

Darbeli Laser-Malzeme Etkileşimi Sırasında Malzemedeki Sıcaklık Dağılımının Yarı Kinetik Teori ile Analizi

Yıldız KOÇ*^{ID}, Ertuğrul BALTACIOĞLU

İskenderun Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü,
İskenderun/Hatay, Türkiye

Geliş / Received: 18/09/2019, Kabul / Accepted: 11/07/2019

Öz

Günümüzde teknolojinin gelişimi ile imalat sanayisinde laserin kullanımı, düşük maliyet ve yüksek hassasiyetten dolayı önem kazanmaktadır. Laser-metal etkileşimi sırasında malzemeye olan ısı transferi ve sıcaklık dağılımı metal şekillendirmede büyük bir önem arz etmektedir. Bu çalışmada 1.10^{10} W/m² ve 5.10^{10} W/m² gücündeki darbeli laser ile dört farklı malzemenin (çelik, nikel, tantal ve titanyum) etkileşimi sırasında malzeme yüzeyinde ve malzeme içerisindeki sıcaklık dağılımı zamana bağlı olarak incelenmiştir. Laser-metal etkileşimi sırasında, birinci aşamada ısı iletimi esas alınmış ve buna bağlı olarak elektron kinetik teori modeli ile malzeme ergime sıcaklığına ulaşana kadar çözüm yapılmıştır. İkinci aşamada malzeme ergime sıcaklığına ulaştıktan sonra taşınım ile olan ısı transferi klasik metotla ve iletimle olan ısı transferi kinetik teori yaklaşımıyla birlikte (yarı klasik teori) ele alınarak çözüm yapılmıştır. Malzeme içerisindeki ve yüzeyindeki sıcaklık dağılımlarının malzeme termodinamik özellikleriyle değişimini belirlemek amacıyla dört farklı malzeme incelenmiş ve elde edilen sıcaklık dağılımları birbiriyle kıyaslanmıştır. Nümerik çözümler için bir bilgisayar programı geliştirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Laser-metal etkileşimi, laser ısıtma, kinetik teori, sıcaklık dağılımı

Çalışma doktora tezinden üretilmiştir.

Analysis of Temperature Distribution in Materials during Pulsed Laser-Material Interaction with Semi-Kinetic Theory

Abstract

Nowadays, with the development of technology, the use of laser in the manufacturing industry is gaining importance because of its low cost and high precision. During the laser-metal interaction, heat transfer to the material and temperature distribution on the material are of great importance in metal forming. In this study, the time depended temperature distribution on the material surface and within the material were examined for interaction of the 1.10^{10} W/m² and 5.10^{10} W/m² power pulsed lasers with four different materials (steel, nickel, tantalum and titanium). During laser-metal interaction, in the first step, heat transfer was considered and the analysis was made until the material reaches melting temperature with electron kinetic theory model. In the second step, after the material reached melting temperature, heat transfer by convection was analysed by classical method and heat transfer by conduction was analysed by heat transfer kinetic theory approach (semi-classical theory). In order to determine the variation of temperature distributions within material and material surface depending on material thermodynamic properties, four different materials were examined and the obtained temperature distributions were compared with each other. A computer program was developed for numerical solutions.

Keywords: Laser-metal interaction, laser heating, kinetic theory, temperature distribution

1. Giriş

LASER sözcüğü; Uyarılmış ışımaya yayılımı ile ışığın şiddetlendirilmesi anlamına gelen " Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation" sözcüklerinin baş harflerinden oluşmaktadır (Joe vd., 2017). Laser yaklaşık elli yıllık çalışma ve araştırma sonucunda ancak 1960 yılında ortaya konulabilmiştir. Günümüzde teknolojinin gelişmesiyle birlikte sanayi, savunma, tıp, mühendislik ve haberleşme gibi birçok alanda kullanılmaktadır (Beck vd., 2010; Remo ve Adams, 2008; Koç vd., 2018). Yayılan dalga boyları mor ötesi veya kızıl ötesi bölgede ise bu tür dalgaları yayan veya üreten kaynaklara da laser denir. Townes ve Schawlow (1958) tarafından teorik olarak laserin meydana gelebileceği İlk olarak 1958 yılında ortaya atıldı. Maiman (1960), bu teori ile ilk yakut laseri 1960 yılında geliştirerek, Ruby kristalinden laser ışını üreterek ilk darbeli katı laser meydana getirilmiş oldu. Bu buluştan sonra Laser üzerine yapılan çalışmalarda araştırmacılar tarafından, kullanım alanlarına göre çok çeşitli laserler geliştirilmiştir.

Laserler, metal işleme endüstrisinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Çünkü işlenmesi zor malzemeler için uygun bir üretim yöntemi sağlar ve mikro işleme gibi özel uygulamaları içerir. Laserler, hassas ve düşük maliyetleri nedeniyle çeşitli malzemelerin kesilmesi, delinmesi, kaynaklanması ve ısıtılmasında yaygın olarak kullanılmaktadır. Darbeli laser ile malzemenin ısıtılmasında, malzemenin sıcaklığındaki artış, yalnızca malzemenin termal ve mekanik özelliklerine değil, aynı zamanda optik özelliklerine de önemli ölçüde bağlıdır. Darbeli Laserle malzemenin ısıtılması işleminde; erime,

buharlaştırma ve plazma oluşumu meydana gelebilmektedir (Koç, 2004)

Işık ve manyetik dalgaların iletilmesini sağlayan foton parçacıkları olup lazer ışını ile metal etkileşimi sırasında fotonlar malzemeye çarptığında yüzeydeki 0.1 µm derinlikteki elektronlar tarafından emilen foton enerji ile uyarılan elektronlar temel enerji seviyesinden, üst enerji seviyelerine çıkarlar. Üst enerji seviyesine çıkan ve kararsız halde bulunan elektronlar tekrar temel enerji seviyesine inerken sahip oldukları enerjileri ile fonon salınımı yaparlar. Fonon enerjisi ile uyarılan malzeme içerisindeki diğer elektronlar yine temel seviyeden üst enerji seviyelerine çıkar ve tekrar temel seviyeye düşerken fonon salınımı yaparlar. Katı malzeme içerisindeki ısı iletimi radyasyon (foton) ile değil fononlar ile katı malzeme içerisinde iletilir. Fononlar; Fiziksel olarak bir parçacık olmadığı için genellikle paçacığimsi olarak adlandırılırlar. Optik ve akustik fonon olmak üzere iki çeşidi bulunur. Optik fononların enerjileri daha yüksektir. Akustik fononlar ise daha düşük enerjilidir. Katı malzeme içerisindeki ısı iletimi optik fononlar ile ses iletimi ise akustik fononlar ile iletilir.

Yılbaş vd. (1990) yaptıkları çalışmada, laser-metal etkileşimi sırasında malzemedeki absorpsiyon mekanizmasını incelemişlerdir Qin ve Tien (1992) metallerin kısa darbeli laserle ısıtılması için iki aşamalı bir ısı iletimi modeli ortaya koydu. Enerji denkleminin çözümünde, elektronun termik gevşeme işleminin hızı için bir elektron - fonon birleştirme faktörü ele alındı.

Yılbaş (1993) yaptığı çalışmada, zamana bağlı yoğunluğu değişen darbeli laser ile

malzemenin ısıtılması sonucu sıcaklık dağılımlarını Laplace dönüşümleri ve integral bir yöntem kullanılarak elde etmiştir. Bazı araştırmacılar, laser ve katı malzeme etkileşimini Fourier ısı iletimi teorisi modellemişlerdir. Neto ve Lima (1994) tarafından üç boyutlu sıcaklık prodüksiyonlarını öngören lineer olmayan bir model araştırıldı. Oluşturdukları model, kullanım için geliştirilen doğrusal olmayan parabolik diferansiyel denklemlere dayanıyordu. Literatürde, katılarda laser malzeme etkileşimi nedeniyle sıcaklığın dağılımını Fourier denklemi kullanılarak modellenmesine yardımcı olan birçok çalışma vardır. Koç (1995), 1.10^{10} W/m² ve 5.10^{10} W/m² laser işleme gücü için ortaya çıkan ısı transferini araştırdı. Aynı zamanda ısı iletimi ve taşınımını, sıcaklık dağılımını belirlemek için farklı metal türlerinde elektron kinetik teorisini kullanarak analiz yaptı. Laser metal, iletim Laser ışını, laser ışını malzeme yüzeyine çarptığında, fotonların bir kısmı iletken banttaki elektronlar tarafından absorbe edilir. Laser ışını içindeki foton enerjisi elektronlara aktarılır. Bunun bir sonucu olarak, yüzey elektronlarının kinetik enerjisi artar. Laser ışından absorpsiyon yoluyla enerji kazanan elektronlar, kafes molekülleri ile arka arkaya çarpışmalar yapar ve kafes fononlarını daha yüksek enerjilere yönlendirir. Böylece, moleküller artan titreşim enerjilerine, yani sonunda daha yüksek sıcaklıklara sahip olurlar. Laser yüzey işlemlerinde yüzeyde buharlaşan malzemenin ayrılma hızı, malzemenin sıcaklığına bağlı olduğundan, doğru bir şekilde hesaplanması çok önemlidir. Fourier iletim denkleminin sıcaklık dağılımını daha yüksek yoğunluklarda belirlemek için kullanılması, teoride sınır koşullarında yapılan varsayımlar nedeniyle önemli hatalara neden olur. Fourier iletim denkleminin teorisi, belirli bir düzlem boyunca

ısı akışı, düzlemdeki sıcaklık gradyanının bir fonksiyonudur (Koç vd. 1998; Smon vd. 1993). Laser işleme mekanizmasının analizinde, merkezi özellik, Fourier iletim denkleminin, laser ışından gelen foton enerjisinin hedef malzemenin moleküler kafesine aktarılma şeklini açıklamak için kullanılmıştır. Laser-malzeme etkileşim sürecini belirleyen bu enerji transfer mekanizmasıdır. Fourier iletim denkleminin sadece katı sınırlar içinde geçerli olduğu ve malzemeleri ısıtlayan kısa laser darbeleriyle oluşan bir ısı transfer işleminin analizinde geçersiz olduğu araştırmacılar tarafından gösterilmiştir (Koç 1995). Yılbaş ve Sami (1995), darbeli laserli ısıtma işlemi için bir elektron kinetik teori yaklaşımı getirmiştir. İletim mekanizması, art arda gelen elektron ve fonon çarpışmalarıyla değerlendirildi. Prensipte olarak, laserle işleme, laser ışından gelen ısıtılan enerji ile iş parçasına ve iş parçasına iletim ve konveksiyon ısıları arasındaki enerji dengesi ile yönetilebileceğini belirtmişlerdir. Böylece, katıların laserle ısıtılması için daha alakalı bir teori, yani elektron kinetik bir teori, bazı araştırmacılar tarafından geliştirilmiştir. Laser radyasyonunun absorpsiyon derinliği, atomlar arası boşluklarla karşılaştırılabilen ortalama-serbest elektron yoluna bağlıdır, bu nedenle, bu problemi incelemek için gereken mesafeler ölçeğinde malzemenin artık homojen bir süreklilik olarak kabul edilemez. Belirli bir düzlem boyunca ısı akması malzeme boyunca elektron enerji dağılımına bağlıdır (Yılbaş ve Şahin,1993; Yılbaş, 1997; Yılbaş ve Koç, 1986)

Yukarıdaki tartışmaların ışığında, laserli malzeme etkileşimi ile malzemenin ısıtma sırasındaki sıcaklık dağılımını incelemek için yeni bir modele ihtiyaç vardır. Kinetik teori yaklaşımını; problemi incelemeye temel, elektron fonon çarpışmalarıyla enerjinin

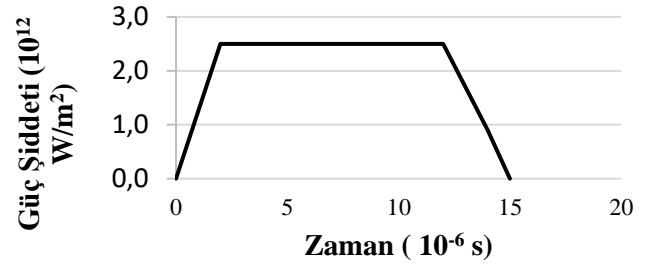
taşınmasını tanımlamaktadır. Sonuç olarak, bu çalışma, darbeli laserli ısıtma işleminde iletim için uygun bir kinetik teori yaklaşımı ve taşınım için ise klasik metot kullanılarak malzeme içerisindeki sıcaklık dağılım analizleri yapılmıştır. İki farklı güçteki darbeli laser ile malzemenin ısıtılması işlemi sırasında sıcaklık artışı sayısal olarak hesaplanmıştır. Dört farklı malzemenin (Demir, Nikel, Titanyum ve Tantal) darbeli laser ile ısıtılması sonucu malzemedeki ısı iletimi kinetik teori ile ve ısı taşınım klasik metotla çözümü sonucu malzemedeki malzeme yüzeyinde ve malzeme içerisindeki sıcaklık dağılımlarının zamana göre dağılımı verilmiştir.

2. Materyal ve Metot

2.1. Sistemin tanıtımı ve kabuller

Laser malzeme etkileşimi sırasında malzemenin ertilmesi uygulamalarında Fourier iletim denkleminde bağı sınırlamalar nedeniyle yeni bir modele ihtiyaç vardır. Temelde problemin çözümü için enerjinin elektronlar ile taşınmasını tanımlamak için kinetik teori kullanılır (Yılbaş, 1986). Bu model şu şekilde açıklanabilir. Dışardan malzeme yüzeyine uygulanan elektromanyetik ışımaya, metallerin iletim bandında bulunan serbest elektronlar tarafından absorbe edilirler. Enerjisi artan bu elektronlar atomlarla çarpışarak enerjilerinin bir kısmını atomlara terk ederler. Bu etkileşimden dolayı atomların foton enerjileri artar ve çevresinde bulunana atomları da titreşime zorlayarak fonon enerjilerinin artmasına sebep olur. Problemin çözülmesine kolaylık getirmesi için bazı kabuller yapılmıştır. Bu çalışmada termoyonik emisyonundan dolayı enerji kaybı ihmal edilmiştir. Enerji transfer işlemi elektron-

foton çarpışmaları sırasında meydana gelmektedir. Çarpışmalardan sonra elektronların yönleri hemen değişir, fakat elektron akışı herhangi bir yönde sabit kalır. Çarpışma esnasında fazla elektron enerjisinin küçük bir oranı fotonlara geçer. Çözümde lokal dengede olduğu, $t=0$ 'da anında malzeme üniform bir sıcaklıkta olduğu kabulü yapılmaktadır. Plazmanın sürekli bir rejim gösterdiği, çekirdekleşme ve sıvı metal fişkırtma mekanizmasının olmadığı, laser optik sisteminden ve plazmadan dolayı laser ışınının fiziksel değişiminin ihmal edilmektedir. Elektronların, ortalama serbest yolunun sıcaklık değişimlerinden etkilenmeyeceği olarak sıralanabilir. Katı laserlerden, laser ışının çıkışı yoğunluğu birkaç mikrosaniye de (μs) maksimum değere ulaşır. Yaklaşık 10 mikrosaniye sonra tekrar düşer. Darbeli laserin güç yoğunluğunun zamana göre dağılımı Şekil 1'de verilmiştir (Koç, 1995).



Şekil 1. Darbeli laserin güç yoğunluğunun zamana göre dağılımı

Bu çalışmada, darbeli laser ve malzeme etkileşimi sonucu yarı kinetik teori (ısı iletimi kinetik teori ile ve ısı taşınım klasik metotla) ile sıcaklık dağılımları incelenecek olan malzemelerin fiziksel özellikleri Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Malzemelerin fiziksel özellikleri (Koç, 1995).

Malzeme Özelliği	Birimi	Çelik	Nikel	Tantal	Titanyum
Erime Sıcaklığı	°C	1473	1728	3270	1950
Kaynama sıcaklığı	°C	3100	3110	5700	3350
Kritik sıcaklığı	°C	10300	10800	22000	12500
Özgül ısısı	J/kg.K	460	447	150	523
Isıl iletkenlik	j/s.m.K	80,3	90.3	57.7	20,4
Yoğunluk	kg/m ³	7880	8900	16620	4570
Soğurma katsayısı	1/m	6.16*10 ⁷	6.75*10 ⁷	5.69*10 ⁷	4.38*10 ⁷
Isıl difüzyivite	m ² /sn	0.227*10 ⁻⁴	0.229*10 ⁻⁴	0.247*10 ⁻⁴	0.092*10 ⁻⁴

$$n = \frac{1}{e^{\hbar\omega/k_B T} - 1} \quad (2a)$$

2.2. Kinetik teoriye göre ısı iletimi

Kinetik teoriye göre; malzeme içerisindeki serbest elektron modeli göz önüne alınarak ısı iletiminin incelenmesi gerekir. Serbest elektronlar, yüzey içerisinde belirli bir hıza sahip olan ve serbest olarak hareket eden elektronlardır. Belirli bir yüzeyle sınırlandırılan hacim içerisinde bulunan elektronların enerjileri, fermi dağılım yasasına göre değişirler. Moleküler kafese içerisindeki elektronlar, titreşim hareketlerine bağlı olarak fonon enerjisine sahip olurlar (Merhav, 2018). Bir kafes atomunun titreşimi göz önüne alındığında, bir bağlı elektronun "s" kafes alanındaki (Şekil 1) yer değiştirmesi şöyle ifade edilebilir (Koç, 1995):

$$A_g \cdot e^{i(gs - \omega t)}$$

A_g , hareketin genliğidir. Kafes titreşim enerjisi frekansa (ω) ve ortalama fonon sayısına (n) bağlıdır. T sıcaklığında, termal dengedeki fonon sayısı aşağıdaki Planck dağılımının bir fonksiyonunu olarak yazabilir (Dekker, 1958):

veya

$$n + \frac{1}{2} = \frac{1}{2} c \cdot n \cdot \frac{\hbar\omega}{2k_B T} \quad (2b)$$

Burada; k_B : Boltzman sabitidir, c: ışık hızıdır, n; fonon sayısı ve nth: Kuantum durumunda bulunan uyarma sayısıdır. Planck dağılımında, ısı dengede bulunan aynı harmonik salınımların değişimi göz önüne alınır (Kittel 2005). Kuantum durumunda bulunan "nth" daki uyarma sayısının, kuantum durumdaki "(n+1)th" salınımlarının sayısına oranı Boltzman sabitine bağlı olarak;

$$N_{n+1} / N_n = e^{\hbar\omega/k_B T} \quad (3)$$

Şeklinde yazılır. N; atom sayısıdır. Bu durumda "nth" kuantum durumundaki salınımların toplam sayısına oranı;

$$\frac{N_n}{\sum_{s=0}^{\infty} N_s} = \frac{e^{-n\hbar\omega/k_B T}}{\sum_{s=0}^{\infty} e^{-s\hbar\omega/k_B T}} \quad (4)$$

Salınımın ortalama uyarma kuantum sayısının düzenlenmesi yapılırsa ve $x = \exp(-\hbar\omega/k_B T)$ ise, aşağıdaki formu alır;

$$\sum_s s \cdot e^s = x \frac{d}{dx} \sum_s x^s = \frac{x}{(1-x)^2} \quad (5)$$

şeklini alır. Klasik anlamda, her salınımın $\hbar\omega \approx k_B T$ enerjisine sahip olduğu kabul edilir. ω frekansındaki salınımın ortalama enerjisi $h\hbar\omega$ 'dır. Bir atom titreşimi için ortalama enerji;

$$E = h \cdot \omega g / [\exp(h \cdot \omega g / k \cdot T - 1)] \quad (6)$$

Şeklinde yazılır. Salınımların ısı kapasitesi;

$$C_v = \left(\frac{dE}{dT} \right)_v = N \cdot k_B \cdot \left(\frac{\hbar \cdot \omega}{\tau} \right)^2 \cdot \frac{e^{\hbar\omega/\tau}}{(e^{-\hbar\omega/\tau} - 1)^2} \quad (7)$$

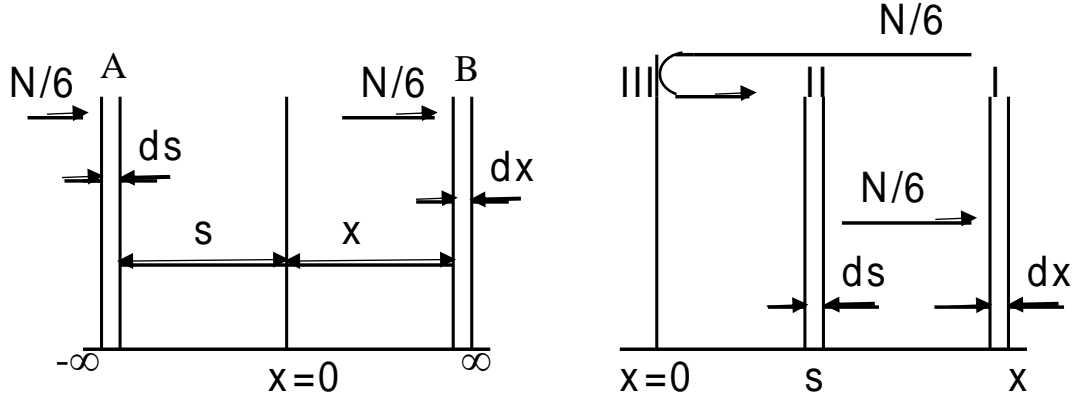
Şeklinde yazılır. C_v ; salınımın ısı kapasitesidir. Üç boyutlu N adet atomun salınımları için denkleme “ $3N$ ” yazılır. Çünkü her bir atomun üç serbestlik derecesine sahiptir. Kafes titreşimlerinden dolayı tek bir yöndeki N adet molekülün enerjisi;

$$E_x = N_x \cdot k_B \cdot T \quad (8)$$

Bu denklemde E_x ; foton enerjisi olarak tanımlanabilir. Genel olarak homojen yapıdaki bir malzemede, sürekli halde ısı geçişi olduğu kabulü ile ısı iletkenlik katsayısı tanımlanmış olup tek yöndeki ısı iletkenlik katsayısı aşağıdaki bağıntıyla tanımlanmıştır (Yılbaş ve Kalyon, 2002; Koç 1995)

$$k = \frac{N \cdot \bar{V}_x \cdot k_B \cdot \lambda}{6} \quad (9)$$

Burada; λ : elektronların serbest yolu ve \bar{V} : serbest molekülün bağıl hızı olup, Deby sıcaklığından daha yüksek sıcaklar için, ısı iletkenlik sabit olacaktır. Analizde, yüzeyden yansıyan elektronlardan dolayı bir zorluk meydana gelmektedir. Bu güçlük Şekil 2.a'de görüldüğü gibi yüzeyde bir yansıtıcının olduğu kabulüyle aşılmıştır. Bu analizde, malzemede hareket eden ve yüzeyden geri yansıyan elektronların matematiksel açıklamaları verilmiştir. Bu durum, yüzeye yerleştirilmiş hayali ayna ile yüzeyden uzaklaştırılabilir. Bir elektronun çarpışmadan x mesafesine ulaşması $x \ll \lambda$ için $\exp(x/\lambda)$ olur. Bir elektron dx aralığının sonunda çarpışma olasılığı dx/λ olarak verilir. Şekil 2.b'ye göre, II, III, I için son çarpışma olasılığı, dx mesafesindeki elektronların yolları aşağıdaki gibidir.



a) Elektron akışı

b) Hayali ayna kabulü

Şekil 2. Elektronların enerji taşımını ile ilgili hareket yönü

Elektronlar, Şekil 2'de görülen II, I veya III, I yolunu izlerler. Yüzey bölgesinde elektronların toplam çarpışma ihtimali aşağıdaki gibi yazılabilir (Koç, 1995).

$$\int_{-\infty}^{\infty} \exp\left[-\frac{|x-s|}{\lambda}\right] \cdot \frac{ds}{\lambda} \cdot \frac{dx}{\lambda} \quad (9)$$

İntegralin negatif sınırı, yüzeyden yansıyan elektronlar ve düşünülen yansıtıcıdan dolayıdır. Bütün cisimde elektron-foton çarpışması esnasında net enerji transferi aşağıdaki gibidir.

$$\Delta E_{x,t} = \int_{-\infty}^{\infty} \exp\left[-\frac{|x-s|}{\lambda}\right] \cdot \frac{ds}{\lambda} \cdot \frac{dx}{\lambda} \cdot f. \quad (10)$$

($E_{s,t} - E_{x,t}$)

Burada; $E_{s,t}$ ve $E_{x,t}$ dizileri sırasıyla bir noktadaki elektronların ve atomların enerjileridir. f parametresi, atomun çarpışma sırasında elektronun fonona verdiği enerji yüzdesidir ve $f=10^{-4}$ olarak alınır (Dekker, 1981; Yan vd., 2007). Isı geçişinde, x uzaklık formülü olan homojen bir ortamdan geçiş, aşağıdaki denklem ile yazılır.

$$\frac{dl}{dx} = -\delta \cdot l(x) \quad (11)$$

Burada δ soğurma katsayısıdır. Buradaki negatif işaret δ pozitif büyüklüğü ile soğurmadan dolayı ışın şiddetindeki azalmayı belirtmektedir. Bu denklem integre edersek

$$I = I_0 \cdot \exp(-\delta \cdot x) \quad (12)$$

Burada; I_0 gelen laser ışınının maksimum şiddetidir. Bundan dolayı, laser ışınının şiddeti için yukardaki formül kullanılarak, dt zaman alanında dx boyunda uygulanan enerji aşağıdaki gibi yazılabilir;

$$\Delta E_{x,t} \Big|_{\text{abs}} = I_0 \cdot \delta \cdot e^{-\delta \cdot x} \cdot A \cdot dt \cdot dx \quad (13)$$

dt zamanında dx boyundaki metalde ki toplam enerji artışı;

$$N \cdot A \cdot (E_{x,t+dt} - E_{x,t}) \cdot dx = \Delta E_{x,t} + \Delta E_{x,t} \Big|_{\text{abs}} \quad (14)$$

Bundan dolayı toplam enerji transfer denklemi,

$$\begin{aligned}
 N \cdot A \cdot (E_{x,t+dt} - E_{x,t}) \cdot dx &= I_0 \cdot \delta \cdot \exp(-\delta \cdot x) \cdot A \cdot dx \\
 &+ \int_{-\infty}^{\infty} \frac{N \cdot \bar{V}}{6 \cdot \lambda^2} \cdot \exp\left(-\frac{|x-s|}{\lambda}\right) \cdot f(E_{s,t} - E_{x,t}) \cdot ds \cdot A \cdot dt \cdot dx
 \end{aligned}
 \quad (15)$$

Bu denklemle birlikte elektronlar ve moleküller arasındaki enerji transferi, elektronların ve kafes titreşimlerinin sonucu oluşan sıcaklığa bağlı olarak hesaplanabilmektedir (Koç, 1995). Toplam enerji transfer denklemi düzenlendikten sonra kafes sıcaklığının değişimi aşağıdaki şekilde yazılabilir.

$$\begin{aligned}
 \frac{dT(x,t)}{dt} &= \frac{I_0 \cdot \delta}{\rho \cdot C_p} \exp(-\delta \cdot x) - \frac{K \cdot f}{2 \cdot \lambda^3 \cdot \rho \cdot C_p} T(x,t) + \frac{K \cdot f}{4 \cdot \lambda^3 \cdot \rho \cdot C_p} \left[\int_0^{\infty} \exp\left(-\frac{|x+s|}{\lambda}\right) T(s,t) \cdot ds \right. \\
 &\quad \left. + \int_0^x \exp\left(-\frac{|x-s|}{\lambda}\right) T(s,t) \cdot ds + \int_x^{\infty} \exp\left(-\frac{|x-s|}{\lambda}\right) T(s,t) \cdot ds \right]
 \end{aligned}
 \quad (16)$$

$$\frac{dU}{dT} = \frac{U}{T} + (C_{p2} - C_{p1}) - \frac{U}{(v_2 - v_1)} \left[\left(\frac{\partial v_2}{\partial T} \right)_P - \left(\frac{\partial v_1}{\partial T} \right)_P \right]
 \quad (18)$$

2.3. Klasik metotla ısı taşınımı

Laser metal etkileşim esnasında, malzemenin katıdan sıvıya ve sıvadan buhara faz değişimleri esnasında önemli bir miktar da enerjiye ihtiyaç duyacaktır. Bu faz değişimleri sırasında iletim, buharlaşma, radyal akış ve soğurma gibi fiziki olayların meydana geldiği kabul edilir (Belforte ve Levitt 2012; Bulgan vd.,1991). Maddenin, buhar faza geçişinde bir yerde buharlaşma gizli ısıya ihtiyacı vardır. Burada buharlaşma gizli ısıyı eliptik fonksiyon sıcaklığı gibi veririz. Uygun denklem yazılırsa (Koç, 1995).

$$U(T) = U_0 \left[1 - (T_s / T_0)^2 \right]^{1/2}
 \quad (17)$$

Burada; U_0 : mutlak sıfırda buharlaşma gizli ısıdır. Sabit basınçta, gizli ısının sıcaklıkla değişimi aşağıdaki gibi ifade edilir (Prokhorow, 1990).

Burada; C_{p1} ve C_{p2} sabit basınçta özgül ısılar olup, v_1 ve v_2 özgül hacimlerdir. 1 ve 2 indisleri sırasıyla sıvı ve buhar fazlarını gösteren alt indislerdir. Enerjinin dönüşüm denklemini;

$$I_0 = \rho V_s [U(T_s) + C_p T_s]
 \quad (19)$$

ve yüzeyin buharlaşma hızı;

$$V_s = \left[\frac{k_B \cdot T_s}{2 \cdot \pi \cdot m} \right]^{1/2} \cdot \exp\left[-\frac{U(T_s)}{k_B \cdot T_s}\right]
 \quad (20)$$

Şeklinde yazılır. V_s ; yüzeydeki buharlaşma hızı ve T_s ; yüzey sıcaklığı olup eşzamanlı ifadelerdir. Bunlar vakum şartlarındaki buharlaşma neticesinde standart kaynama sıcaklığının altındaki sıcaklıklar için geçerlidir (Yılbaş ve Apalak, 1987). Düşük yüzey sıcaklıklarının üzerindeki kritik nokta sıcaklığı için hız ifadesini (Yılbaş ve Yılbaş 1988);

$$V_s = \left[\frac{k_B \cdot T_s}{2 \cdot \pi \cdot m} \right]^{1/2} \quad (21)$$

ve laser gücüne bağlı olarak;

$$V_s = \left[\frac{I_0}{\rho \cdot C_p \cdot T_s} \right] \quad (22)$$

şeklinde ifade etmişlerdir. Ancak bu denklemler, atmosfer şartlarında ve ergime sıcaklıklarının altında doğru sonuç vermezler. (21) ve (22) eşitliklerinden güç ifadesi çekilerek gerekli işlemler yapılırsa;

$$I_0 = \rho \cdot C_p \cdot T_s \cdot \left[\frac{k_B \cdot T_s}{2 \cdot \pi \cdot m} \right]^{1/2} \quad (23)$$

şeklinde yazılır. Yılbaş (1986) sürekli hal rejimini için gerekli analizleri yapıp, erime ve buharlaşma ifadelerini kullanarak birim hacim ısı transfer oranını hesap etmiştir. Bu ısı transferi oranı aşağıdaki bağıntı ile verilmiştir.

$$\rho \cdot C_p \cdot V_s \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \quad (24)$$

Genel ısı transfer denklemini yazacak olursak, ısı iletimi olarak elektron kinetik teori modeliyle elde edilen (16) denklemden, taşınım olarak (24) denkleminde yazılan erime ve buharlaşma ifadelerini esas alan denklemler beraberce aşağıdaki şekilde yazılabilir.

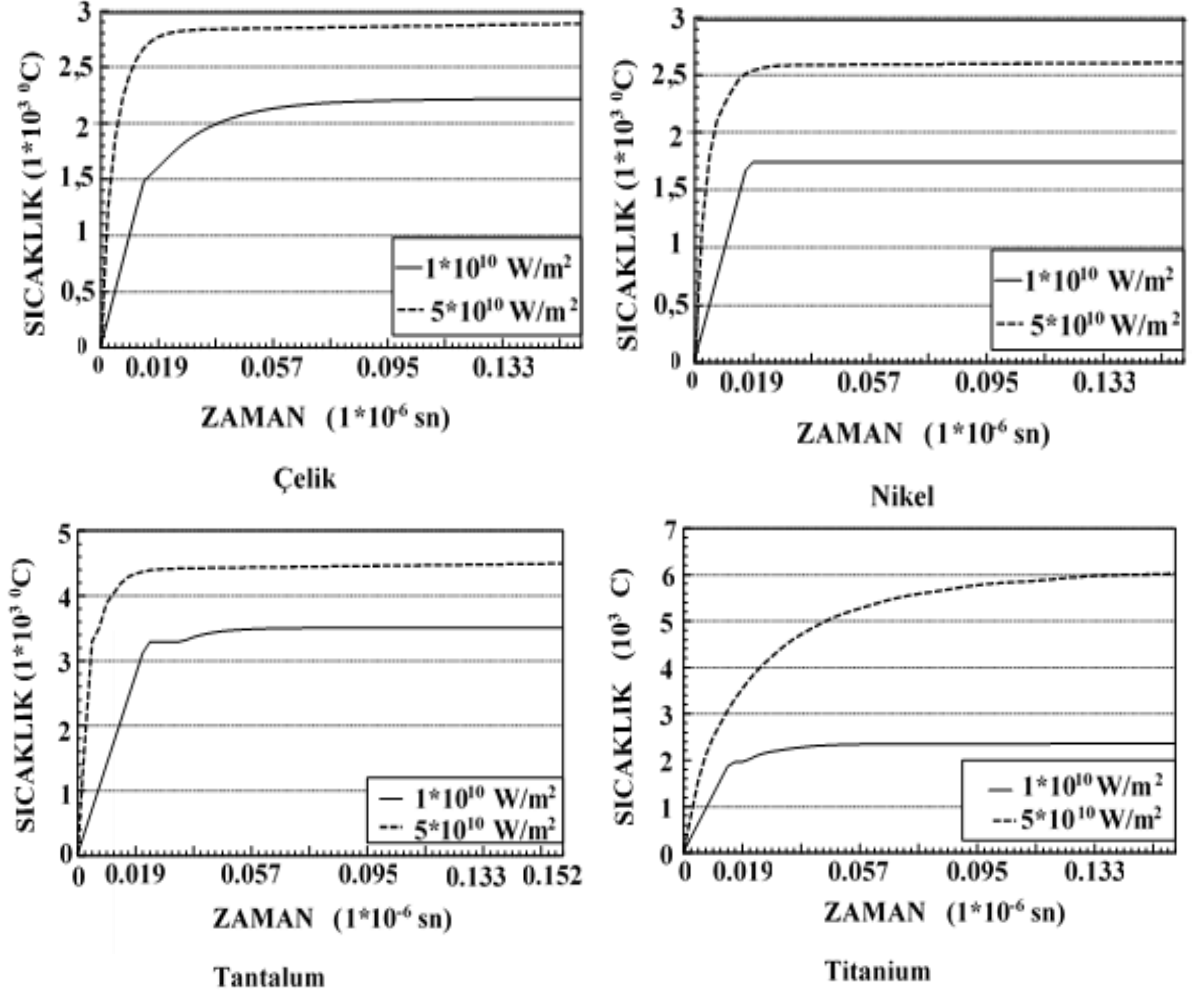
$$\frac{dT(x, t)}{dt} = \frac{I_0 \cdot \delta}{\rho \cdot C_p} \exp(-\delta \cdot x) - \frac{K \cdot f}{2 \cdot \lambda^2 \cdot \rho \cdot C_p} T(x, t) + \frac{K \cdot f}{4 \cdot \lambda^3 \cdot \rho \cdot C_p} \left[\int_0^\infty \exp\left(-\frac{|x+s|}{\lambda}\right) T(s, t) \cdot ds \right]$$

$$+ \int_0^x \exp\left(-\frac{|x-s|}{\lambda}\right) T(s, t) \cdot ds + \left[\int_x^\infty \exp\left(-\frac{|x-s|}{\lambda}\right) T(s, t) \cdot ds \right] + \rho \cdot C_p \cdot V_s \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \quad (25)$$

Bu denklem laser ısıtma işlemleri için kinetik teoriye göre iletim ve klasik metoda göre taşınım (yarı klasik teori) etkilerini içeren sıcaklık dağılımını veren denklemdir.

3. Bulgular

Laser-malzeme etkileşimi sırasında, malzemede meydana gelen sıcaklık dağılımı zamana bağlı olarak tek boyutta incelenmiştir. Bu çalışmada laser güç şiddeti $1 \cdot 10^{10} \text{ W/m}^2$ ve $5 \cdot 10^{10} \text{ W/m}^2$ olan laser ışını ile Çelik, Nikel, Tantal ve Titanyum malzemelerinin etkileşimi esnasındaki sıcaklık dağılımlarının analizi ısı iletimi kinetik teoriye ve ısı taşınımını klasik metoda (yarı kinetik teori yaklaşımı) göre yapılarak bir bilgisayar programı hazırlanmıştır. Malzemelerin ergime sıcaklıklarına ulaşma zamanları termofiziksel özelliklerine bağlı olarak birbirinden farklı olmasından dolayı aynı güç yoğunluklarında her malzemenin ergime sıcaklığına ulaşma zamanı birbirinden farklıdır. Sekil 3'de $1 \cdot 10^{10} \text{ W/m}^2$ ve $5 \cdot 10^{10} \text{ W/m}^2$ güç yoğunluklarındaki laser ışını ile etkileşimi sırasında yarı klasik teori yaklaşımı ile bulunan malzeme yüzeyindeki sıcaklık dağılımının zamana göre değişimi verilmiştir.

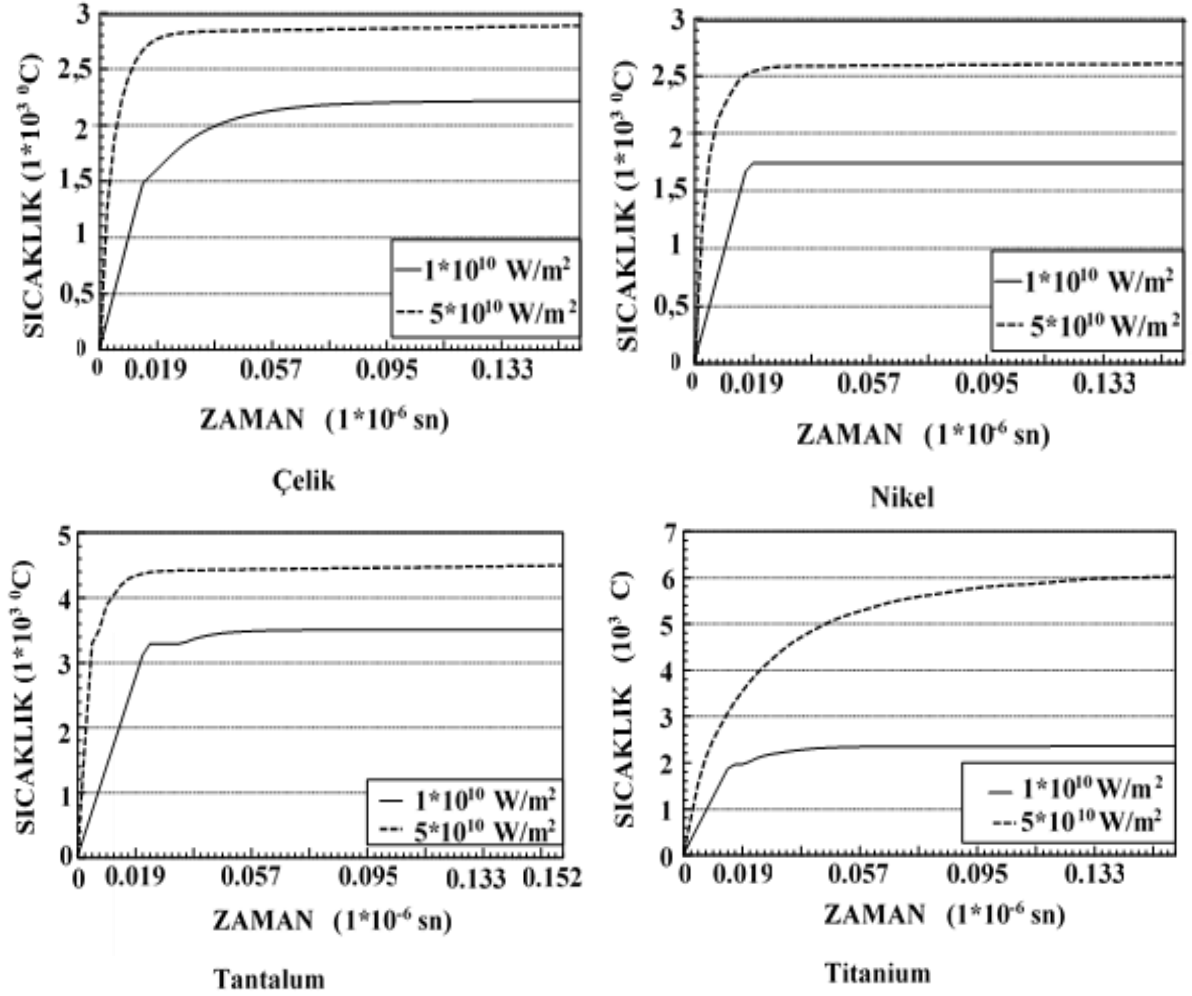


Sekil 3. Darbeli laser 1.10^{10} W/m² ve 5.10^{10} W/m² güç yoğunluklarındaki laser ışını ile etkileşimi sırasında yarı klasik teori yaklaşımı ile bulunan malzeme yüzeyindeki sıcaklık dağılımının zamana göre değişimi

Şekil 3’de yarı klasik teori (ısı iletimi kinetik teoriye ve ısı taşınımı klasik metoda) yaklaşımına göre bulunan ve darbeli laser 1.10^{10} W/m² ve 5.10^{10} W/m² güç yoğunluklarındaki laser ışını ile sırasıyla Çelik, Nikel, Tantal ve Titanyum malzemelerinin etkileşimi sırasında malzeme yüzeyinde meydana gelen sıcaklığın değişimi 0 ile 0.16 μ s aralığında zamana bağlı olarak verilmiştir. Buradan görüleceği gibi malzeme yüzey sıcaklığı, ergime sıcaklığına kısa sürede ulaşmaktadır. Ergime sıcaklığında kısa bir süre sabit sıcaklıkta devam etmekte ve ergime tamamlandıktan sonra sıvı fazdaki

sıcaklık artışı devam etmektedir. Darbeli laser 1.10^{10} W/m² güç yoğunluğunda; Çelik 0.014 μ sn, Nikel 0.0174 μ sn, Tantal 0.0224 μ sn ve Titanyum 0.0149 μ sn sonra ergime sıcaklığına ulaştığı görülmektedir. Ergime sıcaklığına ulaşma süreleri malzemenin fiziksel özelliklerine (ergime sıcaklığı, özgül ısı, ısı iletkenlik ve soğurma katsayısı vb.) bağlı olarak değişmektedir. Darbeli Laser 5.10^{10} W/m² güç yoğunluğunda, Çelik 0.0028 μ sn, Nikel 0.0035 μ sn, Tantal 0.00448 μ sn ve Titanyum 0.00299 μ sn sonra ergime sıcaklığına ulaşmaktadır. Bu sonuçların

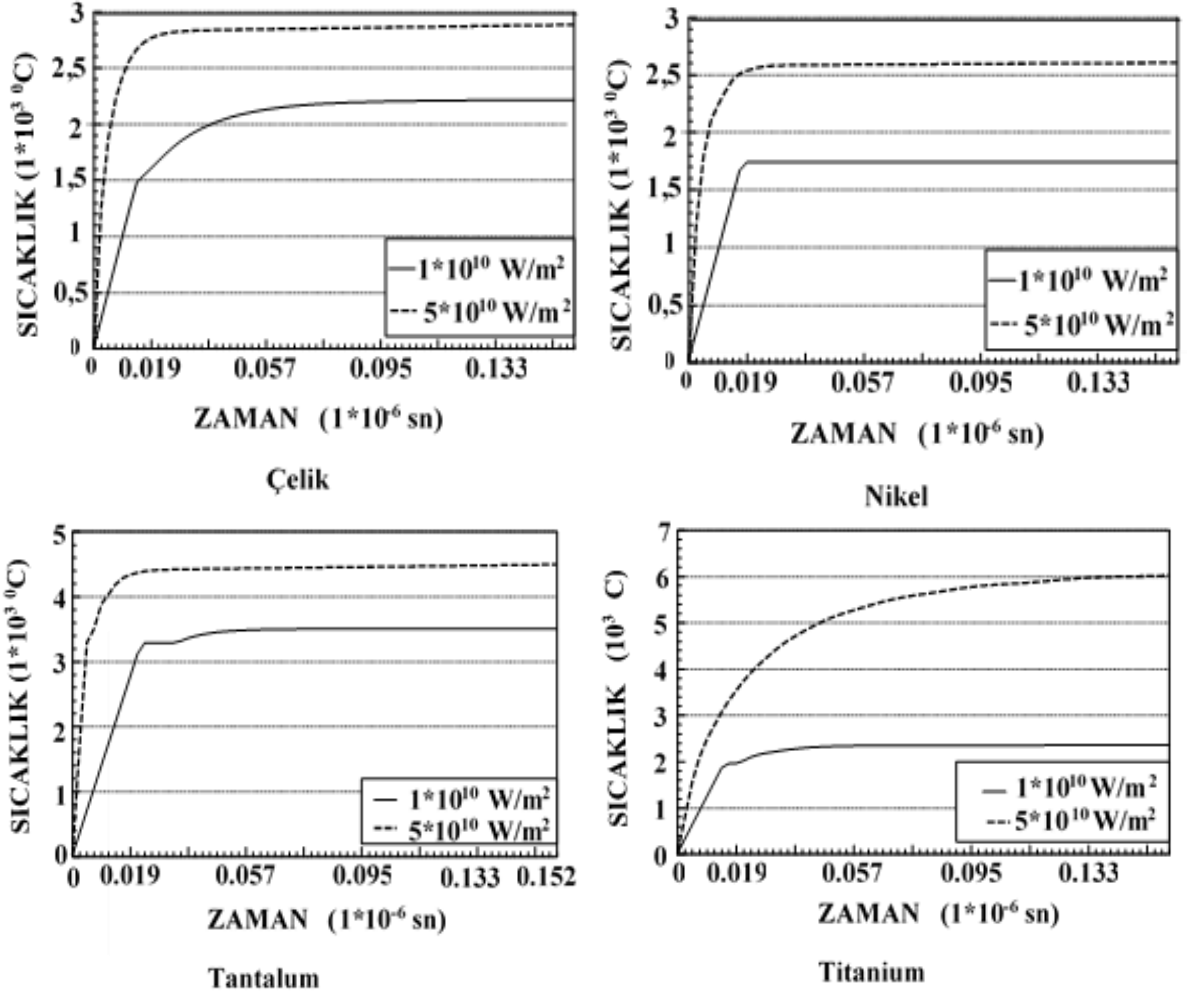
literatürle uyumlu olduğu görülmektedir [Yılbaş, 1986; Yılbaş ve Şahin, 1993].



Şekil 4. Darbeli laser 1.10^{10} W/m² güç yoğunundaki laser ışını ile etkileşimi malzeme içerisindeki sıcaklık dağılımlarının malzeme derinliğine göre değişimi.

Darbeli laser 1.10^{10} W/m² güç yoğunluğundaki, laser ışını ile sırasıyla Çelik, Nikel, Tantal ve Titanyum malzemelerinin etkileşimi sırasında değişik zamanlarda, malzeme yüzeyine dik doğrultudaki yarı klasik teori yaklaşımına göre sıcaklık dağılımları verilmiştir. Yarı klasik teori yaklaşımında malzemenin derinliğine doğru sıvı fazda sıcaklık exponansiyel olarak hızlı bir düşüş göstermekte, faz değiştirme sıcaklığında sabit kalmakta ve daha sonra yine exponansiyel olarak azalarak asimtot olarak devam

etmektedir. Yarı klasik teori yaklaşımında, sıvı fazda yüzeyden malzeme içerisine doğru olan sıcaklıktaki azalma hızlı bir şekilde meydana gelmektedir. Bunun nedeni ise yarı klasik teoride taşınım ile olan ısı transferinin klasik yaklaşımla yapılması ve yüksek güç yoğunluklarında hataların büyümesinden ileri gelmektedir. 5.10^{10} W/m² güç yoğunundaki laser ışını ile etkileşimi malzeme içerisindeki sıcaklık dağılımlarının malzeme derinliğine göre değişimi Şekil 5’de verilmiştir.



Şekil 5. Darbeli laser $5 \cdot 10^{10} \text{ W/m}^2$ güç yoğunundaki laser ışını ile etkileşimi malzeme içerisindeki sıcaklık dağılımlarının malzeme derinliğine göre değişimi

Darbeli laser $5 \cdot 10^{10} \text{ W/m}^2$ güç yoğunluğundaki, laser ışını ile sırasıyla Çelik, Nikel, Tantal ve Titanyum malzemelerinin etkileşimi sırasında değişik zamanlarda, malzeme yüzeyine dik doğrultudaki yarı klasik teori yaklaşımına göre sıcaklık dağılımları verilmiştir. Malzeme yüzeyindeki sıcaklık artışı Şekil 3.2 de verilen $1 \cdot 10^{10} \text{ W/m}^2$ güç yoğunluğundaki laser malzeme etkileşimiyle karşılaştırıldığında, sıcaklık dağılımları benzer bir eğilim izlemesine rağmen, yüzeydeki sıcaklık artışı çok hızlı olmaktadır. Buna karşılık malzeme yüzeyine dik ve malzeme derinliğindeki

sıcaklık farkı çok büyüktür. Bu da malzemenin fiziksel özellikleri aynı olduğundan malzeme derinliğine olan ısı transfer hızı yüzeydeki sıcaklık artışından daha yavaş olmaktadır.

Bu çalışmada geliştirilen bilgisayar programı ile 8 elektron serbest aralığına eşit derinlik incelenebilmiştir. Bu aralıktan daha büyük derinlikler için bilgisayar işlem zamanının çok uzun olması ve nümerik analizden doğan yuvarlama hatalarının büyümesi nedeni ile analiz yapılamamıştır.

4. Sonuç ve Tartışma

Bu çalışmada, yarı klasik teori yaklaşımı ile elde edilen sonuçlar şu şekilde sıralanabilir. Malzeme yüzeyine dik doğrultuda, artan malzeme derinliğine doğru sıcaklık değişimi sıvı faz bölgesine kadar önce exponansiyel bir şekilde düşüş gösterir. Ergime sıcaklığında ise sıcaklık sabit kalmaktadır. Daha sonra katı faz içerisinde malzeme derinliği arttıkça sıcaklık, hızlı bir şekilde exponansiyel olarak azalma göstermekte ve daha sonra asimtot olarak devam etmektedir. Yapılan analiz sonucunda yüzey sıcaklığı arttıkça malzeme içerisindeki faz değiştirme bölgesi gittikçe küçülmektedir.

Malzeme yüzeyinde zamana bağlı olarak sıcaklık artışları göz önüne alındığında, yapılan analiz sonucu üç bölge göz önüne alınabilir. Birinci bölge katı faz bölgesi olup sıcaklık artışı grafiklerde lineer görünmesine rağmen çok azda olsa parabolik olarak ergime noktasına kadar devam etmektedir. İkinci bölge sıvı faz bölgesi olup düşük yoğunluklardaki enerjilerde sıcaklık, ilk önce sabit kalmakta ve daha sonra yavaş yavaş artmaktadır. Bu durum verilen enerjinin elektron ve atomların kinetik enerji artışının duraklayarak ve potansiyel enerjilerinin artması yani faz değişimleri için gerekli olan gizli ısıya dönüştüğü şeklinde açıklanabilir. Ancak yüksek yoğunluklardaki laser ışını ile malzeme temas halinde olduğunda faz değişimi daha kısa bir zaman içerisinde meydana gelmektedir. Üçüncü bölgede ise buharlaşma sıcaklığının üzerinde yüzey sıcaklığı daha hızlı olarak artmaktadır.

Yüzeydeki sıcaklık artışı zamana bağlı olarak incelendiğinde; ısı iletim katsayısı küçük ve soğurma katsayısı büyük olan malzemelerde yüzeydeki sıcaklık artışının daha hızlı olduğu tespit edilmiştir. Buna karşılık ısı iletim

katsayısı büyük olan malzemelerde yüzeydeki sıcaklık artışı yavaş olmakta ve malzeme derinliğine doğru sıcaklık artışı daha hızlı olmaktadır.

5. Kaynaklar

Beck, R. J., Parry, J. P., MacPherson, W. N., Waddie, A., Weston, N. J., Shephard, J. D., & Hand, D. P. (2010). "Application of cooled spatial light modulator for high power nanosecond laser micromachining", *Optics express*,18(16), 17059-17065.

Belforte, D., & Levitt, M. (Eds.). (2012)."The industrial laser handbook": *Edition. Springer Science & Business Media*. 1992–1993

Bulgan, A.T., Koç, A., Keçeciler, A., (1991) "The Heat Transfer Analysis Which Happens During Laser-Metal Interaction", *J. Inst Sci.Techno Gazi Univ*, Vol.:4, No:1, pp:15-37, January 1991].

Dekker, A. J. (1958). "Solid State Physics", Vol. 6.*Seitz and D. Turnbull, eds., Academic Press*, New York, 251.

Dekker, A. J. (1981). "In Solid State Physics", Chapter 16, page no 408, Pub. Joe, D. J., Kim, S., Park, J. H., Park, D. Y., Lee, H. E., Im, T. H., ... & Lee, K. J. (2017). "Laser-material interactions for flexible applications",*Advanced Materials*,29(26), 1606586.

Kittel, C. (2005). "Introduction to solid state physics", *John Wiley & Sons.Inc.*, New York. Koc, A., Yilbas, B. S., Koc, Y., Said, S., Gbadebo, S. A., & Sami, M. (1998)."Material response to laser pulse heating: a kinetic theory approach",*Optics and lasers in engineering*,30(3-4), 327-350.

A. (2004). "3-D analysis of temperature distribution in the material during pulsed laser and material interaction". *Heat and mass transfer*, 40(9), 697-706.

- Koc Y. (1995). “Kinetik teori yaklaşımı ile lase-malzeme etkileşimi sırasında malzemedeki sıcaklık dağılımının analizi”. Yüksek lisans tezi. *Erciyes Üniversitesi Fenbilimleri Enstitüsü.*, Kayseri,1995
- Koç, A., Yağlı, H., Koç, Y., & Uğurlu, İ. (2018). Dünyada ve Türkiye’de Enerji Görünümünün Genel Değerlendirilmesi. *Engineer & the Machinery Magazine*, 59(692).
- Maiman, T. H. (1960). “Stimulated optical radiation in ruby. Masers”, *Nature*, 187,484-493, 1960].
- Merhav, N. (2018). “Vibrations in a Solid–Phonons and Heat Capacity $\rho^* \rho$. In” *Statistical Physics for Electrical Engineering* (pp. 95-102). Springer, Cham.
- Neto, O. D., & Lima, C. A. S. (1994). “Nonlinear three-dimensional temperature profiles in pulsed laser heated solids”, *Journal of Physics D: Applied Physics*, 27(9), 1795.
- Remo, J. L., & Adams, R. G. (2008, May). “High energy density laser interactions with planetary and astrophysical materials: methodology and data. In”, *High-Power Laser Ablation VII*, (Vol. 7005, p. 70052M). International Society for Optics and Photonics.
- Prokhorov, A. M., Konov, V. I., Ursu, I., & Mihailescu, I. N. (1990). “Laser Heating of Metals”, *Adam Hilger Series on Optics and Optoelectronics*, Bristol: Hilger.
- Qiu, T. Q., & Tien, C. L. (1992). “Short-pulse laser heating on metals”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 35(3), 719-726.
- Simon, G., Gratzke, U., & Kroos, J. (1993). “Analysis of heat conduction in deep penetration welding with a time-modulated laser beam”, *Journal of Physics D: Applied Physics*, 26(5), 862.
- Townes, C. H., & Schawlow, A. L. (1958). “Infrared and optical Masers”, *Phys. Rev.*, 112(6), 1940-1949.
- Yan, J., Zhang, Y., Kim, P., & Pinczuk, A. (2007). “Electric field effect tuning of electron-phonon coupling in graphene”, *Physical review letters*, 98(16), 166802.
- Yilbas, B. S. (1986). “Heating of metals at a free surface by laser irradiation—an electron kinetic theory approach”, *Laser and Particle Beams*, 4(2), 275-286.
- Yilbas, B. S., & KOÇ, A. (1986), “Nd+ 3 Laser Rodunda Isıl Gerilmelerin ve Optik Distorsiyonların İncelenmesi”, *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fen Bilimleri Dergisi*, 2109-119.
- Yilbas, B. S., & Apalak, K. (1987). “The basic concepts of heat transfer mechanism during laser drilling of metals”, *Egypt J. of Phys*, 18(2), 133-156.
- Yilbaş, B. S., & Yilbaş, Z. (1988). “Some aspects of laser-metal vapour interaction”, *Pramana*, 31(5), 365-381.
- Yilbas, B. S., Davies, R., Yilbas, Z., & Koc, A. (1990). Analysis of the absorption mechanism during laser-metal interaction. *Pramana*, 34(6), 473-489.
- Yilbaş, B. S. (1993). “Analytical solution for the heat conduction mechanism appropriate to the laser heating process”, *International communications in heat and mass transfer*, 20(4), 545-555.
- Yilbaş, B. S., & Şahin, A. Z. (1993). “An approach to convergency of kinetic theory to Fourier theory in relation to laser heating process”, *Japanese journal of applied physics*, 32(12R), 5646
- Yilbas, B. S., & Sami, M. (1995). “Laser heating mechanisms including evaporation process-semiclassical and kinetic theory

approaches”, *Japanese journal of applied physics*, 34(12R), 6391.

Yilbas, B. S. (1997). “Laser heating process and experimental validation”, *International journal of heat and mass transfer*, 40(5), 1131-1143.

Yilbas, B. S., & Kalyon, M. (2002). “Analytical solution for pulsed laser heating process: convective boundary condition case”, *International journal of heat and mass transfer*, 45(7), 1571-1582.