhanın farklı lazer şiddet değerleri için etkileşimini deneysel olarak incelemişlerdir. Yapılan çalışmada farklı dalgaboyu ve şiddet değerlerine sahip nanosaniye lazer atımları için bakır levha yüzeyinde oluşan krater yapıları görüntülenerek ve aşındırma derinlikleri ölçülerek değerlendirilmiştir.

Ohtsu ve diğerleri [39] 1064 ve 532 nm dalgaboylarında, nanosaniye Nd:YAG lazer atımları kullanarak azot atmosfer ortamında titanyum malzemenin yüzey sertleştirme işlemi için deneysel bir çalışma yapmışlardır. Lazerle işlenen titanyum malzemenin yüzey morfolojisi, kimyasal durumu, kimyasal bileşimi gibi yüzey karakteristikleri incelenmiştir. Titanyum levhanın sertleşme profili lazerle işlem öncesi ve sonrası için elde edilmiştir. Lazerle aşındırma sonucu titanyum malzeme yüzeyinde oluşan kraterlerin büyüklüğü ve derinliğinin lazer gücü ve dalgaboyuna göre değişimi belirlenmiştir.

György ve diğerleri [40] titanyum malzemenin 1064 nm dalgaboyunda, nanosaniye Nd:YAG tek lazer atımı ile etkileşimi sonucu meydana gelen yüzey morfolojisini deneysel olarak incelemişlerdir. Farklı lazer şiddeti değerlerinin oluşan yüzey morfolojisi üzerine olan etkilerini araştırmışlardır. Lazerle aşındırma sonucu titanyum malzeme yüzeyinde oluşan yapılar görüntülenerek değerlendirilmiştir.

György ve diğerleri [41] yaptıkları bir diğer çalışmada ise titanyum malzemenin 1064 nm dalgaboyunda, nanosaniye Nd:YAG çoklu lazer atımları ile etkileşimi sonucu yüzey modifikasyonunu deneysel olarak incelemişlerdir. Lazerle aşındırma sonucu titanyum malzemedeki meydana gelen yüzey yapıları görüntülenerek değerlendirilmiştir.

Mahdieh ve diğerleri [42] 532 nm dalgaboyunda, nanosaniye Nd:YAG lazer kullanarak tek ve çoklu lazer atımları ile alüminyum malzemenin hava ve su ortamlarında etkileşimini incelemişlerdir. Alüminyum hedef malzeme yüzeyinde farklı lazer ve ortam koşullarında lazerle aşındırma sonucu oluşan kraterlerin çapı ve derinlikleri karşılaştırılarak değerlendirilmiştir.

Katı bir hedef malzeme üzerine lazer ışını düşürülmesi sonucu hedef yüzeyinde sıcaklığın artması süreci, erime ve ardından buharlaşma ile devam eder. Bu nedenle lazerle katı malzemenin etkileşimi için birçok model katı malzemenin ısınması, ardından erime ve buharlaşmasını içeren ısıl süreçlere dayanır. Bu modeller lazer ile katı malzeme etkileşimini makroskopik düzeyde yani ısı iletim denklemi ile tanımlarlar. Hedef malzeme içindeki sıcaklık dağılımı ısı iletim denklemi ile hesaplanır [33, 34].

Yilbas ve diğerleri yaptıkları çalışmada [43] nanosaniye lazerle malzeme etkileşiminde meydana gelen ısınma ve faz değişimi fiziksel süreçlerini incelemek için bir model ortaya koymuşlardır. Modelde lazerle etkileşen malzemedeki lazer enerjisinin soğurulmasından kaynaklanan ısınmayı tanımlamak için ısı iletim denklemini ele almışlardır. Erime ve buharlaşma faz değişim süreçleri için ise faz değişiminin olduğu bölgede bir diferansiyel eleman ele alarak bu bölge içinde enerji dengesinden yararlanarak faz değişimini tanımlayan denklemleri türetmişlerdir.

Bozsoki ve diğerleri [44] yaptıkları çalışmada cam üzerinde oluşturulmuş nikel, altın ve bakır ince filmlerin 355 nm dalgaboyunda, nanosaniye atımlı Nd:YAG lazer ile aşındırılmasını deneysel ve teorik olarak incelemişlerdir. Isıl simülasyon yapmak için lazer enerjisinin soğurulması ve malzeme içinde ısı olarak iletilmesini, ısı iletim denklemi kullanarak tanımlamışlardır. İnce film için soğurulma derinliği lazer demet çapından çok küçük olduğu için bir boyutlu ısı iletim modeli kullanımının uygun

olduğunu belirtmişlerdir. Metal yüzeyde erime ve buharlaşma faz değişimlerini de dikkate almışlardır. Denklemleri sonlu fark yöntemiyle sayısal olarak çözmüşlerdir. Lazerle ince film aşındırma işlemi için yüzey sıcaklığı ve eşik akı değerlerini hesaplamışlardır.

Weidman ve diğerleri [45] çift atımlı lazerle oluşturulan plazma spektroskopisi (LIBS) ile demir malzeme yüzeyinde oluşan plazmadan yayılan spektrumunu incelemişlerdir. İlk lazer atımının hedef yüzeyi ile etkileşiminde malzeme içinde sıcaklık dağılımını hesaplamak için bir boyutlu ısı iletim denklemini kullanarak sayısal bir model oluşturmuşlardır.

Bogaerts ve diğerleri [46] nanosaniye lazerle aşındırma ve kimyasal analiz işleminde lazerle malzeme etkileşimi sırasında meydana gelen ısınma, faz değişimi ve plazma oluşumu fiziksel süreçlerini incelemek için bir model ortaya koymuşlardır. Bu modelde hedef malzemenin lazer enerjisini soğurması dolayısıyla ısınmasını tanımlamak ve malzeme içinde sıcaklık dağılımını belirlemek için bir boyutlu ısı iletim denklemini kullanmışlardır.

1.5. Sonuçlar

Bu bölümde lazerlerin ilk üretilmesinden bu yana yüksek şiddette ışınma üretebilmesinin ısınma, erime ve buharlaşmayı içeren birçok uygulamanın gelişmesine olanak sağladığı belirtilerek günümüzde yaygın olarak kullanılan lazerle malzeme etkileşimine dayanan uygulamalar anlatıldı. Geleneksel uygulamalara göre lazerlerin sahip olduğu avantajlar belirtildi. Lazerle malzeme etkileşimi sırasında lazer ışını malzeme yüzeyine çarptığında lazer ışınının enerjisinin malzeme tarafından soğrulma mekanizmasına yer verildi. Ardından nanosaniye lazerle metal malzemelerin etkileşim mekanizması ve bu sırada meydana gelen fiziksel olaylar anlatıldı. Nanosaniye atımlı lazerlerle malzeme etkileşimine dayanan uygulamalar ve bu uygulamalarda meydana gelen süreçlerle işlem sonrası oluşan yapıların incelenmesi için yapılan deneysel ve teorik çalışmalardan örnekler verildi.

Günümüzde lazerle aşındırma sürecine dayanan birçok uygulama yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu uygulamalarda malzemelerin lazerle işlenmesi, lazerle malzeme

etkileşimi sırasında meydana gelen erime ve buharlaşma oranlarına oldukça bağlı olduğundan lazerle işleme sonucu yapılan üretimin geliştirilmesi erime ve ardından gerçekleşen buharlaşma süreçlerinin araştırılmasını gerektirir. Aynı zamanda, lazerle malzeme işleme süreci lazer şiddeti, lazer atım uzunluğu gibi lazer parametreleri ile malzeme özelliklerine bağlıdır. Bu parametrelere bağlı olarak lazer malzeme etkileşimi süreci sırasında farklı türde fiziksel mekanizmalar meydana gelebilir. Bu sebeple lazerle aşındırma sürecine dayanan uygulamalara ışık tutması, bu uygulamaların kontrol edilebilmesi ve geliştirilebilmesi açısından bu süreçte meydana gelen fiziksel olayların mekanizmasının hem deneysel hem de teorik olarak incelenmesi gerekir. Ayrıca, lazerle etkileşim sürecinin matematiksel modellenmesi deneysel maliyeti azaltır ve meydana gelen fiziksel olayların daha iyi anlaşılmasını sağlar.

2. LAZER MALZEME ETKİLEŞİMİNİN MATEMATİKSEL MODELLEMESİ

Lazerler yüksek şiddetli atımlar üretebildiğinden ısınma, erime ve buharlaşma süreçlerini içeren birçok uygulamada kullanılabilirler. Lazerin metal malzeme işlemede kullanılabilmesini sağlayan özelliği malzeme üzerinde belirli bir bölgeye birim alan başına çok yüksek güç gönderebilmesidir. Geleneksel ısı kaynakları birim alan başına çok daha düşük güç gönderirler ve belirli bir bölgeye iyi odaklanamazlar [1, 6].

Lazer ışınması bir hedef malzeme yüzeyine düşürüldüğünde ışınların bir kısmı malzeme tarafından soğrulur, bir kısmı ise yüzeyden yansıtılır. Soğrulan enerji hedef malzeme yüzeyini ısıtmaya başlar. Yüksek güçlü lazer ışın demetinin soğrulmasından kaynaklanan ısınma süreci oldukça hızlı gerçekleşebilir ve böylece yüzey sıcaklığı çok kısa sürede erime sıcaklığına erişir. Lazerle erime süreci kaynak işlemi uygulamalarında ilgi konusudur. Kaynak uygulamalarında genellikle yüzeyde buharlaşmanın olmadığı koşullar altında maksimum erime elde edilmek istenir. Buharlaşma olmadan erime, lazer parametrelerinin yalnızca çok dar bir değer aralığında elde edilir. Eğer birim alan başına düşen lazer gücü çok yüksek ise yüzey buharlaşmaya başlar. Soğrulan enerjinin hedef malzemeyi buharlaştırmasıyla yüzeyden malzeme tahliyesi yani aşındırma gerçekleşir ve yüzeyde krater oluşur [1].

Lazer ışını ile bir malzemenin erimesi malzeme içinde ısı akışına bağlıdır. Isı akışı ise ısı iletkenliğe (κ) bağlıdır. Fakat ısı akışını etkileyen tek faktör iletkenlik değildir, çünkü sıcaklık değişme oranı malzemenin öz ısısına (c) da bağlıdır. Isınma oranı, ρc ile ifade edilen birim hacim başına öz ısı ile ters orantılıdır. Burada ρ malzeme yoğunluğunu ifade eder. Buna göre ısı akışı için önemli faktör ısı yayınımdır ($\kappa/\rho c$). Bütün kararlı olmayan durum ısı akış problemlerinde malzemenin ısı enerjisi ne kadar çabuk alacağı ve iletceğini ısı yayınımları belirler [1].

Lazer kullanılarak malzeme yüzeyinin erimesi ve ardından buharlaşması endüstride geniş çaplı uygulamalarda yer alır. Metal malzemelerin lazerle işlenmesi lazerle malzeme etkileşim mekanizmasının detaylı olarak araştırılmasını gerektirir. Çünkü endüstriyel malzemelerin lazerle işlenmesinin, erime ve buharlaşma oranlarına oldukça bağlı olması dolayısıyla lazerle işlemeyle ortaya çıkan ürünün geliştirilmesi erime ve buharlaşma süreçlerinin araştırılmasını gerektirir. Bu da genellikle karmaşık bir iştir ve hem lazerin hem de işlenen malzemenin özelliklerine bağlıdır. Bu nedenlerle lazerle etkileşme sürecinin modellenmesi deneysel maliyeti azaltır ve meydana gelen fiziksel süreçlerin daha iyi anlaşılmasını sağlar. Ayrıca yeterli güce sahip bir lazer demeti bir metal malzeme ile etkileştiğinde, etkileşim süresine ve enerji depolanma oranına bağlı olarak farklı fiziksel süreçler meydana gelebilir. Bu sebeple enerji iletim süreci modellenirken bu süreç dikkatlice tanımlanmalıdır [1].

Bu bölümde, Gauss formunda şiddet dağılımına sahip nanosaniye süreli bir lazer demetinin bir metal yüzeye uygulanması işleminde lazer demeti ile katı malzemenin etkileşimi süreci sırasında meydana gelen ısınma, erime ve buharlaşma süreçlerini sayısal olarak incelemek için matematiksel bir model ele alındı. Bu süreçlerin modellenmesi için ele alınan ısı iletimi ve faz değişimi denklemlerinin çözümünde sonlu fark sayısal çözüm yöntemi kullanıldı.

Bu bölümün birinci kısmında nanosaniye lazerle metal malzemelerin işlenmesi süreci için genel bir model sunuldu. Nanosaniye lazerle metal malzeme etkileşimi sürecinde meydana gelen ısı iletimi olayını ifade eden denklem ve probleme uygun sınır koşulları belirtildi. Metal malzemenin ısınmasının ardından gerçekleşen faz değişimi (erime ve buharlaşma) süreçlerini tanımlayan denklemler verildi.

Bu bölümün ikinci kısmında ise, birinci kısmında belirtilen probleme uygun sayısal çözüm yöntemleri sunuldu ve problemi ifade eden denklemlerin sayısal yöntemler kullanılarak yapılan çözümü verildi.

2.1. Nanosaniye Lazerle Metal Malzeme Etkileşimi İçin Isı İletim Problemi

Lazerle katı malzeme etkileşimi için çok sayıda model malzemenin ısınması ve bunu izleyen erime ve buharlaşma ısıl süreçlerine dayanır. Bu modeller lazerle katı

etkileşimini makroskopik ölçekte yani ısı iletim denklemiyle tanımlarlar [33, 34]. Bu varsayım özellikle nanosaniye atımlı lazerle metallerin etkileşimi için doğrudur [46]. Nanosaniye lazer atımı ile metallerin etkileşmesi sürecinde metallerde lazer ışımalarının enerjisi elektronlarla etkileşim aracılığıyla soğrulur. Bir foton bir elektron tarafından soğrulur ve bu elektron iletim bandında daha yüksek bir enerji seviyesine çıkar. Uyarılmış elektronlar örgü fononlarıyla çarpışmalar gerçekleştirirler ve böylece soğrulan enerji örgüye aktarılır. Metallerde enerji relaksasyon zamanı 10^{-13} s civarında olduğundan [19, 31, 46], nanosaniye atımlı lazerle etkileşme için optik enerjinin hızlıca ısıya dönüştüğü kabul edilebilir. Bu durumda ısınma periyodu boyunca metal malzeme içinde meydana gelen enerji iletimi dengededir. Sonuç olarak elektron ve örgü yapısının sıcaklıkları özdeş hale gelir [1, 32]. Bu nedenle nanosaniye ısınma süreleri sırasında meydana gelen fiziksel süreçleri tanımlamak için sıcaklık ve ısı iletimi kavramları uygulanabilir [1, 31, 46]. Diğer yandan, pikosaniye ve femtosaniye atımlı lazerlerle malzeme etkileşimi için elektron enerjisinin hızlıca ısıya dönüştüğü kabul edilemez ve elektron sıcaklığı ile örgü sıcaklığını tanımlayan iki sıcaklıklı bir modele ihtiyaç duyulur [1, 35, 36].

Nanosaniye atımlı lazerle metal malzemenin etkileşimi sırasında meydana gelen ısınma sürecini modellemek için bazı kabullenmeler yapılır [1, 43]. Öncelikle, işlem sırasında malzeme ve lazer, her ikisi de durgun haldedir. Katı malzeme izotropik yapıdadır, bundan dolayı malzeme özellikleri sabit olarak ele alınabilir. Malzemenin ısıl özelliklerinin sıcaklıktan bağımsız olduğu kabul edilebilir. Birçok metal için oldukça geniş bir sıcaklık aralığında değişimler nispeten küçük olduğundan bu kabullenme yapılabilir [31, 46]. Malzeme, lazer ışınması için belirli bir soğurma derinliğine sahiptir. Lazer demeti katı ve sıvı fazlar tarafından soğrulur ve ısı kaynağı olarak davranır. Yüzeiden taşınım (konveksiyon) veya ışınma yoluyla ısı kaybı yoktur. Böylece yalıtılmış yüzey sınır koşulu kabul edilir. Lazer demet şiddeti Gauss formunda dağılıma sahiptir. Malzeme yarı-sonsuz olarak kabul edilir. Çünkü hedef malzemenin kalınlığından dolayı ısı iletimi malzemenin taban noktasına ulaşmayacağından bu noktada sıcaklık başlangıçtaki sıcaklıkta değişmeden sabit kalır. Faz değişim süreci sırasında katı ve sıvı fazlar aynı soğurma katsayısına sahiptir. Malzeme buharlaşmaya başladığında oluşan sıvı-gaz arayüzü bir oyuk oluşturarak malzeme içine doğru ilerler. Oluşan gaz fazında iyonlaşma yoktur.

Malzemenin kazandığı iç enerjiyle karşılaştırıldığında ihmal edilebilecek kadar küçük olduğundan, oluşan oyuktan ışıma ve taşınım ile ısı kayıpları ihmal edilir. Malzeme, tek bir erime ve buharlaşma sıcaklığına sahip bir maddedir [1, 43].

Buna göre ele alınan modelde metal hedef yüzeyine odaklanan Gauss formunda şiddet dağılımına sahip bir lazer demeti ısı kaynağı olarak davranır ve katı malzemenin iletim yoluyla ısınması, yüzeyde yalıtılmış sınır koşuluyla birlikte ele alınır. Isınma süreci sırasında sıcaklık malzemenin faz değiştirme sıcaklıklarına (erime ve buharlaşma sıcaklıkları) ulaştığında, faz değişimi ele alınır; yani katı malzemenin erimesi ve ardından buharlaşması uygun sınır koşullarıyla birlikte ısı iletiminin ana denkleminde uygulanır [1, 43].

2.1.1. Isı iletim denklemi

Katı bir hedef malzeme üzerine lazer ışını düşürülmesi sonucu hedef yüzeyinde sıcaklığın artması süreci, erime ve ardından buharlaşma ile devam eder. Hedef malzeme içindeki sıcaklık dağılımı ısı iletim denklemi ile hesaplanır. Hedef içindeki soğrulma derinliği, α soğrulma katsayısı olmak üzere, $\delta = 1/\alpha$ şeklinde tanımlanır [6, 19, 46]. Bu değer lazer demet çapına göre çok küçük olduğu için ısı iletim denklemi bir boyutta çözülebilir. Örneğin Cu elementi için soğrulma katsayısı $\alpha = 7.44 \times 10^7 \text{ m}^{-1}$ değerindedir. Buna göre bakır elementi ile etkileşen lazer demeti için soğrulma uzunluğu 10 nm civarında olur. Bu değer, tipik olarak 100 μm civarında olan lazer demeti çapından çok küçük olduğundan ısı iletim denklemi bir boyutta çözülebilir [31, 46-49].

Yüzeyine Gauss formunda şiddet dağılımına sahip bir lazer demeti odaklanan, sabit özelliklere sahip bir katı malzeme için ısı iletim denklemi,

$$\rho c_p \frac{\partial T(x,t)}{\partial t} = \kappa \frac{\partial^2 T(x,t)}{\partial x^2} + \alpha I(x,t) \quad (2.1)$$

şeklinde yazılabilir [46]. Burada T hedef malzeme içindeki sıcaklığı temsil eder; x yüzeye göre konum, t zamandır. κ , c_p , ρ ve α ise sırasıyla hedef malzemenin ısı iletkenliği, öz ısısı, kütle yoğunluğu ve soğrulma katsayısını ifade eder. Burada hedef malzemenin özelliklerinin sıcaklıktan bağımsız olduğu kabul edilmiştir. Denklem

(2.1)'in sağ tarafındaki ikinci terim lazer enerjisinin soğrulmasıyla elde edilen ısı kaynağını temsil eder [46]. $I(x,t)$ zamanın ve hedefteki konumun fonksiyonu olarak lazer şiddetini ifade eder ve,

$$I(x,t) = I_0(t) \exp(-\alpha x)(1 - \mathcal{R}) \quad (2.2)$$

şeklinde yazılabilir [46]. Burada \mathcal{R} yüzeyin yansıtıcılığıdır. $I_0(t)$ ise yüzeye gelen lazer şiddetidir ve τ lazer atımının zamansal yarı maksimumdaki tam çizgi genişliği olmak üzere,

$$I_0(t) = I_0 \exp \left[-4 \ln 2 \left(\frac{t}{\tau} - 1.5 \right)^2 \right] \quad (2.3)$$

şeklinde ifade edilir [50, 51].

2.1.2. Başlangıç ve sınır koşulları

Başlangıçta, lazer ışını ile etkileşiminden önce, hedef malzemenin her noktasında sıcaklığın sabit ve belirli bir değere sahip olduğu kabul edilir. Buna göre başlangıç koşulu,

$$T = T_0 \text{ (belirli) } , \quad t = 0 \text{ 'da (başlangıçta)} \quad (2.4)$$

şeklindedir [1,43].

Yarı-sonsuz olarak kabul edilen malzemenin lazerle etkileşimi sırasında yüzeyden taşınım (konveksiyon) veya ışınım yoluyla ısı kaybı yoktur. Böylece yalıtılmış yüzey sınır koşulu kabul edilir. Ayrıca malzeme yarı-sonsuz kabul edildiğinden taban noktasında sıcaklık değişmeyecek ve başlangıçtaki sıcaklıkta sabit kalacaktır. Buna göre sınır koşulları,

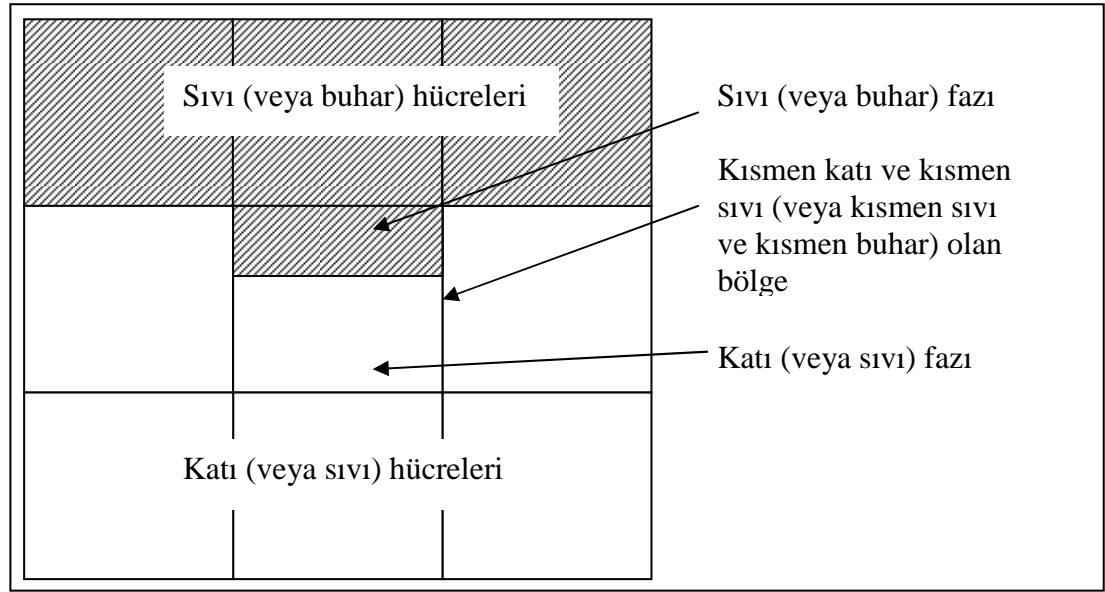
$$\frac{\partial T}{\partial x} = 0 \quad , \quad x = 0 \text{ 'da (yüzeyde)} \quad (2.5)$$

$$T = T_0 \text{ (belirli) } , \quad x \rightarrow \infty \text{ 'da (çok uzakta)} \quad (2.6)$$

şeklindedir [1,43].

2.1.3. Faz değişimi

Katı bir hedef malzeme üzerine lazer ışını düşürülmesi sonucu hedef yüzeyinde sıcaklık artar. Sıcaklık malzemenin faz değişim sıcaklıklarına (erime ve buharlaşma sıcaklıkları) ulaştığında faz değişimi ele alınır. Hedef malzemenin tek bir erime ve buharlaşma sıcaklığına sahip olduğu kabul edilir. Buna göre, hedef malzeme erime veya buharlaşma sıcaklığına ulaştığında, faz değişimi sabit bir sıcaklıkta gerçekleşir [1, 43].



Şekil 2.1. Faz değişiminin şematik gösterimi [1, 43]

Faz değişimi süreci bu çalışmada Yilbas'ın [43] uyguladığı biçimde ele alındı. Buna göre, Şekil 2.1'de gösterildiği gibi faz değişimi gerçekleşmeye başladığında, faz değişiminin meydana geldiği bölge boyunca kısmen katı ve kısmen sıvı veya kısmen sıvı ve kısmen buhar olan bir bölge meydana gelir. Buna dayanarak faz değişimi problemi formüle edilirken faz geçişinin olduğu iki fazlı bir bölge oluşumu ele alınır [1, 43].

Bu problem Yilbas ve diğerleri [43] tarafından şöyle formüle edilmiştir: Hedef malzeme içinde Şekil 2.1'deki gibi erime sürecinde olan bir diferansiyel eleman ele alınır. Eleman içinde bulunan erimiş kütle oranı χ_e ile gösterilirse, T_e erime sıcaklığındaki ΔV hacimli diferansiyel elemanın ΔU enerji değişimi,

$$\Delta U = \rho_e \Delta V [\chi_e (L_e + c_{pe} (T_e - T_{ref})) + c_{pk} (1 - \chi_e) (T_e - T_{ref})] \quad (2.7)$$

şeklinde yazılabilir [43]. Burada,

$$\chi_e = \frac{m_e}{m_e + m_k} \quad (2.8)$$

şeklinde [43]. T_{ref} entalpi için referans sıcaklığı, L_e erime ısısı, χ_e erimiş kütle oranı, m_e elemandaki sıvı kütlesi ve m_k elemandaki katı kütlesidir. Erime sıcaklığında, erimiş malzemenin öz ısısının katı malzemeninkiyle aynı olduğu kabul edilerek ($c_{pk} = c_{pe}$, $T = T_e$ iken), Denklem (2.7),

$$\Delta U = \rho_e \Delta V [\chi_e L_e + c_{pe} (T_e - T_{ref})] \quad (2.9)$$

şeklinde indirgenebilir [43]. Denklem (2.9) birim hacim için,

$$\frac{\Delta U}{\Delta V} = \Delta u = \rho_e [\chi_e L_e + c_{pe} (T_e - T_{ref})] \quad (2.10)$$

biçiminde yazılır [43]. Denklem (2.10)'un zamana göre türevi alınırsa $c_{pe} (T_e - T_{ref}) = \text{sabit}$ olduğundan,

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \rho_e L_e \frac{\partial \chi_e}{\partial t} \quad (2.11)$$

elde edilir [43]. Denklem (2.1)'deki $\rho c_p (\partial T / \partial t)$ 'nin de birim hacim başına entalpi olduğu belirtilerek,

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial u}{\partial t} \quad (2.12)$$

yazılır [43]. Denklem (2.11), Denklem (2.1)'de yerine yazılırsa faz değişim süreci (erime) içinde bulunan diferansiyel eleman için enerji denklemi,

$$\rho_e L_e \frac{\partial \chi_e}{\partial t} = \kappa_e \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \alpha I(x, t) \quad (2.13)$$

olarak elde edilir [43]. Denklem (2.13), sıcaklık hedef malzemenin erime sıcaklığına ($T = T_e$) geldiğinde ve $0 \leq \chi_e \leq 1$ olduğu durumda, diferansiyel elemanlara (hedef malzeme içinde düğüm noktalarıyla tanımlanan hücrelere) uygulanabilir. Buna göre, burada $0 \leq \chi_e \leq 1$ olan hücrelerin sıcaklığı erime sıcaklığında ($T = T_e$) tutulur. χ_e değeri 1 değerini aştığında ($\chi_e > 1$), Denklem (2.13) ele alınan diferansiyel elemana uygulanamaz. Bu durumda, sıvının ısınmasıyla sıcaklık artışını belirlemek için Denklem (2.1) uygulanır. Böylece sıvının ısınma süreci başlar ve sıcaklık buharlaşma sıcaklığına ulaşana kadar ısınma süreci devam eder [43]. Sıcaklığın buharlaşma sıcaklığına ulaştığı durumda, tekrar iki fazlı bölge ele alınmalıdır. Bu durumda, Denklem (2.13) buharlaşma sürecinde bulunan bir diferansiyel eleman için,

$$\rho_b L_b \frac{\partial \chi_b}{\partial t} = \kappa_b \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \alpha I(x,t) \quad (2.14)$$

şeklinde değiştirilebilir [43]. Denklem (2.14) kısmen sıvı ve kısmen buhar bölgede $T = T_b$ ve $0 \leq \chi_b \leq 1$ olduğu durumda uygulanabilir. Buna göre, $0 \leq \chi_b \leq 1$ olan hücrelerin sıcaklığı buharlaşma sıcaklığında ($T = T_b$) tutulur. Burada χ_e değeri, diferansiyel elemandaki buhar fazı oranını gösteren χ_b ile yer değiştirmiştir [43].

Denklem (2.13) ve Denklem (2.14) hedef malzeme içinde katı-sıvı ve sıvı-buhar arayüzlerinin görelî konumunu belirler. Sıvı-buhar arayüzü buharlaşma süreci sonrasında meydana gelen oyuguñ biçimini ve büyüklüğünü belirler [1].

2.2. Sayısal Çözüm Yöntemi

Önceki kısımda hedef malzemenin ısınması ve faz değişimi süreçlerinin modeli tanımlandı. Bu süreçler parabolik kısmi diferansiyel denklemlerle ifade edilir. Başlangıç ve sınır koşulları belirtilen bu parabolik kısmi diferansiyel denklemler sayısal yöntemler kullanılarak çözümlür. Bunun için denklemin çözümünün yapılacağı bölgeyi kaplayacak şekilde bir kafes (ağ) çizilir ve bu kafes noktalarındaki (ağ veya düğüm noktaları da denir) sıcaklık değerleri hesaplanır. Buna göre sıcaklık dağılımları düğüm noktalarındaki sıcaklık değerleri cinsinden ifade edilir. Belirtilen parabolik kısmi diferansiyel denklemlere sayısal çözüm yöntemleri uygulandığında

ana diferansiyel denklemden sıcaklığın kafes noktalarındaki değerleri için bir cebirsel denklemler sistemi türetilir. Elde edilen cevabın doğruluğu ve detayı, düğüm noktalarının ve zaman aralığının uygun seçilmesine bağlıdır. Çeşitli sayısal analiz teknikleri vardır. Bunlar arasında en çok kullanılan tekniklerden birisi sonlu fark yöntemidir.

2.2.1 Sonlu fark denklemleri

Sayısal yöntemler kullanıldığında bütün bölgeyi kaplayacak şekilde bir kafes (ağ) çizilir. xt düzleminde bir kafes veya ağ yapı, i ve j tamsayılar ve (x_0, t_0) bir referans nokta olmak üzere $(x_i, t_j) = (x_0 + ih, t_0 + jk)$ noktaları kümesidir. (x_i, t_j) 'ye ağ noktaları veya düğüm noktaları denir. Pozitif h ve k sayılarına sırasıyla x ve t ağ boyutu denir. Bu düğüm noktalarındaki sıcaklık değerleri ise $u(x_i, t_j)$ şeklinde belirtilir. Kısaca $u_{i,j} \equiv u(x_i, t_j)$ alt indis gösterimi uygundur ve yaygın olarak kullanılır [52, 53].

Bir $u(x,t)$ fonksiyonunun çeşitli kısmi türevleri bir fark oranı ile ifade edilebilir. $\partial u / \partial t$ için ileri fark,

$$\frac{\partial u}{\partial t}(x_i, t_j) \cong \frac{u(x_i, t_j + k) - u(x_i, t_j)}{k}; \quad (2.15)$$

geri fark,

$$\frac{\partial u}{\partial t}(x_i, t_j) \cong \frac{u(x_i, t_j) - u(x_i, t_{j-1})}{k}; \quad (2.16)$$

merkezi fark,

$$\frac{\partial u}{\partial t}(x_i, t_j) \cong \frac{u(x_i, t_j + k) - u(x_i, t_j - k)}{2k}; \quad (2.17)$$

$\partial u / \partial x$ için ileri fark,

$$\frac{\partial u}{\partial x}(x_i, t_j) \cong \frac{u(x_i + h, t_j) - u(x_i, t_j)}{h}; \quad (2.18)$$

geri fark,

$$\frac{\partial u}{\partial x}(x_i, t_j) \cong \frac{u(x_i, t_j) - u(x_i - h, t_j)}{h}; \quad (2.19)$$

merkezi fark,

$$\frac{\partial u}{\partial x}(x_i, t_j) \cong \frac{u(x_i + h, t_j) - u(x_i - h, t_j)}{2h}; \quad (2.20)$$

ve $\partial^2 u / \partial x^2$ için merkezi fark,

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2}(x_i, t_j) \cong \frac{u(x_i + h, t_j) - 2u(x_i, t_j) + u(x_i - h, t_j)}{h^2}; \quad (2.21)$$

şeklinde ifade edilir [52, 53]. Tek boyutlu ısı iletim denklemi,

$$\frac{\partial u}{\partial t}(x_i, t_j) = a^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}(x_i, t_j) \quad (2.22)$$

biçiminde ifade edilebilir ve $(x_i, t_j) = (ih, jk)$, $(i = 0, 1, 2, \dots, N, j = 0, 1, 2, \dots)$ ağı için sonlu fark eşitlikleri kullanılarak fark denklemleri elde edilir.

Denklem (2.22)'ye açık (ileri fark) yöntem uygulandığında,

$$\frac{U_{i,j+1} - U_{i,j}}{k} = a^2 \frac{U_{i+1,j} - 2U_{i,j} + U_{i-1,j}}{h^2} \quad (2.23)$$

elde edilir ve bu denklem düzenlendiğinde,

$$U_{i,j+1} = rU_{i+1,j} + (1 - 2r)U_{i,j} + rU_{i-1,j} \quad , \quad \left(r = a^2 k / h^2\right) \quad (2.24)$$

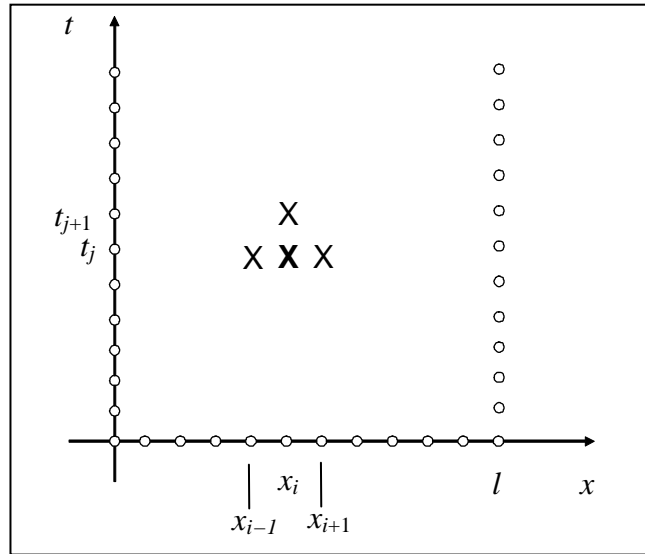
biçiminde yazılır [52, 53]. Burada $U_{i,j}$, $u(x_i, t_j)$ 'ye yaklaşımdır. Sistemi ifade eden matris,

$$A = \begin{bmatrix} (1-2r) & r & 0 & \dots & 0 \\ r & (1-2r) & r & \ddots & \vdots \\ 0 & \ddots & \ddots & \ddots & 0 \\ \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & r \\ 0 & \dots & 0 & r & (1-2r) \end{bmatrix} \quad (2.25)$$

olarak yazılır [52, 53]. İleri fark yöntemi koşullu kararlı bir yöntemdir. Bu yöntemin kararlılığı malzeme özellikleri, zaman adım aralığı k ve uzay adım aralığı h arasındaki bağıntıya bağlıdır. Ağ sabitleri h ve k ,

$$a^2 \frac{k}{h^2} \leq \frac{1}{2} \quad (2.26)$$

eşitsizliğini sağlamalıdır. Çünkü ileri fark yöntemi ile yapılan çözüm kullanılarak gerçekleştirilen hesaplamalarda elde edilen sonucun kararlı kalması için ağ sabitleri h ve k , Denklem (2.26) ile verilen koşulu sağlayacak şekilde seçilmelidir [52, 53].



Şekil 2.2. İleri fark yönteminde örgü noktaları [53]

İleri fark yöntemi, (x_{i-1}, t_j) , (x_i, t_j) , (x_i, t_{j+1}) ve (x_{i+1}, t_j) örgü noktalarını içerir ve kafes yapısında Şekil 2.2'de X ile işaretlenmiş örgü noktalarındaki yaklaşımları içerir. Probleme ilgili sınır ve başlangıç koşulları, Şekil 2.2'de yuvarlak içine alınmış örgü noktalarındaki bilgiyi verir. Buna göre, başlangıç ve sınır koşullarından elde edilen bilgi kullanılarak, örgü noktalarındaki yaklaşımları bulmak için açık yöntem kullanılabilir [53].

Denklem (2.22)'ye kapalı (geri fark) yöntem uygulandığında,

$$\frac{U_{i,j+1} - U_{i,j}}{k} = a^2 \frac{U_{i+1,j+1} - 2U_{i,j+1} + U_{i-1,j+1}}{h^2} \quad (2.27)$$

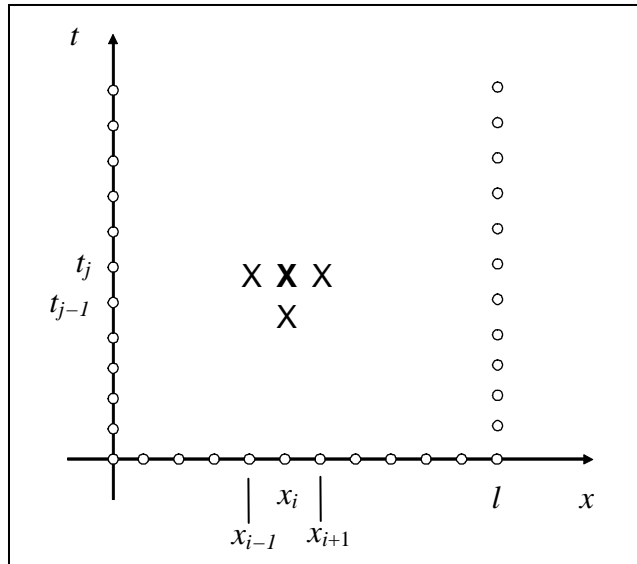
elde edilir ve bu denklem düzenlendiğinde,

$$U_{i,j} = -rU_{i+1,j+1} + (1+2r)U_{i,j+1} - rU_{i-1,j+1} \quad , \quad (r = a^2k/h^2) \quad (2.28)$$

biçiminde yazılır [52, 53]. Burada $U_{i,j}$, $u(x_i, t_j)$ 'ye yaklaşımdır. Sistemi ifade eden matris,

$$\begin{bmatrix} (1+2r) & -r & 0 & \cdots & 0 \\ -r & (1+2r) & -r & \ddots & \vdots \\ 0 & \ddots & \ddots & \ddots & 0 \\ \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & -r \\ 0 & \cdots & 0 & -r & (1+2r) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{1,j} \\ U_{2,j} \\ \vdots \\ \vdots \\ U_{N-1,j} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_{1,j-1} \\ U_{2,j-1} \\ \vdots \\ \vdots \\ U_{N-1,j-1} \end{bmatrix} \quad (2.29)$$

şeklinde yazılır [52, 53]. Geri fark yönteminde, ileri fark yöntemindeki kararlılık problemleri yoktur. Yöntem kararlıdır ve h , k seçiminden bağımsızdır. Buna göre geri fark yöntemi koşulsuz kararlı bir yöntemdir [53].



Şekil 2.3. Geri fark yönteminde örgü noktaları [53]

Geri fark yöntemi tipik bir adımda (x_i, t_j) , (x_i, t_{j-1}) , (x_{i-1}, t_j) ve (x_{i+1}, t_j) örgü noktalarını ve kafes yapısında Şekil 2.3'de X ile işaretlenmiş örgü noktalarındaki yaklaşımları içerir [53]. Probleme ilgili sınır ve başlangıç koşulları, Şekil 2.3'de yuvarlak içine alınmış örgü noktalarındaki bilgiyi verir ve Denklem (2.21)'i çözmek için kapalı yöntem kullanılır [53].

2.2.2. İleri fark yöntemi ile çözüm

Denklem (2.1)'in düzenlenmesiyle elde edilen,

$$\frac{\partial T(x,t)}{\partial t} = \frac{\kappa}{\rho c_p} \frac{\partial^2 T(x,t)}{\partial x^2} + \frac{\alpha}{\rho c_p} I(x,t) \quad (2.30)$$

ısı iletim denkleminin, sonlu fark eşitlikleri ile açık (ileri fark) yöntem kullanılarak,

$$\frac{U_{i,j+1} - U_{i,j}}{k} = a^2 \frac{U_{i+1,j} - 2U_{i,j} + U_{i-1,j}}{h^2} + \frac{\alpha}{\rho c_p} I_{i,j}, \quad (i=0,1,2,\dots,N, j=0,1,2,\dots) \quad (2.31)$$

şeklinde fark denklemleri elde edilir. Burada $a^2 = \kappa/(\rho c_p)$ şeklindedir ve $U_{i,j}$, $u(x_i, t_j)$ 'ye yaklaşımdır. Denklem (2.31) düzenlendiğinde,

$$U_{i,j+1} = rU_{i+1,j} + (1-2r)U_{i,j} + rU_{i-1,j} + \frac{k\alpha}{\rho c_p} I_{i,j} \quad (2.32)$$

elde edilir. Burada $r = (a^2 k)/h^2$ şeklindedir. İleri fark yöntemi koşullu kararlı bir yöntemdir. Kararlılık koşuluna göre ağ sabitleri h ve k ,

$$a^2 \frac{k}{h^2} \leq \frac{1}{2} \quad (2.33)$$

eşitsizliğini sağlayacak şekilde seçilmelidir.

Yüzeydeki $\frac{\partial T}{\partial x} = 0$ sınır koşulunu uygulamak için $(x_i, t_j) = (x_0 + ih, t_0 + jk)$ ($i = -1, 0, 1, 2, \dots, N, j = 0, 1, 2, \dots$) olmak üzere x_{-1} hayali noktası kullanılarak $u_x(0,t)=0$ koşulu,

$$\frac{U_{1,j} - U_{-1,j}}{2h} = 0 \quad (2.34)$$

şeklinde merkezi fark ile yaklaştırılır [52]. Denklem (2.32) ile verilen fark denkleminde göre,

$$i=0 \quad \text{için} \quad U_{0,j+1} = rU_{i,j} + (1-2r)U_{0,j} + rU_{-1,j} + \frac{k\alpha}{\rho c_p} I_{0,j} \quad (2.35)$$

yazılır. Buradaki $U_{-1,j}$ Denklem (2.34) kullanılarak yok edilir ve,

$$U_{0,j+1} = (1-2r)U_{0,j} + 2rU_{1,j} + \frac{k\alpha}{\rho c_p} I_{0,j} \quad (2.36)$$

yazılır. Böylece yüzeydeki sınır koşulu uygulanmış olur. Diğer sınır koşulu $T = T_0$, $x \rightarrow \infty$ 'da (çok uzakta) ise $U_{N,j} = T_0$ yazılarak uygulanır. Böylece Denklem (2.32)'den $U_{i,j+1}$ bilinmeyenleri için lineer denklemler sistemi,

$$i=0 \quad \text{için} \quad U_{0,j+1} = (1-2r)U_{0,j} + 2rU_{1,j} + \frac{k\alpha}{\rho c_p} I_{0,j}$$

$$i=1 \quad \text{için} \quad U_{1,j+1} = rU_{2,j} + (1-2r)U_{1,j} + rU_{0,j} + \frac{k\alpha}{\rho c_p} I_{1,j}$$

(2.37)

$$i=N-1 \quad \text{için} \quad U_{N-1,j+1} = rU_{N,j} + (1-2r)U_{N-1,j} + rU_{N-2,j} + \frac{k\alpha}{\rho c_p} I_{N-1,j}$$

$$i=N \quad \text{için} \quad U_{N,j} = T_0$$

şeklinde elde edilir. Bu denklemleri kullanarak yüzeyine lazer demeti odaklanan hedef malzemedeki sıcaklık dağılımını belirlemek amacıyla düğüm noktalarındaki sıcaklık değerlerini hesaplamak için oluşturulan algoritma Fortran programlama diliyle yazıldı.

2.2.3. Geri fark yöntemi ile çözüm

Denklem (2.1)'in düzenlenmesiyle elde edilen,

$$\frac{\partial T(x,t)}{\partial t} = \frac{\kappa}{\rho c_p} \frac{\partial^2 T(x,t)}{\partial x^2} + \frac{\alpha}{\rho c_p} I(x,t) \quad (2.38)$$

ısı iletim denkleminin, sonlu fark eşitlikleri ile kapalı yöntem kullanılarak,

$$\frac{U_{i,j} - U_{i,j-1}}{k} = a^2 \frac{U_{i+1,j} - 2U_{i,j} + U_{i-1,j}}{h^2} + \frac{\alpha}{\rho c_p} I_{i,j-1}, \quad (i=0,1,2,\dots,N, j=0,1,2,\dots) \quad (2.39)$$

şeklinde fark denklemleri elde edilir. Burada $a^2 = \kappa/(\rho c_p)$ şeklindedir ve $U_{i,j}$, $u(x_i, t_j)$ 'ye yaklaşımdır. Denklem (2.39) düzenlendiğinde,

$$-rU_{i-1,j} + (1+2r)U_{i,j} - rU_{i+1,j} = U_{i,j-1} + \frac{k\alpha}{\rho c_p} I_{i,j-1} \quad (2.40)$$

elde edilir. Burada $r = (a^2 k)/h^2$ şeklindedir.

Yüzeydeki $\frac{\partial T}{\partial x} = 0$ sınır koşulunu uygulamak için $u_x(0,t)=0$ koşulu,

$$\frac{U_{1,j} - U_{-1,j}}{2h} = 0 \quad (2.41)$$

şeklinde merkezi fark ile yaklaştırılır [52]. Denklem (2.40) ile verilen fark denkleminde göre,

$$i=0 \quad \text{için} \quad -rU_{-1,j} + (1+2r)U_{0,j} - rU_{1,j} = U_{0,j-1} + \frac{k\alpha}{\rho c_p} I_{0,j-1} \quad (2.42)$$

yazılır. Buradaki $U_{-1,j}$ Denklem (2.41) kullanılarak yok edilir ve,

$$(1+2r)U_{0,j} - 2rU_{1,j} = U_{0,j-1} + \frac{k\alpha}{\rho c_p} I_{0,j-1} \quad (2.43)$$

yazılır. Böylece yüzeydeki sınır koşulu uygulanmış olur. Buna göre sistemi ifade eden matris,

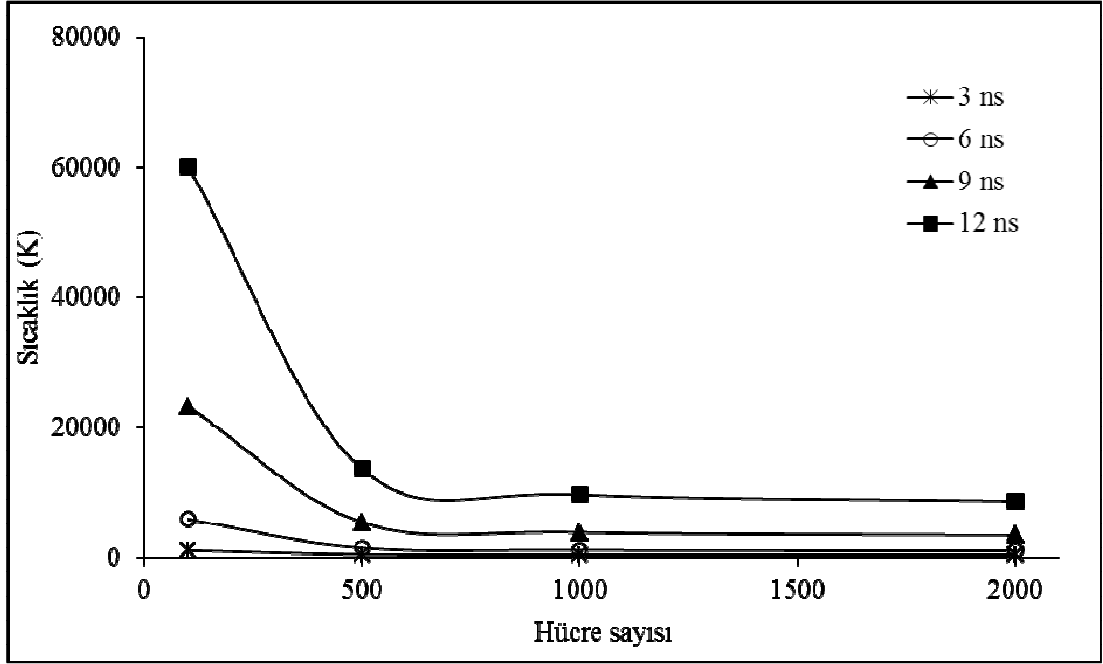
$$\begin{bmatrix} (1+2r) & -2r & 0 & \cdots & 0 \\ -r & (1+2r) & -r & \ddots & \vdots \\ 0 & \ddots & \ddots & \ddots & 0 \\ \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & -r \\ 0 & \cdots & 0 & -r & (1+2r) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{0,j} \\ U_{1,j} \\ \vdots \\ \vdots \\ U_{N-1,j} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_{0,j-1} + \frac{k\alpha}{c\rho} I_{0,j-1} \\ U_{1,j-1} + \frac{k\alpha}{c\rho} I_{1,j-1} \\ \vdots \\ \vdots \\ U_{N-1,j-1} + rT_0 + \frac{k\alpha}{c\rho} I_{N-1,j-1} \end{bmatrix} \quad (2.44)$$

olarak elde edilir. Bu denklemleri kullanarak yüzeyine lazer demeti odaklanan hedef malzemedeki sıcaklık dağılımını belirlemek amacıyla düğüm noktalarındaki sıcaklık değerlerini hesaplamak için oluşturulan algoritma Fortran programlama dili kullanılarak yazıldı.

2.2.4. Uzay adımından bağımsızlık testi

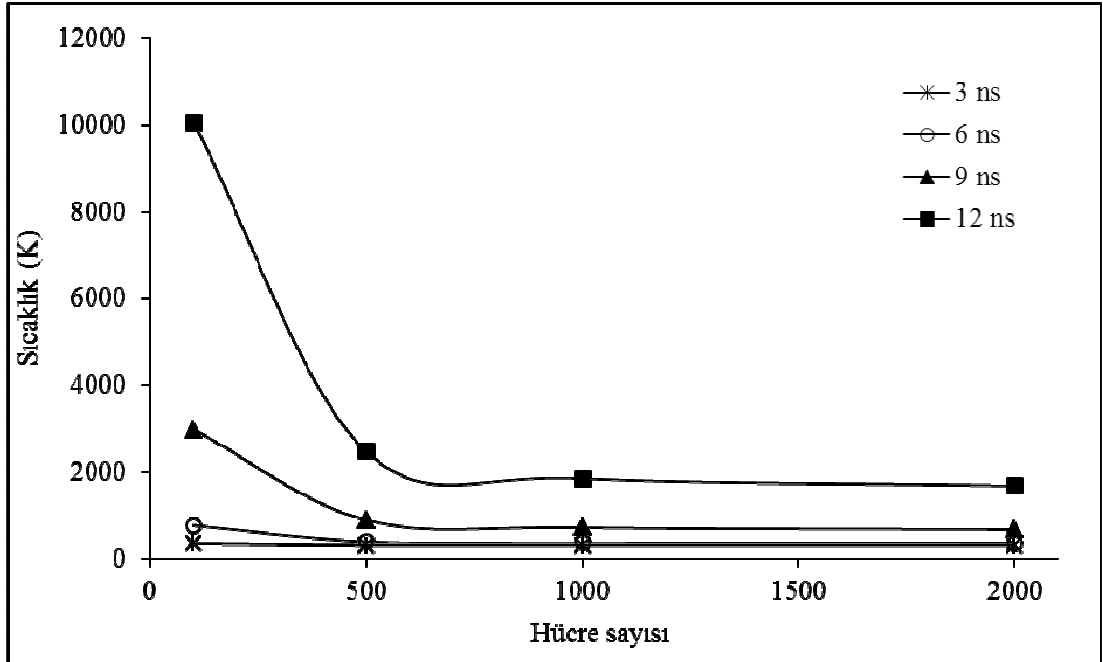
Açık şema çözüm yöntemi koşullu kararlı bir yöntemdir. Kapalı şema çözüm yöntemi ise zaman adımına göre koşulsuz kararlıdır. Ancak her iki yöntem de uzay adımına göre farklı sonuçlar verebilir. Uzay adımından bağımsızlık, sayısal sonuçların doğruluğu ve rasyonelliği ile ilişkilidir. Bu nedenle uzay adımından bağımsızlık testi uygulanır. Uzay adımından bağımsızlık testinin amacı kullanılan uzay adımına bağlı olmayan çözümü üretmek için gereken minimum uzay adımı değerini belirlemektir. Bunun için geniş bir uzay adımı değeriyle başlanarak ele alınan bölgedeki hücre sayısı her uzay adımından elde edilen çözüm değişmez oluncaya kadar artırılır ve bu uzay adımı kullanılarak analizler yapılır [54].

Uzay adımından bağımsızlık testini uygulamak için örnek bir problem ele alındı. Atım süresi 10 ns, şiddeti 1×10^9 W/cm² olan lazer atımının kalınlığı 20 µm olan hedef malzeme yüzeyine gönderildiği kabul edilerek açık ve kapalı şema çözüm yöntemleri için uzay adımından bağımsızlık testi uygulandı. Hücre sayısı 100'den 2000'e kadar artırılarak hesaplanan sıcaklık değerlerinin hücre sayısına bağlı olarak nasıl değiştiği gözlemlendi. Şekil 2.4'de açık şema için farklı anlarda malzeme yüzeyindeki sıcaklığın hücre sayısına göre değişimi görülmektedir.



Şekil 2.4. Açık şema için farklı anlarda malzeme yüzeyindeki sıcaklığın hücre sayısına göre değişimi

Şekil 2.5 ve Şekil 2.6'da ise açık şema için farklı anlarda malzeme yüzeyinden sırasıyla 1 μm ve 2 μm derinliklerdeki sıcaklığın hücre sayısına göre değişimi görülmektedir.

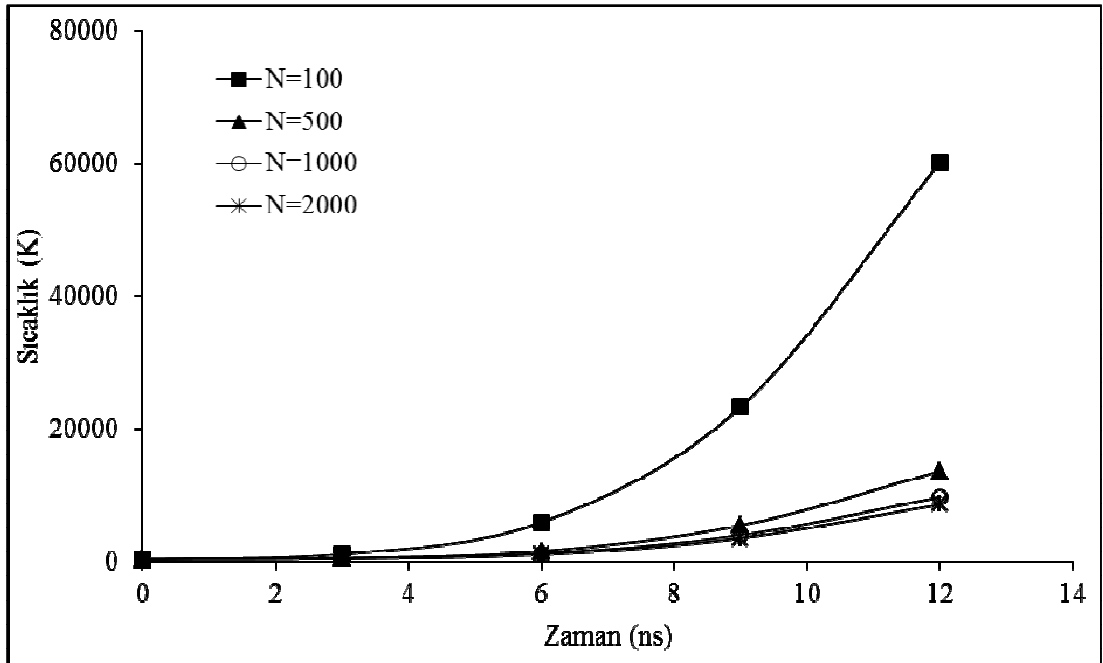


Şekil 2.5. Açık şema için farklı anlarda malzeme yüzeyinden 1 μm derinlikteki sıcaklığın hücre sayısına göre değişimi



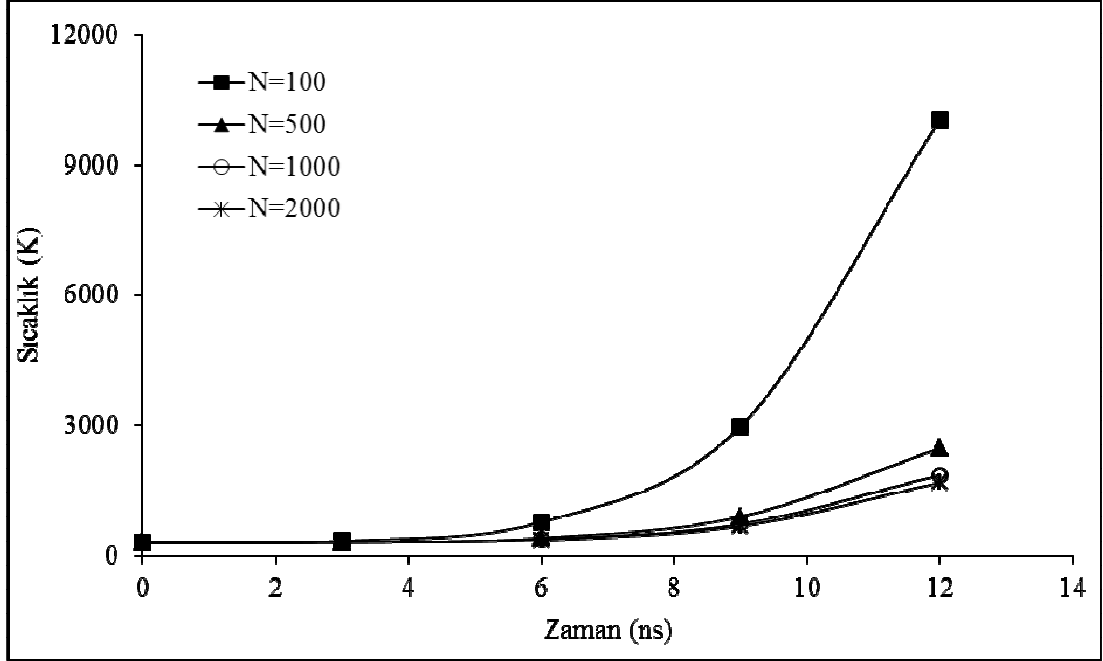
Şekil 2.6. Açık şema için farklı anlarda malzeme yüzeyinden 2 µm derinlikteki sıcaklığın hücre sayısına göre değişimi

Şekil 2.7’de açık şema için farklı hücre sayıları için malzeme yüzeyindeki sıcaklığın zamana göre değişimi görülmektedir.

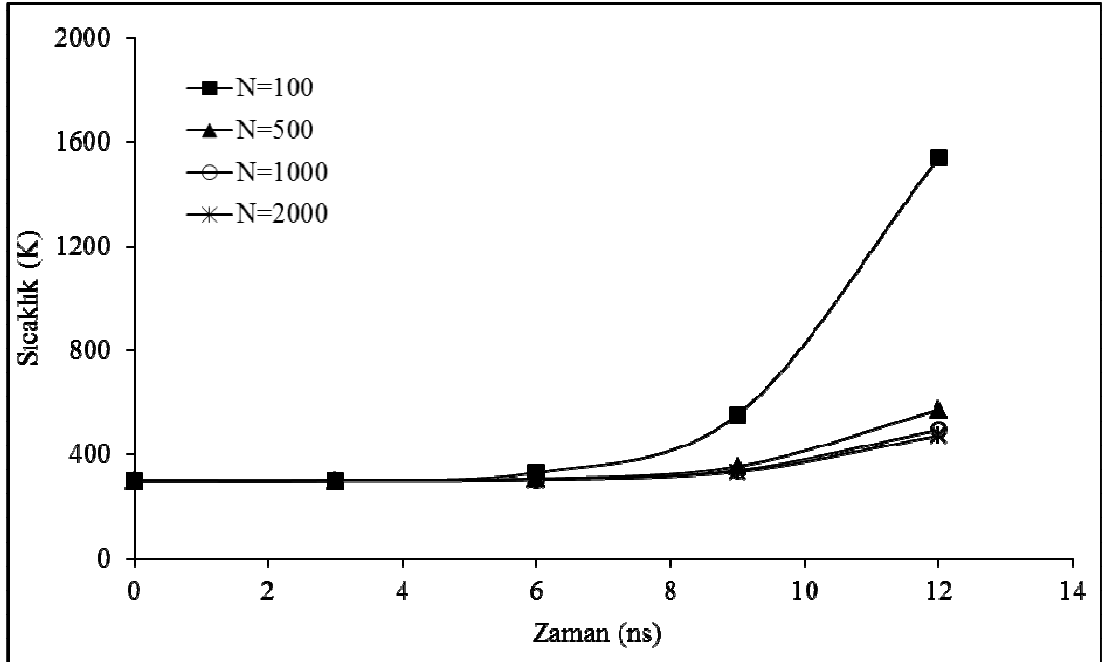


Şekil 2.7. Açık şema için farklı hücre sayıları için malzeme yüzeyindeki sıcaklığın zamana göre değişimi

Şekil 2.8 ve Şekil 2.9’da ise açık şema için farklı hücre sayıları için malzeme yüzeyinden sırasıyla 1 μm ve 2 μm derinliklerdeki sıcaklığın zamanla değişimi görülmektedir.

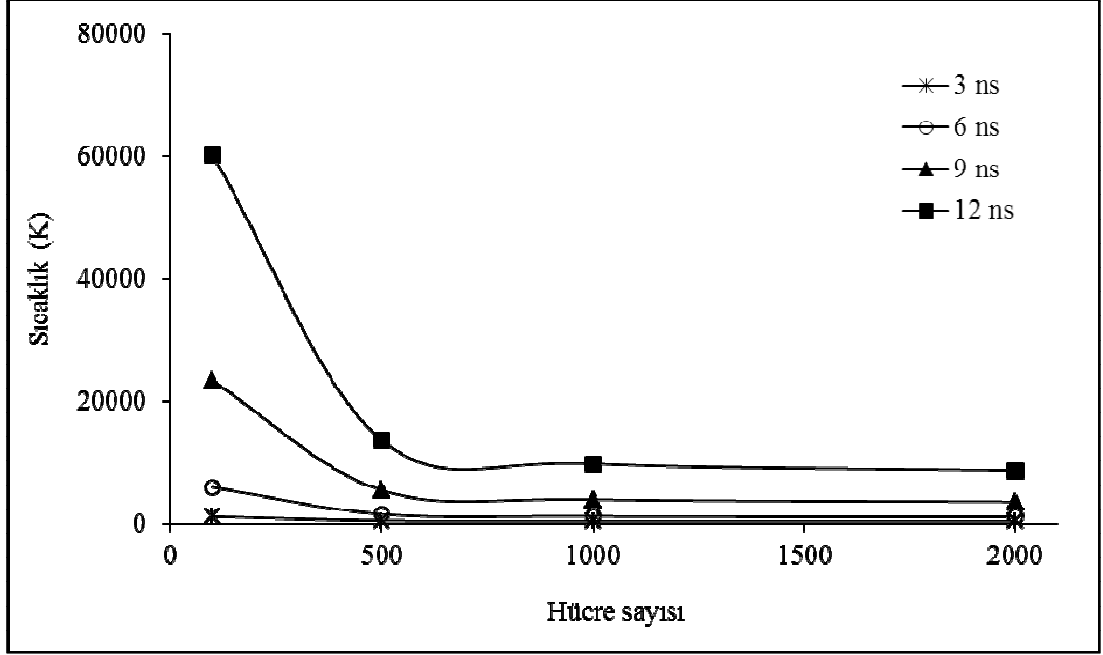


Şekil 2.8. Açık şema için farklı hücre sayıları için malzeme yüzeyinden 1 μm derinlikteki sıcaklığın zamana göre değişimi

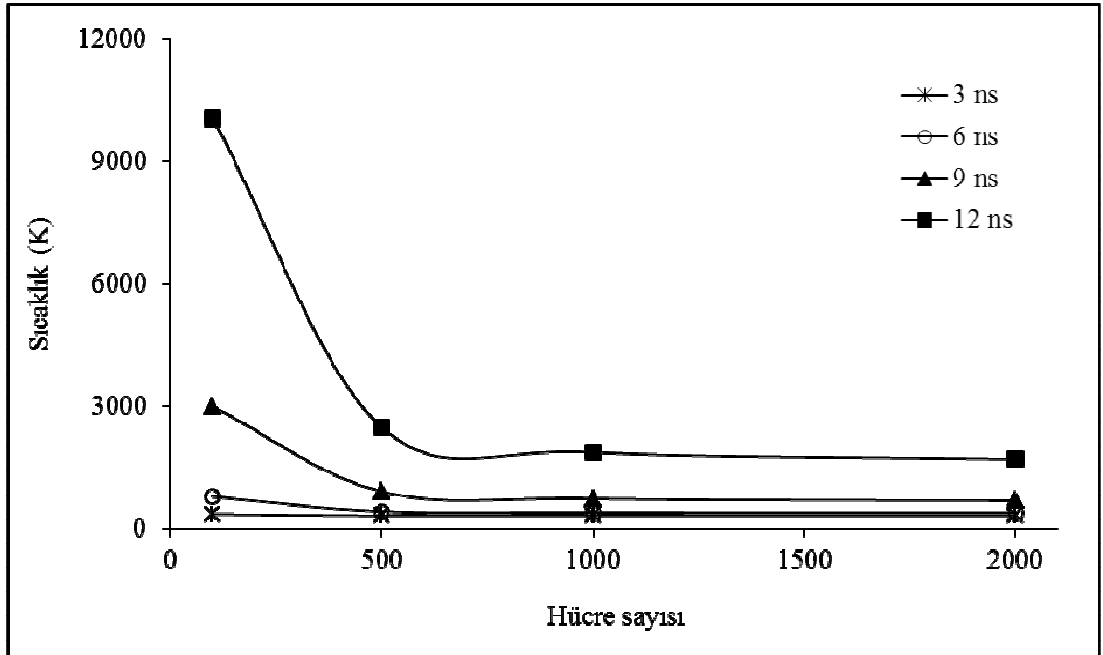


Şekil 2.9. Açık şema için farklı hücre sayıları için malzeme yüzeyinden 2 μm derinlikteki sıcaklığın zamana göre değişimi

Şekil 2.4–2.9'a göre hücre sayısı 100'den 2000'e kadar arttırıldığında hesap sonuçlarının birbirine yaklaştığı ve hücre sayısının 1500'den yüksek değerlerde olduğunda hesap sonuçlarının sabit kaldığı görülmektedir. Buna göre hücre sayısının 2000 seçilmesinin uygun olduğu belirlendi.

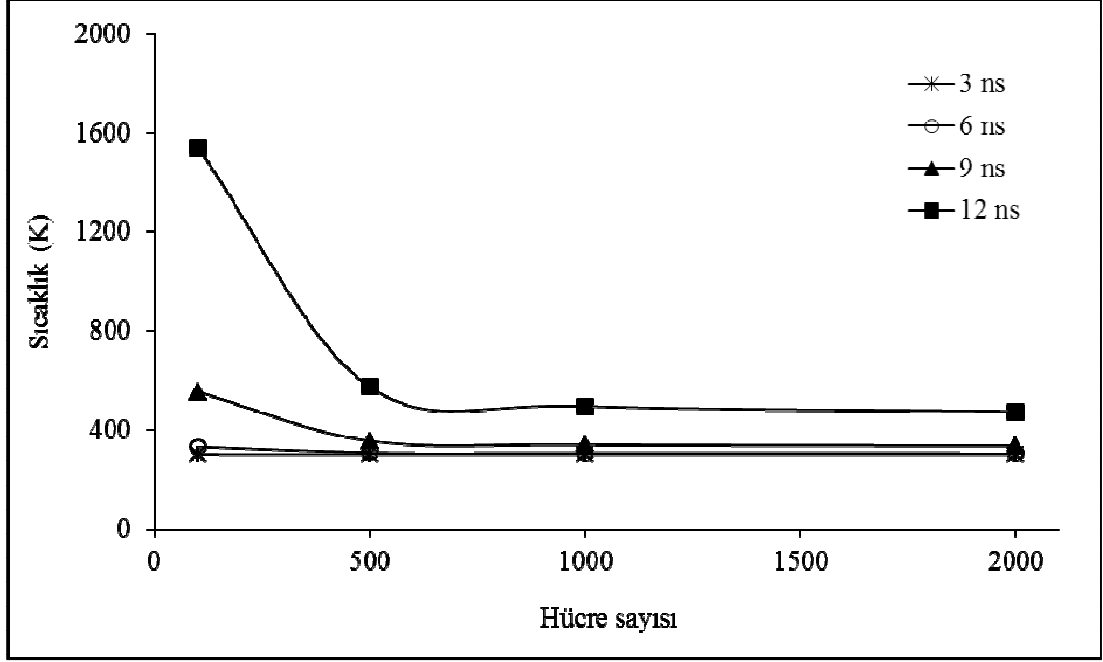


Şekil 2.10. Kapalı şema için farklı anlarda malzeme yüzeyindeki sıcaklığın hücre sayısına göre değişimi



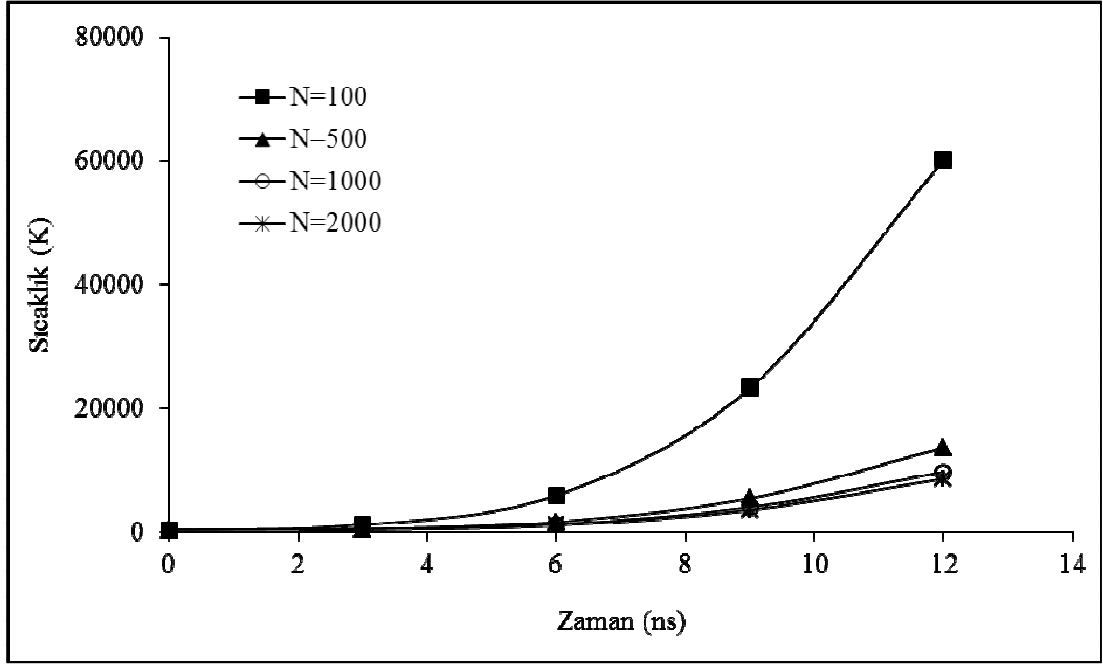
Şekil 2.11. Kapalı şema için farklı anlarda malzeme yüzeyinden 1 µm derinlikteki sıcaklığın hücre sayısına göre değişimi

Aynı koşullarda kapalı şema için de uzay adımından bağımsızlık testi uygulandı. Şekil 2.10'da kapalı şema için farklı anlarda malzeme yüzeyindeki, Şekil 2.11'de ise kapalı şema için farklı anlarda yüzeyden 1 µm derinlikteki sıcaklığın hücre sayısına göre değişimi görülmektedir.

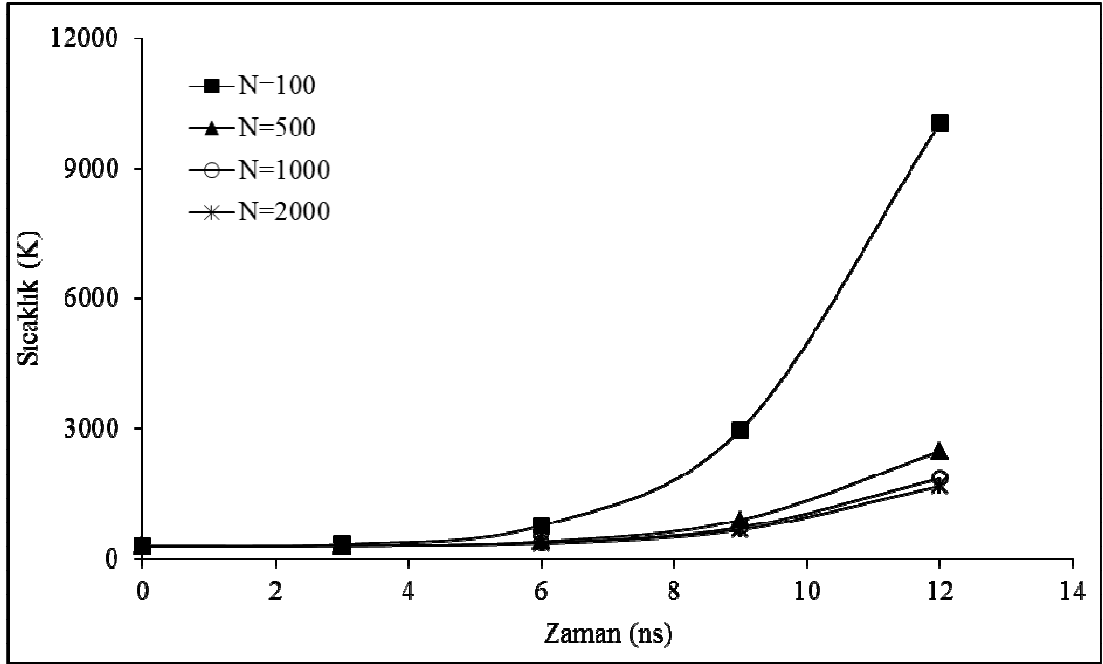


Şekil 2.12. Kapalı şema için farklı anlarda malzeme yüzeyinden 2 µm derinlikteki sıcaklığın hücre sayısına göre değişimi

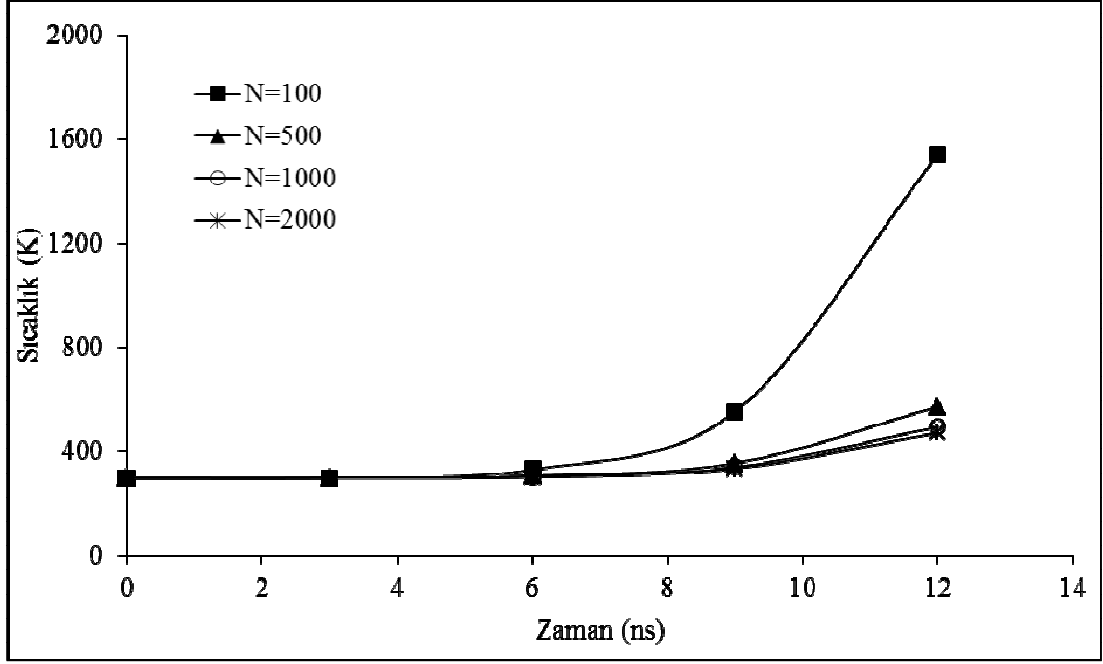
Şekil 2.12'de ise kapalı şema için farklı anlarda malzeme yüzeyinden 2 µm derinlikteki sıcaklığın hücre sayısına göre değişimi görülmektedir. Ayrıca kapalı şema kullanılarak da aynı koşullarda farklı hücre sayıları için sıcaklığın zamanla değişimi hesaplandı. Şekil 2.13, Şekil 2.14 ve Şekil 2.15'te kapalı şema için farklı hücre sayıları için sırasıyla malzeme yüzeyindeki, yüzeyden 1 µm ve 2 µm derinliklerdeki sıcaklığın zamanla değişimi görülmektedir.



Şekil 2.13. Kapalı şema için farklı hücre sayıları için malzeme yüzeyindeki sıcaklığın zamana göre değişimi



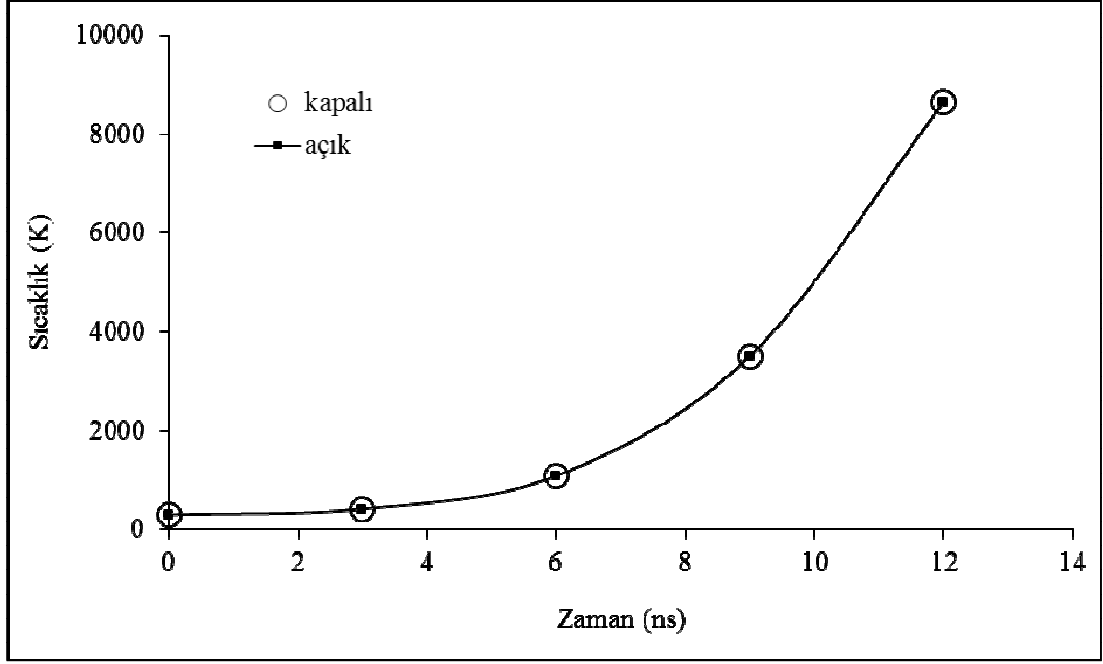
Şekil 2.14. Kapalı şema için farklı hücre sayıları için malzeme yüzeyinden 1 µm derinlikteki sıcaklığın zamana göre değişimi



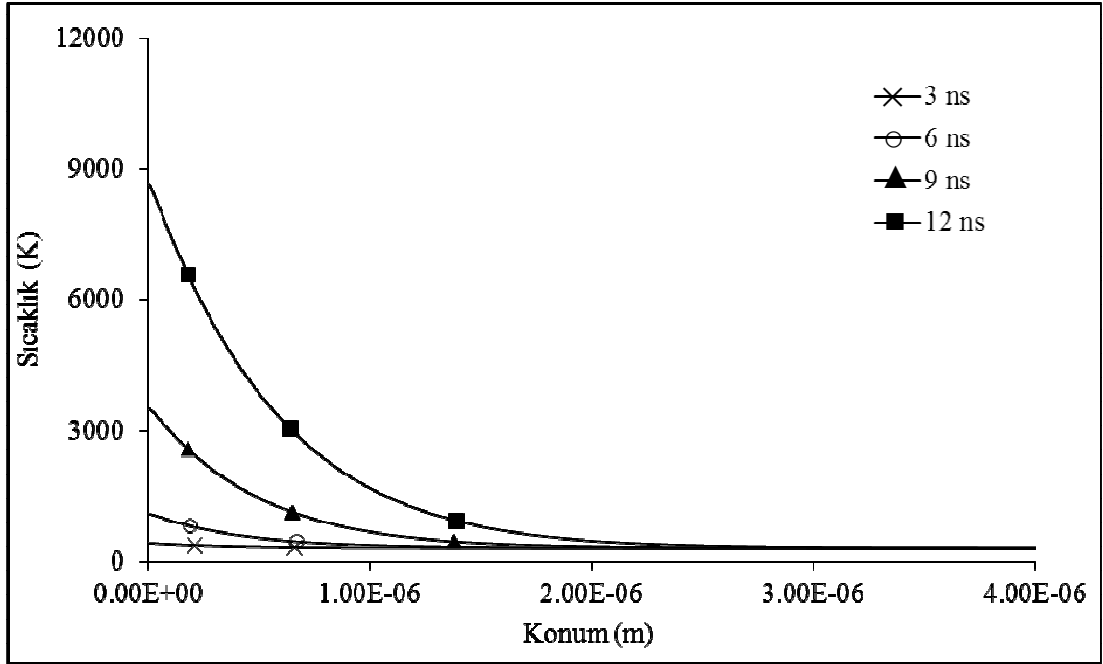
Şekil 2.15. Kapalı şema için farklı hücre sayıları için malzeme yüzeyinden 2 µm derinlikteki sıcaklığın zamana göre değişimi

Şekil 2.10–2.15’e göre kapalı şema için de hücre sayısı 100’den 2000’e kadar artırıldığında hesap sonuçlarının birbirine yaklaştığı ve hücre sayısının 1500’den yüksek değerlerde olduğunda hesap sonuçlarının sabit kaldığı görülmektedir. Buna göre hücre sayısının 2000 seçilmesinin uygun olduğu belirlendi.

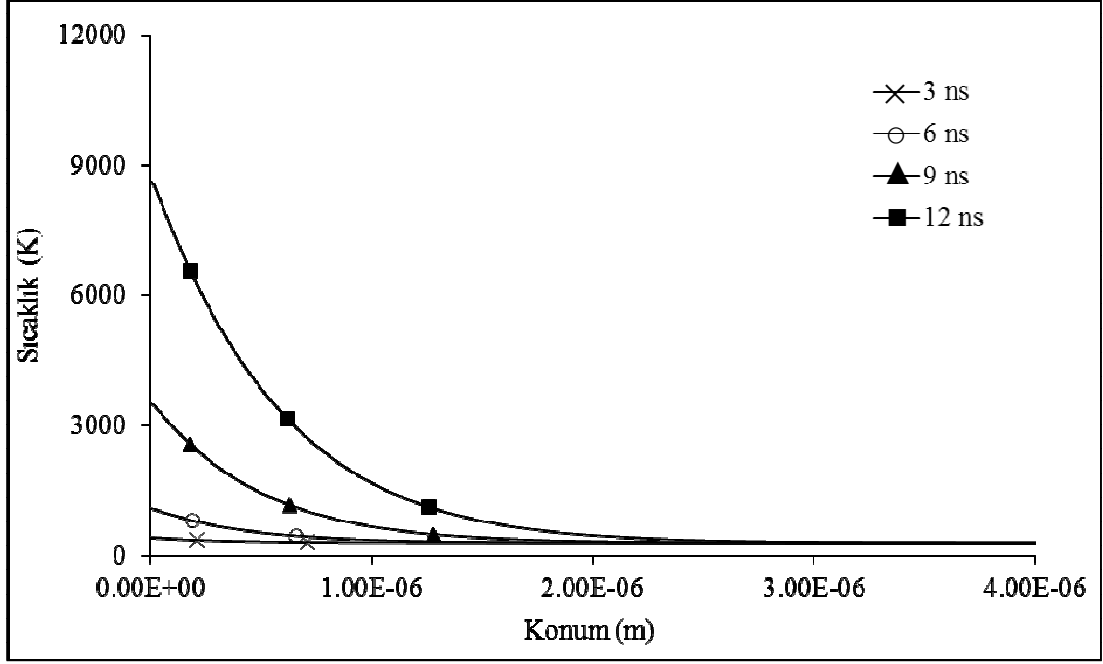
Atım süresi 10 ns, şiddeti 1×10^9 W/cm² olan lazer atımının kalınlığı 20 µm olan hedef malzeme yüzeyine gönderildiği kabul edilerek açık ve kapalı şema çözüm yöntemleri için hücre sayısı 2000 olduğu durumda yüzey sıcaklığının zamanla değişimi Şekil 2.16’da gösterildi. Şekil 2.17 ve Şekil 2.18’de ise açık ve kapalı şema çözüm yöntemleri ile farklı anlarda hesaplanan sıcaklığın konuma göre değişimi görülmektedir. Şekil 2.16–2.18’de görüldüğü gibi açık ve kapalı şema çözüm yöntemleri ile yapılan hesap sonuçları birbiriyle örtüşmektedir.



Şekil 2.16. Açık ve kapalı şema çözüm yöntemleri için hücre sayısı 2000 olduğu durumda yüzey sıcaklığının zamanla değişimi



Şekil 2.17. Açık şema çözüm yöntemi ile farklı anlarda hesaplanan sıcaklığın konuma göre değişimi



Şekil 2.18. Kapalı şema çözüm yöntemi ile farklı anlarda hesaplanan sıcaklığın konuma göre değişimi

2.3. Sonuçlar

Yapılan çalışmalar sonucunda Gauss formunda şiddet dağılımına sahip nanosaniye lazer atımı ile metal hedef malzemenin etkileşmesini tanımlayan model hedef malzemedeki ısı dağılımını belirleyen ısı iletim denklemi, probleme uygun başlangıç ve sınır koşulları ile birlikte anlatıldı. Hedef malzemenin faz değişimi süreçleri ve bu süreçlerin matematiksel modeli tanımlandı. Bu matematiksel modeli ifade eden denklemlerin çözümü için sayısal çözüm yöntemleri incelendi ve problemi ifade eden denklemlerin sayısal yöntemler kullanılarak çözümü yapıldı. Hesaplama yapılabilmesi için yazılan algoritma Fortran programlama dili kullanılarak yazıldı. Elde edilen çözümle yapılan hesaplamaların doğruluğunu sağlamak için uzay adımından bağımsızlık testi uygulandı. Yazılan algoritma, yüzeyine lazer demeti odaklanan hedef malzemedeki sıcaklık dağılımını ve faz değişimi süreçlerini belirlemek amacıyla hesaplama yapmak için kullanılır.

3. TEK ATIM NANOSANIYE LAZER DEMETİ İLE TİTANYUM VE ÇİNKO METALLERİNİN ETKİLEŞİMİ

Lazerle aşındırma, bir hedef malzeme yüzeyine bir lazer demeti odaklanması sonucunda hedef yüzeyinden malzeme tahliyesi işlemidir [7]. Lazerle aşındırma süreci içeren birçok uygulama bulunur. Atımlı lazerle aşındırma işlemi sırasında lazerle malzeme etkileşimi sürecinde meydana gelen fiziksel olayların incelenmesi derinleşmesine rağmen işlem sırasında lazerle malzeme tahliyesinin kontrol ve optimizasyonu için enerji taşınımı ve faz değişimi süreçlerini anlamak gereklidir [37, 55].

3.1. Nanosaniye Lazer Demeti ile Metallerin Etkileşiminde Meydana Gelen Fiziksel Süreçler

Mikrosaniye ve nanosaniye mertebesinde kısa lazer atımları için aşındırma işlemi ısı iletimi, erime, buharlaşma ve plazma oluşumu süreçleri ile kontrol edilir. Nanosaniye atım süreli lazerle ısıl aşındırma sürecinde lazer ışığının katı hedef yüzeyine çarpmasıyla enerjisi hedef malzeme yüzeyinde elektronlar tarafından soğrulur. Ardından uyarılmış elektronlar elektron-fonon relaksasyonu ile enerjiyi örgüye iletirler. İletilen enerji örgü titreşimleri aracılığıyla lazerle aydınlatılan bölgeden malzeme hacmine ısı olarak yayılır ve ısı iletimi malzeme içinde bir sıcaklık alanının oluşmasına yol açar. Ulaşılan sıcaklığa bağlı olarak malzeme erir, buharlaşır veya plazma oluşur. Metaller ve metal benzeri malzemeler için, lazerle malzeme etkileşiminde aşındırmaya yol açan ısıl süreçlere bakıldığında üç mekanizma genellikle normal buharlaşma, normal kaynama ve patlayarak kaynama (faz patlaması) şeklindedir. Aşındırma hem buharlaşma hem de eriyen malzemenin dışarı atılımı ile belirlenir. Hangi mekanizmanın baskın olacağı lazer atım süresine, enerjisine ve lazerle etkileşen hedef yüzeyinde ulaşılan sıcaklığa bağlıdır [7, 37, 56-58]. Söz edilen bu üç ısıl sürece bakıldığında normal buharlaşma 1 ns'den küçük çok kısa zaman ölçekleri için önemli değildir. Normal kaynama ise kabarcık difüzyonu hareketi kinetik engellerden dolayı oldukça yavaş olduğundan 100 ns'den küçük

sürelerde gerçekleşmez. Sürecin gerçekleşmesi için lazer atım süresinin yeterince uzun olması gereklidir. Eğer lazer akısı yeterince yüksek ve atım uzunluğu yeterince kısa ise yüzey sıcaklığı, T_k termodinamik kritik sıcaklık olmak üzere, $0.9T_k$ değerine ulaşabilir ve faz patlaması olarak bilinen mekanizma gaz ve sıvı damlacıklarının bir patlama gibi hedeften ayrılmasıyla meydana gelir. Buna göre faz patlaması sürecinde lazer akısının artmasıyla ışımaya maruz kalan madde termodinamik kritik noktaya yaklaşırken normal buharlaşma rejiminden faz patlamasına geçiş gerçekleşir [7, 37, 57, 59-62]. Yüzey sıcaklığının termodinamik kritik sıcaklığa yaklaşmasıyla faz patlaması sürecinin nanosaniye ve pikosaniye lazer atımları için gerçekleştiğini gösteren çeşitli çalışmalar vardır [7, 37, 57-60, 63-68].

Katıların orta seviyede akı değerinde ($1-10 \text{ J/cm}^2$) nanosaniye atımlı lazerle buharlaştırılması (aşındırılması) film depolama, yüzey işleme, parçacık üretme gibi birçok uygulamada kullanılır [69]. Bulgakov ve Bulgakova [69] yapmış oldukları çalışmada orta seviyede akı değerine sahip nanosaniye lazer atımı ile bir katı malzemenin aşındırılması işlemini tanımlamak için ısı bir model ortaya koymuşlardır. Bu ısı bir modelde aşındırma derinliğini hesaplamak için orta seviyede lazer akısı değeri dikkate alındığında yüzeyde normal buharlaşma gerçekleşeceği varsayılmıştır. Hedef malzeme içinde zamanla derinliğe göre sıcaklık dağılımı ve atım başına toplam aşındırma derinliğini bulmak için bir boyutlu ısı iletim denklemi sonlu fark şeması kullanılarak sayısal olarak çözülmüştür. Hesaplamalar Gauss formunda profile sahip lazer atımı için gerçekleştirilmiştir. Çözümünden elde edilen atım başına toplam aşındırma derinliği değeri kullanılarak buharlaşan kütle değeri hesaplanmıştır. Ayrıca 1064 nm dalgaboyunda, 13 ns atım süreli, Gauss profilinde Nd:YAG lazer atımı ile deney yapılarak buharlaşan kütle ölçülmüş ve ölçüm sonuçları model kullanılarak yapılan hesaplardan elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Hesaplanan ve deneysel olarak elde edilen atım başına buharlaşan kütle değerleri incelenmiştir. İncelemenin yapıldığı orta seviyede lazer akısı değer aralığında, normal buharlaşma mekanizmasının gerçekleştiği, faz patlaması mekanizmasının sonucu olarak meydana gelen damlacık çıkışının buharlaşan kütleyle önemli bir katkıda bulunmadığı gösterilmiştir [69].

Bulgakova ve Bulgakov [37] yaptıkları bir diğer çalışmada orta seviyeden yüksek seviyeye doğru akı değerleri için nanosaniye lazer atımları ile yapılan atımlı lazerle aşındırma işlemi sırasında meydana gelen malzeme tahliyesi üzerine deneysel ve teorik çalışmalar yapmışlardır. Yapmış oldukları deneyde 1064 nm dalgaboyunda, 13 ns atım süreli, Gauss profilinde Nd:YAG lazer atımı ile malzeme aşındırma işleminde lazer akısının fonksiyonu olarak aşındırma oranı ölçümlerine dayanarak normal buharlaşmadan faz patlamasına geçiş için kanıt elde etmişlerdir. Teorik çalışmalarda ise lazerle hedef malzemenin etkileşmesi sonucu malzeme içinde zamana bağlı sıcaklık dağılımı ve aşındırma oranı için yazarların önceki çalışmalarında [69] verilen normal buharlaşma kavramına dayanan matematiksel model kullanılarak hesaplamalar yapılmıştır. Hesaplamaların sonuçları deneysel verilerle karşılaştırılmıştır. Hesaplama verilerinin deneyden elde edilen verilerle lazer akı değeri arttıkça lazer akısının eşik değerine kadar iyi eşleştiği ancak eşik akı değerinde aşındırma oranında ani bir artış meydana geldiği ve gaz bulutunda farklı bir buharlaşma rejimine geçişi belirten, dikkate değer miktarda damlacıkların görüldüğü gözlenmiştir. Buna göre lazer akısının artmasıyla belirli bir eşik değerine gelindiğinde yüzey sıcaklığının termodinamik kritik sıcaklık değerine yaklaşmasıyla faz patlaması mekanizmasının gerçekleştiği gösterilmiştir [37, 57, 60, 64] ve normal buharlaşma kavramına dayanan matematiksel modelin faz patlaması mekanizmasına geçişin gerçekleştiği akı değerlerine kadar lazer ışınmasına maruz kalan hedefin içinde sıcaklık dağılımının değerlendirilmesine izin verdiği sonucuna varılmıştır [37].

Lazerle aşındırma süreci lazer parametrelerine [7, 70-72] olduğu gibi hedef malzemenin optik ve ısıl özelliklerine de [7, 73] bağlıdır. Amer ve diğerleri [7] fiziksel özelliklerinde önemli farklılıklar bulunan çinko (Zn) ve titanyum (Ti) metallerinin lazerle aşındırma süreçlerini deneysel olarak inceleyerek değerlendirmiş ve karşılaştırmışlardır. Deneyde 1064 nm dalgaboyunda, 12 ns atım süreli Nd:YAG lazer atımı kullanılarak atmosferik hava basıncında iki farklı metale lazerle aşındırma işlemi uygulanmıştır. Farklı metaller için aynı lazer koşullarında farklı lazer aşındırma mekanizmaları meydana gelebileceği görülmüştür. Lazer akısının 5 J/cm^2 değerinde Ti için baskın mekanizmanın normal buharlaşma olduğu görülürken Zn için aşındırma mekanizmasının faz patlaması olduğu görülmüştür.

3.2. Çalışmanın Önemi ve Amacı

Bu tez çalışmasında atımlı lazerle film depolama, lazerle oluşturulan plazma spektroskopisi, yüzey işleme gibi uygulamalar dikkate alınarak orta seviyede akı değerine sahip nanosaniye atımlı lazerle katı malzemenin lazerle aşındırılması işlemi ele alındığından yukarıda açıklanan literatürdeki bu bilgiler ışığında normal buharlaşma mekanizmasının gerçekleştiği kabul edilerek ikinci bölümde anlatıldığı gibi modelleme yapıldı. Amer ve diğerlerinin çalışması dikkate alınarak fiziksel özellikleri arasında önemli farklar bulunan iki farklı metalin (Zn ve Ti) lazerle aşındırma işleminde meydana gelen ısı iletimi süreci için hesaplamalar yapıldı. Bu metallerin tek atım Nd:YAG lazer ile etkileşimini araştırmak için yapılan hesaplarda ikinci bölümde verilen ısı iletimi ve faz değişimi süreçlerini tanımlayan denklemlerin açık sonlu fark yöntemi ile yapılan çözümü için yazılan algoritma kullanıldı. Ti ve Zn metal hedef malzemeler içinde sıcaklık dağılımı, erime derinliği ve yüzey buharlaşma derinliği farklı lazer akı değerleri için hesaplanarak elde edildi. Yapılan hesaplamalar lazerle aşındırma işleminde meydana gelen ısıl mekanizmalara bir öngörü ve anlayış sağlar.

3.3. Tek Atım Nanosaniye Lazer Demeti ile Ti ve Zn Metallerinin Etkileşiminde Meydana Gelen Fiziksel Süreçler İçin Sayısal Hesaplamalar ve Elde Edilen Sonuçlar

Tezin ikinci bölümünde verildiği gibi açık sonlu fark yöntemi ile çözümü yapılan denklemler için yazılan algoritma kullanılarak yapılan hesaplarda zaman adım genişliği 4×10^{-13} s olarak alındı. Hesaplama yapılan maksimum zaman değeri 1×10^{-7} s olarak seçildi ve buna göre zaman adım sayısı değeri 250000 olarak elde edildi. İkinci bölümde belirtildiği gibi açık sonlu fark yöntemi koşullu kararlı bir yöntemdir. Uzay ve zaman adım genişlikleri ikinci bölümde Denklem (2.26) ile verilen kararlılık koşulunu sağlamalıdır. Buna göre uzay adım genişliği belirtilen kararlılık koşulunu sağlayacak şekilde 1×10^{-8} m olarak seçildi. İkinci bölümde tanımlanan modele göre hedef malzemenin kalınlığından dolayı ısı iletimi malzemenin taban noktasına ulaşmayacağından bu noktada sıcaklığın değişmeyeceği ve başlangıçtaki sıcaklıkta sabit kalacağı kabul edildi. Dolayısıyla sınır koşulu malzemenin yarı-sonsuz olarak kabul edilmesine uygun olarak belirlendi. Buna göre

kalınlık 10 μm olarak belirlendiğinde bu koşulun sağlandığı görüldüğünden hesaplamalarda hedef malzeme kalınlığı 10 μm olarak ele alındı. Ele alınan uzay adım genişliği ve hedef malzeme kalınlığı değerlerine bağlı olarak uzay adım sayısı değeri 1000 olarak belirlendi. Bu değer ikinci bölümde söz edilen sayısal sonuçların doğruluğu ve rasyonelliği ile ilişkili olan uzay adımından bağımsızlık testini sağlamaktadır.

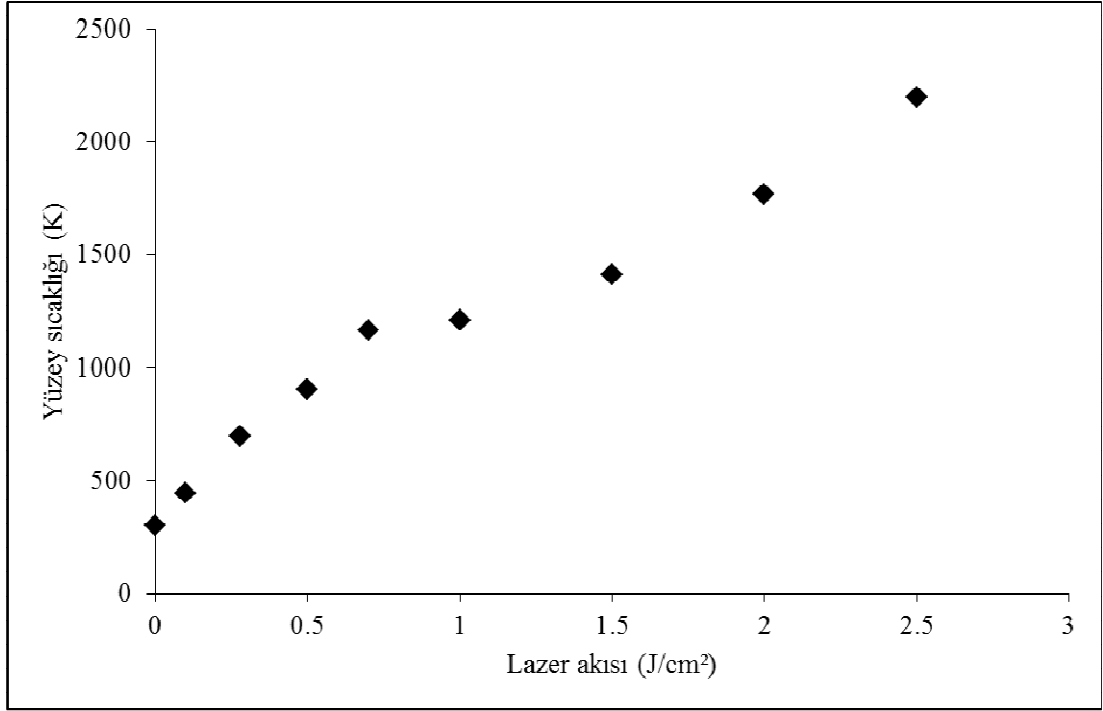
Tablo 3.1. Hesaplamalarda kullanılan lazer parametrelerinin değerleri

| | | | | | | | | | |
|---|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Atım süresi (ns) | 12 | | | | | | | | |
| Spot çapı (μm) | 680 | | | | | | | | |
| Lazer akısı (J/cm^2) | 0.10 | 0.28 | 0.40 | 0.50 | 0.70 | 1.00 | 1.50 | 2.00 | 2.50 |

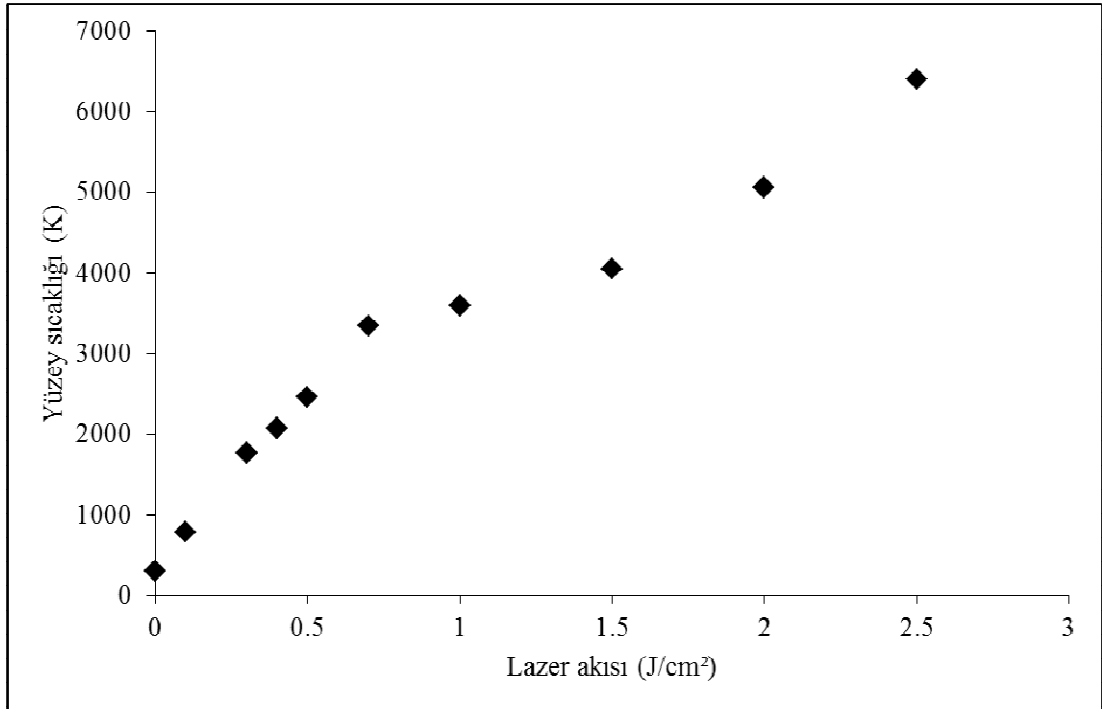
Hesaplamalarda Gauss formunda şiddet profiline sahip lazer atımının dalgaboyu 1064 nm olarak ele alındı. Atım süresi 12 ns olan lazer atımının, hedef malzeme yüzeyine gönderildiği kabul edilerek lazer akı değeri 0.1 – 2.5 J/cm^2 aralığında değiştirilerek sıcaklık dağılımı, erime derinliği ve buhar derinliği hesaplandı. Hesaplamalarda kullanılan lazer parametrelerinin değerleri Tablo 3.1’de gösterildi. Hesaplamalarda ele alınan Ti ve Zn metallerinin fiziksel özellikleri ise Tablo 3.2’de gösterildi [7].

Tablo 3.2. Ti ve Zn metallerinin fiziksel özellikleri

| | Zn | Ti |
|---|--------------------|--------------------|
| Isıl iletkenlik, κ (W/m.K) | 116 | 21.9 |
| Öz ısı, c (J/kg.K) | 390 | 520 |
| Kütle yoğunluğu, ρ (kg/m^3) | 7140 | 4500 |
| Soğrulma katsayısı (1064 nm için), α (m^{-1}) | 4.7×10^7 | 3.9×10^7 |
| Yansıtıcılık katsayısı (1064 nm için), \mathcal{R} | 0.684 | 0.55 |
| Erime sıcaklığı, T_e (K) | 692.53 | 1943 |
| Buharlaştırma sıcaklığı, T_b (K) | 1180 | 3560 |
| Termodinamik kritik sıcaklık, T_k (K) | 2930 | 7890 |
| Erime ısısı, L_e (J/kg) | 1.13×10^5 | 3.9×10^5 |
| Buharlaştırma ısısı, L_b (J/kg) | 1.75×10^6 | 8.89×10^6 |



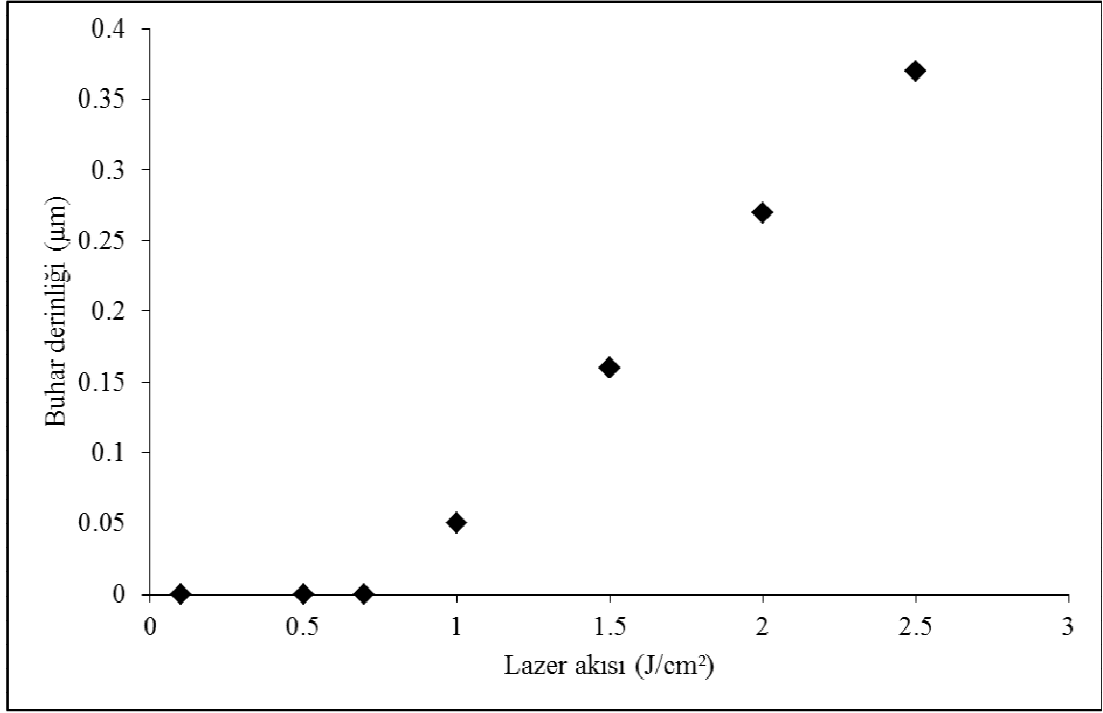
(a)



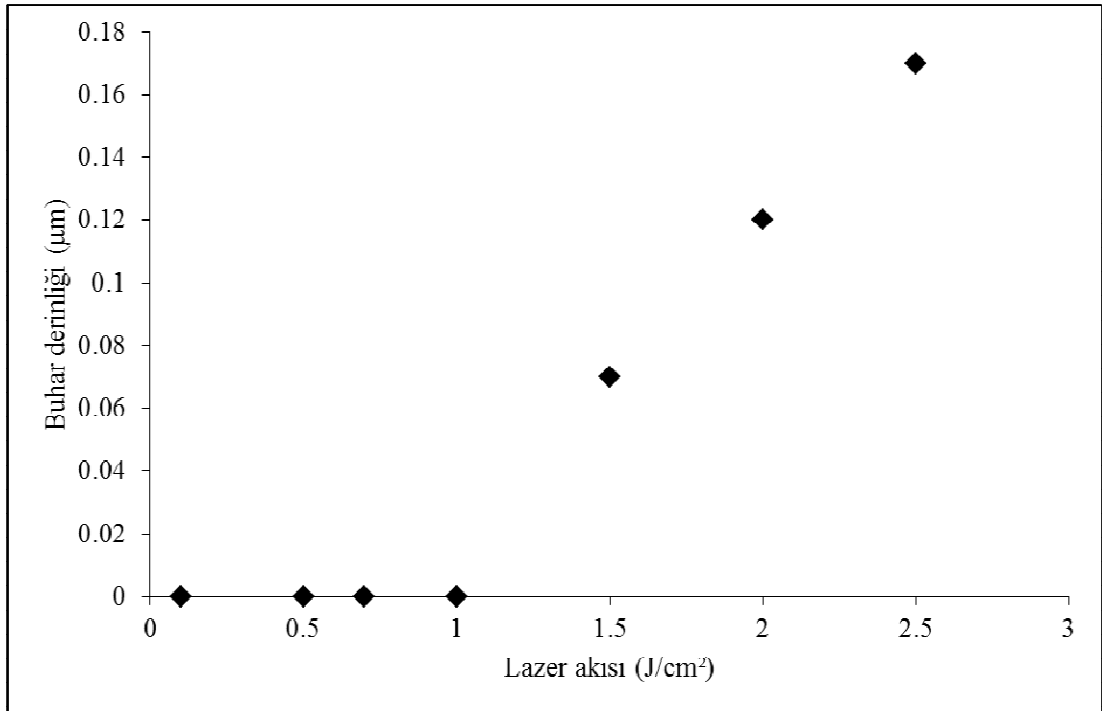
(b)

Şekil 3.1. a) Zn ve b) Ti metalleri için farklı lazer akı değerlerine karşılık maksimum yüzey sıcaklığı

Dalgaboyu 1064 nm olan, 12 ns süreli tek atım Nd:YAG lazer demetiyle Ti ve Zn metallerin etkileşiminde lazerle aşındırma için eşik akı değerini belirlemek ve lazer akısının bir fonksiyonu olarak aşındırma derinliğini elde etmek amacıyla farklı lazer akısı değerlerine göre hesaplamalar yapıldı. Şekil 3.1’de Ti ve Zn metalleri için farklı lazer akı değerlerinde elde edilen maksimum yüzey sıcaklığı değerleri gösterildi. Lazer akısı arttıkça hedef malzeme tarafından soğrulan enerji de arttığından sıcaklığın yükseldiği görülür. Şekil 3.2’de ise Ti ve Zn metalleri için farklı lazer akı değerlerine karşılık buhar derinliği gösterildi. Şekil 3.2’de görüldüğü gibi düşük akı değerlerinde hedef malzemeye buharlaşma ısısını aşacak kadar enerji iletilmediğinden hedef yüzeyinin sıcaklığı buharlaşma sıcaklığına ulaşmamaktadır. Zn metal hedef malzemenin $\sim 0.7 \text{ J/cm}^2$, Ti hedefin ise $\sim 1 \text{ J/cm}^2$ lazer akı değerinde buharlaşma sıcaklığına ulaştığı ve bu akı değerlerinden sonra aşındırma gerçekleştiği görülür. Bu fark Tablo 3.2’de verilen Ti ve Zn metallerin fiziksel özelliklerindeki (ısı ve optik özellikleri) farklılıklara dayandırılabilir. Böylece lazerle aşındırma işleminde metal hedef malzemenin yüzeyinde aşındırma gerçekleşebilmesi için bir eşik lazer akısı değeri bulunduğu yapılan hesaplardan elde edilen verilerle oluşturulan grafiklerde gösterildi. Bu durum Willis ve diğerlerinin Nd:YAG lazer ile nikel hedefin lazerle aşındırma işlemi üzerine yaptıkları bir çalışmada da deneysel olarak gösterilmiştir [55]. İkinci bölümde anlatıldığı gibi modelde yapılan kabullenmeler dolayısıyla Ti ve Zn metallerin lazerle aşındırma işlemi için eşik lazer akısının sayısal değeri kesin değer olmamakla birlikte lazerle aşındırma işleminin eşik değer davranışını göstermesi açısından hesaplamalar yarar ve öngörü sağlamaktadır ve eşik lazer akısı değeri için bir yaklaşım sunmaktadır.

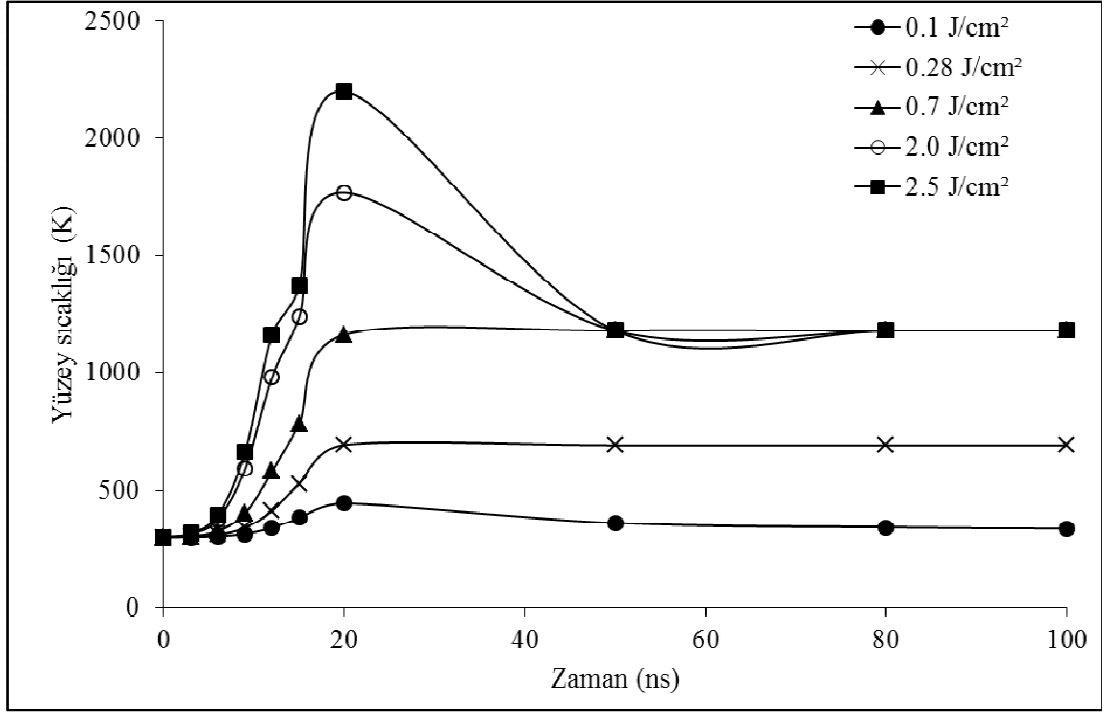


(a)

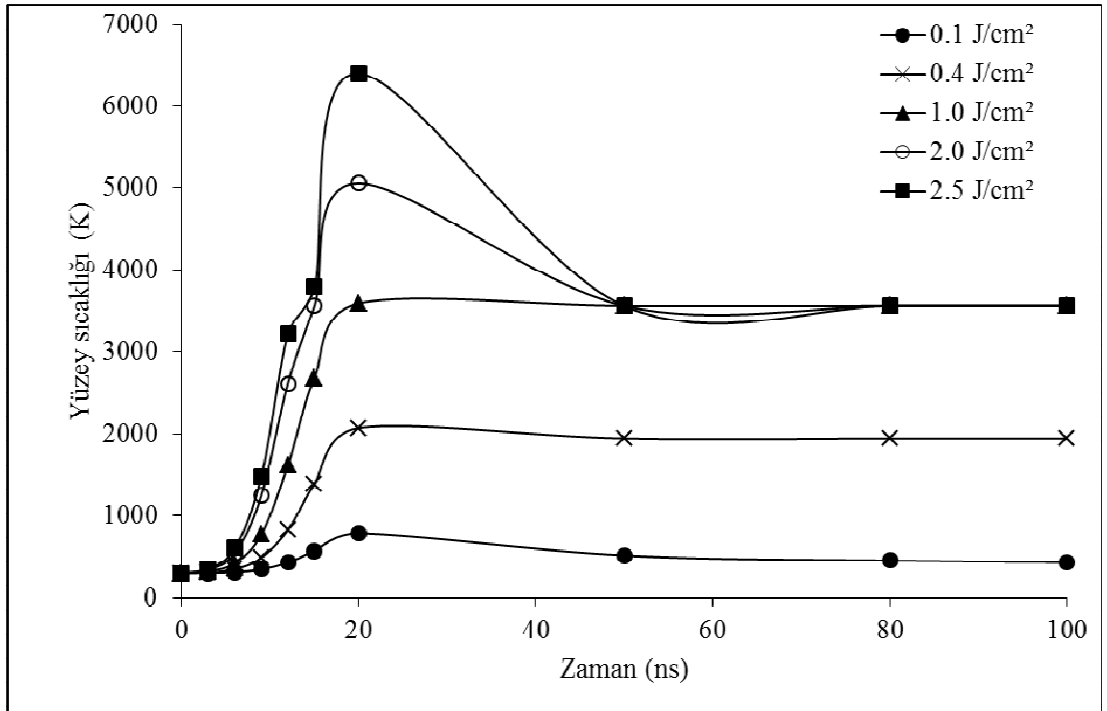


(b)

Şekil 3.2. a) Zn ve b) Ti metalleri için farklı lazer akı değerlerine karşılık buhar derinliği



(a)

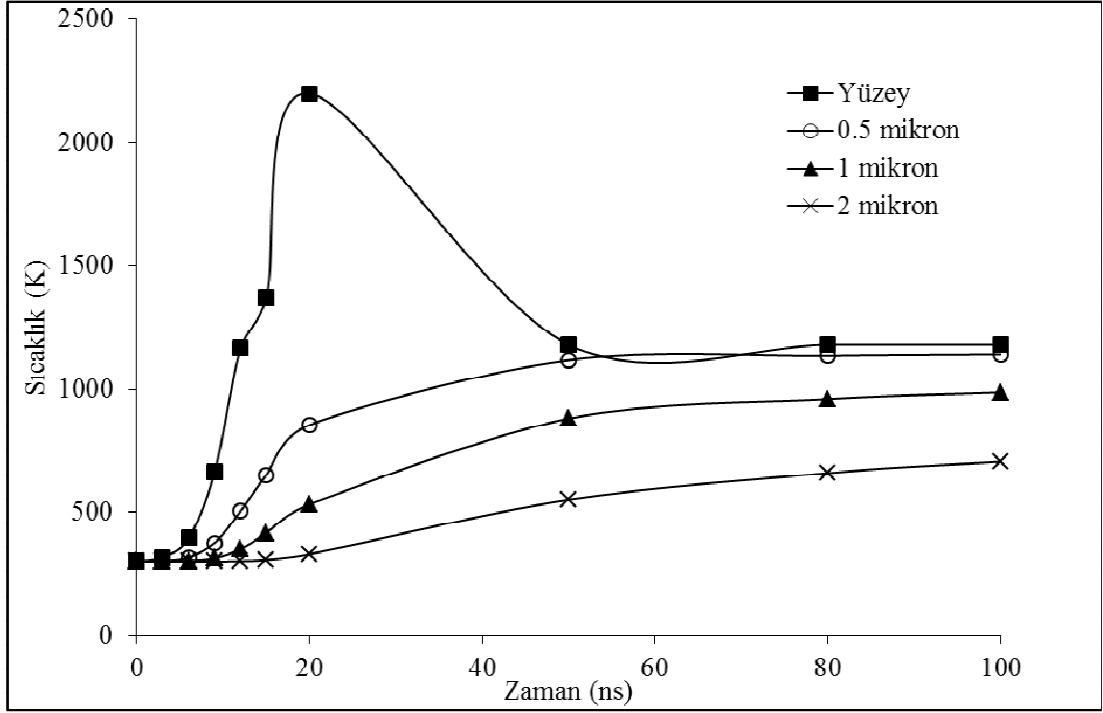


(b)

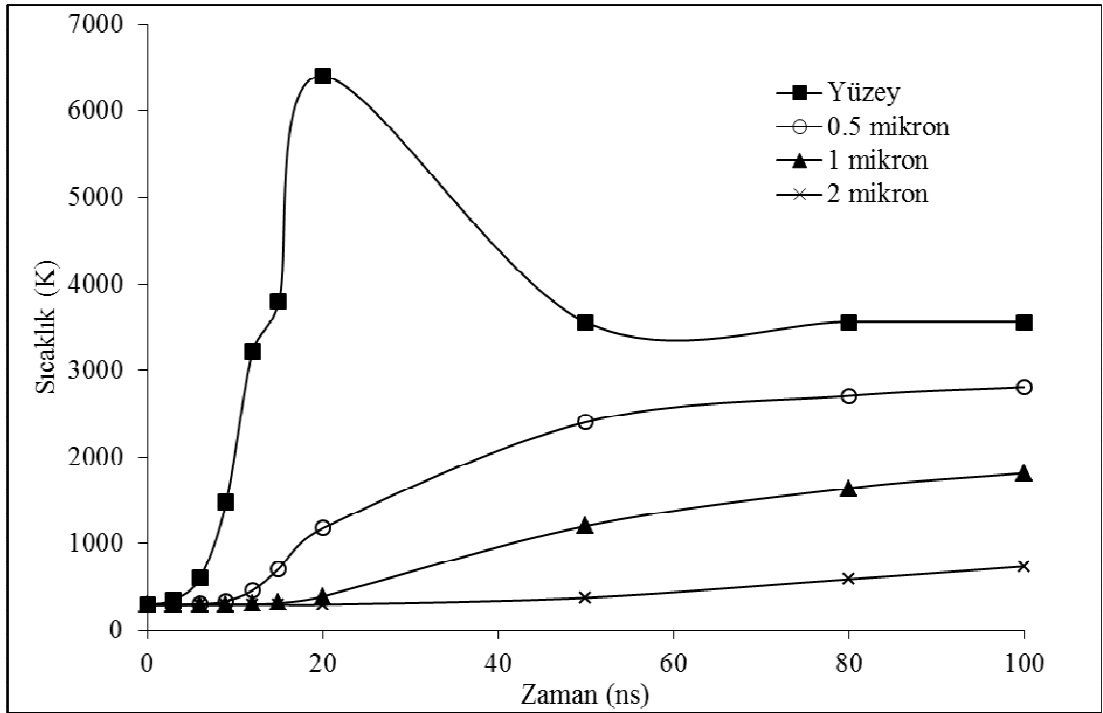
Şekil 3.3. a) Zn ve b) Ti için gelen lazer akısına göre yüzey sıcaklığının zamansal değişimi

Şekil 3.3'te Zn ve Ti için gelen lazer akısının bir fonksiyonu olarak yüzey sıcaklığının zamansal değişimi gösterildi. Şekil 3.4'te ise yüzeydeki, yüzeyden 0.5 µm, 1 µm ve 2 µm derinliklerdeki sıcaklığının zamansal değişimi Zn ve Ti için gelen lazer akısının bir fonksiyonu olarak gösterildi. Erime sıcaklığına erişmek için gereken eşik lazer akısı değeri Zn için 0.28 J/cm^2 , Ti için ise 0.40 J/cm^2 'dir. Lazer akı değeri Zn için 0.7 J/cm^2 üzerinde olduğunda erimiş metal malzeme buharlaşma sıcaklığının (692.53 K) üzerinde ısıtılır. Ti için ise 3560 K buharlaşma sıcaklığının üzerinde ısıtılması için lazer akı değeri 1 J/cm^2 'nin üzerinde olmalıdır. Akı değeri 2.5 J/cm^2 olduğunda yüzey $\sim 0.78T_k$ değerine ulaşır. Sayısal hesaplama bu akı değerinden büyük değerler için gerçekleştirilmedi, çünkü $\sim 0.78T_k$ veya daha yüksek sıcaklıklarda ısı ve optik özelliklerde büyük kararsızlıklar meydana gelir [55, 57]. Böylece, yukarıda da bahsedildiği gibi, normal buharlaşma kavramına dayanan model faz patlaması mekanizmasına geçişin gerçekleştiği akı değerlerine kadar lazer ışımaya maruz kalan hedefin içinde sıcaklık dağılımının değerlendirilmesine izin verir [37].

Şekil 3.3'te görüldüğü gibi başlangıçta malzeme oda sıcaklığındadır (300 K) ve ardından yüzey sıcaklığı önemli ölçüde artmaktadır. Aynı zamanda Şekil 3.4'te iç noktalardaki sıcaklığın da yüzeyden hedef malzemenin iç noktalarına doğru gerçekleşen ısı iletiminden dolayı arttığı görülmektedir. Lazer demetinin enerjisi hedef yüzeyi tarafından doğrudan soğrulduğu için hedef malzemenin en yüksek sıcaklığa sahip olan noktası yüzeydir ve bu nedenle erime ilk önce bu noktada yani yüzeyde meydana gelir. Verilen enerji katı-sıvı ve sıvı-buhar faz değişim ısını aştığında yüzey nokta buharlaşır. Yani lazer demetinin etkisiyle malzeme ısınır ve faz değişim süreci gerçekleşir. Lazer atımı sona erdikten sonra hedef malzeme için artık ısı kaynağı yoktur, böylece yüzeyin sıcaklığı düşmeye başlar. Bununla birlikte iç noktalar, aralarındaki sıcaklık farkından dolayı yüzeyden iletilen ısıyı hala soğururlar. Yüzey sıcaklığı, iç katman noktasının sıcaklığına eşit sıcaklığa düştüğünde aralarında artık ısı iletimi gerçekleşmez.

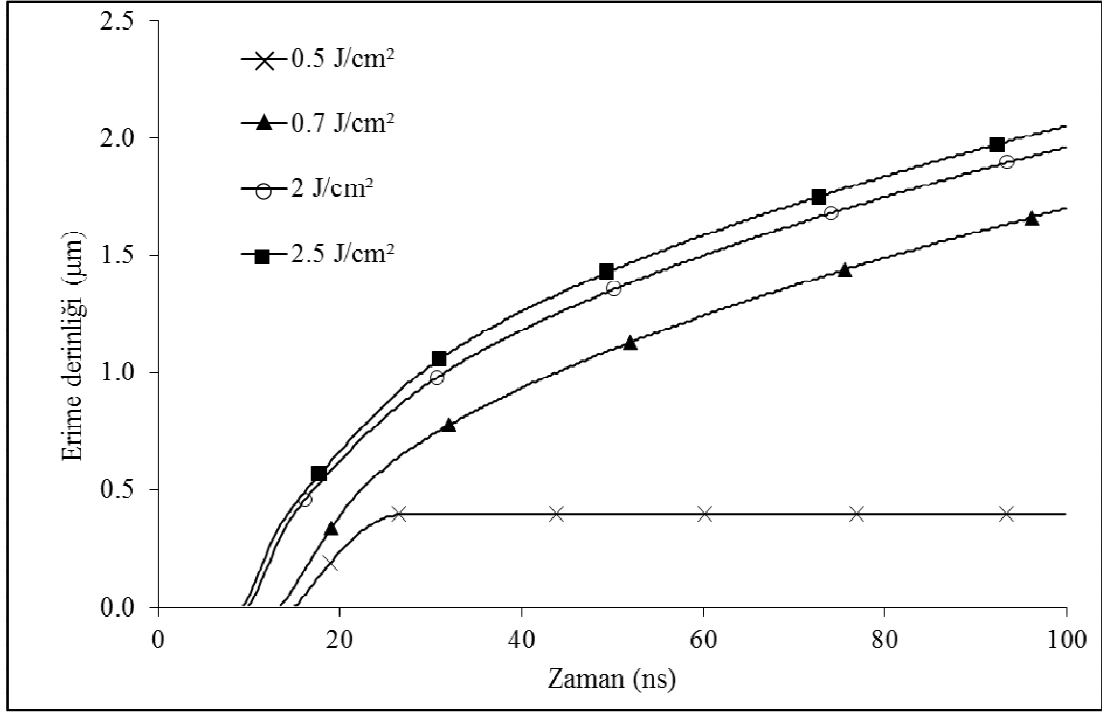


(a)

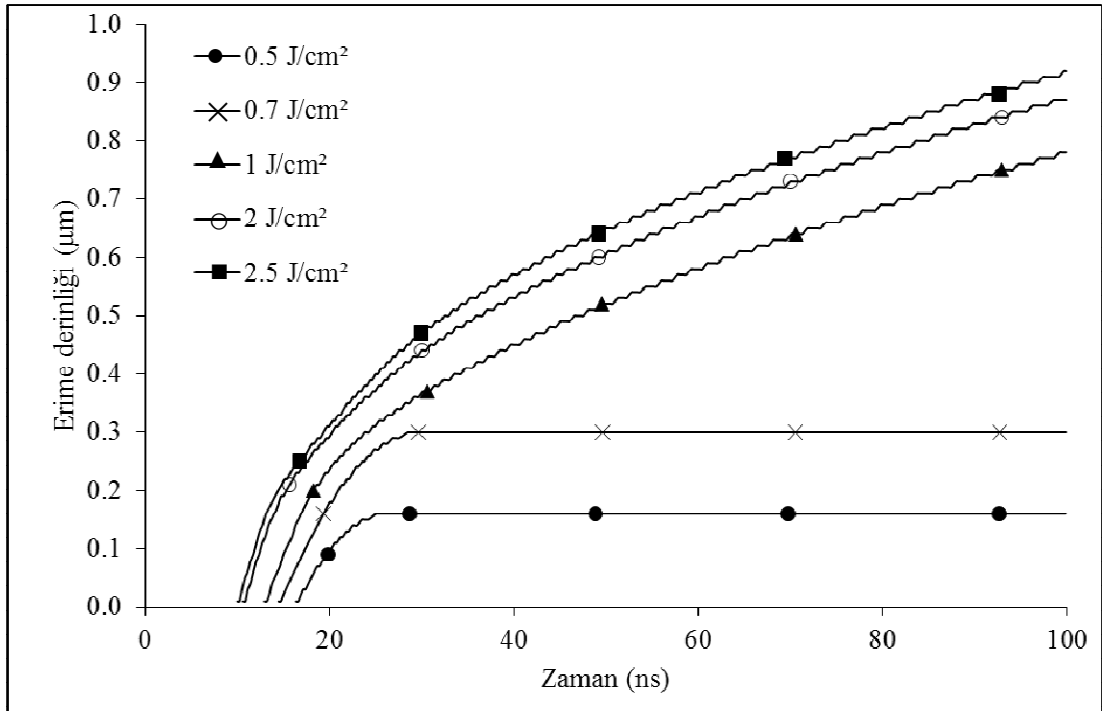


(b)

Şekil 3.4. a) Zn ve b) Ti için 2.5 J/cm^2 akı değerinde yüzeydeki ve iç noktalardaki sıcaklığın zamansal değişimi



(a)



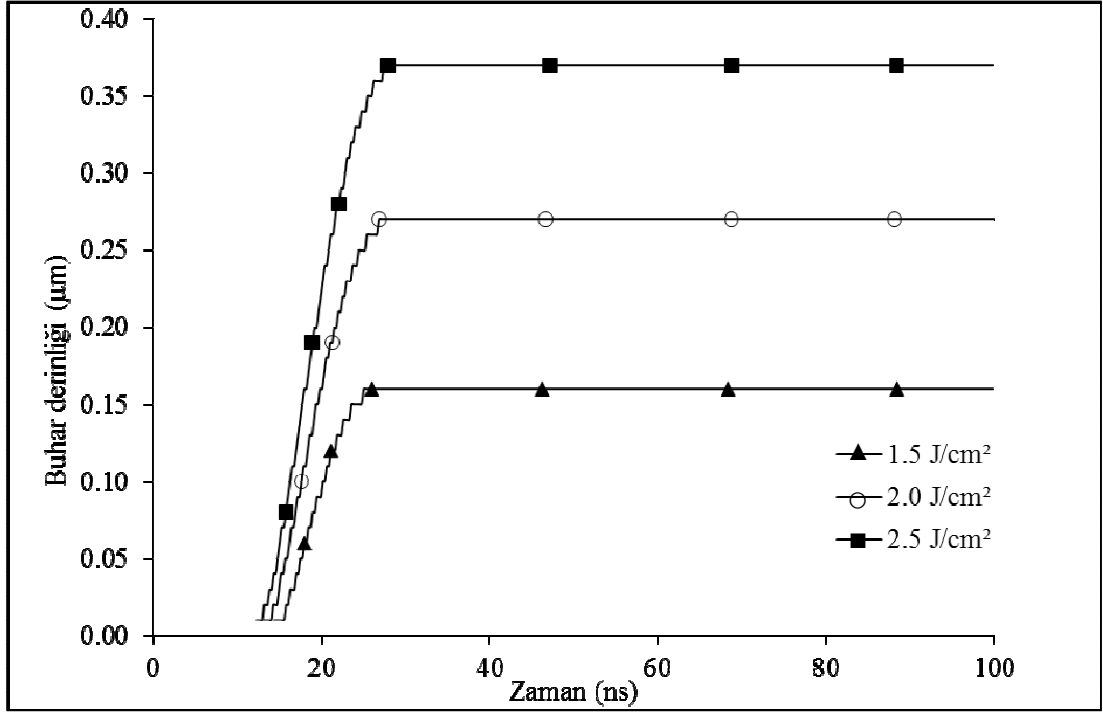
(b)

Şekil 3.5. a) Zn ve b) Ti için gelen lazer akısına göre erime derinliğinin zamansal değişimi

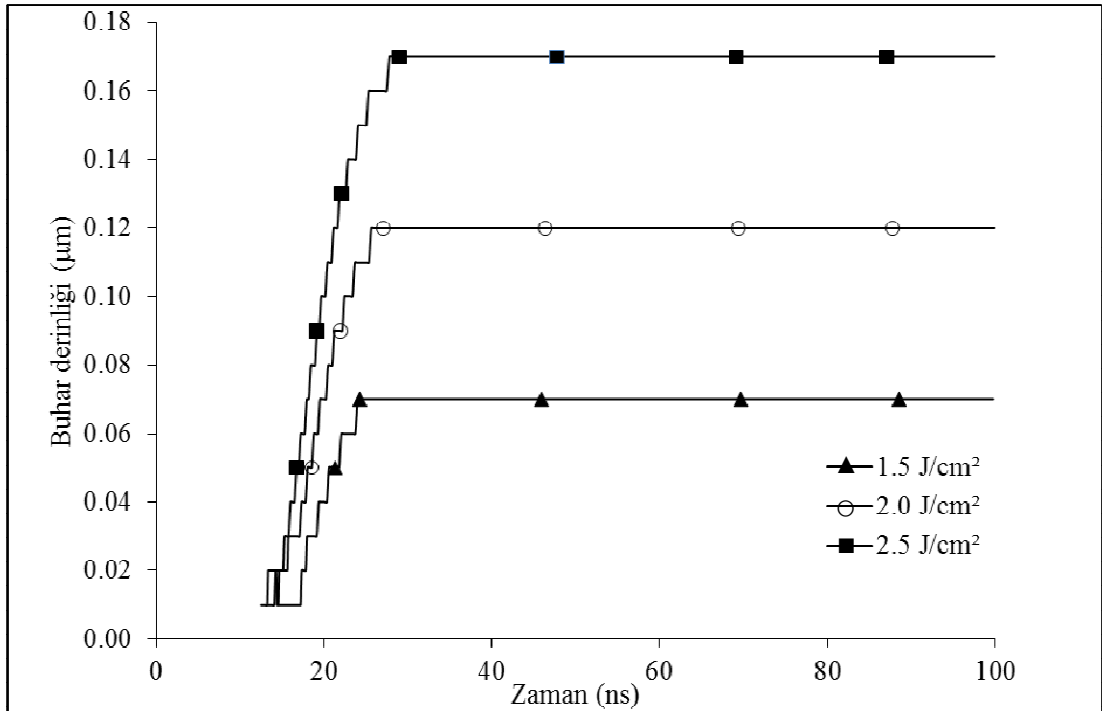
Şekil 3.5'te Zn ve Ti için gelen lazer akısının bir fonksiyonu olarak erime derinliğinin zamansal değişimi gösterildi. Erime derinliği lazer atımı sona erdikten sonra da yüzey bölgesinden iç bölgelere doğru gerçekleşen ısı iletiminden dolayı artmaya devam etmektedir. En yüksek lazer akısı değerinde (2.5 J/cm^2) Zn için erimiş bölge yaklaşık $\sim 2 \text{ } \mu\text{m}$ derinliğe ulaşırken Ti için yaklaşık $\sim 1 \text{ } \mu\text{m}$ değerindedir.

Şekil 3.6'da Zn ve Ti için gelen lazer akısının bir fonksiyonu olarak buhar derinliğinin zamanla değişimi gösterildi. En yüksek lazer akı değeri (2.5 J/cm^2) için buharlaşma ile aşınan malzeme derinliği Zn için yaklaşık $0.37 \text{ } \mu\text{m}$ iken Ti için yaklaşık $0.17 \text{ } \mu\text{m}$ değerindedir. Modelde malzeme aşınması buharlaşma süreci ile ele alındığından buharlaşma derinliği, malzeme çıkarılma sürecinin yalnızca buharlaşma olduğu durumda oluşan krater derinliği için bir alt limit verir [46].

Şekil 3.7'de yüzeyden uzaklığın bir fonksiyonu olarak sıcaklık dağılımı 2.5 J/cm^2 lazer akı değeri için farklı zaman anlarında gösterilmektedir. Şekil 3.7 gösterir ki, $10 \text{ } \mu\text{m}$ alan büyüklüğü ısı iletimi ve faz değişimini uygun bir şekilde tam olarak modellemek için yeterlidir, çünkü yüzeyden $10 \text{ } \mu\text{m}$ 'den daha az mesafede sıcaklık ortam sıcaklığına iner [55]. Başlangıçta lazer demetinin enerjisi hedef yüzeyi tarafından doğrudan soğrulduğu için hedef malzemenin en yüksek sıcaklığa sahip olan noktası yüzeydir. Zamanla iç noktadaki sıcaklığın yüzeyden hedef malzemenin iç noktalarına doğru gerçekleşen ısı iletiminden dolayı arttığı görülmektedir. Lazer atımı sona erdikten sonra hedef malzeme için artık ısı kaynağı yoktur, böylece yüzeyin sıcaklığı düşmeye başlar. Bununla birlikte iç noktalar, aralarındaki sıcaklık farkından dolayı yüzeyden iletilen ısıyı soğurmaya devam ettiklerinden sıcaklık zamanla artmaya devam eder.

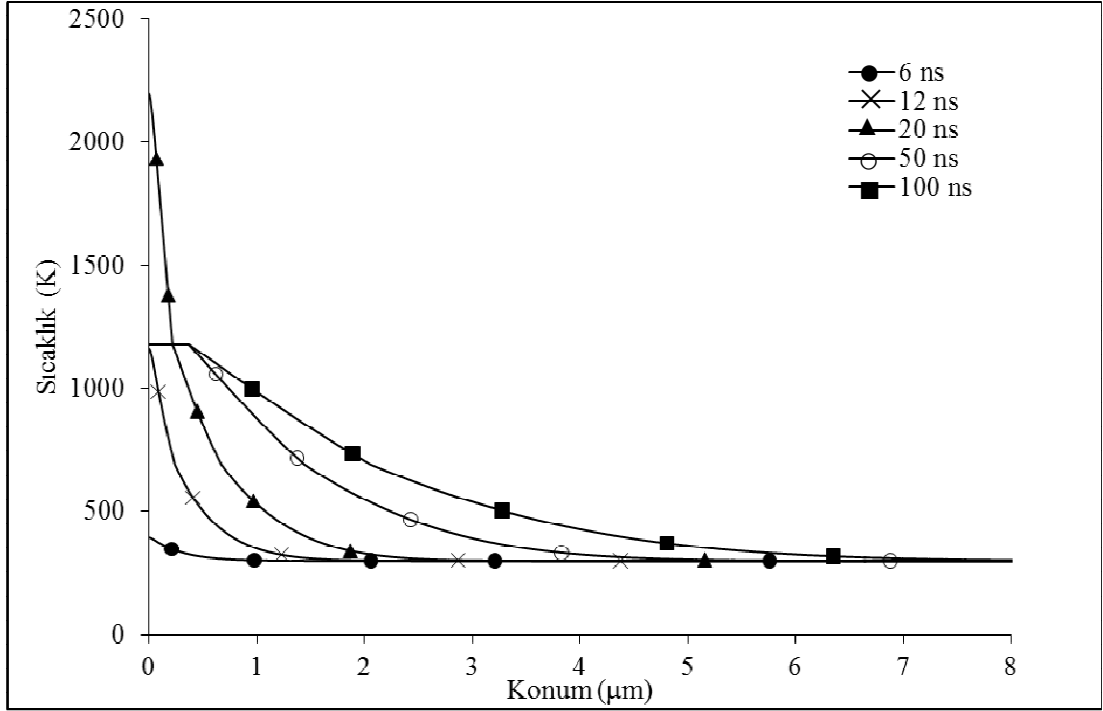


(a)

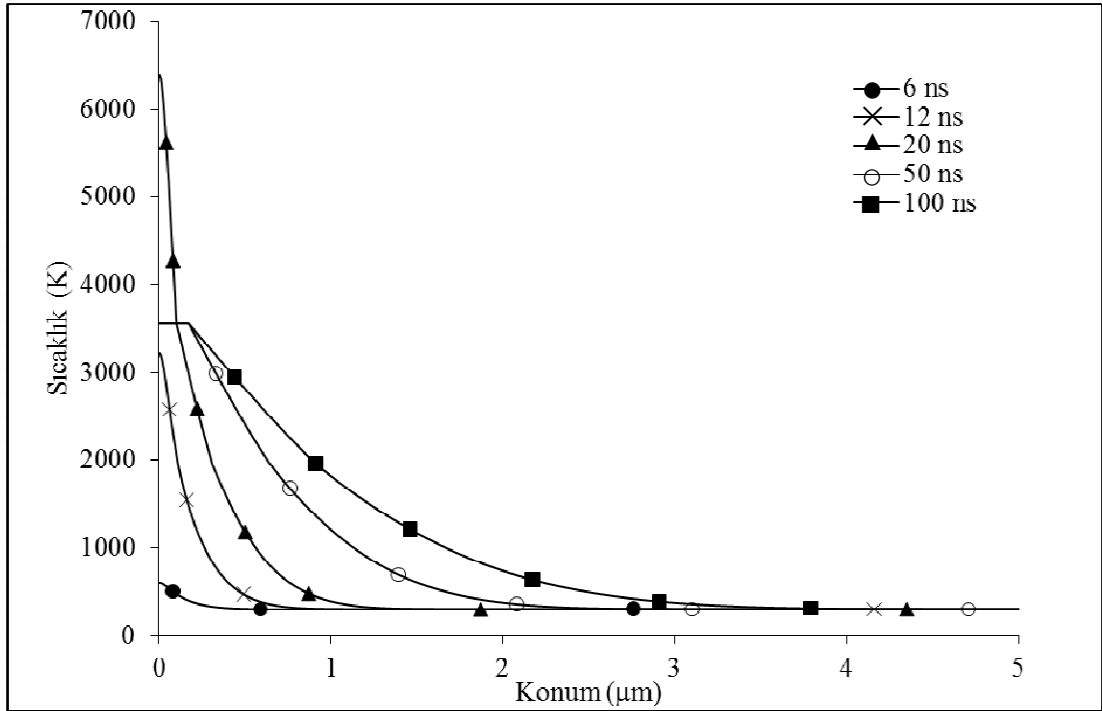


(b)

Şekil 3.6. a) Zn ve b) Ti için gelen lazer akısına göre buhar derinliğinin zamansal değişimi



(a)



(b)

Şekil 3.7. a) Zn ve b) Ti için farklı zaman anlarında 2.5 J/cm^2 lazer akı değeri için yüzeyden uzaklığın bir fonksiyonu olarak sıcaklık dağılımı

Willis ve diğerkleri pikosaniye lazerle nikel metal hedefin aşındırılması işleminde ısı iletimi ve faz değışimi süreçlerini bir boyutlu ısı iletim denklemi ile yüzey buharlaşmasını dikkate alarak teorik olarak incelemişlerdir. Malzeme aşındırılması için gereken eşik lazer akı değerini ise deneysel olarak belirlemişlerdir. Bu değer $\sim 2 \text{ J/cm}^2$ olarak ölçülmüştür. Yapılan hesaplamalarda ise eşik lazer akı değeri 0.508 J/cm^2 olarak elde edilmiştir. Deneysel veri ile hesaplama sonuçları arasındaki bu fark, deneydeki ve hesaplamadaki belirsizliklere (lazer akısındaki belirsizlik, yüksek sıcaklıkta termofiziksel özelliklerdeki belirsizlik ve ısı iletim modelindeki kabullenmeler) dayandırılmıştır. Ayrıca modelde nikel hedef malzeme yüzeyinin üzerinde lazer enerjisinin soğrulmadığı kabullenilmiştir. Buna göre verilen referanslara dayanarak [55, 74, 75] lazerle hedef malzeme etkileşiminde yüzeyde plazma oluşumu meydana geldiğı ve gelen lazerin oluşan bu plazma ile etkileştiğı belirtilmiş ve dolayısıyla oluşturulan modelde plazma oluşumu göz önüne alınmadığından eşik lazer akı değerlerinin gerçek değerin altında tahmin edildiğı belirtilmiştir. Bununla birlikte, belirtilen bu etkenler dikkate alındığında bile eşik akı davranışı ve yüzey buharlaşmasından kaynaklanan minimal malzeme aşınımı için hesaplardan sonuç edilebildiğı sonucuna varılmıştır.

Benzer olarak nanosaniye atımlı lazerle malzeme etkileşiminde de lazer atımının etkisiyle hedef yüzeyi üzerinde bir plazma oluştuğı [69] ve lazer enerjisinin belli bir kısmının oluşan plazmada soğrulmasıyla gelen enerjinin daha az bir kısmının hedefe iletildiğı ve böylece bu durumun aşındırma etkinliğini ve kalitesini etkilediğı belirtilmiştir. Ayrıca bir boyutlu ısı iletim denklemi ile yüzey buharlaşma sürecine dayanan modelle yapılan hesaplamalarda plazmada soğrulma hesaba katılmadığında hesaplamaların düşük lazer akı değerlerinde deneysel verilerle uyum gösterdiğı gösterilmiştir [69, 76].

Leitz ve diğerkleri [56] yaptıkları bir çalışmada nanosaniye atımlı lazer ile malzeme etkileşiminde aşındırma oranının tahmini için lazer atımının enerjisinin tümünün malzemenin buharlaşmasına yol açtığı kabullenmesiyle enerji korunumundan yararlanarak bir model ele almışlardır. Lazer atımının enerjisinin erime ve buharlaşma ısılarını aşmak ve malzemeyi buharlaşma sıcaklığına ısıtmak için uygulandığı kabul edilmiştir. Buna göre buhar halinde bulunan malzemenin

aşındırılmış olduğu kabul edilmiştir. Aşındırma miktarı için elde edilen deneysel verilerle modelden elde edilen verilerin oldukça iyi uyduğu görülmüştür. Deneysel veri ile teorik veri arasında çok küçük bir oranda fark bulunmasının sebebi modelde kabul edilen %100 enerji soğrulmasının gerçekte %100'ün altında olduğu ve malzemenin buharlaşma sıcaklığının üzerinde ısıtıldığı gerçeği olabileceği belirtilmiştir. Nanosaniye aşındırma işleminin lazer enerjisinin tümünün aşındırılan malzemenin buharlaşmasına gittiği varsayımı ile enerji korunumuna dayanan oldukça basitleştirilmiş şekilde tanımlanan modelle oldukça iyi tanımlanabildiği sonucuna varılmıştır [56].

3.4. Sonuçlar

Bu bölümde fiziksel özellikleri arasında önemli farklar bulunan iki farklı metalin (Zn ve Ti) lazerle aşındırma işleminde meydana gelen ısı iletimi süreci için hesaplamalar yapıldı. Verilen literatür bilgilerine dayanarak ikinci bölümde verilen model kullanılarak yapılan hesaplamalardan elde edilen sonuçların lazerle aşındırma işlemi için ısı iletiminin incelenmesine ışık tuttuğu ve yüzey buharlaşmasından kaynaklanan minimal malzeme aşınımı için bir tahmin verebildiği sonucuna varıldı. Modelde yapılan kabullenmelerden dolayı hesaplamalar sonucu elde edilen verilerin sayısal değerlerinin deneysel değerlere yaklaşık sonuç verebileceği görüldü.

4. GALVANİZE ÇELİK VE PASLANMAZ ÇELİK MALZEMELERİN LAZERLE AŞINDIRILMASINA DAYANAN DENEYSEL VE SAYISAL ÇALIŞMALAR

Bu bölümde galvanize çelik ve paslanmaz çelik malzemeler kullanılarak yapılan lazerle aşındırma sürecine dayanan deneysel çalışmalar ve sayısal hesaplamalar verilmektedir. Bölümün birinci kısmında derinlik çözünürlüğü deneysel olarak LIBS tekniği uygulanarak elde edilen galvanize çelik malzemenin deney parametrelerinin optimizasyonu için yapılan sayısal hesaplamalar anlatıldı. İkinci kısımda ise paslanmaz çelik malzeme yüzeyinin nanosaniye tek lazer atımı ile etkileşiminin deneysel ve sayısal olarak incelenmesinin sonuçları verildi.

4.1. Galvanize Çelik Malzemenin LIBS Tekniği ile Derinlik Çözünürlüğünün Elde Edilmesinde Parametrelerin Optimizasyonu İçin Sayısal Hesaplamalar

Çinko ile kaplayarak galvanize etme, çelik levhaları atmosferik korozyondan korumak için en yaygın teknik olarak bilinir [77]. Otomobil endüstrisinde yaygın olarak kullanılan galvanize çelik malzemenin LIBS tekniği ile derinlik çözünürlüğü analizinin yapıldığı çalışmada [78] tezin ikinci bölümünde detayları verilen ısı iletimi ve faz değişimi süreçlerini tanımlayan denklemlerle oluşturulan model kullanılarak tek lazer atımı için sayısal simülasyon yapıldı.

Yüzey analizi ve karakterizasyonunun önemi modifiye edilmiş malzemelerdeki gelişme ve ilerlemeyle artmıştır. Malzemelerin yüzey yapılarının değiştirilerek fiziksel ve kimyasal özelliklerinin modifikasyonu gibi yeni teknolojik gelişmeler, derinlik profili analizi için uygun yöntemler gerektirmektedir. İkincil iyon kütle spektrometresi (secondary ion mass spectrometry, odaklanan birincil iyon demeti ve çıkan ikincil iyonların toplanması ve analiz edilmesiyle) [79, 80], Auger elektron spektroskopisi (Auger electron spectroscopy) [81], X-ışını fotoelektron spektroskopisi (X-ray photoelectron spectroscopy) [82], ışıklı deşarj optik yayılım spektrometresi (glow discharge optical emission spectrometry) ve ışıklı deşarj kütle

spektrometresi (glow discharge mass spectrometry) [83, 84] gibi çeşitli farklı teknikler çok katmanlı metal malzemelerin derinlik profilini araştırmak için kullanılırlar. Bu tekniklerin birçoğu, örneğin biçimi veya yapısından kaynaklanan kısıtlamalar gibi çeşitli sebeplerden dolayı sınırlıdır [85]. Bununla birlikte LIBS, katmanlı malzemelerin derinlik profilini elde etmek için güçlü bir araçtır ve periyodik tablodaki elementlerin çoğuna duyarlıdır. Ayrıca, LIBS ile örnek boyutu ve yapısından kaynaklanan sınırlamalar olmaksızın hava ortamında atmosferik basınç altında tamamlanan hızlı bir analiz gerçekleştirilebilir [80, 85].

LIBS tekniği askeri, ev güvenliği, ekolojik ve çevresel uygulamalar gibi geniş bir aralıkta çeşitli uygulamalar için kullanılmaktadır. Oztoprak ve diğerleri [86] stellit tozun bakır levha içine difüzyon derinliğinin miktarını analiz etmek için LIBS tekniğini kullanmışlardır. Lazer tepe gücü ve atım süresinin lazerle kaynak işleminin kalitesi üzerine etkilerini araştırmışlardır. Peng ve diğerleri [87] kullanılmış pillerdeki ağır metallerin hızlı ve basit olarak belirlenmesinde, geleneksel yöntemlerle analiz etmek zor ve zaman alıcı olduğundan, LIBS tekniğinin uygulanabilirliğini araştırmışlardır. Daha ileri bir gelişme olarak, Elsayed ve diğerleri [88] taşınabilir LIBS sistemi için küçük boyutlu dayanıklı bir potansiyel lazer kaynağı sağlayan, Q-anahtarlamalı atımlı Nd:YAG lazer sistemi tasarlamış ve kurmuşlardır.

Yüzeyinde çinko kaplama bulunan (galvanize) çelik levhanın derinlik çözünürlüğünün LIBS tekniği ile elde edilmesinde, derinlik çözünürlüğü iki ortam arasındaki arayüz profili belirlenirken bir sinyalin belirli bir ölçüde azalması (veya artması) üzerinden belirlenen derinlik menzili olarak tanımlanır. Derinlik çözünürlüğü ölçülen toplam sinyaldeki %84'ten 16'ya (veya %16'dan 84'e) değişim oranındaki derinlik menziline karşılık gelir [89, 90].

4.1.1. Çalışmanın önemi ve amacı

Yüksek derinlik çözünürlüğü elde etmek için derinlik profili analizindeki ana problemlerden birisi işlemi etkileyen en uygun parametrelerin seçilmesidir. Buharlaşma, atomlaşma, iyonlaşma, molekül ve parçacık oluşumu, plazma oluşumu ve genişlemesi ile diğer süreçler derinlik profilini etkiler [91]. Bir katı hedef lazer

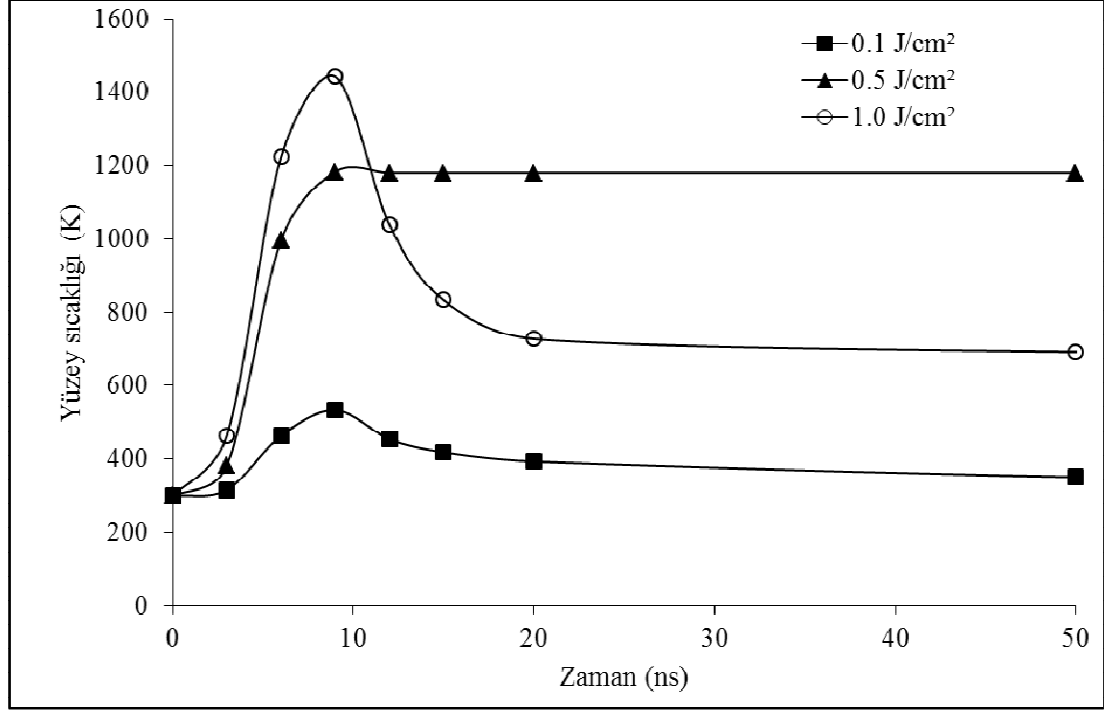
ışın demetiyle aydınlatıldığında, ışımanın yüzey tarafından soğurulması sonucu aşındırma süreci başlar. Hedef yüzeyinde sıcaklık artar ve bunu hedef malzemenin erime ve buharlaşma süreçleri izler. Isı iletim denklemi hedef malzemenin ısınma sürecinin modellenmesi için kullanılır. Lazer işlemleri çoğunlukla çoklu-atım uygulamaları olarak uygulansa da, izleyen lazer atımları için yüzey soğurması ve plazma oluşum eşik değerini büyük ölçüde ilk lazer atımı belirlediğinden, lazerle etkileşim sürecinin içerdiği fiziksel olay hedef yüzeyinde tek atım ışımanın etkisinin araştırılmasıyla daha doğru bir şekilde çalışılabilir [39-42, 92]. Deneysel araştırmanın yanısıra, matematik modelleme katı yüzeyler üzerinde lazerle etkileşim sonucu yapı oluşumu mekanizmasına daha iyi bir bakış açısı sağlayabilir.

Yapılan çalışmada nanosaniye Nd:YAG lazerle birleştirilmiş yüksek çözünürlüklü spektrometre kullanarak yüksek derinlik çözünürlüğü elde etmek amaçlandı. Bu nedenle, daha yüksek derinlik çözünürlüğü elde etmek için deneylerin gerçekleştirilmesinde, daha önce de belirtildiği gibi, optimum koşulların belirlenmesi önemlidir ve bu amaçla sayısal hesaplamalar yapıldı. Deneylerin performansını etkileyen işlem parametrelerinden lazer atım akısının etkileri en iyi koşulları tanımlamak için araştırıldı. Farklı lazer akı değerleri için tek lazer atımı ile aşındırma sürecinin etkisini incelemek amacıyla malzeme içinde sıcaklık dağılımı, erime ve buharlaşma koşulları ısı iletim denklemi kullanılarak yapılan sayısal hesaplamalar ile elde edildi. Sıcaklık dağılımının, erime ve buharlaşma süreçlerinin lazer akısının bir fonksiyonu olarak zamana göre değişimleri gösterildi. Lazerle malzeme etkileşim sürecindeki fiziksel olay hedef malzeme yüzeyinde tek lazer atımının etkisi araştırılarak daha detaylı çalışılabilir [39-42, 92]. Ayrıca matematik modeller kullanılarak yapılan hesaplamalarla meydana gelen fiziksel olaylara getirilen bakış deney parametrelerinin daha uygun seçilebilmesine yardımcı olur ve böylece yapılan uygulamalarda zaman ve deneysel maliyet azaltılabilir.

4.1.2. Deneyle ilgili hesaplamalar ve elde edilen sonuçlar

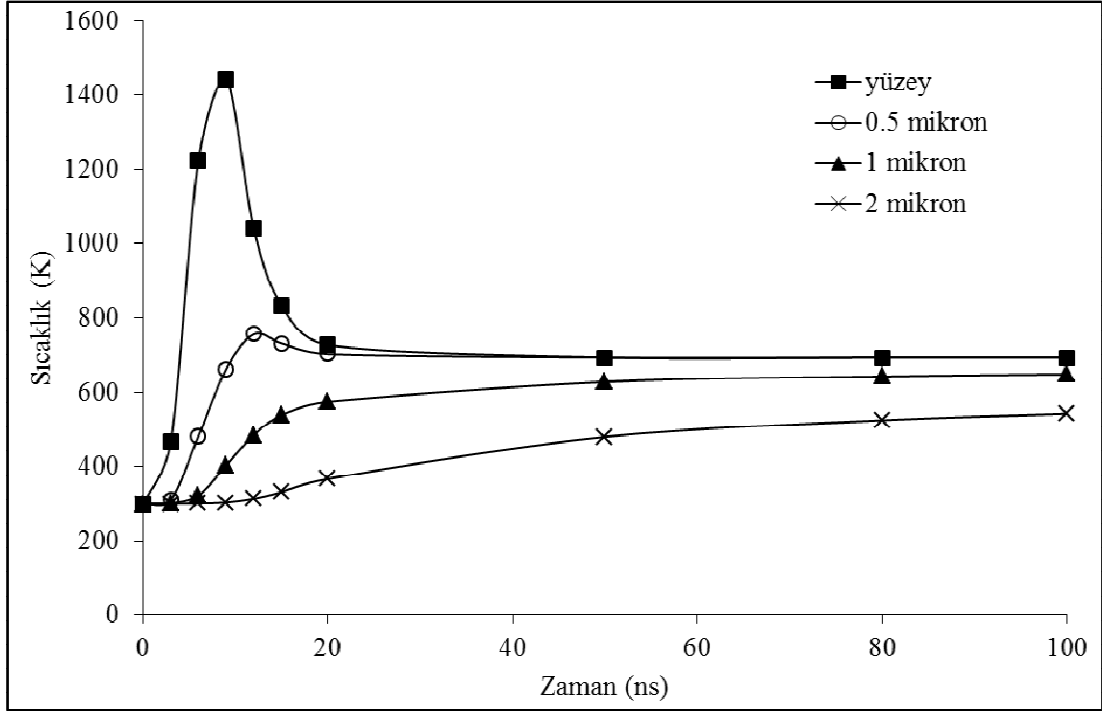
Çinko kaplanmış (galvanize) çelik levhanın derinlik profil analizini yapmak için aşındırma işlemi Nd:YAG lazer kullanılarak yapıldı. Dalgaboyu 1064 nm, atım uzunluğu 4.4 ns olan lazer atımları malzeme yüzeyine odaklandı. Buna göre dalgaboyu 1064 nm, atım uzunluğu 4.4 ns olan lazer atımının galvanize çelik

malzeme yüzeyine odaklanması sonucu gerçekleşen lazer malzeme etkileşiminde meydana gelen sıcaklık dağılımı, erime ve buharlaşma derinlikleri lazer akısının bir fonksiyonu olarak hesaplandı. Lazer atımı galvanize çelik malzemenin yüzeyinde kaplanmış olan çinko ile etkileştiğinden hesaplamalarda çinko için üçüncü bölümdeki Tablo 3.2’de verilen özellikler kullanıldı.



Şekil 4.1. Galvanize çelik levha yüzey sıcaklığının farklı lazer akı değerleri için zamanla değişimi

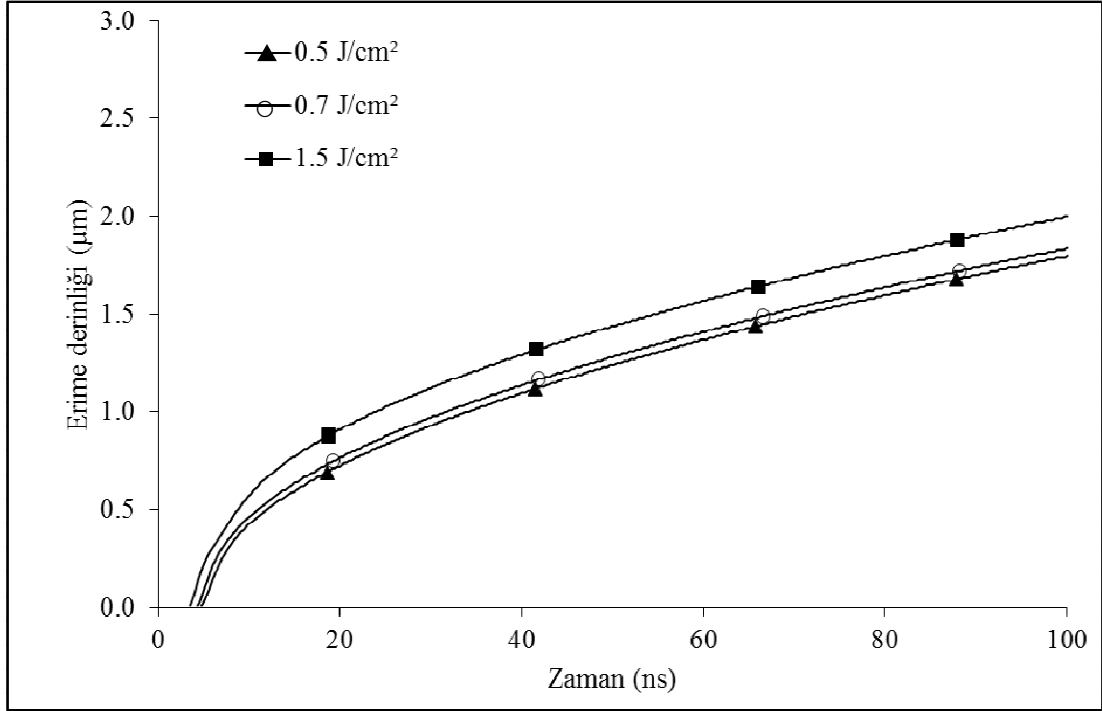
Şekil 4.1’de galvanize çelik levha yüzey sıcaklığının farklı lazer akı değerleri için zamanla değişimi gösterildi. Şekil 4.1’e göre 0.5 J/cm^2 akı değerinde lazer atımı ile malzeme yüzeyi buharlaşma sıcaklığına ulaşır. Üçüncü bölümde 12 ns lazer atımı için yapılan hesaplamalarda lazer akı değeri Zn için 0.7 J/cm^2 üzerinde olduğunda çinko hedef malzemenin buharlaşma sıcaklığının (1180 K) üzerinde ısıtıldığı belirtildi. Bu sonuç 4.4 ns lazer atımı için yapılan hesaplamalarla karşılaştırıldığında lazer atım süresi kısa olduğunda hedef malzeme yüzeyine düşen lazer atım şiddeti daha yüksek olacağından daha düşük akı değerinde buharlaşma sıcaklığına ulaşılabilceği sonucuna varılabilir.



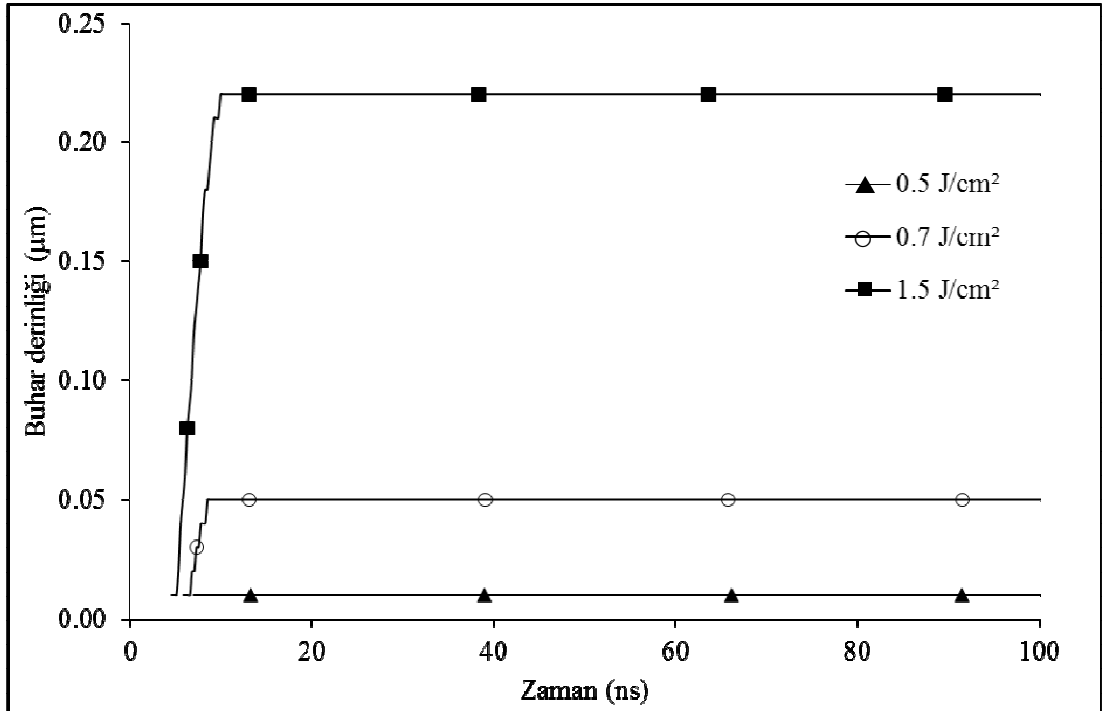
Şekil 4.2. Lazer akı değeri 1 J/cm^2 için galvanize çelik levha yüzeyinde ve iç noktalarında zamana göre sıcaklık dağılımı

Şekil 4.2'de 1 J/cm^2 lazer akı değeri için galvanize çelik levha yüzeyinde ve yüzeyden $0.5 \mu\text{m}$, $1 \mu\text{m}$ ve $2 \mu\text{m}$ derinliklerdeki iç noktalarında zamana göre sıcaklık dağılımı verilmektedir. Şekil 4.2'ye göre yüzeyden iç noktalara doğru gerçekleşen ısı iletiminden dolayı zamanla yüzey bölgesinin sıcaklığı azalırken iç noktalarda sıcaklık arttığı görülür. Yüzey sıcaklığı, iç katman noktasının sıcaklığına eşit sıcaklığa düştüğünde aralarında artık ısı iletimi gerçekleşmez.

Şekil 4.3'te farklı lazer akı değerleri için galvanize çelik levhada erime derinliğinin zamanla değişimi gösterilmektedir. Yüzey bölgesinden içeriye doğru gerçekleşen ısı yayılımından dolayı lazer atımı sonra erdikten sonra da erime derinliği artmaya devam etmektedir. Şekil 4.4'te ise farklı lazer akı değerleri için galvanize çelik levhada buhar derinliğinin zamanla değişimi gösterilmektedir. Normal buharlaşma mekanizması ile 1.5 J/cm^2 lazer akı değeri için minimum $\sim 0.20 \mu\text{m}$ aşındırma olacağı görülür. Normal buharlaşma mekanizmasına dayanan model ile yapılan hesaplamalar ile yüzey buharlaşmasından kaynaklanan minimal malzeme aşınımı için sonuç edildi. Buna göre deneylerde yüksek değerde aşındırma oranı elde etmek için 1.5 J/cm^2 lazer akı değerinden yüksek akı değerleri kullanılabilir.



Şekil 4.3. Farklı akı değerleri için galvanize çelik levhada erime derinliğinin zamanla değişimi

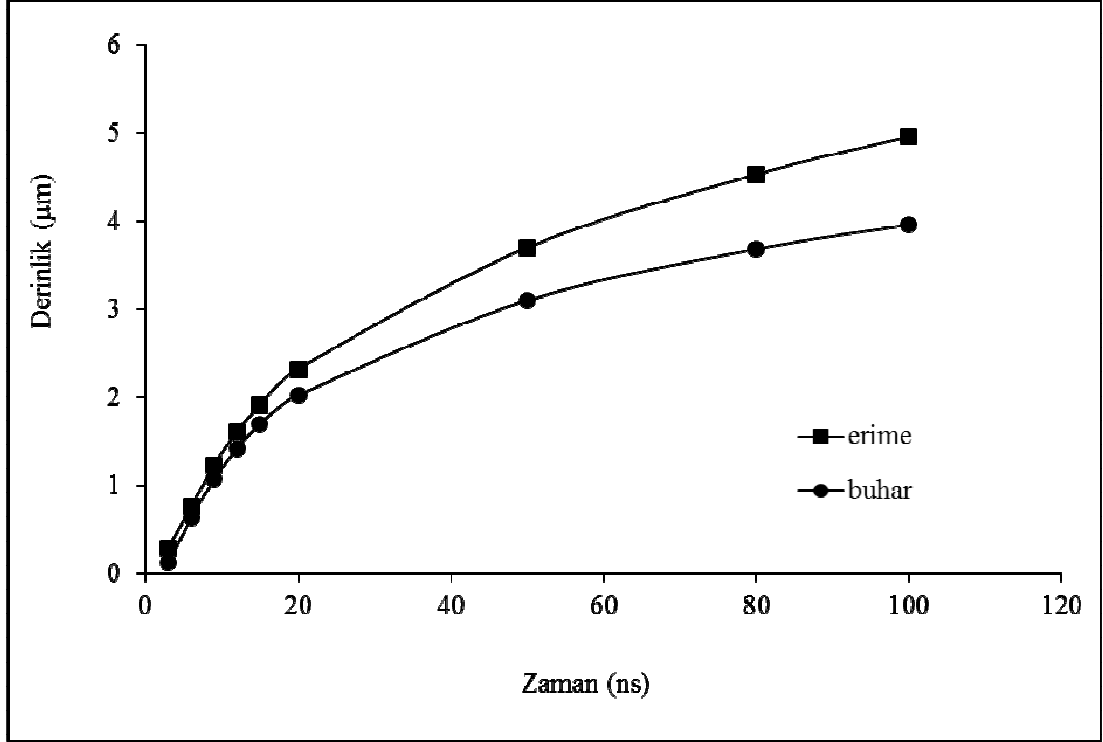


Şekil 4.4. Farklı akı değerleri için galvanize çelik levhada buhar derinliğinin zamanla değişimi

Bulgakova ve diğerleri [93] yaptıkları çalışmada lazerle aşındırma işlemi sırasında oluşan plazmadan yayılan ışımının nanosaniye lazer atımıyla aydınlatılan

malzemelerin ısınması ve aşındırılması üzerindeki etkilerini $1-50 \text{ J/cm}^2$ lazer akı değer aralığında deneysel ve teorik olarak incelemişlerdir. Lazerle oluşturulan plazmanın bremsstrahlung ve tekrar-birleşme ışımalarından dolayı malzemenin daha fazla ısınmasına sebep olarak daha derin erimiş bölge oluşumuna ve dolayısıyla daha derin krater oluşmasına yol açtığını göstermişlerdir. Lazerle aşındırma işlemi sırasında yüzey buharlaşması rejiminde, lazerle oluşturulan plazma hedef malzemeyi lazer ışınına karşı perdeler ve sonuç olarak kütle aşınması doyuma ulaşır [37, 69, 93, 94]. Patlayarak buharlaşma (faz patlaması) rejimine geçiş yakınındaki lazer akı değerlerinde ise plazma lazer demeti enerjisinin %40'tan fazlasını toplayabilir [93, 95]. Böyle sıcak bir plazma erimiş malzemenin, plazma tepki (recoil) basıncından dolayı, dışarı atılmasına sebep olur [3, 93]. Diğer taraftan, plazmada gerçekleşen tekrar-birleşme ve bremsstrahlung ışımaları hedef malzeme için ilave bir ısı kaynağı olarak malzemenin daha fazla ısınmasına sebep olabilir [31, 93, 96, 97]. Dolayısıyla patlayarak buharlaşma rejiminde gözlenen aşındırma derinliği, sadece plazma perdelemesi dikkate alınarak tahmin edilen aşındırma ve erime derinliklerinin toplamından daha yüksek değere sahip olur [93]. Faz patlaması rejiminde tahliye edilen katman, erimiş malzeme katmanının derinliğini aşamayacağından böyle derin bir aşındırma değerine bütün erimiş malzeme katmanının hedeften tahliyesi varsayımı ile ulaşamaz. Geleneksel ısı modeli yüksek akı değerleri için erime derinliğini olduğundan daha küçük tahmin eder. Çünkü aşındırma ile oluşan plazmadan bremsstrahlung ve tekrar-birleşme ışımaları (ağırlıklı olarak ultraviyole bölgede) ile dikkate değer oranda enerji yayılır ve hedef malzemeye geri gönderilir. Plazma ışımından gelen ilave enerji kaynağı ile hedef malzeme daha fazla ısınabilir ve daha derin erimiş bölge katmanı oluşur. Böylece daha derin aşındırma meydana gelir [31, 93, 96, 97]. Ayrıca, lazerle oluşturulan sıcak plazmalar etkin olarak ultraviyole spektral aralıkta yayılım yapar [93, 96]. Malzemelerin bu aralıkta yansıtma katsayıları kızılötesi ve görünür bölgeye kıyasla daha küçüktür ve dolayısıyla hedef malzeme tarafından gelen lazer ışınına göre daha iyi soğrulur. Böylece bu ilave ısınma, erimiş malzeme katmanını dikkate değer oranda arttırabilir. Sonuç olarak yazarlar, lazer akı değeri aralığına bağlı olarak, lazerle oluşturulan plazmanın aşındırma oranını birbirine zıt olarak iki farklı şekilde etkilediğini belirtmişlerdir. Orta seviyede akı değerleri için plazmanın hedefi gelen lazer ışınına

karşı kısmen perdelemesinden dolayı aşındırma veriminin düşeceği ve tersine, yüksek akı değerlerinde ise plazmanın patlayarak aşındırma için uyarıcı rol oynadığı sonucuna varmışlardır.



Şekil 4.5. Deneysel koşullar için yapılan hesaplama sonucunda elde edilen galvanize çelik levhada erime ve buhar derinliklerinin zamanla değişimi

Şekil 4.5'te deneysel koşullar için yapılan hesaplama sonucunda elde edilen galvanize çelik levhada erime ve buhar derinliklerinin zamanla değişimi gösterilmektedir. Deneyde 1064 nm dalgaboyunda, 4.4 ns atım süreli, 26 mJ enerjili Nd:YAG lazer demeti kaplama kalınlığı 14.10 µm olan galvanize çelik hedefe 160 µm yarıçapında alana odaklanarak derinlik çözünürlüğü elde edildi. Hedef yüzeyinde lazer akısı 32.34 J/cm² değerindedir. Şekilde erime derinliğinin ~5 µm buhar derinliğinin ise ~4 µm olarak elde edildiği görülür. Yukarıda yapılan açıklamalar dikkate alındığında, galvanize çelik malzemenin kaplama kalınlığı 14.10 µm olduğu halde derinlik çözünürlüğü elde edildiğine göre eriyen bölgenin derinliğinin en az bu değerde olması gerektiği söylenebilir. Ayrıca hesaplamalarda kullanılan modelde plazmadan kaynaklanan etki hesaba katılmamış olduğundan eriyen bölge derinliğinin olduğundan daha düşük tahmin edildiği söylenebilir. Buna

göre yüksek lazer akı değeri için aşındırma ile oluşan plazmadan kaynaklanan hedef malzemenin ilave ısınmasından dolayı erimiş bölge derinliği tahmin edilenden fazla olmalıdır. Hesaplanan değerler minimum değerlerdir ve deneysel değerlere yaklaşım sunar.

Matematik modeller kullanılarak yapılan hesaplamalar lazer malzeme etkileşiminde meydana gelen fiziksel olayların incelenmesine ve deneyde lazer parametrelerinin uygun bir şekilde seçilmesine yardımcı olur ve böylece yapılan uygulamalarda harcanan zaman ve deneysel maliyet azaltılabilir. Lazerle malzeme etkileşiminde meydana gelen fiziksel olaylar karmaşık olduğundan belirli yaklaşımlar yapılarak matematik modeller oluşturulur. Buna göre yapılan hesaplamalardan elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde derinlik çözünürlüğünü etkileyen önemli parametrelerden birisi olan lazer akı değerinin lazerle malzeme etkileşiminde meydana gelen fiziksel olaylar için yaklaşık olarak tahmin edilebildiği görülür.

4.2. Paslanmaz Çelik Malzemenin Tek Atım Nd:YAG Lazerle Aşındırılmasının Deneysel ve Sayısal İncelenmesi

Yüzey modifikasyonu malzeme yüzey mikroyapısının değiştirilerek özelliklerinin geliştirilmesi anlamı taşır. Bu uygulama yaygın olarak çalışılır ve uygulanır. Uygulama sonucu elde edilen yüzey morfolojisi veya mikroyapısı malzeme yüzeyinin özelliklerini büyük oranda belirler [98]. Malzemede uygun ya da istenen yüzey morfolojisi elde etmek için ısıl püskürtme [98-101], yüzeyde mekanik aşındırma işlemi [98, 102-104], lazerle yüzey işleme [98, 105-110] gibi birçok farklı yüzey işleme teknikleri bulunur. Bunlar arasında lazerle yüzey işleme geleneksel yöntemlere göre bazı avantajlar sağlar ve metal malzemeler için önemli ölçüde ilgi görür [98, 105-121].

AISI 316L paslanmaz çelik endüstriyel olarak çok yaygın kullanıma sahip önemli bir malzemedir. Bu tür paslanmaz çelikler kolaylıkla şekillendirilebilir ve mükemmel korozyon direnci gösterirler ve ayrıca biyo-uyumludurlar [122, 123]. Uçak, kimya ve gıda endüstrilerinde ve nükleer reaktörlerde geniş uygulama alanları bulurlar [115, 118, 119]. Bu tip paslanmaz çelik malzemelerin böyle yaygın kullanımından dolayı

lazerle yüzey modifikasyonu uygulamaları çeşitli yazarlar tarafından çalışılmıştır [98, 115, 118, 119, 122, 123].

4.2.1. Çalışmanın önemi ve amacı

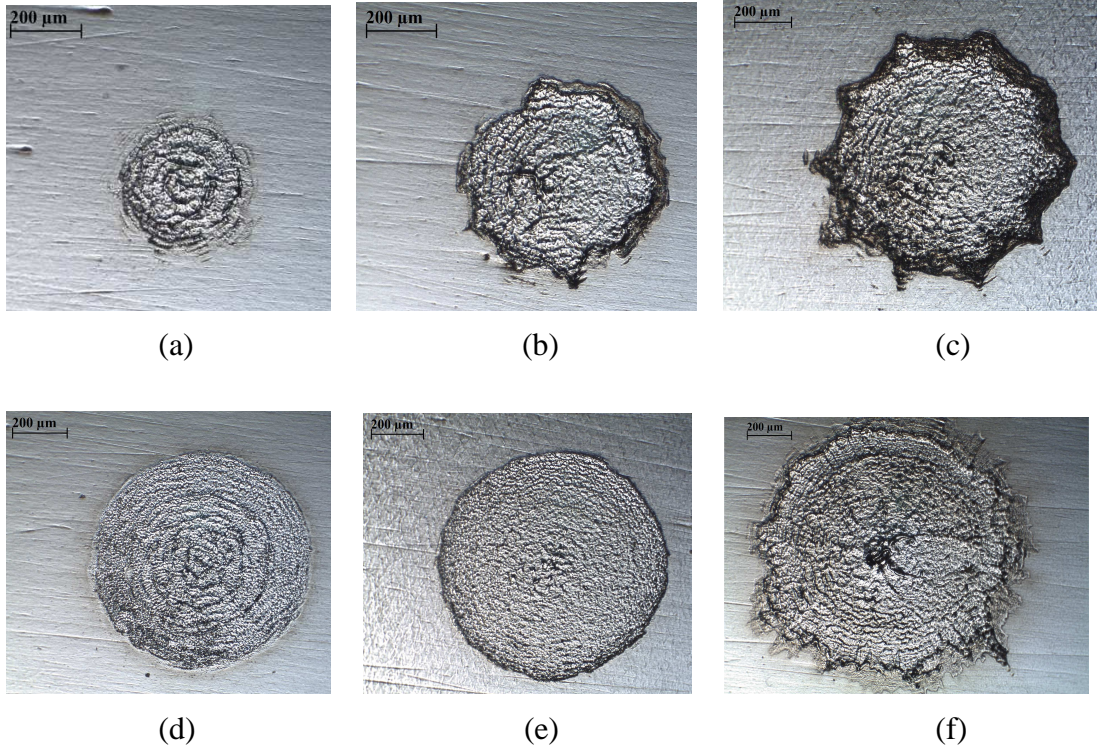
AISI 316L paslanmaz çelik malzeme çok yaygın kullanım alanına sahip önemli bir malzeme olduğundan lazerle yüzey modifikasyonu çalışmaları ile malzeme yüzeyinin özelliklerinin geliştirilmesi önem taşır. Bu uygulamalarda lazerle malzeme etkileşimi sırasında ısıl süreçler meydana gelir. Lazer atımı hedef malzeme yüzeyine çarptığında enerjisi soğrulur, böylece malzeme ısınır, ardından erime ve buharlaşma süreçleri meydana gelir. Bu süreçler oluşan yüzey morfolojisini etkiler. Bu nedenle lazer malzeme etkileşiminde meydana gelen fiziksel ısıl süreçlerin incelenmesi önem taşır. Bu süreçler hedef malzemenin optik ve ısıl özelliklerine [124] ve lazer parametrelerine [73] bağlı olduğundan, parametrelerin ve enerji iletiminin hedef malzeme üzerindeki etkilerinin araştırılması uygulamaların kontrol ve optimizasyonu için gereklidir [55, 125]. Lazerle yüzey modifikasyon işlemi genellikle çoklu lazer atımları ile uygulansa da [3, 40, 97, 126] meydana gelen fiziksel olaylar tek lazer atımının hedef malzeme yüzeyine etkisi incelenerek daha iyi ve doğru olarak çalışılabilir [40].

Bu çalışmada dalgaboyu 1064 nm olan, 6 ns süreli tek atım Nd:YAG lazer ile AISI 316L paslanmaz çelik malzeme yüzeyinin etkileşimi deneysel ve sayısal olarak incelendi. Lazer ile paslanmaz çelik malzemenin yüzey modifikasyonu gelen lazer akı değişiminin yüzey morfolojisi üzerine etkileri gözlenerek çalışıldı. Lazerle aşındırılan paslanmaz çelik malzemenin yüzey yapısı optik mikroskop ve profilometre analizleri ile belirlendi. İkinci bölümde anlatılan model kullanılarak tek lazer atımı için sayısal hesaplamalar yapıldı. Nd:YAG tek lazer atımı ile paslanmaz çelik malzeme yüzeyi arasındaki etkileşimin sayısal ve deneysel olarak incelenmesinden elde edilen sonuçlar sunuldu.

4.2.2. Deney ve hesaplamalardan elde edilen sonuçlar

Deneyde hedef malzeme olarak AISI 316L paslanmaz çelik kullanıldı. Malzemenin element kompozisyonunu ağırlıkça %69 Fe, %18 Cr, %10 Ni, %3 Mo oluşturur.

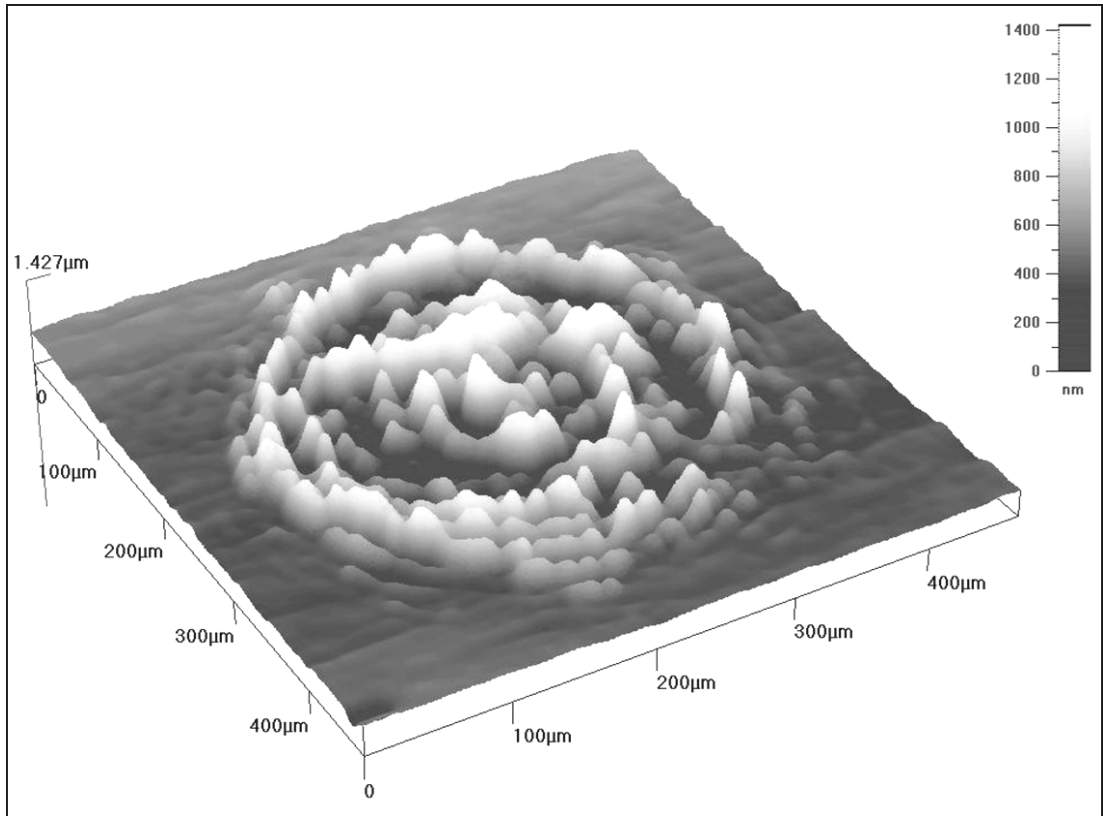
Paslanmaz çelik levha 1 mm kalınlığındadır ve 1 µm'den az yüzey pürüzlülüğüne sahiptir. Lazer uygulanmadan önce çelik levhanın cilalı yüzeyi aseton ve alkol ile temizlendi. Deneyler 6 ns süreli lazer atımları üreten Nd:YAG Surelite Continuum lazer sistemi ile gerçekleştirildi. Dalgaboyu 1064 nm olan Gaussian profilde Nd:YAG tek lazer atımı hedef malzeme yüzeyine odaklandı. Lazer demeti 100 mm odak uzaklığına sahip mercek ile paslanmaz çelik hedef yüzeyine normal doğrultuda odaklandı. Deneyler normal atmosfer ortamında gerçekleştirildi. Hedef malzeme yüzeyine gelen lazer şiddeti, lazer enerjisi sabit tutularak mercek ile hedef arasındaki uzaklığın değiştirilmesiyle belirlendi.



Şekil 4.6. Hedef ile mercek arasındaki farklı uzaklık değerlerinde farklı lazer enerjileri için paslanmaz çelik malzemede lazerle işlenen yüzeylerin optik mikroskop görüntüleri, a) 100 mm, 20 mJ; b) 100 mm, 50 mJ; c) 100 mm, 200 mJ; d) 90 mm, 20 mJ; e) 90 mm, 50 mJ; f) 90 mm, 200 mJ

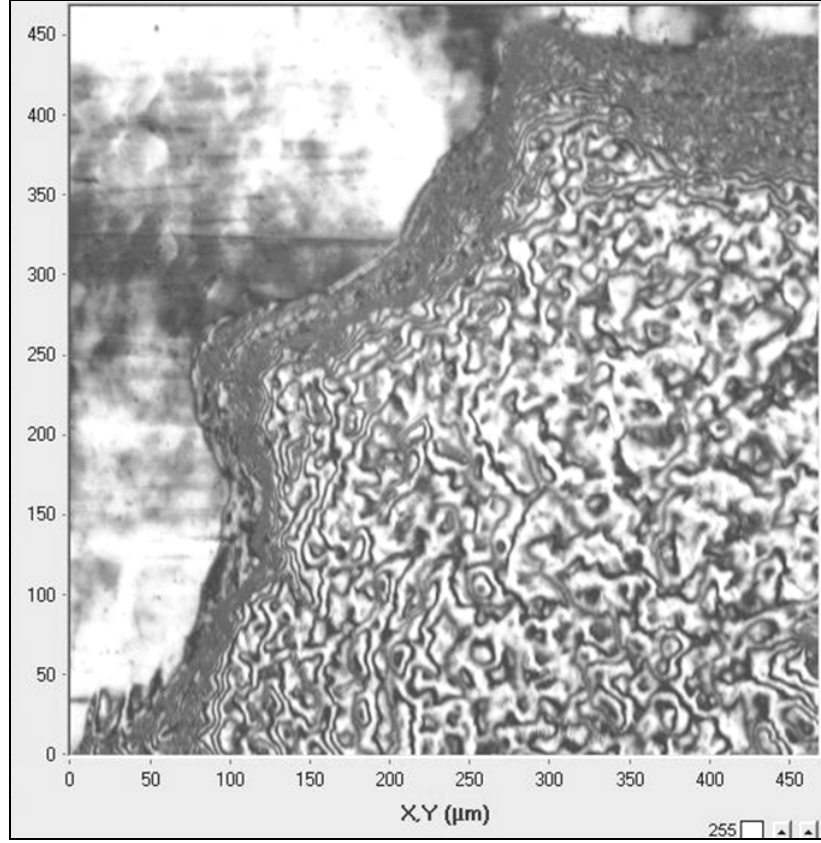
Deneyde lazer atım enerjisi 20 mJ değerinde sabit tutuldu. Lazer atım enerjisi güç-ölçer ile ölçüldü. Lazer ışınını malzeme yüzeyine odaklamak için kullanılan mercek ile hedef arasındaki uzaklık 100 mm ile 90 mm arasında değiştirildi. Buna karşılık hedef yüzeyinde lazerin odaklandığı alanın çapı 43 ile 316 µm aralığında, lazer atımının tepe şiddeti ise $4.25 \times 10^9 - 2.27 \times 10^{11}$ W/cm² aralığında değiştirildi.

Diğer deney serilerinde ise lazer atım enerjisini 50 mJ ve 200 mJ değerlerinde sabit tutularak mercekle hedef arasındaki uzaklık değiştirildi. Buna karşılık lazer şiddet değerleri ise sırasıyla $1.06 \times 10^{10} - 5.67 \times 10^{11} \text{ W/cm}^2$ ve $4.25 \times 10^{10} - 2.27 \times 10^{12} \text{ W/cm}^2$ aralığında olmaktadır. Lazerle etkileşen paslanmaz çelik malzemenin yüzey yapısı optik mikroskop ve profilometre ile belirlendi. Paslanmaz çelik malzemenin belirtilen koşullarda lazerle işlenen yüzeylerinin optik mikroskop ile elde edilen yüzey görüntüleri Şekil 4.6'da gösterildi.



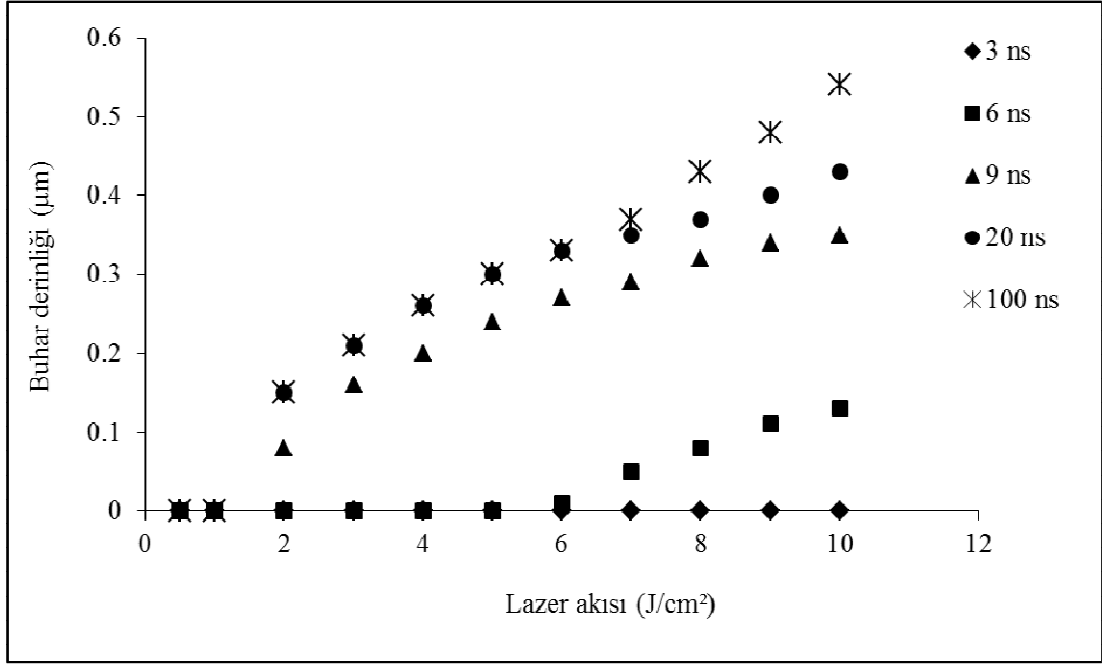
Şekil 4.7. Mercek ile hedef arasındaki uzaklığın 100 mm olduğu durumda 20 mJ lazer enerji değeri için paslanmaz çelik malzemedeki lazerle işlenen yüzeylerin profilometre görüntüsü

Lazer enerjisi 20 mJ ve 200 mJ olduğu durumda lazerle işlenen yüzeylerin profilometre ile elde edilen yüzey görüntüleri ise sırasıyla Şekil 4.7 ve 4.8'de gösterildi. Şekillerden lazerle işleme sırasında malzemenin sıvı fazında meydana gelen dalga benzeri hareket görülür. Şekil 4.8'de ise lazerle işlenen yüzeyde hacim artışı olduğu görülür ve bu durumun György ve diğerleri [17] tarafından yapılan çalışmada elde edilen sonuçlara dayanarak yüzey oksidasyonundan kaynaklandığı söylenebilir.

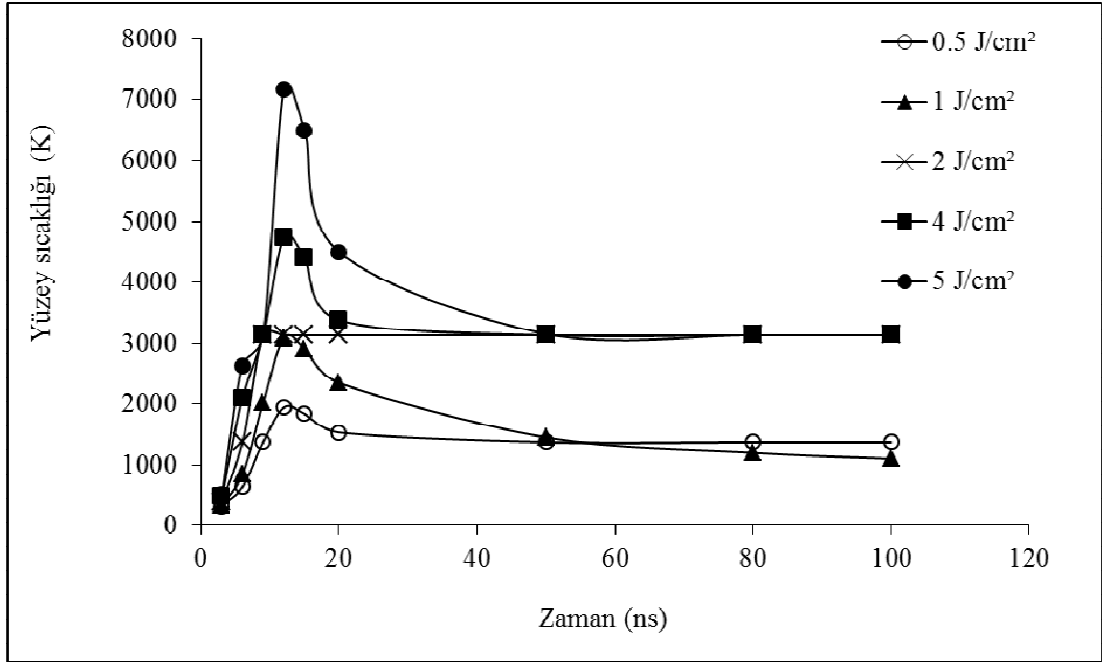


Şekil 4.8. Mercek ile hedef arasındaki uzaklığın 100 mm olduğu durumda 200 mJ lazer enerji değeri için paslanmaz çelik malzemede lazerle işlenen yüzeylerin profilometre görüntüsü

Lazerle aşındırma sürecinde meydana gelen fiziksel olayları anlamak amacıyla çelik malzemenin ısınma, erime ve buharlaşma süreçlerini belirlemek için sayısal hesaplamalar yapıldı. Şekil 4.9’da farklı lazer akı değerlerine göre buhar derinliği gösterilmektedir. Şekil 4.10’da ise yüzey sıcaklığının farklı lazer akı değerlerine göre zamanla değişimi görülmektedir. Şekil 4.9’a göre 1064 nm dalgaboyunda Nd:YAG lazer ile paslanmaz çelik arasındaki etkileşimde 2 J/cm^2 lazer akı değeri için aşındırma gerçekleşmektedir. Aşındırma eşik değeri hedef malzeme yüzeyinde gözlenebilir derecede aşındırma oluşturmak için gereken minimum lazer akısı olarak tanımlanır [92]. Aşındırma için eşik lazer akı değeri 2 J/cm^2 olarak elde edildi.



Şekil 4.9. Paslanmaz çelik malzemede farklı lazer akı değerlerine göre buhar derinliğinin değişimi



Şekil 4.10. Paslanmaz çelik malzemede farklı lazer akı değerlerine karşılık yüzey sıcaklığının zamanla değişimi

Dalgaboyu 1064 nm olan tek atım Nd:YAG lazer ile AISI 316L paslanmaz çelik malzeme yüzeyinin etkileşimi deneysel ve sayısal olarak incelendi. Paslanmaz çelik

malzemenin lazerle yüzey modifikasyonu lazer atım şiddeti değiştirilerek incelendi. Farklı lazer şiddeti değerlerinin yüzey morfolojisi üzerine etkileri araştırıldı.

4.3. Sonuçlar

Lazerle aşındırma sürecine dayanan uygulamalardan birisi olan LIBS tekniği kullanılarak galvanize çelik malzemenin derinlik çözünürlüğünün deneysel olarak elde edilmesinde deney parametrelerinin optimizasyonu için ikinci bölümde anlatılan model kullanılarak sayısal hesaplamalar yapıldı. Daha yüksek derinlik çözünürlüğü elde etmek için deneylerin gerçekleştirilmesinde optimum koşulların belirlenmesi önemlidir ve bu amaçla sayısal hesaplamalar yapıldı. Deneylerin performansını etkileyen işlem parametrelerinden lazer atım akısının etkileri en iyi koşulları tanımlamak için araştırıldı. Yapılan hesaplamalardan elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde derinlik çözünürlüğünü etkileyen önemli parametrelerden birisi olan lazer akı değerinin lazerle malzeme etkileşiminde meydana gelen fiziksel olaylar için yaklaşık olarak tahmin edilebildiği görüldü.

Endüstriyel olarak çok yaygın kullanıma sahip ve aynı zamanda biyo-uyumlu önemli bir malzeme olan AISI 316L paslanmaz çelik malzemenin tek atım Nd:YAG lazer ile aşındırılması üzerine deneysel ve sayısal incelemeler yapıldı. Lazer ile paslanmaz çelik malzemenin yüzey modifikasyonu gelen lazer akı değişiminin yüzey morfolojisi üzerine etkileri gözlenerek çalışıldı. İkinci bölümde anlatılan model kullanılarak tek lazer atımı için sayısal hesaplamalar yapıldı. Nd:YAG tek lazer atımı ile paslanmaz çelik malzeme yüzeyi arasındaki etkileşimin sayısal ve deneysel olarak incelenmesinden elde edilen sonuçlar sunuldu.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında öncelikle Gauss formunda şiddet dağılımına sahip nanosaniye süreli bir lazer demetinin bir metal yüzeye uygulanması sürecinde lazer demeti ile katı malzemenin etkileşimi sırasında meydana gelen ısınma, erime ve buharlaşma süreçlerini sayısal olarak incelemek için matematiksel bir model ele alındı. Bu süreçlerin modellenmesi için ısı iletimi ve faz değişimi denklemleri kullanıldı. Denklemlerin çözümünde sonlu fark yaklaşımıyla sayısal çözüm yöntemi kullanılarak oluşturulan algoritma Fortran programlama dili kullanılarak yazıldı.

Lazerle etkileşen malzemeler içinde sıcaklık dağılımı, erime derinliği ve yüzey buharlaşma derinliğini elde etmek için yazılan sayısal çözüm algoritmasıyla fiziksel özellikleri arasında önemli farklar bulunan iki farklı metalin (Zn ve Ti) lazerle aşındırma işleminde meydana gelen ısı iletimi süreci için hesaplamalar yapıldı. Ti ve Zn metal hedef malzemeler içinde sıcaklık dağılımı, erime derinliği ve yüzey buharlaşma derinliği farklı lazer akı değerleri için hesaplanarak elde edildi. Yapılan hesaplamalar lazerle aşındırma işleminde meydana gelen ısısal mekanizmalara bir öngörü ve anlayış sağlar. Ele alınan model kullanılarak yapılan hesaplamalardan elde edilen sonuçların lazerle aşındırma işlemi için ısı iletiminin incelenmesine ışık tuttuğu ve yüzey buharlaşmasından kaynaklanan minimal malzeme aşınımı için bir tahmin verebildiği sonucuna varıldı.

Lazerle aşındırma sürecine dayanan uygulamalardan birisi olan LIBS tekniği kullanılarak galvanize çelik malzemenin derinlik çözünürlüğünün deneysel olarak elde edilmesinde deney parametrelerinin optimizasyonu için bu tez çalışmasında ele alınan model kullanılarak sayısal hesaplamalar yapıldı. Yüksek derinlik çözünürlüğü elde etmek için derinlik profili analizindeki ana problemlerden birisi işlemi etkileyen en uygun parametrelerin seçilmesidir. Bu nedenle, daha yüksek derinlik çözünürlüğü elde etmek için deneylerin gerçekleştirilmesinde optimum koşulların belirlenmesi önemlidir ve bu amaçla sayısal hesaplamalar yapıldı. Deneylerin performansını etkileyen işlem parametrelerinden lazer atım akısının etkileri en iyi koşulları

tanımlamak için araştırıldı. Farklı lazer akı değerleri için tek lazer atımı ile aşındırma sürecinin etkisini incelemek amacıyla malzeme içinde sıcaklık dağılımı, erime ve buharlaşma koşulları yapılan sayısal hesaplamalar ile elde edildi. Yapılan hesaplamalardan elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde derinlik çözünürlüğünü etkileyen önemli parametrelerden birisi olan lazer akı değerinin lazerle malzeme etkileşiminde meydana gelen fiziksel olaylar için yaklaşık olarak tahmin edilebildiği görüldü.

Lazerle aşındırma sürecine dayanan uygulamalardan bir diğeri olan yüzey modifikasyonu ile malzemenin yüzey mikroyapısı değiştirilerek özellikleri geliştirilebilir. Uygulama sonucu elde edilen yüzey morfolojisi veya mikroyapısı malzeme yüzeyinin özelliklerini büyük oranda belirler. Endüstriyel olarak çok yaygın kullanıma sahip ve aynı zamanda biyo-uyumlu önemli bir malzeme olan AISI 316L paslanmaz çelik malzemenin tek atım Nd:YAG lazer ile aşındırılmasında deneysel ve sayısal incelemeler yapıldı. Lazer ile paslanmaz çelik malzemenin yüzey modifikasyonu gelen lazer akı değişiminin yüzey morfolojisi üzerine etkileri gözlenerek çalışıldı. Bu tez çalışmasında ele alınan model kullanılarak tek lazer atımı için sayısal hesaplamalar yapıldı. Nd:YAG tek lazer atımı ile paslanmaz çelik malzeme yüzeyi arasındaki etkileşimin sayısal ve deneysel olarak incelenmesinden elde edilen sonuçlar sunuldu.

Bu tez kapsamında yürütülen çalışmalardan elde edilen sonuçlara göre lazerle malzeme işleme sürecinin genellikle karmaşık olması ve lazer şiddeti, lazer atım uzunluğu gibi lazer parametreleri ile malzeme özelliklerine bağlı olması sebebiyle lazer malzeme etkileşimi süreci sırasında farklı türde fiziksel mekanizmalar meydana gelebileceği literatürde daha önce yapılan çalışmalar referans alınarak anlatıldı ve gösterildi. Lazerle aşındırma sürecine dayanan uygulamalara ışık tutması, bu uygulamaların kontrol edilebilmesi ve geliştirilebilmesi açısından bu süreçte meydana gelen fiziksel olayların mekanizmasının hem deneysel hem de teorik olarak incelenmesi gerekir. Ayrıca matematik modeller kullanılarak yapılan hesaplamalarla meydana gelen fiziksel olaylara getirilen bakış deney parametrelerinin daha uygun seçilebilmesine yardımcı olabileceği ve böylece yapılan uygulamalarda zaman ve deneysel maliyetinin azaltılabileceği de gösterildi.

Bu tez kapsamında yapılan çalışmalarla nanosaniye lazerle aşındırma sürecine dayanan uygulamalarda lazerle malzeme etkileşimi sırasında meydana gelen hedef malzemenin ısınması, malzeme içinde sıcaklık dağılımı, erime ve yüzey buharlaşma süreçleri ele alındı. Lazerle malzeme etkileşiminde lazer atım şiddeti yüksek olduğu koşullarda buharlaşma sürecinin ardından hedef malzeme yüzeyinde plazma oluşur. Tez kapsamında yer verilen matematik model ileriki çalışmalarda hedef malzeme yüzeyinde oluşan plazmanın etkileri de hesaba katılarak geliştirilebilir. Böylece lazer atım şiddeti yüksek olduğu koşullarda da lazerle malzeme etkileşimi sonucu hedef malzeme yüzeyinde meydana gelen aşındırma oranı için deneysel sonuçlarla uyumlu sonuçlar elde edilebilir.

KAYNAKLAR

- [1] Naqavi I. Z., Conduction and non-conduction limited laser heating process-mathematical simulation, Master of Science Thesis, King Fahd University of Petroleum and Minerals, College of Graduate Studies, Dhahran, Saudi Arabia, 2001.
- [2] Dahotre N. B., Sudarshan T. S., *Lasers in surface engineering*, 1st ed., ASM International, Ohio, 1998.
- [3] Bäuerle D., *Laser processing and chemistry*, 3rd ed., Springer, Berlin, 2000.
- [4] Steen W. M., *Laser material processing*, 3rd ed., Springer, London, 2003.
- [5] Ion J. C., *Laser processing of engineering materials: principles, procedure and industrial applications*, 1st ed., Elsevier, Oxford, 2005.
- [6] Sugioka K., Meunier M., Piqué A., *Laser precision microfabrication*, 1st ed., Springer, Berlin, 2010.
- [7] Amer E., Gren P., Kaplan A. F. H., Sjö Dahl M., Impact of an extended source in laser ablation using pulsed digital holographic interferometry and modelling, *Appl. Surf. Sci.*, 2009, **255**, 8917-8925.
- [8] Miroshnikova N., Sjö Dahl M., Gren P., Sarady I., Percussion hole drilling of metals with a fourth-harmonic Nd:YAG laser studied by defocused laser speckle correlation, *Appl. Opt.*, 2005, **44**, 3403-3408.
- [9] Ameer-Beg S., Perrie W., Rathbone S., Wright J., Weaver W., Champoux H., Femtosecond laser microstructuring of materials, *Appl. Surf. Sci.*, 1998, **127-129**, 875-880.
- [10] Marcinkevicius A., Juodkasis S., Watanabe M., Miwa M., Matsuo S., Misawa H., Nishii J., Femtosecond laser-assisted three-dimensional microfabrication in silica, *Opt. Lett.*, 2001, **26**, 277-279.
- [11] Xu X., Ryu J. W., Willis D. A., Pulsed laser machining of thin films for microsensor development, *Laser Institute of America Conference Proceedings*, 1999, **88**, 160-166.
- [12] Patel R. S., Redmond T. F., Tessler C., Tudryn D., Pulaski D., Laser via ablation technology for MCM-D fabrication at IBM Microelectronics, *Int. J. Microcirc. Electron. Packaging*, 1995, **18**, 266-273.

- [13] Yalukova O., Miroshnikova N., Gren P., Sarady I., Sjö Dahl M., Investigation of laser percussion hole drilling by use of speckle correlation, *Appl. Opt.*, 2005, **44**, 6338-6344.
- [14] Vertes A., Gijbels R., Adams F., *Laser ionization mass analysis*, 1st ed., Wiley, New York, 1993.
- [15] Radziemski L. J., Cremers D. A., *Laser-induced plasmas and applications*, 1st ed., Marcel Dekker Inc, New York, 1989.
- [16] Winefordner J. D., Gornushkin I. B., Pappas D., Matveev O. I., Smith B. W., Novel uses of lasers in atomic spectroscopy, *J. Anal. At. Spectrom.*, 2000, **15**, 1161-1189.
- [17] Becker M. F., Brock J. R., Cai H., Henneke D. E., Keto J. W., Lee J., Nichols W. T., Glicksman H. D., Metal nanoparticles generated by laser ablation, *Nanostructured Mater.*, 1998, **10**, 853-863.
- [18] György E., Pérez del Pino A., Serra P., Morenza J. L., Surface nitridation of titanium by pulsed Nd:YAG laser irradiation, *Appl. Surf. Sci.*, 2002, **186**, 130-134.
- [19] Von Allmen M., *Laser beam interactions with materials*, 1st ed., Springer, Heidelberg, 1987.
- [20] Chrisey D. B., Hubler G. K., *Pulsed laser deposition of thin films*, 1st ed., Wiley, New York, 1994.
- [21] Vijayalakshmi S., George M. A., Sturmman J., Grebel H., Pulsed laser deposition of Si nanoclusters, *Appl. Surf. Sci.*, 1998, **127-129**, 378-382.
- [22] Weissmantel, S., Reisse, G., Keiper, B., Broulik, U., Johansen, I., Scholz, R., Properties of pulsed laser deposited optical coatings, *Appl. Surf. Sci.*, 1997, **108**, 1-7.
- [23] http://en.wikipedia.org/wiki/Pulsed_laser_deposition, (Ziyaret tarihi: 21 Kasım 2013).
- [24] Cremers, D. A., Radziemski, L. J., *Handbook Of laser-induced breakdown spectroscopy*, 1st ed., Wiley, England, 2006.
- [25] Miziolek A. W., Palleschi V., Schechter I., *Laser-induced breakdown Spectroscopy (LIBS): Fundamentals and Applications*, 1st ed., Cambridge University Press, New York, 2006.
- [26] <http://www.tut.fi/en/about-tut/departments/physics/research/optics/research-projects/applied-optics/index.htm>, (Ziyaret tarihi: 25 Kasım 2013).

- [27] Han W., Computational and experimental investigations of laser drilling and welding for microelectronic packaging, Doctor of Philosophy Thesis, Worcester Polytechnic Institute, England, 2004.
- [28] Bertolotti M., *Physical processes in laser-materials interactions*, 1st ed., Plenum Press, New York, 1983.
- [29] Steen W. M., Laser material processing - an overview, *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.*, 2003, **5**, 3-7.
- [30] <http://www.trumpf-laser.com/en/solutions/applications/laser-cutting/drilling.html>, (Ziyaret tarihi: 16 Kasım 2013).
- [31] Ready J. F., *Effects of high power laser radiation*, 1st ed., Academic Press, New York, 1971.
- [32] Yilbas, B. S., Shuja, S. Z., One-equation, two-equation and kinetic theory: laser pulse heating, *Jpn. J. Appl. Phys. Part 1*, 2000, **39**(7A), 4018-4027.
- [33] Jeong S. H., Greif R., Russo R. E., Numerical modeling of pulsed laser evaporation of aluminum targets, *Appl. Surf. Sci.*, 1998, **127-129**, 177-183.
- [34] Yoo J. H., Jeong S. H., Greif R., Russo R. E., Explosive change in crater properties during high power nanosecond laser ablation of silicon, *J. Appl. Phys.*, 2000, **88**, 1638-1649.
- [35] Wellershoff S. S., Hohlfeld J., Gdde J., Matthias E., The role of electron-phonon coupling in femtosecond laser damage of metals, *Appl. Phys. A*, 1999, **69**, S99-S107.
- [36] Mao S. S., Mao X. L., Greif R., Russo R. E., Simulation of infrared picosecond laser-induced electron emission from semiconductors, *Appl. Surf. Sci.*, 1998, **127-129**, 206-211.
- [37] Bulgakova N. M., Bulgakov A. V., Pulsed laser ablation of solids: transition from normal vaporization to phase explosion, *Appl. Phys. A*, 2001, **73**, 199-208.
- [38] Tunna L., Kearns A., O'Neill W., Sutcliffe C. J., Micromachining of copper using Nd:YAG laser radiation at 1064, 532, and 355 nm wavelengths, *Opt. Laser Technol.*, 2001, **33**, 135-143.
- [39] Ohtsu N., Yamane M., Kodama K., Wagatsuma K., Surface hardening of titanium by pulsed Nd:YAG laser irradiation at 1064- and 532-nm wavelengths in nitrogen atmosphere, *Appl. Surf. Sci.*, 2010, **257**, 691-695.
- [40] György E., Mihailescu I. N., Serra P., Pérez del Pino A., Morenza J. L., Single pulse Nd:YAG laser irradiation of titanium: influence of laser intensity on surface morphology, *Surf. Coat. Technol.*, 2002, **154**, 63-67.

- [41] György E., Pérez del Pino A., Serra P., Morenza J. L., Growth of surface structures on titanium through pulsed Nd:YAG laser irradiation in vacuum, *Appl. Surf. Sci.*, 2002, **197-198**, 851-855.
- [42] Mahdieh M. H., Nikbakht M., Eghlimi Moghadam Z., Sobhani M., Crater geometry characterization of Al targets irradiated by single pulse and pulse trains of Nd:YAG laser in ambient air and water, *Appl. Surf. Sci.*, 2010, **256**, 1778-1783.
- [43] Yilbas B. S., Mansoor S. B., Laser pulse heating and phase changes in the irradiated region: Temperature-dependent thermal properties case, *Int. J. Therm. Sci.*, 2009, **48**, 761-772.
- [44] Bozsóki I., Balogh B., Gordon P., 355 nm nanosecond pulsed Nd:YAG laser profile measurement, metal thin film ablation and thermal simulation, *Opt. Laser Technol.*, 2011, **43**, 1212-1218.
- [45] Weidman M., Palanco S., Baudelet M., Richardson M. C., Thermodynamic and spectroscopic properties of Nd:YAG-CO₂ double-pulse laser-induced iron plasmas, *Spectrochim. Acta B*, 2009, **64**, 961-967.
- [46] Bogaerts A., Chen Z., Gijbels R., Vertes A., Laser ablation for analytical sampling: what can we learn from modeling?, *Spectrochim. Acta B*, 2003, **58**, 1867-1893.
- [47] Svendsen W., Ellegaard O., Schou J., Laser ablation deposition measurements from silver and nickel, *Appl. Phys. A*, 1996, **63**, 247-255.
- [48] Bhattacharya D., Singh R. K., Holloway P. H., Laser-target interactions during pulsed laser deposition of superconducting thin films, *J. Appl. Phys.*, 1991, **70**, 5433-5439.
- [49] Ho J. R., Grigoropoulos C. P., Humphrey J. A. C., Computational study of heat transfer and gas dynamics in the pulsed laser evaporation of metals, *J. Appl. Phys.*, 1995, **78**, 4696-4709.
- [50] Yaroshchuk P., Morrison R. J. S., Body D., Chadwick B. L., Quantitative determination of wear metals in engine oils using laser-induced breakdown spectroscopy: A comparison between liquid jets and static liquids, *Spectrochim. Acta B*, 2005, **60**, 986-992.
- [51] Jaunich M., Raje S., Kim K., Mitra K., Guo Z., Bio-heat transfer analysis during short pulse laser irradiation of tissues, *Int. J. Heat and Mass Transfer*, 2008, **51**, 5511-5521.
- [52] DuChateau P., Zachmann D. W., Schaum's Outline of *Partial Differential Equations*, 1st ed., McGraw-Hill, New York, 1986.
- [53] Burden, R. L., Faires, J. D., *Numerical Analysis*, 5th ed., PWS Publishing Company, Boston, 1993.

- [54] Ahmed S., Aerodynamics of rectangular slot-burners and combustion in tangentially-fired furnace, Doctor of Philosophy Thesis, Swinburne University of Technology, Faculty of Engineering & Industrial Science, Melbourne, Australia, 2005.
- [55] Willis D. A., Xu X., Heat transfer and phase change during picosecond laser ablation of nickel, *Int. J. Heat Mass Transfer*, 2002, **45**, 3911-3918.
- [56] Leitz K. H., Redlingshöfer B., Reg Y., Otto A., Schmidt M., Metal ablation with short and ultrashort laser pulses, *Physics Procedia*, 2011, **12**, 230-238.
- [57] Miotello A., Kelly R., Laser-induced phase explosion: new physical problems when a condensed phase approaches the thermodynamic critical temperature, *Appl. Phys. A*, 1999, **69**, S67-S73.
- [58] Kelly R., Miotello A., Mele A., Guidoni A. G., Hastie J. W., Schenck P. K., Okabe H., Gas-dynamic effects in the laser-pulse sputtering of AlN: is there evidence for phase explosion?, *Appl. Surf. Sci.*, 1998, **133**, 251-269.
- [59] Miotello A., Kelly R., Critical assessment of thermal models for laser sputtering at high fluences, *Appl. Phys. Lett.*, 1995, **67**, 3535-3537.
- [60] Kelly R., Miotello A., On the mechanisms of target modification by ion beams and laser pulses, *Nucl. Instrum. Methods B*, 1997, **122**, 374-400.
- [61] Zeng X. Z., Mao X. L., Wen S. B., Greif R., Russo R. E., Energy deposition and shock wave propagation during pulsed laser ablation in fused silica cavities, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2004, **37**, 1132-1136.
- [62] Amer E., Gren P., Sjö Dahl M., Shock wave generation in laser ablation studied using pulsed digital holographic interferometry, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2008, **41**, 215502.
- [63] Geohegan D. B., Imaging and blackbody emission spectra of particulates generated in the KrF-laser ablation of BN and $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$, *Appl. Phys. Lett.*, 1993, **62**, 1463-1465.
- [64] Song K. H., Xu X., Explosive phase transformation in excimer laser ablation, *Appl. Surf. Sci.*, 1998, **127-129**, 111-116.
- [65] Yoo J. H., Jeong S. H., Mao X. L., Greif R., Russo R. E., Evidence for phase-explosion and generation of large particles during high power nanosecond laser ablation of silicon, *Appl. Phys. Lett.*, 2000, **76**, 783-785.
- [66] Zhigilei L. V., Garrison B. J., Computer simulation study of damage and ablation of submicron particles from short-pulse laser irradiation, *Appl. Surf. Sci.*, 1998, **127-129**, 142-150.

- [67] Stoian R., Varel H., Rosenfeld A., Ashkenasi D., Kelly R., Campbell E. E. B., Ion time-of-flight analysis of ultrashort pulsed laser-induced processing of Al_2O_3 , *Appl. Surf. Sci.*, 2000, **165**, 44-55.
- [68] Kelly R., Miotello A., Comments on explosive mechanisms of laser sputtering, *Appl. Surf. Sci.*, 1996, **96-98**, 205-215.
- [69] Bulgakov A. V., Bulgakova N. M., Thermal model of pulsed laser ablation under the conditions of formation and heating of a radiation-absorbing plasma, *Quantum Electron.*, 1999, **29**, 433-437.
- [70] Hauer M., Funk D. J., Lippert T., Wokaun A., Time resolved study of the laser ablation induced shockwave, *Thin Solid Films*, 2004, **453**, 584-588.
- [71] Wen S. B., Mao X. L., Greif R., Russo R. E., Laser ablation induced vapor plume expansion into a background gas. II. Experimental analysis, *J. Appl. Phys.*, 2007, **101**, 023115.
- [72] Gravel J. F. Y., Boudreau D., Study by focused shadowgraphy of the effect of laser irradiance on laser-induced plasma formation and ablation rate in various gases, *Spectrochim. Acta B*, 2009, **64**, 56-66.
- [73] Zeng X., Mao X. L., Greif R., Russo R. E., Experimental investigation of ablation efficiency and plasma expansion during femtosecond and nanosecond laser ablation of silicon, *Appl. Phys. A*, 2005, **80**, 237-241.
- [74] Mao S. S., Mao X., Greif R., Russo R. E., Initiation of an early-stage plasma during picosecond laser ablation of solids, *Appl. Phys. Lett.*, 2000, **77**, 2464-2466.
- [75] Mao S. S., Mao X., Greif R., Russo R. E., Simulation of a picosecond laser ablation plasma, *Appl. Phys. Lett.*, 2000, **76**, 3370-3372.
- [76] Giardini Guidoni A., Kelly R., Mele A., Miotello A., Heating effects and gas-dynamic expansion of the plasma plume produced by irradiating a solid with laser pulses, *Plasma Sources Sci. Technol.*, 1997, **6**, 260-269.
- [77] Azimi A., Ashrafizadeh F., Toroghinejad M. R., Shahriari F., Metallurgical analysis of pimples and their influence on the properties of hot dip galvanized steel sheet, *Engineering Failure Analysis*, 2012, **26**, 81-88.
- [78] Canel T., Demir P., Kacar E., Genc Oztoprak B., Akman E., Gunes M., Demir A., Optimization of parameters for depth resolution of galvanized steel by LIBS technique, *Opt. Laser Technol.*, 2013, **54**, 257-264.
- [79] Oswald S., Baunack S., Comparison of depth profiling techniques using ion sputtering from the practical point of view, *Thin Solid Films*, 2003, **425**, 9-19.
- [80] Novotny K., Vaculovic T., Galiova M., Otruba V., Kanicky V., Kaiser J., Liska M., Samek O., Malina R., Palenikova K., The use of zinc and iron emission

- lines in the depth profile analysis of zinc-coated steel, *Appl. Surf. Sci.*, 2007, **253**, 3834-3842.
- [81] Rar A., Hofmann S., Yoshihara K., Kajiwara K., Optimization of depth resolution parameters in AES sputter profiling of GaAs/AlAs multilayer structures, *Appl. Surf. Sci.*, 1999, **144-145**, 310-314.
- [82] Balkova R., Zemek J., Cech V., Vanek J., Prikryl R., XPS study of siloxane plasma polymer films, *Surf. Coat. Technol.*, 2003, **174-175**, 1159-1163.
- [83] Nelis T., Pallosi J., Glow discharge as a tool for surface and interface analysis, *Appl. Spectrosc. Rev.*, 2006, **41**, 227-258.
- [84] Oxley E., Yang C., Harrison W. W., Quantitative depth analysis using microsecond pulsed glow discharge atomic emission spectrometry, *J. Anal. At. Spectrom.*, 2000, **15**, 1241-1245.
- [85] Afkhami A. H., Tavassoli S. H., Numerical and experimental depth profile analyses of coated and attached layers by laser-induced breakdown spectroscopy, *Spectrochim. Acta B*, 2010, **65**, 210-217.
- [86] Genc Oztoprak B., Akman E., Hanon M. M., Gunes M., Gumus S., Kacar E., Gundogdu O., Zeren M., Demir A., Laser welding of copper with stellite 6 powder and investigation using LIBS technique, *Opt. Laser Technol.*, 2013, **45**, 748-755.
- [87] Peng L., Sun D., Su M., Han J., Dong C., Rapid analysis on the heavy metal content of spent zinc-manganese batteries by laser-induced breakdown spectroscopy, *Opt. Laser Technol.*, 2012, **44**, 2469-2475.
- [88] Elsayed K., Imam H., Harfoosh A., Hassebo Y., Elbaz Y., Aziz M., Mansour M., Design and construction of Q-switched Nd:YAG laser system for LIBS measurements, *Opt. Laser Technol.*, 2012, **44**, 130-135.
- [89] Hofmann S., From depth resolution to depth resolution function: refinement of the concept for delta layers, single layers and multilayers, *Surf. Interface Anal.*, 1999, **27**, 825-834.
- [90] Mateo M. P., Vadillo J. M., Laserna J. J., Irradiance-dependent depth profiling of layered materials using laser-induced plasma spectrometry, *J. Anal. At. Spectrom.*, 2001, **16**, 1317-1321.
- [91] Vadillo J. M., Laserna J. J., Depth-resolved analysis of multi layered samples by laser-induced break down spectrometry, *J. Anal. At. Spectrom.*, 1997, **12**, 859-862.
- [92] Trtica M., Gakovic B., Batani D., Desai T., Panjan P., Radak B., Surface modifications of a titanium implant by a picosecond Nd:YAG laser operating at 1064 and 532 nm, *Appl. Surf. Sci.*, 2006, **253**, 2551-2556.

- [93] Bulgakova N. M., Evtushenko A. B., Shukhov Y. G., Kudryashov S. I., Bulgakov A. V., Role of laser-induced plasma in ultradeep drilling of materials by nanosecond laser pulses, *Appl. Surf. Sci.*, 2011, **257**, 10876-10882.
- [94] Kononenko T. V., Garnov S. V., Pimenov S. M., Konov V. I., Romano V., Borsos B., Weber H. P., Laser ablation and micropatterning of thin TiN coatings, *Appl. Phys. A*, 2000, **71**, 627-631.
- [95] Bulgakova N. M., Bulgakov A. V., Babich L. P., Energy balance of pulsed laser ablation: thermal model revised, *Appl. Phys. A*, 2004, **79**, 1323-1326.
- [96] Paul S., Kudryashov S. I., Lyon K., Allen S. D., Nanosecond-laser plasma-assisted ultradeep microdrilling of optically opaque and transparent solids, *J. Appl. Phys.*, 2007, **101**, 043106.
- [97] Prokhorov A. M., Konov V. I., Ursu I., Mihailescu I. N., *Laser Heating of Metals*, 1st ed., Adam Hilger, Bristol, 1990.
- [98] Cui C. Y., Cui X. G., Zhao Q., Hu J. D., Liu Y. H., Wang Y. M., Investigation of different surface morphologies formed on AISI 304 stainless steel via millisecond Nd:YAG pulsed laser oxidation, *Opt. Laser Technol.*, 2012, **44**, 815-820.
- [99] Datye A., Koneti S., Gomes G., Wu K. H., Lin H. T., Synthesis and characterization of aluminum oxide-boron carbide coatings by air plasma spraying, *Ceramics International*, 2010, **36**, 1517-1522.
- [100] Kobayashi A., Kuroda T., Kimura H., Inoue A., Effect of spraying condition on property of Zr-based metallic glass coating by gas tunnel type plasma spraying, *Mater. Sci. Eng. B*, 2010, **173**, 122-125.
- [101] Tekmen C., Iwata K., Tsunekawa Y., Okumiya M., Influence of methane and carbon dioxide on in-flight particle behavior of cast iron powder by atmospheric plasma spraying, *Materials Letters*, 2009, **63**, 2439-2441.
- [102] Wei Y. H., Liu B. S., Hou L. F., Xu B. S., Liu G., Characterization and properties of nanocrystalline surface layer in Mg alloy induced by surface mechanical attrition treatment, *J. Alloys Compd*, 2008, **452**, 336-342.
- [103] Lu S. D., Wang Z. B., Lu K., Enhanced chromizing kinetics of tool steel by means of surface mechanical attrition treatment, *Mater. Sci. Eng. A*, 2010, **527**, 995-1002.
- [104] Zhou L., Liu G., Ma X. L., Lu K., Strain-induced refinement in a steel with spheroidal cementite subjected to surface mechanical attrition treatment, *Acta Materialia*, 2008, **56**, 78-87.
- [105] Lu J. Z., Luo K. Y., Zhang Y. K., Sun G. F., Gu Y. Y., Grain refinement mechanism of multiple laser shock processing impacts on ANSI 304 stainless steel, *Acta Materialia*, 2010, **58**, 5354-5362.

- [106] Adamiak M., Dobrzański L. A., Microstructure and selected properties of hot-work tool steel with PVD coatings after laser surface treatment, *Appl. Surf. Sci.*, 2008, **254**, 4552-4556.
- [107] Zhu G. X., Li D. C., Zhang A. F., Pi G., Tang Y. P., The influence of laser and powder defocusing characteristics on the surface quality in laser direct metal deposition, *Opt. Laser Technol.*, 2012, **44**, 349-356.
- [108] Cheng C. W., Chen C. M., Lee Y. C., Laser surface treatment of screen-printed carbon nanotube emitters for enhanced field emission, *Appl. Surf. Sci.*, 2009, **255**, 5770-5774.
- [109] Yilbas B. S., Karatas C., Arif A. F. M., Abdul Aleem B. J., Laser control melting of alumina surfaces and thermal stress analysis, *Opt. Laser Technol.*, 2011, **43**, 858-865.
- [110] Cui X. G., Cui C. Y., Cheng X. N., Xu X. J., Lu J. Z., Hu J. D., Wang Y. M., Microstructure and tensile properties of the sub-micro and nano-structured Al produced by laser surface melting, *Mater. Sci. Eng. A*, 2010, **527**, 7400-7406.
- [111] Cui C. Y., Hu J. D., Liu Y. H., Guo Z. X., Microstructure evolution on the surface of stainless steel by Nd:YAG pulsed laser irradiation, *Appl. Surf. Sci.*, 2008, **254**, 3442-3448.
- [112] Zhang Y. K., Chen J. F., Lei W. N., Xv R. J., Effect of laser surface melting on friction and wear behavior of AM50 magnesium alloy, *Surf. Coat. Technol.*, 2008, **202**, 3175-3179.
- [113] Yang S., Wang Z. J., Kokawa H., Sato Y. S., Reassessment of the effects of laser surface melting on IGC of SUS 304, *Mater. Sci. Eng. A*, 2008, **474**, 112-119.
- [114] Cui C. Y., Cui X. G., Zhang Y. K., Luo K. Y., Zhao Q., Hu J. D., Liu Z., Wang Y. M., Microstructure and microhardness analysis of the hexagonal oxides formed on the surface of the AISI 304 stainless steel after Nd:YAG pulsed laser surface melting, *Appl. Surf. Sci.*, 2010, **256**, 6782-6786.
- [115] Cui C. Y., Hu J. D., Liu Y. H., Gao K., Guo Z. X., Formation of nano-crystalline and amorphous phases on the surface of stainless steel by Nd:YAG pulsed laser irradiation, *Appl. Surf. Sci.*, 2008, **254**, 6779-6782.
- [116] Capello E., Chiarello P., Previtali B., Vedani M., Laser welding and surface treatment of a 22Cr-5Ni-3Mo duplex stainless steel, *Mater. Sci. Eng. A*, 2003, **351**, 334-343.
- [117] Trtica M. S., Gakovic B. M., Nenadović T. M., Mitrović M. M., Surface modification of stainless steels by TEA CO₂ laser, *Appl. Surf. Sci.*, 2001, **177**, 48-57.

- [118] Viswanathan A., Sastikumar D., Rajarajan P., Kumar H., Nath A. K., Laser irradiation of AISI 316L stainless steel coated with Si₃N₄ and Ti , *Opt. Laser Technol.*, 2007, **39**, 1504-1513.
- [119] Liu Y. H., Hu J. D., Zhao L., Guo Z. X., Chumakov A. N., Bosak N. A., Accumulation morphology on the surface of stainless steel irradiated by a nanosecond Nd:YAG pulsed laser, *Opt. Laser Technol.*, 2010, **42**, 647-652.
- [120] Dong Q. Z., Hu J. D., Lian J. S., Guo Z. X., Chen J. W., Chen B., Oxidation behavior of Cr films by Nd:YAG pulsed laser, *Scr. Mater.*, 2003, **48**, 1373-1377.
- [121] Li H., Costil S., Barnier V., Oltra R., Heintz O., Coddet C., Surface modifications induced by nanosecond pulsed Nd:YAG laser irradiation of metallic substrates, *Surf. Coat. Technol.*, 2006, **201**, 1383-1392.
- [122] Oberringer M., Akman E., Lee J., Metzger W., Akkan C. K., Kacar E., Demir A., Abdul-Khaliq H., Pütz N., Wennemuth G., Pohlemann T., Veith M., Aktas C., Reduced myofibroblast differentiation on femtosecond laser treated 316LS stainless steel, *Mater. Sci. Eng. C*, 2013, **33**, 901-908.
- [123] Kenar H., Akman E., Kacar E., Demir A., Park H., Abdul-Khaliq H., Aktas C., Karaoz E., Femtosecond laser treatment of 316L improves its surface nanoroughness and carbon content and promotes osseointegration: an in vitro evaluation, *Coll. Surf. B: Biointerfaces*, 2013, **108**, 305-312.
- [124] Bleiner D., Chen Z. Y., Autrique D., Bogaerts A., Role of laser-induced melting and vaporization of metals during ICP-MS and LIBS analysis, investigated with computer simulations and experiments, *J. Anal. At. Spectrom.*, 2006, **21**, 910-921.
- [125] Amer E., Gren P., Kaplan A. F. H., Sjö Dahl M., El Shaer M., Comparison of the laser ablation process on Zn and Ti using pulsed digital holographic interferometry, *Appl. Surf. Sci.*, 2010, **256**, 4633-4641.
- [126] Miller J. C., Haglund R. F., *Laser Ablation and Desorption*, 1st ed., Academic Press, San Diego, 1998.

KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER

- [1] Canel T., **Demir P.**, Kacar E., GencOztoprak B., Akman E., Gunes M., Demir A., Optimization of parameters for depth resolution of galvanized steel by LIBS technique, *Optics and Laser Technology*, 2013, **54**, 257-264.
- [2] **Demir P.**, Kacar E., Akman E., Demir A., Single pulse laser ablation of AISI 316L stainless steel surface using Nd:YAG laser irradiation, *Acta Physica Polonica A*, (baskıda).
- [3] **Demir P.**, Kacar E., Demir A., Numerical modeling of laser induced plasma formation, *6th Euro-Mediterranean Symposium on Laser-Induced Breakdown Spectroscopy*, İzmir, Turkey, 11-15 September 2011.
- [4] **Demir P.**, Kacar E., Demir A., Nanosaniye lazerle plazma oluşumu sürecinin sayısal modellemesi, *13. Ulusal Optik, Elektro-Optik ve Fotonik Çalıştayı*, Ankara, Türkiye, 23 Eylül 2011.
- [5] Mutlu M., Kacar E., Akman E., Akkan C. K., **Demir P.**, Demir A., Effects of the laser wavelength on drilling process of ceramic using Nd:YAG laser, *Journal of Laser Micro/Nanoengineering*, 2009, **4**, 84-88.
- [6] **Demir P.**, Demir P., Kacar E., Bilikmen S. K., Demir A., Conversion efficiency calculations for soft X-rays emitted from tin plasma for lithography applications, *Springer Proceedings in Physics*, 2009, **130**, 281-287.
- [7] Akkan C. K., **Demir P.**, Mutlu M., Akman E., Kacar E., Demir A., Drilling process of ceramic using nanosecond Nd:YAG laser, *Balkan Physics Letters*, 2009, **16**, 161083.
- [8] **Demir P.**, Akman E., Mutlu M., Babur S., Suvaci E., Kacar E., Demir A., Pulsed Nd:YAG laser drilling process of alumina ceramic for printed circuit board, *17th International Conference on Advanced Laser Technologies*, Antalya, Turkey, 26 September-1 October 2009.
- [9] Genc B., Sipahioglu S., Akman E., **Demir P.**, E., Kacar E., Demir A., Spectroscopic measurements and modelling of the spectrum emitted from laser-induced argon plasma, *17th International Conference on Advanced Laser Technologies*, Antalya, Turkey, 26 September-1 October 2009.
- [10] Kacar E., **Demir P.**, Simulations of grazing-incidence pumped Ni-like Sn X-ray laser at 11.9 nm, *Optics Communications*, 2008, **281**, 718-724.
- [11] Genc B., Akman E., **Demir P.**, Kacar E., Demir A., Spectroscopic measurements and modelling of the laser-induced titanium plasma, *5th*

International Conference on Laser-Induced Breakdown Spectroscopy, Berlin, Germany, 22-26 September 2008.

- [12] **Demir P.**, Kacar E., Demir A., Lazer Teknolojileri Araştırma ve Uygulama Merkezinde gerçekleştirilen modelleme çalışmaları, *10. Ulusal Optik, Elektro-Optik ve Fotonik Toplantısı*, Kocaeli, Türkiye, 17 Ekim 2008.
- [13] Kacar E., **Demir P.**, Demir P., A collisional radiative code coupled with hydrodynamic code for simulation Ni-like, Co-like resonance lines and excited levels emitted from laser produced plasmas, *20th International Conference on Numerical Simulations of Plasmas*, Texas, USA, 10-12 October 2007.
- [14] **Demir P.**, Kacar E., Demir A., Modelling of silver plasma to produce grazing incidence pumped Ni-like Ag X-ray laser, *20th International Conference on Numerical Simulations of Plasmas*, Texas, USA, 10-12 October 2007.
- [15] Akman E., Atalay B., Candan L., Canel T., Demir A, **Demir P.**, Erturk S., Genc B., Kacar E., Kenar N., Koymen E., Mutlu M., Sınmazcelik T., Urhan O., Progresses on the theoretical and experimental studies in Laser Technologies Research and Application Center in Kocaeli, *American Institute of Physics Conference Proceedings*, 2007, **899**, 331-332.
- [16] **Demir P.**, Kacar E., Demir A., Effects of double pulse configuration on absorption of driving laser energy for laser produced iron plasmas, *American Institute of Physics Conference Proceedings*, 2007, **899**, 341-342.
- [17] Kacar E., **Demir P.**, Demir P., Demir A., Yaltkaya S., Simulation of longitudinally pumped Ni-like molybdenum X-ray laser medium using post-processor code coupled to EHYBRID, *Springer Proceedings in Physics*, 2007, **115**, 347-351.
- [18] **Demir P.**, Demir A., Kenar N., Tallents G. J., Modelling of Ne-like iron X-ray laser driven by 1.2 ps short pulse and 280 ps pre-pulse configuration, *Turkish Physical Society 23rd International Physics Congress*, Muğla, Turkey, 13-16 October 2005.

ÖZGEÇMİŞ

1981 yılında İzmit'te doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini İzmit'te tamamladı. 1999 yılında girdiği Kocaeli Üniversitesi, Fen Edebiyat Fakültesi, Fizik Bölümü'nden 2004 yılında Fizikçi olarak mezun oldu. 2004-2006 yılları arasında, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans öğrenimini tamamladı. 2005 yılından beri Kocaeli Üniversitesi, Fen Edebiyat Fakültesi, Fizik Bölümü'nde Araştırma Görevlisi olarak görev yapmaktadır.