

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**LASER GÜÇ MODÜLASYONUNUN İŞİLİSİL
ETKİLEŞİMLER ÜZERİNE ETKİLERİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Müh. Saime AKDEMİR**

**Anabilim Dalı : ELEKTRONİK VE HABERLEŞME
MÜHENDİSLİĞİ**

Programı : BİYOMEDİKAL MÜHENDİSLİĞİ

HAZİRAN 2008

**LASER GÜÇ MODÜLASYONUNUN İŞİLİSİL
ETKİLEŞİMLER ÜZERİNE ETKİLERİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Müh. Saime AKDEMİR
(504051407)**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 5 Mayıs 2008
Tezin Savunulduğu Tarih : 11 Haziran 2008**

**Tez Danışmanları : Prof.Dr. İnci ÇİLESİZ
Yrd.Doç.Dr. Murat GÜLSOY (B.Ü.)**

**Diğer Jüri Üyeleri Prof.Dr. Sadık KARA (F.Ü.)
Doç.Dr. Mürvet KIRCI
Prof.Dr. Sedef KENT**

HAZİRAN 2008

ÖNSÖZ

Biyomedikal Mühendisliği Programı'na katıldığımdan beri, her konuda üstün bilgi ve birikimiyle her aşamada yardım ve teşviklerini esirgemeyen, tez çalışmam boyunca tavsiyeleriyle yol gösteren danışman hocam, Sayın Prof. Dr. İnci ÇİLESİZ'e (İstanbul Teknik Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Fakültesi), tez çalışmamda her konuda gerekli yardımı ve Boğaziçi Üniversitesi Biyofotonik Laboratuvarı'nın imkanlarını kullanmamı sağlayan eş danışman hocam, Sayın Yrd. Doç. Dr. Murat GÜLSOY'a (Boğaziçi Üniversitesi, Biyomedikal Mühendislik Enstitüsü), özellikle deneyler sırasında karşılaştığım sorunları çözmemde fikirleriyle her zaman yol gösterici ve motive edici olan Sayın Araş. Gör. Özgür TABAKOĞLU'na (Boğaziçi Üniversitesi, Biyofotonik Laboratuvarı), deney yapma sürecimde anlayışlarını ve yardımlarını esirgemeyen Boğaziçi Üniversitesi Biyofotonik Laboratuvarı çalışanlarından Sayın Araş. Gör. Nermin TOPALOĞLU'na ve Sayın Ayşe Sena SARP'a, fikir ve önerileriyle her zaman yanımda olan arkadaşım, Sayın Araş. Gör. Ayşen GÜRKAN ÖZER'e (İstanbul Teknik Üniversitesi, Mühendislik Bilimleri), çalışmalarım sırasında bana destek olan Maltepe Üniversitesi Mühendislik Fakültesi çalışma arkadaşlarım ve hocalarıma, son olarak çalışmaların boyunca yardımlarını ve desteklerini esirgemeyen, bana inanan ve güvenen aileme teşekkürlerimi sunarım.

Mayıs 2008

Saime AKDEMİR

İÇİNDEKİLER

KISALTMALAR	iv
TABLO LİSTESİ	v
ŞEKİL LİSTESİ	vi
SEMBOL LİSTESİ	ix
ÖZET	x
SUMMARY	xi
1. GİRİŞ	1
1.1. Giriş ve Çalışmanın Amacı	1
2. TEORİ	4
2.1. Laserler	4
2.1.1. Laserin Çalışma İlkesi	5
2.2. Laser Işığının Özellikleri	9
2.3. Laserlerin Tıpta Kullanımları	11
2.4. Laser - Doku Etkileşim Mekanizmaları	12
2.4.1. Işılsıl Etkileşimler	19
3. TEKNİK BİLGİ	24
3.1. Isıl Çift (Thermocouple)	24
3.2. Kızılaltı Algılayıcı	27
3.2.1. Kızılaltı Algılayıcı Tipleri	30
3.3. Sığır Jelatini (Bovine Gelatin)	32
4. MALZEMELER VE YÖNTEMLER	34
4.1. Laser Sistemi	34
4.2. Siyah Cisim (Black body) Kalibrasyonu	35
4.3. Fantom Hazırlanması	43
4.4. Sıcaklık Ölçümü Deney Düzeneği	45
5. SONUÇLAR	47
5.1. I. Grup Ölçümler	49
5.2. II. Grup Ölçümler	61
5.3. III. Grup Ölçümler	84
6. TARTIŞMA	108
KAYNAKLAR	110
EKLER	113
ÖZGEÇMİŞ	122

KISALTMALAR

ANSI	: American National Standards Institute
CO₂	: Carbon dioxide
CW	: Continuous Wave
DNA	: DeoxyriboNucleic Acid
DPT	: Devlet Planlama Teşkilatı
Er: YAG	: Erbium – doped: Yttrium Aluminium Garnet
He-Ne	: Helyum - Neon
Ho: YAG	: Holmium – doped: Yttrium Aluminium Garnet
ICG	: Indocyanine Green
INT	: Interval
IR	: Infrared
KTP	: Potassium – Titanyl - Phosphate
Max	: Maximum
Min	: Minimum
Nd:YAG	: Neodymium - doped: Yttrium Aluminium Garnet
NEP	: Noise Equivalent Power
PDT	: Photo Dynamic Therapy
SMA	: SubMiniature version A
Ti: Sapphire	: Titanium: Sapphire
UV	: Ultraviolet

TABLO LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 2.1 Laserlerin sınıflandırılması ve farklı laserlerin dalgaboyları	9
Tablo 2.2 Laserlerin tıpta kullanım alanları	11
Tablo 2.3 Işılsıl etkileşimler tarafından dokuda gözlenen histolojik değişiklikler	23
Tablo 3.1 Isıl çift üretiminde kullanılan bazı malzemelerin Seebeck katsayıları	26
Tablo 3.2 Standart ısı çift gösterimleri ve bileşenleri	26
Tablo 3.3 IR algılayıcılar ve özellikleri	30
Tablo 3.4 Jelatin seçim rehberi.....	33
Tablo 4.1 Isıl çift ölçüm değerleri	41
Tablo 5.1 Modülasyon tiplerine göre 980-nm diyot laser parametreleri	47
Tablo 5.2 İki ayrı ölçüm için her bir güç değerinde farklı modülasyonlarla oluşan sıcaklık artışları (2W, 3W, 4W, 5W, 6W, 7W)	50
Tablo 5.3 İki ayrı ölçüm için her bir güç değerinde farklı modülasyonlarla oluşan sıcaklık artışları (2W, 3W, 4W, 5W, 6W, 7W)	62
Tablo 5.4 Her bir modülasyon tipi ve laser gücü için fantoma aktarılan toplam enerji	72
Tablo 5.5 Mod-1 ve Mod-4'ün oluşturdukları sıcaklık artışları	73
Tablo 5.6 II. Grup ölçümler için Mod-1 ve Mod-4'ün her bir güç değerinde karşılaştırılması	75
Tablo 5.7 Mod-6 ve Mod-2'nin oluşturdukları sıcaklık artışları ve oranları ...	76
Tablo 5.8 Mod-2 ve Mod-3'ün oluşturdukları sıcaklık artışları ve oranları ...	77
Tablo 5.9 Mod-1 ve Mod-5'in oluşturdukları sıcaklık artışları ve oranları	77
Tablo 5.10 Mod-4 ve Mod-5'in oluşturdukları sıcaklık artışları ve oranları	78
Tablo 5.11 Uygulanan laser güçleri ve ölçülen sıcaklık artışlarının oranlanması	79
Tablo 5.12 Farklı güç ve modülasyonlarla aynı enerjiyi fantoma aktaran ölçümlerin sıcaklık artışları cinsinden karşılaştırılması	80
Tablo 5.13 İki ayrı ölçüm için her bir güç değerinde farklı modülasyonlarla oluşan sıcaklık artışları (2W, 3W, 4W, 5W, 6W, 7W)	85
Tablo 5.14 Mod-1 ve Mod-4'ün oluşturdukları sıcaklık artışları	95
Tablo 5.15 II. Grup ölçümler için Mod-1 ve Mod-4'ün her bir güç değerinde karşılaştırılması	96
Tablo 5.16 Mod-6 ve Mod-2'nin oluşturdukları sıcaklık artışları ve oranları ...	97
Tablo 5.17 Mod-2 ve Mod-3'ün oluşturdukları sıcaklık artışları ve oranları ...	98
Tablo 5.18 Mod-1 ve Mod-5'in oluşturdukları sıcaklık artışları ve oranları	99
Tablo 5.19 Mod-4 ve Mod-5'in oluşturdukları sıcaklık artışları ve oranları	99
Tablo 5.20 Uygulanan laser güçleri ve ölçülen sıcaklık artışlarının oranlanması	100
Tablo 5.21 Farklı güç ve modülasyonlarla aynı enerjiyi fantoma aktaran ölçümlerin sıcaklık artışları cinsinden karşılaştırılması	101

ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 2.1 : Elektromanyetik Spektrum	4
Şekil 2.2 : Laser ışıması üretiminde üç önemli bileşen	5
Şekil 2.3 : İki enerji seviyesi arasında elektron geçişi	6
Şekil 2.4 : Uyarılmış yayılma	7
Şekil 2.5 : Enerji seviyeleri arasında elektronların geçişi	7
Şekil 2.6 : Yoğunluk evrimi	8
Şekil 2.7 : Zamansal ve uzaysal uyumluluk	10
Şekil 2.8 : Normal ışıkla laser ışığının karşılaştırılması	10
Şekil 2.9 : Farklı ışıkların maddeyle etkileşimi	13
Şekil 2.10 : Işığın doku içerisinde gösterdiği dört ayrı durum	13
Şekil 2.11 : Temel soğurucuların soğurma katsayısı ve ortalama saçılma	15
Şekil 2.12 : Işığın dokuyla etkileşiminde gözlenen saçılma mekanizmaları....	15
Şekil 2.13 : Farklı laserlerin girginliği	16
Şekil 2.14 : Laser-doku etkileşim mekanizmaları	17
Şekil 2.15 : Foto-dinamik tedavi adımları	18
Şekil 2.16 : Isıl-ışıl etkileşim adımları.....	19
Şekil 2.17 : Dokuda oluşan ısıl etkileşim tipleri	22
Şekil 2.18 : Laser ışıması sonucunda dokuda oluşan bölgeler.....	22
Şekil 3.1 : Seebeck Etkisi	24
Şekil 3.2 : Aynı malzemeden yapılmış iki telin Seebeck gerilimi	25
Şekil 3.3 : K-tipi ısıl çift ve veri alıcısı.....	27
Şekil 3.4 : Kızılaltı Algı Sistemi	28
Şekil 3.5 : OMEGA kızılaltı algılayıcı	30
Şekil 3.6 : OS552-V1-1 IR algılayıcı görüş alanı	31
Şekil 4.1 : Laser Sistemi	34
Şekil 4.2 : 980-nm diyot laser kullanıcı arayüz ekranı	35
Şekil 4.3 : Hazırlanan Al siyah cisim	37
Şekil 4.4 : Isıl çift	37
Şekil 4.5 : Siyah cisim kalibrasyonu deney düzeneği	38
Şekil 4.6 : Isıl çiftin manyetik taban ve veri alıcısı bağlantısı	38
Şekil 4.7 : $\varepsilon = 0.98$ değerinde ısıl çift ve algılayıcı sıcaklık ölçümü.....	39
Şekil 4.8 : IR sensörün 24-52 sn aralığında sıcaklık ölçümü	42
Şekil 4.9 : $\varepsilon = 0.98$ iken 30 dakikalık sıcaklık ölçümü	42
Şekil 4.10 : Laser uygulamasının yapıldığı fantomun hazırlanışı	44
Şekil 4.11 : Deney düzeneği	45
Şekil 4.12 : IR sıcaklık ölçüm deney düzeneği	46
Şekil 5.1 : Laser Modülasyon Tipleri	48
Şekil 5.2 : I. Grup ölçümlerin yapıldığı deney düzeneği	49

Şekil 5.3	: Farklı modülasyonlarda oluşan sıcaklık değişimlerinin zaman ekseninde incelenmesi (2W, 3W, 4W)	53
Şekil 5.4	: Farklı modülasyonlarda oluşan sıcaklık değişimlerinin zaman ekseninde incelenmesi (5W, 6W, 7W)	54
Şekil 5.5	: Farklı güçlerin oluşturduğu sıcaklık değişimlerinin zaman ekseninde incelenmesi (Mod-1, Mod-2, Mod-3)	56
Şekil 5.6	: Farklı güçlerin oluşturduğu sıcaklık değişimlerinin zaman ekseninde incelenmesi (Mod-4, Mod-5, Mod-6)	57
Şekil 5.7	: Farklı laser modları ve güçleri için sıcaklık artışı	58
Şekil 5.8	: Farklı laser modlarında oluşan sıcaklık artışları (2W, 4W, 7W) ...	59
Şekil 5.9	: Farklı laser güçlerinde oluşan sıcaklık artışları (Mod-1, Mod-4, Mod-6)	60
Şekil 5.10	: II. Grup ölçümlerin yapıldığı deney düzeneği	61
Şekil 5.11	: Farklı modülasyonlarda oluşan sıcaklık değişimlerinin zaman ekseninde incelenmesi (2W, 3W, 4W)	65
Şekil 5.12	: Farklı modülasyonlarda oluşan sıcaklık değişimlerinin zaman ekseninde incelenmesi (5W, 6W, 7W)	66
Şekil 5.13	: Farklı güçlerin oluşturduğu sıcaklık değişimlerinin zaman ekseninde incelenmesi (Mod-1, Mod-2, Mod-3)	68
Şekil 5.14	: Farklı laser modları ve güçleri için sıcaklık artışı	69
Şekil 5.15	: Farklı laser modlarında oluşan sıcaklık artışları (3W, 5W, 6W) ...	70
Şekil 5.16	: Farklı laser güçlerinde oluşan sıcaklık artışları (Mod-2, Mod-3, Mod-5)	71
Şekil 5.17	: 4W laser gücünde laser kapalı iken ısıl gevşemelerin gösterimi ...	74
Şekil 5.18	: Fantom yüzeyinde 6W uygulanmasıyla oluşan fiziksel alanların karşılaştırılması (Mod-1, Mod-2, Mod-3)	81
Şekil 5.19	: Fantom yüzeyinde 2W uygulanmasıyla oluşan fiziksel alanların karşılaştırılması.....	82
Şekil 5.20	: 3W, 5W, 7W güç değerlerinin fantom yüzeyinde oluşturdukları fiziksel alanların karşılaştırılması	83
Şekil 5.21	: 3W, 5W ve 7W güç değerlerinin Mod-6 kullanılarak uygulanmasının fantom üzerindeki fiziksel etkisi	84
Şekil 5.22	: Farklı modülasyonlarda oluşan sıcaklık değişimlerinin zaman ekseninde incelenmesi (2W, 3W, 4W)	88
Şekil 5.23	: Farklı modülasyonlarda oluşan sıcaklık değişimlerinin zaman ekseninde incelenmesi (5W, 6W, 7W)	89
Şekil 5.24	: Farklı güçlerin oluşturduğu sıcaklık değişimlerinin zaman ekseninde incelenmesi (Mod-1, Mod-2, Mod-3)	91
Şekil 5.25	: Farklı laser modları ve güçleri için sıcaklık artışı	92
Şekil 5.26	: Farklı laser modlarında oluşan sıcaklık artışları (2W, 4W, 6W) .	93
Şekil 5.27	: Farklı laser güçlerinde oluşan sıcaklık artışları (Mod-1, Mod-2, Mod-3)	94
Şekil 5.28	: 6W laser gücünün Mod-1 kullanılarak fantoma aktarılması	102
Şekil 5.29	: Mod-3'ün 2W, 3W, 4W, 5W, 6W, 7W laser güçlerinde kullanılmasının fantom yüzeyinde etkileri.....	103
Şekil 5.30	: 2W, 4W, 6W güç değerlerinin fantom yüzeyinde oluşturdukları fiziksel alanların karşılaştırılması (Mod-4)	104
Şekil 5.31	: 3W, 5W, 7W laser güçlerinde Mod-2 kullanılması	104
Şekil 5.32	: Fantomdaki siyah boya miktarının sıcaklık artışlarına yansımaları ..	106
Şekil A.1	: Farklı laser modlarında oluşan sıcaklık artışları (3W, 5W, 6W) ..	113

Şekil A.2	: Farklı laser güçlerinde oluşan sıcaklık artışları (Mod-2, Mod-3, Mod-5)	114
Şekil A.3	: Farklı güçlerin oluşturduğu sıcaklık değişimlerinin zaman ekseninde incelenmesi (Mod-4, Mod-5, Mod-6)	115
Şekil A.4	: Farklı laser modlarında oluşan sıcaklık artışları (2W, 4W, 7W)...	116
Şekil A.5	: Farklı laser güçlerinde oluşan sıcaklık artışları (Mod-1, Mod-4, Mod-6)	117
Şekil A.6	: Fantom yüzeyinde 4W uygulanmasıyla oluşan fiziksel alanların karşılaştırılması	118
Şekil A.7	: Farklı güçlerin oluşturduğu sıcaklık değişimlerinin zaman ekseninde incelenmesi (Mod-4, Mod-5, Mod-6)	119
Şekil A.8	: Farklı laser modlarında oluşan sıcaklık artışları (3W, 5W, 7W)...	120
Şekil A.9	: Farklı laser güçlerinde oluşan sıcaklık artışları (Mod-4, Mod-5, Mod-6)	121

SEMBOL LİSTESİ

$A [cm^2]$	: Algılayıcı alanı
A, A^*	: Elektronun başlangıç ve uyarılmış seviyesi
α	: Isıl dağılma
$c [Jkg^{-1}K^{-1}]$	: Özgül ısı
$c [cm/s]$	: Işık hızı
δ	: Girginlik
D^*	: Dedektivite
Δf	: Gürültü band genişliği
ΔT	: Sıcaklık artışı
ΔV	: Isıl çift gerilim değişimi
ε	: Emisivite
E	: Enerji
E_{kin}	: Kinetik enerji
f	: Frekans
φ	: Akı hızı
h	: Planck Katsayısı
k	: Isıl iletkenlik
λ	: Dalgaboyu
L	: Soğurma uzunluğu
μ_a	: Soğurma katsayısı
μ_s	: Saçılma katsayısı
N	: Gürültü gerilimi
P	: Laser gücü
$Q(s)$	: Depolanan ısı
ρ	: Yoğunluk
σ	: Stefan – Boltzmann Katsayısı
S	: Seebeck Katsayısı
S / N	: İşaret / gürültü oranı
t_L	: Laser ışıma süresi
T	: Sıcaklık
W	: Ölçüm alanı büyüklüğü
$W_\lambda(T)$	: İdeal bir siyah cisimden tek dalgaboylu yayılan güç

LASER GÜÇ MODÜLASYONUNUN IŞILISIL ETKİLEŞİMLER ÜZERİNE ETKİLERİ

ÖZET

1960'da Theodore Maiman'ın çalışan ilk laser olan yakut (ruby) laseri üretmesinden beri laserlerin tıptaki kullanım alanları araştırılmaktadır. Farklı laserler göz hastalıklarından kadın hastalıklarına kadar tıpta geniş kullanım alanı bulmaktadır. Laserin doku üzerindeki etkisi hedef dokuyla uygulanan ışığın etkileşim mekanizmalarına bağlıdır. Beş ayrı etkileşim mekanizması vardır: 1) tamamen ısı (optik), örneğin optik tomografi; 2) foto-kimyasal, örneğin, fotodinamik sağaltım; 3) foto-biyo-uyarım, örneğin laserle akupunktur; 4) ışılsıl (photothermal), örneğin dövmelemlerin yok edilmesi; 5) foto-mekanik, örneğin, laserle böbrek taşlarının kırılması. Laser doku etkileşimi özellikle son yıllarda hızla gelişen doku kaynağı araştırmalarında, cerrahi uygulamalarda, tümör tedavisi gibi ışılsıl uygulamalarda kullanılan araştırma alanıdır. Literatürde, laserle gerçekleştirilen ışılsıl tedavilerde, yüzey sıcaklığının ölçümünün ışılsıl haraplamanın ölçeğinin belirlenmesinde önemli bir gösterge olduğu belirtilmektedir. Bu çalışmada 980-nm diyot laser kullanılarak fantom yapılardan kızılaltı (IR) sıcaklık ölçümleri alınmıştır. Deneylerde, sığır jelatini, intralipid ve emilimi sağlayan siyah boya karışımından hazırlanan fantomlar kullanılmıştır. Fantom karışımındaki siyah boya miktarı değiştirilerek etkileşimler üzerindeki etkisi incelenmiştir. Sıcaklık ölçümlerinde kullanılmak üzere IR algılayıcının (detector) varsa hata payını belirlemek ve yüzey emisivitesini ayarlamak için öncelikle Al malzemeden 4cm x 4cm x 4cm boyutunda küp şeklinde bir siyah cisim (blackbody) oluşturulmuş ve algılayıcı kalibrasyonu yapılmıştır. Işılsıl etkileşim derecesini belirlemek için farklı laser güç düzeyleri ve laser uygulama süreleri kullanılmıştır. Bu parametrelere göre fantom yüzeyinde 1 cm çaplı alana laser ışıması yapılarak bu bölgenin sıcaklık değişimi 3 dakika boyunca IR algılayıcı yardımıyla ölçülmüştür. Yapılan ölçümler sonucunda oluşan sıcaklık artışları karşılaştırılmış ve yorumlanmıştır. Ayrıca, laserin optik lif ile fantoma aktarılması sırasında lifdeki kayıp kestirilmiştir. Sonuçta, fantoma toplamda eşit miktarda enerji veren farklı laser güç ve modülasyonları hem sıcaklık artışları hem de etkiledikleri alanlar açısından karşılaştırılarak, daha az ısı haraplama yapan parametreler belirlenmiştir. Literatürde daha önce yapılan uygulamalardan farklı olarak 980-nm diyot laserin farklı güçler ve modülasyonlarla fantoma uygulanmasının etkileri incelenmiştir.

EFFECTS OF LASER POWER MODULATION ON PHOTOTHERMAL INTERACTIONS

SUMMARY

Biomedical uses of lasers have been under investigation ever since Theodore Maiman operated the first Ruby laser in July of 1960. Starting with the ruby laser, most types of laser have found application in medicine, in specializations as diverse as ophthalmology to gynecology. The effect of laser on tissue depends on the interaction mechanism of applied light with the target tissue. There are five interaction mechanisms associated with the use of lasers in biomedicine: 1) purely optical, e.g., optical coherence tomography (OCT) for high-resolution imaging; 2) photo-chemical, e.g., photodynamic therapy (PDT); 3) photo-biostimulative, e.g., laser acupuncture; 4) photothermal, e.g., tattoo removal; 5) photomechanical (photoacoustic), e.g., laser lithotripsy. Recently, laser-tissue interaction has been investigated as an important tool in some areas such as laser-assisted tissue welding, surgery applications and photothermal therapy. According to the data recorded by the early studies, it is mentioned that tissue surface temperature measurement in photothermal treatments is an important indicator to determine thermal damage. In this study, surface temperatures were monitored, during irradiation of tissue phantoms with the 980-nm diode laser. For measurements, phantoms were prepared with a mixture of bovine gelatin, intralipid and black dye. Black dye concentration in the phantom was varied and the photothermal effects were studied. First, to determine the infrared (IR) sensor fault and to adjust the surface emissivity an Al blackbody with the dimension of 4cm x 4cm x 4cm was prepared. To determine the degree of photothermal interaction, different laser power levels and exposure times were used. While a 1 cm diameter of phantom surface was irradiated with the 980-nm diode laser, temperatures were measured with an infrared sensor. Temperature increase of different samples was compared and contrasted. In addition, power loss in the laser fiber was estimated. Finally, laser power levels and modulation types delivering the same total energy to the phantom were compared in terms of temperature increase and extent of interaction. Different from the studies in the literature, the effects of different laser power levels and modulation types on phantoms were investigated.

1. GİRİŞ

1.1. Giriş ve Çalışmanın Amacı

Laserler tıp, endüstri, elektronik cihazlar, ölçümleme teknikleri, askeri amaçlı uygulamalar, jeoloji, astronomi gibi birçok bilimsel alanda kullanılmaktadır [1]. Günümüzde, laserler tıpta göz hastalıklarından (ophthalmology) kadın hastalıklarına (gynecology), genel cerrahiden plastik cerrahiye, sinir cerrahisinden cildiyeeye kadar oldukça yaygın kullanım alanı bulmaktadır.

Laser doku etkileşimi, son yıllarda hızla gelişen doku kaynağı araştırmalarında, cerrahi uygulamalarda, tümör tedavisi gibi ısısıl uygulamalarda doz problemini anlamayı kolaylaştıran önemli bir araştırma alanıdır [1-4]. Doku üzerinde laserin etkisi hedef dokuyla uygulanan ısımanın etkileşim mekanizmalarına bağlıdır. Bu etkileşim, laser gücü, uygulama süresi, modülasyon tipi ve dalgaboyuna bağlı olarak değişmektedir. Doku tarafından laser ışımasının emilimi ışığın dalgaboyuna ve dokunun optik özelliklerine bağlıdır. Isılsıl etkileşimlerde ışık enerjisi ısı enerjisine dönüştürülür. Bu dönüşüm dokunun su, hemoglobin gibi bileşenlerinin uygulanan ışımayı soğurmasıyla oluşmaktadır. Yakın kızılaltı (IR) laser sistemlerinin doku üzerindeki temel etkisi ısıdır [4]. 800 nm'den 1000 nm'ye kadar ısıma yapabilen diyot laserler, Nd:YAG, Er:YAG ve CO₂ laserler bu alanda kullanılmaktadırlar.

Yarı iletken teknolojisiyle üretilmiş, yüksek güçlü, yakın kızılaltıda (800-980-nm) ısıma yapabilen diyot laserler, güvenilir ve uzun ömürlü olmalarının yanı sıra hafif, taşınabilir ve ekonomik olmaları dolayısıyla kullanımda pratiklik sağlamaktadırlar [5].

Literatürde, laserle gerçekleştirilen ısılsıl tedavilerde, yüzey sıcaklığının ölçümünün ısılsıl haraplamanın ölçeğinin belirlenmesinde önemli bir gösterge olduğu belirtilmektedir. Sıcaklık ölçümleri temaslı ya da temassız olmak üzere iki ayrı

prensiple yapılmaktadır. Isıl çift (thermocouple) veya termometrelerin ölçüm yüzeyine temas etmeleri gerekmektedir. Buna karşın, IR algılayıcılar hızlı cevap süresine ve çevre ya da güvenlik engeli olan ortamlarda istenilen doğruluk, çözünürlük ve kararlılıkla sıcaklık ölçümü yapabilme avantajına sahiptirler [5].

Laserin dokuyla ısı etkileşimini araştıran uygulamalarda her bir doku ve organın yapısının farklı olmasından dolayı, jelatin fantomların özelliklerinin genel anlamda biyolojik dokuya benzediği ilk olarak 1987’de gösterilmiştir [6]. En yaygın kullanılan IR laser olan Nd:YAG laserin sürekli dalga modunda jelatinden hazırlanmış fantomla etkileşimi ve IR sıcaklık ölçümü ilk defa 1993’de gözlenmiştir [2].

Literatürde, ısı-ısı etkileşimi incelemek için diyet laserlerin kullanıldığı ve sıcaklık ölçümlerinin alındığı çok sayıda uygulama bulunmaktadır. Bazılarında, 805-nm diyet laser kullanılarak indocyanine-yeşil (ICG) içeren jelatin fantomun sıcaklığı ısı çift yardımıyla ölçülmüştür [1, 3]. Bir çalışmada ise 805-nm diyet laser kullanılarak indocyanine-yeşil içeren jelatin fantom üzerindeki sıcaklık dağılımı IR kamera yardımıyla alınmıştır [3]. Laser ışıması sürekli dalga modunda uygulanabileceği gibi, modüle edilerek de dokuya aktarılabilir. Belirli modülasyonlarla enerjinin dokuya ulaştırılması, laserin kapalı olduğu zaman aralıklarında dokunun sıcaklık açısından gevşemeye girmesine neden olur. Böylelikle atımlı uygulamalarda hedef alanın çevresinde sıcaklık artışı en aza indirgenmiş olur [5].

Bu tez çalışmasında, 980-nm diyet laser ışıması sırasında yüzey sıcaklığının IR ölçümü jelatin fantomlar hazırlanarak yapılmıştır. Laser ışıması sürekli dalga ve atımlı olmak üzere tanımlanan farklı modülasyonlarla gerçekleştirilmiştir. Çalışmada, daha önce yapılan uygulamalardan farklı olarak 980-nm diyet laser farklı güçler ve modülasyonlarla fantoma uygulanmış ve aynı anda IR algılayıcı ile sıcaklık değişimleri kaydedilmiştir. Farklı güç ve modlarla uygulanan laser ışıması sonucunda fantoma daha az ısı haraplama veren parametrelerin belirlenmesi hedeflenmektedir.

2. Bölümde, laserlerin çalışma prensipleri, laserlerin tıpta kullanım alanları, laser-doku etkileşim mekanizmaları ve ısı-ısı etkileşimlerden bahsedilmektedir.

3. Bölümde bu çalışmada kullanılan materyaller ve yöntemler hakkında detaylı bilgi verilmektedir. Sıcaklık ölçümlerinde kullanılan ısı çift ve kızılaltı algılayıcılardan ve sığır jelatininden söz edilmektedir.

4. Bölümde kullanılan laser sistemi, siyah cisim (black body) kalibrasyonu ve deneylerde kullanılan fantomların hazırlanışı hakkında bilgi verilmektedir. Sıcaklık ölçümü deney düzeneği gösterilmektedir.

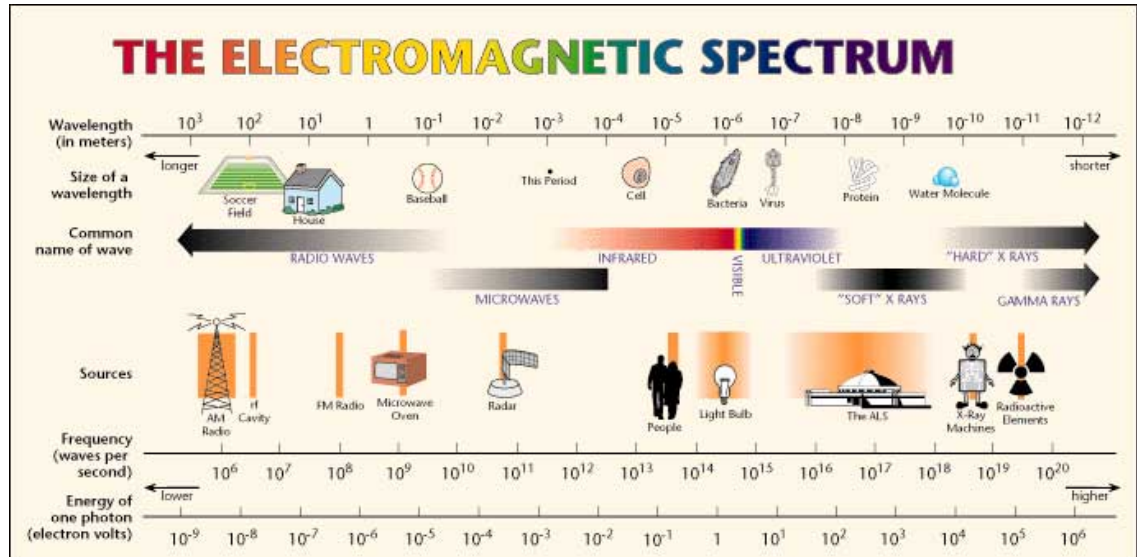
Gerçekleştirilen sıcaklık ölçümleri 5. Bölümde gösterilmektedir. Her bir laser modülasyonun ve gücünün uygulanmasıyla elde edilen sıcaklık değişimlerinin ayrıntılı olarak incelenmesi ve karşılaştırılması çizdirilen grafiklerle bu bölümde yer almaktadır.

Son bölüm olan 6. Bölümde ise sonuçların tartışılması ve ileriki çalışmalar açısından irdelenmesi bulunmaktadır.

2. TEORİ

2.1. Laserler

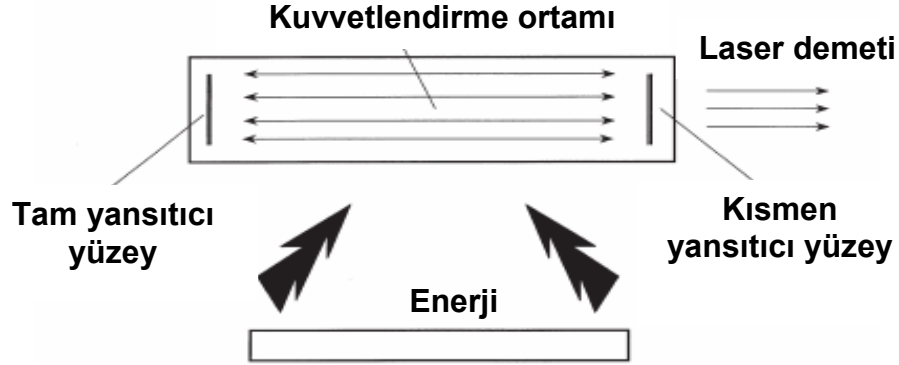
Laser, tek dalga boylu, yoğun ve eş fazlı paralel dalgalar halinde genliği yüksek, güçlü bir “ışık” demeti üreten alettir. Laser İngilizce; “Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation” sözündeki kelimelerin baş harflerinin alınmasından türetilmiş bir kelimedir ve “ışığın uyarılmış yayılımı kuvvetlendirilmesi” anlamını taşımaktadır. Normal “ışık”, dalga boyları farklı, rengarenk, yani farklı faz ve frekansa sahip dalgalardan oluşur. Laser ışığı ise yüksek genlikli, aynı fazda, birbirine paralel, tek renkli, hemen hemen aynı frekanslı dalgalardan oluşmaktadır. Şekil 2.1’de elektromanyetik spektrum gösterilmektedir. Burada, farklı dalga boylarındaki ışınların enerjilerini ve frekanslarını karşılaştırmak mümkündür.



Şekil 2.1: Elektromanyetik Spektrum [7]

Şekil 2.1’de, optik frekans bölgesi yaklaşık olarak Tera Hertz ile üç bin trilyon hertz arasında yer alır. Bu bölge, kızılaltı ışınları, görülebilir ışınları ve elektromanyetik

spektrumun morötesi ışınlarını kapsar. Buna karşılık mikrodalga frekans bölgesi yaklaşık olarak 300 Mega Hertzden 300 Giga Hertze kadar uzanır. Yani, laser çok yüksek frekanslarda çalışır. Şekil 2.2 laser ışığının üretiminde gerekli olan üç önemli bileşeni göstermektedir: kuvvetlendirici ortam, pompalama işlemi ve geribesleme.



Şekil 2.2: Laser ışığı üretiminde üç önemli bileşen [8]

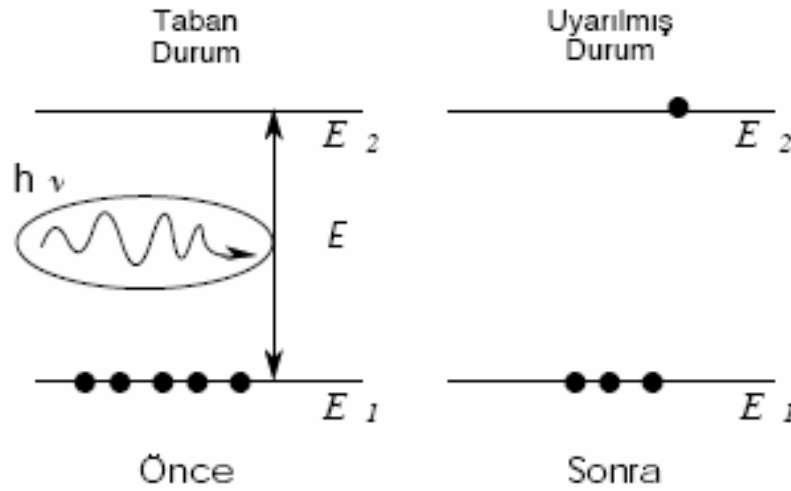
2.1.1. Laserin Çalışma İlkesi

Laser sistemi, Şekil 2.2’de gösterildiği gibi optik bakımdan saydam, bir ucunda tam sırlı ve yansıtıcı, diğer ucunda yarı sırlı kısmen yansıtıcı iki ayna bulunan bir ortamdan oluşmaktadır. Kuvvetlendirme ortamı olarak da adlandırılan bu bölge laserin tipine bağlı olarak katı, sıvı veya gaz molekülleri içermektedir. Bu ortamdan geçen ışın demetinin genliğini artırmak için demete dışarıdan enerji vermek gerekmektedir. Bu nedenle kuvvetlendirme ortamı, dışarıdan ışık verme, elektrik akımı geçirme veya kimyasal bir yolla elde edilen enerjiyi ortamdaki atomlara ulaştırma için pompalama (pumping) olarak adlandırılan bir mekanizmaya ihtiyaç duymaktadır. Böylece, biri tamamen yansıtıcı diğerinin yansıtıcılığı 20 % ile 98 % arasında değişen iki ayna arasında ışın demeti defalarca kuvvetlendirici ortamdan gidip gelmekte ve her seferinde daha da kuvvetlendirilmektedir. Laser ışığının üretimi, uyarılmış yayılma (stimulated emission) ilkesine dayanmaktadır. Bilindiği üzere, atomlar pozitif yüklü çekirdeğe ve onu çevreleyen negatif yüklü elektronlara sahiptirler. Kuantum mekaniksel açıklamalara göre, bu elektronlar yalnızca enerji seviyeleri olarak adlandırılan belirli enerji değerlerinde bulunurlar. Çekirdeği çevreleyen yörüngelerde bulunan bu elektronlardan çekirdeğe en yakın olan elektronun en fazla enerjiye, en dış yörüngedeki elektronun da en düşük enerjiye sahip olduğu bilinmektedir. İşte laser ışığının üretiminde bu son yörünge elektronları

kullanılmaktadır. Bütün bu elektronlar dışarıdan herhangi bir uyarım yapılmazsa kendi konumlarında kararlı halde bulunurlar. Atomdaki bir elektron, iki enerji düzeyi arasında f frekanslı bir foton (ışık paketçisi) salarak veya soğurarak geçiş yapar. Bu olay sadece fotonun enerjisi iki enerji seviyesi arasındaki farka eşit olduğu zaman gerçekleşir. Fotonların emilim, yayılım veya uyarılmış yayılımı ile olan bu seviyeler arası geçişleri için, Denklem 2.1'deki Planck eşitliğinde verilen, enerji seviyeleri arasındaki farkı ifade eden foton enerjisine gerek vardır.

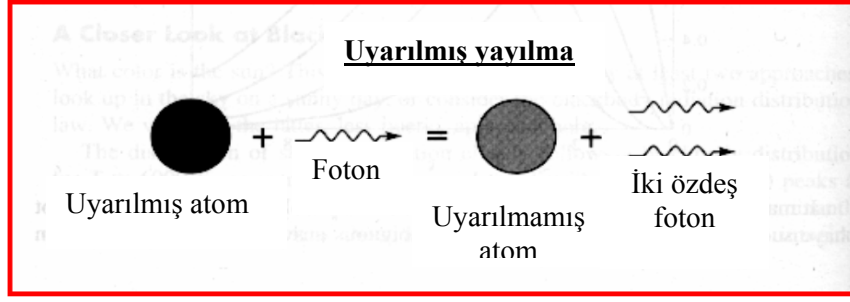
$$E = hf \quad (2.1)$$

Burada, $h[J.s]$ Planck katsayısını göstermektedir. Şekil 2.3'de gösterildiği gibi E_1 alt enerji düzeyinde bulunan bir elektron, E_2 üst enerji düzeyine $E_2 - E_1$ enerjisine sahip fotonu soğurarak çıkar.



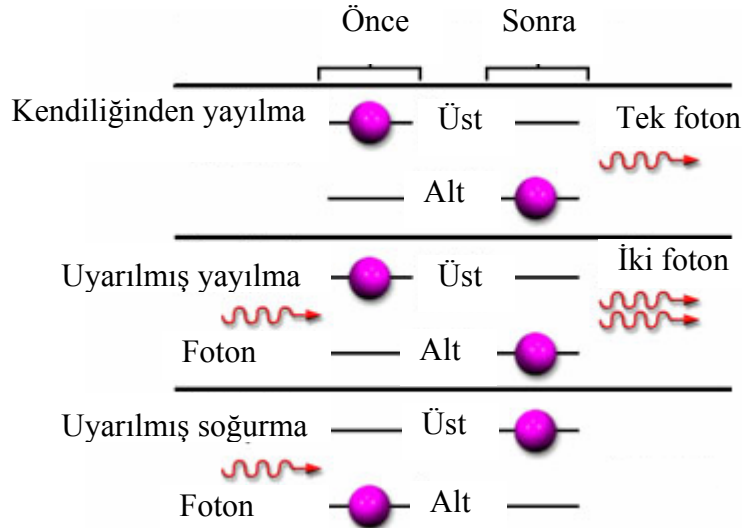
Şekil 2.3: İki enerji seviyesi arasında elektron geçişi [9]

Bu elektron kendi halinde bırakılırsa, uyarılmış bulunduğu E_2 enerjisinden bir foton salarak tekrar E_1 enerji seviyesine döner ve Şekil 2.5'de gösterildiği gibi bu olay kendiliğinden yayılım (spontaneous emission) olarak adlandırılır.



Şekil 2.4: Uyarılmış Yayılma [10]

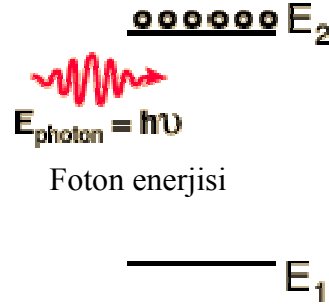
Ancak, iki enerji seviyesi arasındaki farka eşit bir enerjiyle uyarılarak seviyesi E_1 'den E_2 'ye yükseltilen atom, enerjisini geriye foton salarak yaymaya başlarken bu enerji farkında enerjiye sahip bir foton ile uyarılırsa, atomu birbiri ile aynı özellikte iki foton terk eder. Bu olaya da Şekil 2.4'de gösterilen uyarılmış yayılma denilmektedir. Yani, bir elektronun uyarılmış durumda bulunduğu kısa zaman aralığında üzerine belli bir dalgaboyunda foton düşürülürse, bu elektron aynı fazda foton salar. Bu işlem peşpeşe tekrarlanırsa, bileşenleri tamamen aynı fazda bir ışın demeti elde edilir. Bu işlem iki paralel ayna arasında aynı fazda olan fotonların toplanması şeklinde devam eder. Paralel aynalar arasında şiddeti bu şekilde çığ gibi artan ışınlar, ışık frekansına eş bir frekansta, bazen sürekli dalga (cw) bazen atımlı oldukça parlak ışık huzmesi olarak yayılır.



Şekil 2.5: Enerji seviyeleri arasında elektronların geçişi [11]

Şekil 2.4'de gösterildiği gibi uyarılmış yayılımın olması için, uyarılmış seviyelerde düşük seviyelerden daha fazla elektronun bulunması gereklidir. Fakat, normalde

elektronlar düşük enerji seviyelerinde kararlı olarak bulunurlar. İşte bu nedenle, laser ışığının üretimi için düşük enerji seviyelerinde bulunan elektronlardan daha fazla sayıda elektronların uyarılacak enerji seviyelerine yükseltilmesi gerekir. Bu durum ise Şekil 2.6’da gösterildiği gibi normal olarak atomların enerji seviyesi dağılımının tersidir. Bu nedenle laserin çalışması için gerekli durum yoğunluk evrimi (population inversion) olarak adlandırılır. Yoğunluk evrimi için pompalama işlemi kullanılır. Yarı iletken laserlerde pompalama, elektrik akımı yardımı ile gerçekleştirilir ve işlem elektriksel pompalama olarak isimlendirilir. Gaz laserlerde ise pompalama işlemi elektron - atom veya atom - atom çarpıştırılmasıyla ortaya çıkarılır ve çarpışma pompalaması olarak bilinir. Kimyasal pompalama işleminde ise kimyasal reaksiyonlarla atom ve moleküller uyarılır.



Şekil 2.6: Yoğunluk evrimi [12]

Laserin tarihsel gelişimine bakılırsa, 1917’de Albert Einstein uyarılmış yayılmayı açıklamıştır. 1951’de Charles Townes “Microwave amplification by stimulated emission of radiation” sözcüklerinin baş harflerinden oluşan Maser tekniğini geliştirmiştir. Laser olayı ise 1958’de Amerika’da C. Townes ve A. Schawlow, Rusya’da N. Basow tarafından deneysel olarak gerçekleştirilmiş ve bu üçlü 1964 yılında Nobel ödülünü almışlardır. 1960 yılında, ABD’de Theodore H. Maiman ise çalışan ilk laser olan yakut (ruby) laseri üretmiştir. 1961’de sürekli dalga ışımaya yapabilen He-Ne gaz laseri üretilmiştir.

Laserleri, katı hal laserler (Yakut, Nd:YAG, Ti-Sapphire), yarı iletken (diyot) laserler, gaz laserler (CO₂, He-Ne) ve sıvı (dye) laserler olarak dört ana sınıfa ayırmak mümkündür. Tablo 2.1 farklı laserlerin kullanılan kuvvetlendirici ortama göre sınıflandırılmasını ve bu laserlerin ışımaya yaptıkları dalga boylarını göstermektedir.

Tablo 2.1: Laserlerin sınıflandırılması ve farklı laserlerin dalga boyları [13]

Kuvvetlendirici ortam	Laserler	Dalgaboyu
Kati	Nd: YAG	1064 nm
	Ho: YAG	2100 nm
	Er: YAG	2940 nm
	Yakut (Ruby)	694.3 nm
	Alexandrite	720-780 nm
Gaz	CO ₂	10600 nm
	Ar / Kr	457-528 nm
	Uyarılmış ikililer (Excimer)	UV
	He-Ne	632.8 nm
Sıvı	Boya	Görünür bölge
Elektronik	Diyot	IR

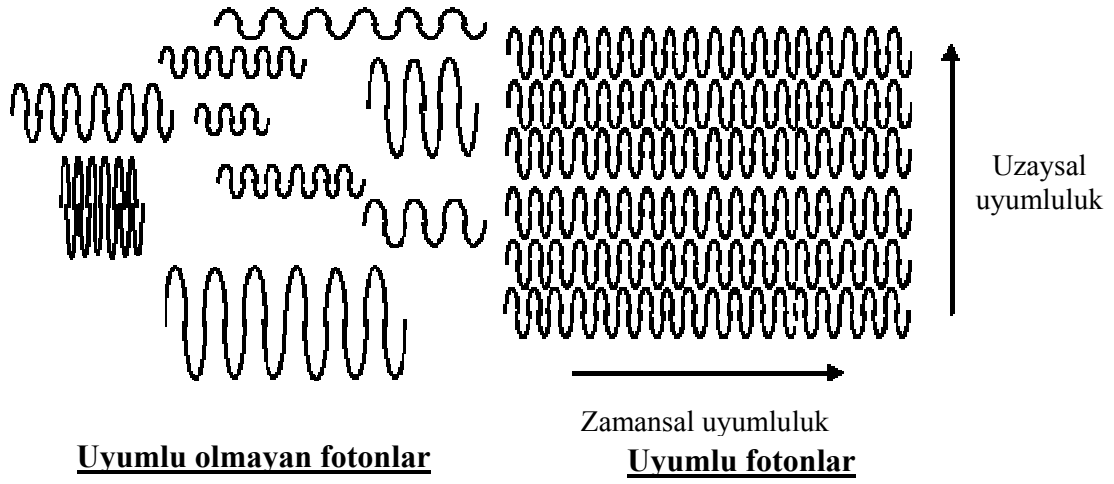
2.2. Laser Işığının Özellikleri

1. Tek dalga boyluluk (Monochromatic)

Laser tarafından salınan ışık hemen hemen tek dalga boylu veya frekanslıdır. Hiçbir ışık tamamen monokromatik olmamasına rağmen, laser ışığı diğer elde edilebilir kaynaklardan daha çok monokromatikliğe yakındır.

2. Eş fazlılık (Coherent)

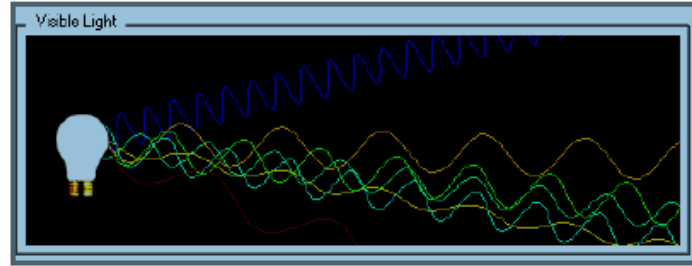
Uyarılmış yayılımın özelliklerinden birisi, uyarılmış dalga'nın uyaran dalgayla aynı fazda olmasıdır; yani iki dalga'nın elektrik alanının uzay ve zamansal değişimi aynıdır. Böylece, laserde elektrik alanının demet kesim yüzeyinin her noktası için özdeş olacak şekilde her noktada zamanla değişme gözlenecek ve demet mükemmel uzaysal uyumluluğa sahip olacaktır. Diğer özellik ise zamansal uyumluluktur. Bu, zamanın fonksiyonu olarak aynı yerdeki elektrik alanın faz bağıntısına karşılık gelir. Eğer faz zamanla sabit bir şekilde değişirse, bu durumda demetin mükemmel zamansal uyumluluğa sahip olduğu söylenir.



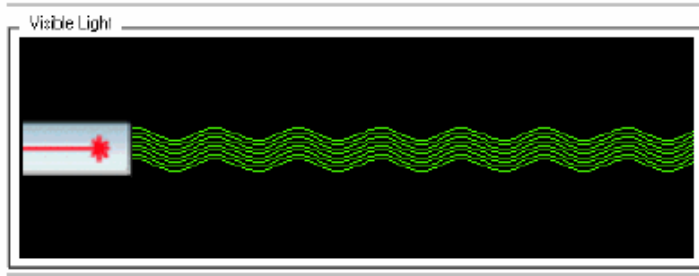
Şekil 2.7: Zamansal ve uzaysal uyumluluk [14]

3. Paralellik (Collimated)

Laserlerin belki de en ilgi çekici özelliği paralelligidir. Yani, aynadan çıkan demet oldukça dardır. Bu, laser demeti tarafından taşınan enerjinin kolaylıkla toplanıp, küçük bir alana odaklanabilmesi anlamına geldiğinden oldukça önemlidir. Geleneksel ışık kaynakları için ışınım 4π katı açıyla yayılır ve ışığın toplanması hemen hemen olanaksızken, laserler için demet dağılma açısı o kadar küçüktür ki laserden çok uzakta bile bu ışığın toplanması mümkündür.



(a)



(b)

Şekil 2.8: Normal ışıkla laser ışığının karşılaştırılması
(a) Ampul, (b) Laser kaynağı [15]

Laser ışığının bu özelliklerinin normal ışıktan farkı Şekil 2.8’de gösterilmektedir. Lambadan çıkan ışık farklı dalgalıboylarında, farklı fazlarda ve farklı yönlerde geniş bir açıyla yayılırken, laser ışığının aynı fazda, aynı doğrultuda ve tek dalgalıboylu olarak dar bir yayılım gösterdiği görülmektedir.

2.3. Laserlerin Tıpta Kullanımları

Laserler tıp, endüstri, elektronik cihazlar, ölçümleme teknikleri, askeri amaçlı uygulamalar, jeoloji, astronomi gibi birçok bilimsel ve teknik alanda kullanılmaktadır [16]. 1960’ların başlarında ilk laserler üretilmeye başlandığından beri, laserlerin tıpta kullanımıyla ilgili çok sayıda araştırma ve geliştirme yapılmıştır. Günümüzde, laserler tıpta göz hastalıklarından kadın hastalıklarına kadar oldukça yaygın kullanım alanı bulmaktadır. Farklı laserlerin tıpta kullanıldığı alanlar Tablo 2.2’de verilmektedir.

Tablo 2.2: Laserlerin Tıpta Kullanım Alanları [17]

Dermatoloji	Boya laser, Ar, CO ₂ , Nd:YAG, Yakut
Sindirim Sistemi	Nd:YAG, Ar
Jinekoloji	CO ₂ , Nd:YAG, Ar
Ağız cerrahisi	CO ₂
Göz hastalıkları (ophthalmology)	Ar, Kr, Nd:YAG (atımlı), excimer, boya
PDT	Boya, Au
Pulmonoloji	Nd:YAG, sapphire
Üroloji	Nd:YAG, sapphire
Laser Anjiyoplasti	Ar, Nd:YAG, excimer, atımlı boya
Laser-destekli Balon Anjiyoplasti	Nd:YAG
Doku Kaynağı Uygulamaları	CO ₂ , Ar, Nd:YAG
Sinir cerrahisi	CO ₂ , Nd:YAG, sapphire
Genel cerrahi	CO ₂ , sapphire
Plastik cerrahi	CO ₂
Taş kırma	Atımlı boya, atımlı Nd: YAG, excimer

Laserlerin bu şekilde kullanılmaları fizik, kimya ve biyoloji alanlarında disiplinlerarası temellere dayanmaktadır. Laserlerin, böyle geniş alanlarda kullanılmaları için dört önemli niceliğin göz önüne alınması gerekmektedir [17];

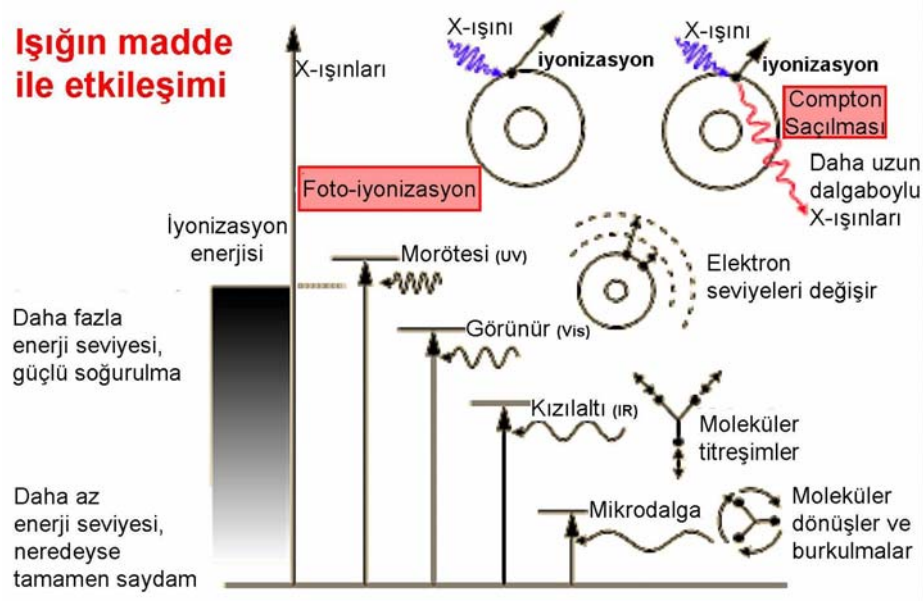
Bunlar, 1) laser-doku etkileşim mekanizmaları, 2) laserin doku içerisinde girginliği (penetration depth), 3) laser ışığının elde edilmesi ve 4) laser ışığını iletecek lifin durumu. Laser-doku etkileşim mekanizmaları dalgaboyu, güç ve atım süresinin bir fonksiyonu olarak değişmektedir. Laser ışığının girginliği ise seçilen dalgaboyunda dokunun optik özelliklerine bağlı olmaktadır. Laser sistemi ve laser ışığını iletecek lif sisteminin gelişmesi ise teknolojiye yapılan yeni ilerlemelerle sağlanmaktadır.

Laserin en yaygın ve başarılı olarak kullanıldığı tıp alanı göz hastalıklarıdır. Genel olarak, laserler Diabetik Retinopati, retina yırtıkları, Glokom tedavileri ve kırılma kusurlarının tedavisinde kullanılmaktadır. Laser, ağız sorunlarının tedavisinde, kanamayı azaltıcı, yara iyileşmesini hızlandırıcı ve ağrıları yok edici etkisiyle diş hekimliği uygulamalarında da geniş bir kullanım alanı bulmuştur. Diş çekiminde, vida ameliyatlarında, dişeti hastalıklarında, ağız ameliyatlarından sonra, diş iltihaplarında, çene eklemi sorunlarında kullanılmaktadır. Dermatolojide laserler, yüz ve bacaklarda damarların genişletilmesinde, deri ve yüz kırışıklarının giderilmesinde, istenmeyen tüylerin giderilmesinde, doğuştan varolan cilt lekelerin giderilmesinde, yara izlerinin giderilmesinde, dövmelemin çıkarılmasında kullanılmaktadır. Laserler, sinir cerrahisinde tümörlerin yok edilmesinde ve ağrıların hafifletilmesinde kullanılmaktadırlar. Ayrıca üroloji ve jinekolojide de yaygın olarak kullanılmaktadırlar. Böbrek taşlarının kırılmasında, böbrek tümörlerinin yok edilmesinde kullanım alanı bulmaktadırlar. Kulak burun boğaz hastalıklarında en sık kullanılan laserler CO₂, KTP, Ho:YAG, Nd:YAG gibi laserlerdir. Görüldüğü gibi farklı alanlarda kullanılan laserlerin her birinin değişik fiziksel özellikleri vardır. Örneğin CO₂ laserler girginliklerinin az olmasından dolayı daha çok bazı ses teli hastalıklarında ve basit horlama cerrahisinde kullanılırken, KTP, Ho:YAG ve Nd:YAG laserler burun tıkanıklığına yol açan konkaların cerrahisinde daha fazla tercih edilmektedir [18].

2.4. Laser-Doku Etkileşim Mekanizmaları

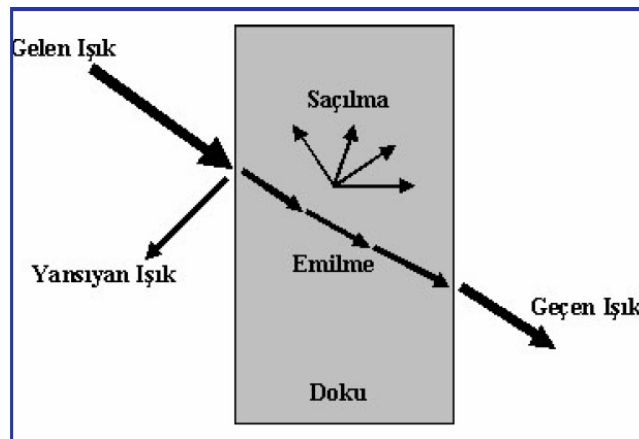
Işık dokudaki etkisi, hedef dokunun optik, kimyasal ve mekanik özelliklerine ve ışık kaynağının dalgaboyu, enerjisi ve uygulama süresi gibi parametrelere bağlıdır.

Farklı dalgaboylarındaki ışınların maddeyle etkileşimleri sonucu görülen durumlar Şekil 2.9’da verilmektedir. Her bir ışık kaynağının enerji seviyesi ve oluşturdukları etki gösterilmektedir.



Şekil 2.9: Farklı ışıkların maddeyle etkileşimi [19]

Laser ışımasının kaynağı, atom veya moleküllerin en dış kabuklarındaki elektronların elektronik ve/veya vibronik enerji değişimleridir. Buna paralel olarak laser-doku etkileşimleri de biyolojik moleküllerin atomlarının en dış kabuklarındaki elektronların laser fotonlarıyla uyarılması ve bunu izleyen gevşeme mekanizmalarının araştırılmasıyla anlaşılabilir [19].



Şekil 2.10: Işığın doku içerisinde gösterdiği dört ayrı durum [18]

Işık özelliklerine bağlı olarak, Şekil 2.10’da gösterildiği gibi dokudan yansiyabilir, geçebilir, doku tarafından emilebilir veya doku içinde saçılabilir. Sadece doku

tarafından emilen ışık dokuda ısı bir etkiye neden olabilir. Doku içerisinde saçılan ışık büyük bir alana yayılacağından emilen ışığa oranla çok daha az bir ısı etki yaratır. Işık eğer dokudan yansır veya geçerse herhangi bir ısı etki yaratmaz.

Işığın dokuyla etkileşim parametreleri, ışınım dalgaboyuna, dokunun fiziksel özelliklerine, ısıma gücü veya enerjisine, ısımanın sürekli dalga veya atımlı yapılmasına, ısıma süresine, atım sıklığına bağlı olarak değişmektedir [19]. Dokunun, optik (soğurma ve saçılma katsayıları, saçılmanın ortalama açısı), ısı (ısı iletkenlik, ısı sığa) ve mekanik (basınca ve çekmeye dayanıklılık) olmak üzere üç ayrı fiziksel özelliği bulunmaktadır ve tüm bu parametreler birbirlerine bağlı olarak ve laser ısıma parametrelerine bağlı olarak değişim göstermektedir. Bu etkileşimler dokunun optik özelliklerine bağlı olduğundan soğurulma ve saçılma olayları önem kazanmaktadır. Laser ışığının uygulanan dokuyu etkilemesi için ya ısıya dönüştürülerek ya da ısı üretmeksizin foto-kimyasal olaylarca soğurulması gerekmektedir. Tıbbi uygulamalarda, yalnızca bu soğurulan ışık kullanılmaktadır [20]. Soğurulma, atom veya moleküllerin bileşenlerine, ısıma dalgaboyuna, dokunun kalınlığına ve sıcaklık, yoğunluk gibi bazı iç parametrelere bağlıdır. Gönderilen ışınım ya dokudaki su tarafından ya da “chromophore” olarak adlandırılan bazı soğurucular tarafından soğurulmaktadır. Bu soğurucular hemoglobin ya da melanin olabilmektedir. Işının soğurulması Beer-Lambert yasasıyla ifade edilmektedir:

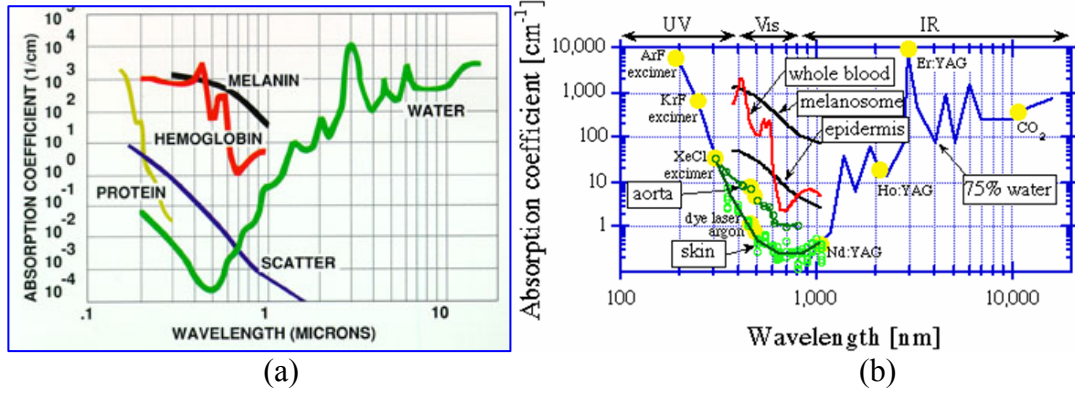
$$z = \frac{1}{\mu_a} \ln \frac{I_0}{I(z)} \quad (2.2)$$

Burada, z ışığın yayılma yönünü, $I(z)$ z mesafesindeki şiddetini, I_0 ilk şiddetini ve μ_a (1/m) soğurma katsayısını göstermektedir. Farklı laserlerin karşılaştırılmasında kullanılan soğurma uzunluğu ise

$$L = \frac{1}{\mu_a} \quad (2.3)$$

olarak ifade edilmektedir.

Şekil 2.11 (a)’da laser-doku etkileşiminde etkili olan temel soğurucuların duyarlı oldukları dalgaboylarındaki soğurma ve ortalama saçılma katsayıları ve (b)’de bu dalgaboylarında kullanılacak laserler gösterilmektedir.



Şekil 2.11: Temel soğurucuların soğurma katsayısı ve ortalama saçılma [16]

Kızılaltı (IR) bölgede, özellikle su soğurmayı sağlamaktadır ve burada Er: YAG laserler kullanılmaktadır. Ayrıca, burada dokunun su içeriğine bağlı olarak dalgaboyu arttıkça soğurulma artmaktadır. Yakın kızılaltıda soğurulma en azdır. Dolayısıyla burası uygulamalarda tanı ve tedavi penceresi olarak kullanılmaktadır. Bu alanda, ışınım en az kayıpla dokuya nüfus etmektedir. Morötesi (UV) bölgede ise, protein, DNA ve diğer moleküller nedeniyle soğurma dalgaboyu azaldıkça artmaktadır.



Şekil 2.12: Işığın dokuyla etkileşiminde gözlenen saçılma mekanizmaları [21]

Biyolojik dokular oldukça heterojen olduklarından dokuya uygulanan laser ışığı, aynı zamanda birtakım saçıcı parçacıklardan dolayı doku içerisinde saçılmaya uğrayacaktır. Bu saçılma etkisi, doku içerisindeki saçıcı yapıların şekil ve büyüklüklerine bağlıdır. Parçacığın büyüklüğü gelen ışığın dalgaboyundan küçükse, saçılma Rayleigh saçılması olarak adlandırılmakta ve hem ileri yöne hem de ışımanın yapıldığı geriye doğru eşit saçılmalar oluşmaktadır. Diğer taraftan, eğer parçacıklar

ışık dalgaboyundan büyükse saçılma Mie saçılması olarak adlandırılacak ve sadece ileri yönlü saçılmalar oluşacaktır. Dokular yapılarına bağlı olarak hayli saçıcı oldukları için gözlenen saçılmalar da farklılık göstermektedir.

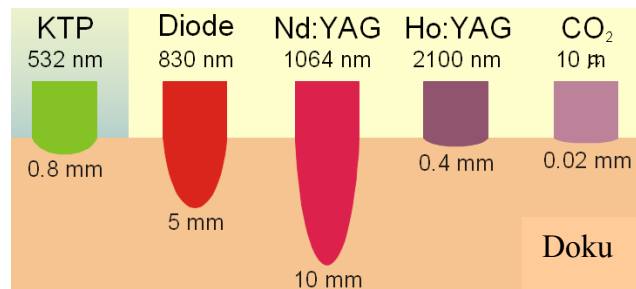
Dokuyla etkileşen fotonların ve etkileşim sonucunda saçılan fotonların aralarındaki frekans uyumuna bakılarak saçılmalar genel olarak Şekil 2.12’de gösterildiği gibi elastik ve elastik olmayan saçılmalar olarak ikiye ayrılmaktadır. Uyumlu (coherent) olarak da adlandırılan elastik saçılmalar düşük enerjili fotonların kullanılması durumunda gözlenmektedir ve gelen ve saçılan fotonlar aynı frekanstadır. Yani herhangi bir enerji değişimi olmamaktadır. Elastik olmayan saçılmalar ise yüksek enerjili yani kısa dalgaboylu fotonların dokuyla etkileşimi sonucunda ortaya çıkmaktadır ve gelen ve saçılan fotonlar arasında frekans farklılığı oluşmaktadır. Soğurulma gibi, saçılma da doku içerisinde ilerleyen ışığın genliğinde azalma oluşturmaktadır. Bu nedenle, dokudaki toplam zayıflama:

$$I(z) = I_0 e^{-(\mu_a + \mu_s)} \quad (2.4)$$

olarak ifade edilmektedir. Burada, Denklem (2.2)’den farklı olarak μ_s saçılma katsayısı kullanılmaktadır. Dolayısıyla da, $\mu_a + \mu_s$ toplam optik kaybı belirtmektedir. Ayrıca, doku içerisinde I_0 giriş ışık şiddetinin $1/e (= 0.37)$ ’sine düştüğü mesafeyi tanımlayan δ optik girginlik laserleri karşılaştırmada önemlidir. Girginlik:

$$\delta = 1 / (\mu_a + \mu_s) \quad (2.5)$$

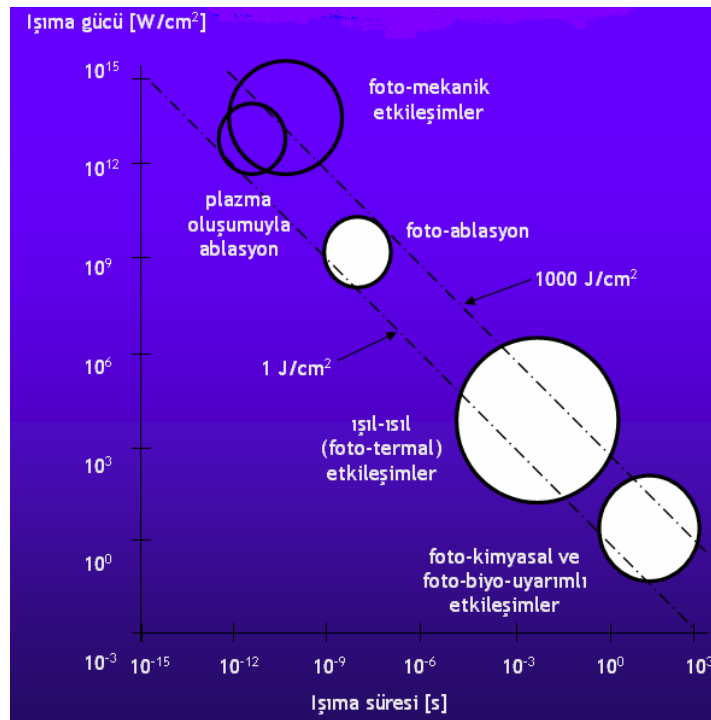
olarak tanımlanmaktadır. Şekil 2.13 farklı laserlerin doku içerisindeki girginliğini göstermektedir.



Şekil 2.13: Farklı laserlerin girginliği [22]

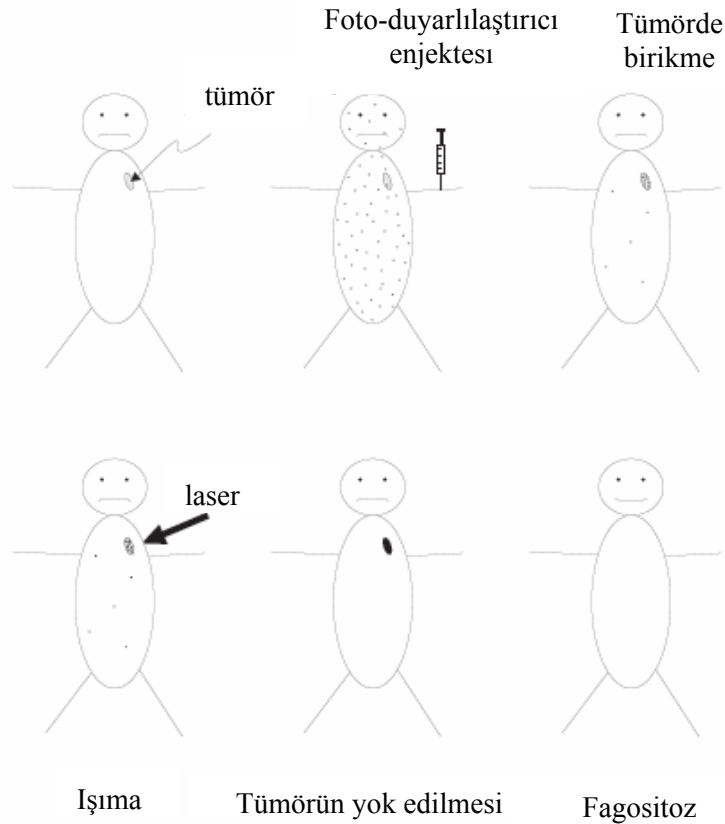
Laser ışımasının doku içerisinde girginliği ışığın dalgaboyuna bağlıdır. Orta kızılaltı bölgede ışıma yapan laserlerin girginliği $2\text{ }\mu\text{m}$ 'dır ve enerjinin çoğu doku yüzeyine çok yakın mesafede soğurulmaktadır. Dolayısıyla da saçılma ihmal edilebilmektedir. $10,6\text{ }\mu\text{m}$ 'de ışıma yapan CO_2 laser kullanıldığında, enerji tamamen soğurulup ısıya dönüştürülmeden önce girginlik en fazla $0,1\text{ mm}$ olmaktadır. Buna karşılık, yakın kızılaltı ve görünür bölgede yapılan laser ışıması orta kızılaltı bölgedekilere göre doku içerisinde daha fazla ilerlemektedir. Örneğin, Argon (Ar) laser kullanılarak yapılan ışıma özellikle kandaki hemoglobin tarafından soğurulmakta ve yüzeyden yaklaşık $0,5\text{ mm}$ 'lik mesafeye ulaşmaktadır. Nd:YAG laser kullanıldığında ise bu mesafe ortalama $2\text{ ile }5\text{ mm}$ arasında değişmektedir.

Laser-doku etkileşimleri 1960'da laserlerin keşfinden beri araştırılmaya devam etmektedir. Işımanın gücü ve süresi değiştirilerek farklı etkileşimler ortaya çıkmaktadır. Düşük ışıma güçleri veya enerjilerinde ısı (optic), foto-kimyasal ve foto-biyo-uyarımli ışımlar gözlenmektedir. Işıma gücü veya enerjisi arttırıldığında ısı-ısı (photothermal) etkileşimler ağırlık kazanmaktadır. Çok kısa atımlı ışımalarda ise foto-mekanik ya da foto-akustik etkileşimler ortaya çıkmaktadır. Şekil 2.14'de tüm bu etkileşim mekanizmalarının 1 J/cm^2 ile 1000 J/cm^2 enerji alanları arasında bulunduğu ve sınıflandırıldığı gözlenmektedir.



Şekil 2.14: Laser-doku etkileşim mekanizmaları [19]

Şekil 2.14’de y-ekseni W / cm^2 biriminde ışıma gücünü, x-ekseni ise saniye (sn) cinsinden ışıma süresini göstermektedir. Bu grafiğe göre ışıma sürelerine bakılarak grafik beş ayrı kısımda incelenebilir: ışıma süresi 1 sn’den büyükse foto-kimyasal ve foto-biyo-uyarımlı etkileşimlerin, 1 sn ile 1 μsn aralığında ise ısılsıl etkileşimlerin, 1 μsn ile 1 nsn aralığında ise foto-ablasyonun ve 1 nsn’den düşük ise plazma oluşumuyla ablasyon veya foto-mekanik etkileşimlerin ortaya çıktığı gözlenmektedir. Güç ve ışıma süresi arasındaki karşılıklı ilişki herhangi bir etkileşim tipi için kabaca aynı enerji yoğunluğunun gerekli olduğunu göstermektedir. Bu nedenle, ışıma süresi etkileşim mekanizmalarının çeşitliliğinden sorumlu olan temel parametre olarak görülmektedir. Tamamen ısı etkileşimlere ısıldama, izge ölçümü ve optik tomografi örnek verilebilir. Foto-kimyasal etkileşimler görünür, morötesi ve kızılaltı ışımının soğurulmasıyla yürütülen işlemlerdir. Bu mekanizmalarda ışık enerjisi kimyasal enerjiye dönüştürülmektedir. En bilinen örneği fotosentezdir. Çok düşük ışıma güçlerinde ve uzun ışıma süreleriyle yapılan foto-kimyasal etkileşime foto-dinamik tedavi (photodynamic therapy, PDT) örnek verilebilir.

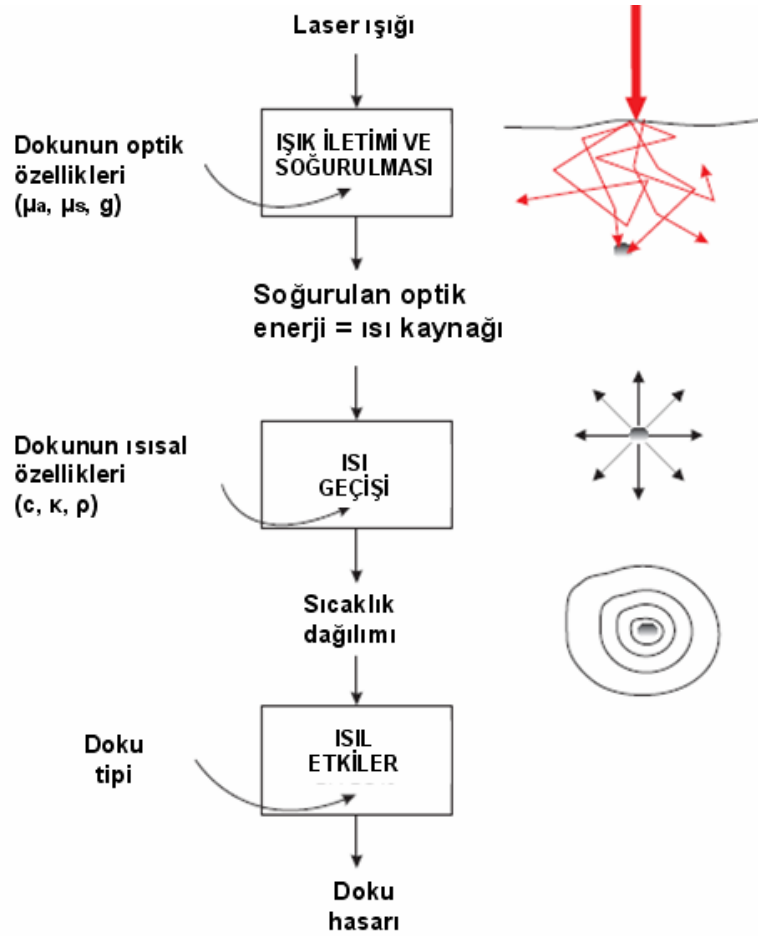


Şekil 2.15: Foto-dinamik tedavi adımları [23]

Şekil 2.15’de özellikle kanser tedavisinde kullanılmakta olan foto-dinamik tedavinin ayrıntılı olarak süreci gösterilmektedir. Öncelikle, laser ışması yapılacak dalgaboyuna duyarlı foto-duyarlılaştırıcı (photosensitizer) olarak adlandırılan kromoforlar vücuda enjekte edilmektedir. Bu yapıların kanserli hücrelerde birikmesi beklendikten sonra duyarlı oldukları dalgaboyunda laser ışması yapılmaktadır. Böylece, laser ışmasının tetiklediği birtakım kimyasal dönüşüm reaksiyonlarıyla tümörlü hücre yapısının ortadan kaldırılması sağlanmaktadır.

Laserle akupunktur ise foto-biyo-uyarımlı etkileşimlere örnek verilebilir. Dövmelerin veya cilt lekelerinin yok edilmesi ışılsıl etkileşimlerin kullanılmasıyla yapılmaktadır. Foto-mekanik veya foto-akustik etkileşimlere ise laserle böbrek veya safra kesesi taşının kırılması örnek gösterilebilir [19]. Foto-mekanik etkileşimler çok yüksek enerjili ve kısa süreli laser uygulamalarıyla gerçekleşmektedir.

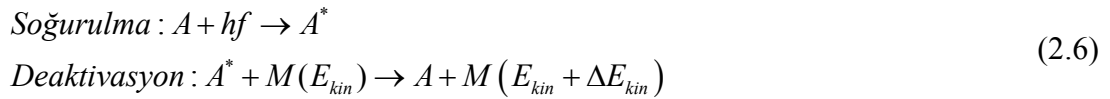
2.4.1. Işılsıl Etkileşimler



Şekil 2.16: Işılsıl etkileşim adımları [23]

Tıbbi uygulamalarda, laser-doku etkileşiminin en yaygın kullanımını ısı etkileşimleri oluşturmaktadır. Laser ışınının dokuda yarattığı ısı mekanizmada, fotonlar doku tarafından soğurulur ve açığa çıkan ısı enerjisi miktarına göre dokuda farklılıklar gözlenir. Dokuda oluşan ısı miktarına ve süresine göre dokuda koagülasyon, buharlaşma, karbonizasyon ve bozulma oluşabilir.

Dokularda foton enerjisinin ısıya dönüştürülmesi için soğurulma ve titreşimsel gevşeme olarak adlandırılan iki işlem gereklidir. Bir molekül tarafından soğurulan hf enerjili foton, o molekülü Denklem 2.6'da gösterilen A^* uyarılmış seviyesine çıkarır. Çevrede bulunan M ile gösterilen başka bir molekülle çarpışma, molekülün uyarılmış seviyede bulunan elektronunun başlangıçtaki A seviyesine inmesine ve onunla çarpışan bu molekülün kinetik enerjisinin artmasına neden olur. Moleküllerin kinetik enerjilerindeki artış dokunun sıcaklığındaki artış olarak gözlenir. Daha sonra, ısı çevre dokularda da ısı artışına neden olacak biçimde yayılır.



Bu iki adımın sırayla oluşması gerekmektedir. Soğurulma tamamlandıktan sonra bir molekülün oda sıcaklığındaki enerji değeri $0.025eV$ 'dan oldukça fazla olan farklı enerjili laser fotonlarının (Er:YAG laser: $0.35eV$, Nd:YAG laser: $1.2eV$, ArF laser: $6.4eV$) kullanılmasından dolayı çok çeşitli ısı gevşeme gözlenmektedir. Şekil 2.16'da ısı-ısı etkileşiminin bu adımları gösterilmektedir. Isı enerjisinin uygulanan laser ışığının soğurulmasıyla depolanması, titreşimsel gevşemelerce ısıya dönüştürülmesi ve dokunun sıcaklığının artması, sonra bu ısı dokunun ısı özelliklerinden dolayı çevre dokulara yayılması adım adım belirtilmiştir. Daha sonra dokunun ulaştığı sıcaklığa ve o sıcaklıkta kalma süresine bağlı olarak dokuda ısı bir haraplama oluşacağı gösterilmiştir. Dokuda oluşan ısı haraplamasının uzaysal büyüklüğü ve derecesi doku içerisinde depo edilen ısı miktarına, laser ışımalarının süresine bağlı olarak değişmektedir. Böyle olmakla birlikte, laser enerjisinin birikimi yalnızca dalga boyu, güç yoğunluğu, ışımama süresi ve tekrarlama hızı gibi laser parametrelerinin bir fonksiyonu değildir. Ayrıca, dokunun soğurma ve saçılma katsayıları gibi birtakım optik özelliklerine de bağlıdır.

Bilindiği üzere, Biyo-ısı denklemi laser ışıması süresince dokunun sıcaklığını modellemek üzere kullanılır [24].

$$k\nabla^2 T(t) + Q(s) = \rho c \frac{\partial T(t)}{\partial t} \quad (2.7)$$

Burada,

$k[Wm^{-1}K^{-1}]$: ısı iletkenlik,

$\rho[kgm^{-3}]$: yoğunluk,

$c[Jkg^{-1}K^{-1}]$: ısı kapasite, özgül ısı, ve $Q(s)$: depolanan ısı'dır.

Silindirik geometride Biyo-ısı denkleminin çözümünden Orr ve Eberhart (1995) r (m) radyal koordinat ve z (m) doku derinliğinde laser ışımasının başlamasından t zaman sonra $\Delta T(t, z, r)(^{\circ}C)$ sıcaklık artışı

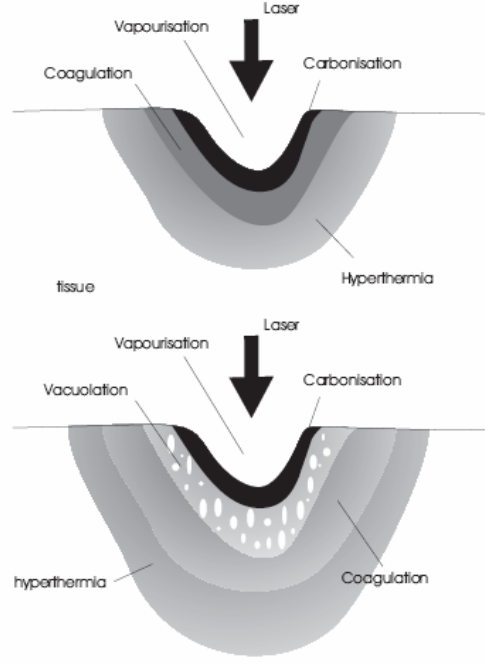
$$\frac{\partial \Delta T(t, z, r)}{\partial t} = \frac{\mu_a \phi(z, r)}{\rho c} + \alpha \left(\frac{\partial^2 \Delta T(t, z, r)}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 \Delta T(t, z, r)}{\partial r^2} + \frac{\partial \Delta T(t, z, r)}{r \partial r} \right) \quad (2.8)$$

olarak elde edilmiştir. Burada, $\mu_a(m^{-1})$ doku soğurma katsayısı, $\phi(z, r)(Wm^{-2})$ laser ışınının akı hızı, $\alpha = k/(\rho c)[m^{-2}s^{-1}]$ ısı dağılıma, $k(Wm^{-1}K^{-1})$ ısı iletkenlik, $\rho(kgm^{-3})$ doku yoğunluğu ve $c(Jkg^{-1}K^{-1})$ ısı kapasitesidir. Ölçüm alanının büyüklüğü (W) küçük, veya doku içerisine girinlik derin olduğu zaman Biyo-ısı denklemi yalnızca radyal ısı iletimini içerir [24] ve denklem

$$\Delta T(t - t_L, r = 0) = E \frac{\mu_a}{\rho c} \left(\frac{W^2}{8\alpha} \right) \ln \left(1 + \frac{\alpha t_L}{W^2/8 + \alpha(t - t_L)} \right) \quad (2.9)$$

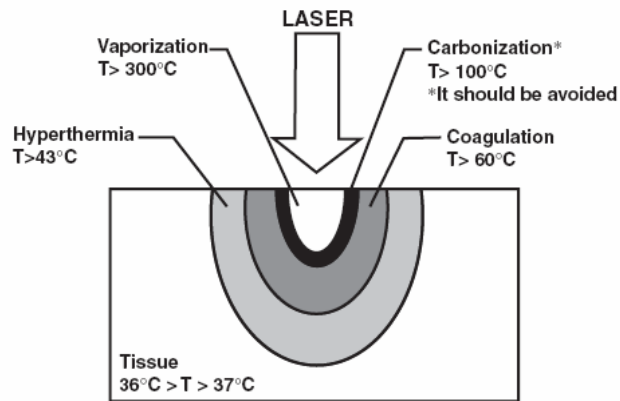
şeklinde elde edilir. Burada $t_L(sn)$ laser atımının ışıma süresi ve $E = 2P/(\pi W^2)[W/m^2]$ (P :laser gücü) laser ışımasıdır.

Homojen olduğu kabul edilen doku üzerine uygulanan laser atımıyla depo edilen ısı miktarı, dokunun yüzeyinden uzaklaştıkça azalmaktadır. Doku sıcaklığı $100^{\circ}C$ 'ye çıkarıldığında içerisindeki su buharlaşacaktır. Daha sonra, kalan organik kısım karbonize olacaktır. Alt kısımda yer alan dokuya verilecek haraplama, atım süresine ve ısı iletkenliğe göre etkilenen dokunun ulaştığı sıcaklığa bağlıdır.



Şekil 2.17: Dokuda oluşan ısıl etkileşim tipleri [23]

Laser ışıması sonucunda, Şekil 2.17’de iki ayrı biçimde gösterildiği gibi genellikle birbirinden net olarak ayırt edilebilen bölgeler gözlenmektedir. Bu şekillerden ikincisinde, doku içerisindeki suyun buharlaştığı ancak dokudan ayrılmayıp boşluklar oluşturduğu gözlenmektedir. Isıl etkileşimler, laser ışıması doku içerisinde kan, pigment, kolesterol gibi kromoforlar tarafından soğurulduğunda oluşan ısı üretimine bağlıdır. Bu ısı üretimi özellikle kanserli dokuları yok etmede kullanılmaktadır. Sıcaklık artışına bağlı olarak dokudaki yapısal ve kimyasal değişiklikler laser-doku etkileşim parametrelerine bağlı olarak Şekil 2.18’de gösterildiği gibi pıhtılaşma (coagulation), buharlaşma, karbonizasyon ve hipertermi olarak sınıflandırılabilir [4].



Şekil 2.18: Laser ışıması sonucunda dokuda oluşan bölgeler [4]

36 - 37 °C arasında bulunan doku, laser ışıması sonucunda 43 - 45 °C'ye ulaştığında tersinir hipertermi olarak adlandırılan yüksek ısınma başlamaktadır. Doku sıcaklığı 60 – 65 °C'ye ulaştığında ise proteinlerin bozulması ve kan damarlarının pıhtılaşması etkili olmaktadır. 100 °C civarındaki sıcaklıklarda hücre içerisindeki su buharlaşmaya başlamaktadır. Doku sıcaklığı 100 °C'yi geçtiğinde ise proteinler hidrojen, oksijen ve nitrojen salarak parçalanmakta ve geride kalan karbon içeriğinden dolayı karbonize doku oluşmaktadır. Tüm bu ısılsıl etkileşimler sonucunda dokuda gözlenen histolojik değişikliklerin olduğu sıcaklıklar Tablo 2.3'de özetlenmiştir.

Tablo 2.3: ısılsıl etkileşimler tarafından dokuda gözlenen histolojik değişiklikler [13]

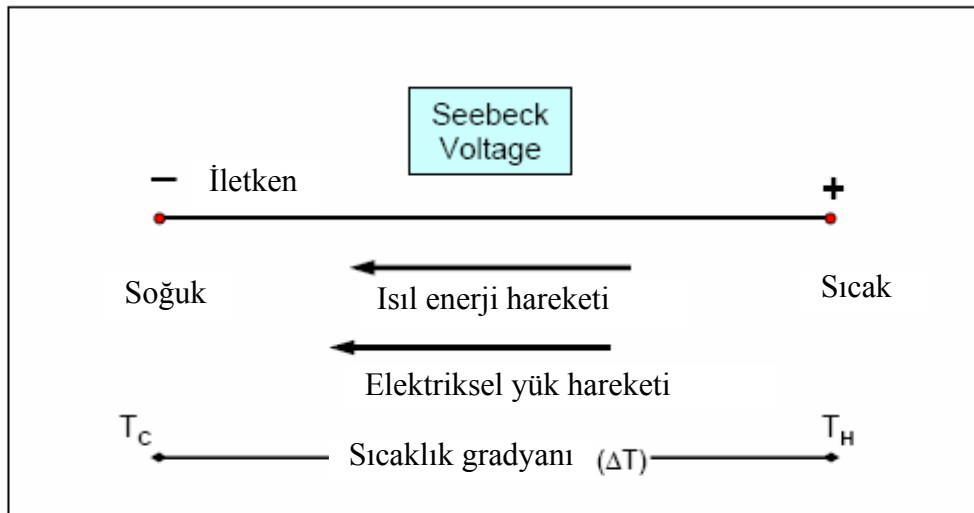
Sıcaklık Değeri	Histolojik Etki
37 °C	Normal
45 °C	Hipertermi
50 °C	Enzimlerin aktivasyonunda azalma, hücre hareketsizliği
60 °C	Proteinlerin ve kolajenlerin bozulması ve pıhtılaşma
80 °C	Hücre zarının seçiciliğini yitirmesi
100 °C	Buharlaşma, ablasyon
> 150 °C	Karbonizasyon
> 300 °C	Erime

3. TEKNİK BİLGİ

Bu bölümde tez çalışmasında kullanılmış olan ısı çifti (thermocouple) ve IR algılayıcı (detector) sıcaklık ölçüm mekanizmaları hakkında bilgi verilecektir. Ayrıca, biyolojik doku benzetimi olarak kullanılmış olan sıgır jelatininin özellikleri anlatılacaktır.

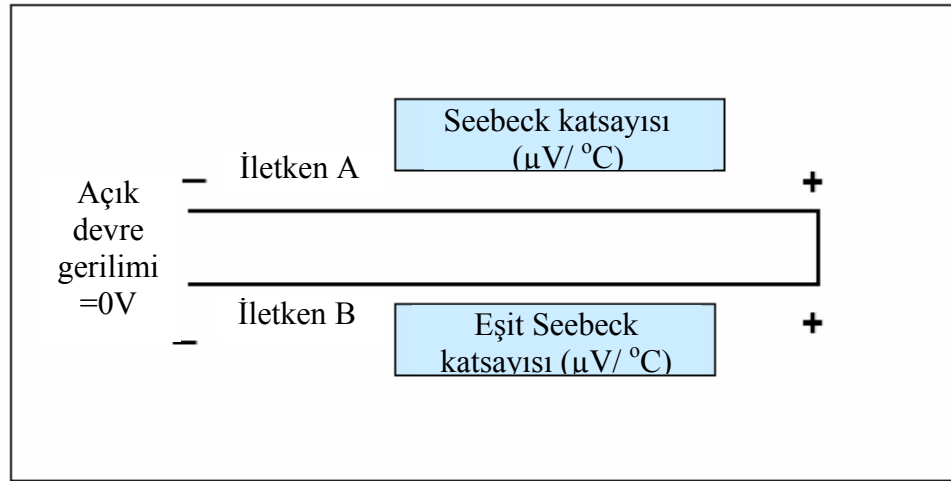
3.1. Isıl Çift (Thermocouple)

Sıcaklık ölçümlerinde en yaygın kullanılan dönüştürücülerden biri şüphesiz ısı çiftleridir [25]. Geniş bir sıcaklık aralığında çalışabilmelerinden ve pahalı olmamalarından dolayı tercih edilmektedirler. Isıl çift, birbirine değen iki farklı metalden yapılmaktadır. İki farklı metal birbirine değdiğinde, bu değme noktası sıcaklığın bir fonksiyonu olarak bir açık devre gerilimi üretir ve bu termoelektrik gerilim 1821’de Thomas Seebeck tarafından Seebeck Gerilimi olarak adlandırılmıştır [25].



Şekil 3.1: Seebeck Etkisi [25]

İletken malzemenin bir ucu diğer ucuna göre daha fazla ısıtılırsa, ısınan bu uçtaki elektronlar diğer uçtaki elektronlara göre ısı olarak daha fazla enerjilenirler ve diğer uca doğru hareketlenmeye başlarlar. Yük dağılımını eşitlemek için elektronların yeniden dağılımı, soğuk uça negatif yük, sıcak uça da buna eşit pozitif yük oluşturur. Sonuçta, iletkenin ısınan ucu ısı olarak enerjilenmiş elektronların bütün malzeme boyunca yeniden dağılımı sayesinde bir elektrostatik gerilim oluşturur. Bu durum Şekil 3.1’de gösterilen “Seebeck Etkisi” olarak bilinir. Tek bir tel kullanarak Seebeck geriliminin ölçülmesi mümkün değildir. Ancak, aynı malzemedan yapılmış başka bir telin kullanılması da yeterli değildir. Bu teller eşit Seebeck gerilimi oluşturur ve Şekil 3.2’de gösterildiği gibi ölçüm noktasında net $0V$ ’luk bir gerilim oluştururlar.



Şekil 3.2: Aynı malzemedan yapılmış iki telin Seebeck gerilimi [25]

Dolayısıyla, sıcaklık ölçümlerinin yapıldığı ısı çiftler farklı malzemedan yapılmış tellerin bir araya gelmesiyle oluşturulmaktadır. Her malzemenin termoelektrik duyarlılık olarak da adlandırılan bir Seebeck katsayısı tanımlanmıştır. Bu katsayının büyüklüğü malzemedan malzemeye değişim göstermekte ve pozitif veya negatif olabilmektedir. Tablo 3.1’de ısı çift üretiminde kullanılan farklı malzemeler ve bu malzemelerin Seebeck katsayıları verilmektedir. Oluşturulan Seebeck gerilimi sıcaklıkla doğrusal olmayan bir değişim göstermektedir. Sıcaklıklardaki çok küçük değişikliklerde gerilim yaklaşık olarak lineerdir ve Denklem (3.1)’deki gibi ifade edilmektedir.

$$\Delta V \approx S \Delta T \quad (3.1)$$

Burada ΔV gerilimdeki değişimi, S Seebeck katsayısını ve ΔT sıcaklık değişimini göstermektedir. S normalde sıcaklık değiştikçe değişmekte ve dolayısıyla ısı çiftlerinin çıkış gerilimleri çalışma aralığı boyunca non-lineer olmaktadır.

Tablo 3.1: Isıl çift üretiminde kullanılan bazı malzemelerin Seebeck katsayıları [25]

Malzeme	Seebeck Katsayısı	Malzeme	Seebeck Katsayısı	Malzeme	Seebeck Katsayısı
Alüminyum	3,5	Altın	6,5	Rodyum	6,0
Antimon	47	Demir	19	Selenyum	900
Bizmut	-72	Kurşun	4,0	Silikon	440
Kadmiyum	7,5	Civa	0,60	Gümüş	6,5
Karbon	3,0	Nikrom	25	Sodyum	-2,0
Konstantan	-35	Nikel	-15	Tantal	4,5
Bakır	6,5	Platin	0	Tellür	500
Germanyum	300	Potasyum	-9,0	Tungsten	7,5

Piyasada, American National Standards Institute (ANSI) birimlerine göre bileşimlerini gösteren büyük harflerle tanımlanmış çok sayıda ısı çifti bulunmaktadır. Örneğin, J tipi ısı çifti, demir ve konstantan (bakır-nikel alaşımı) iletkenlerinden oluşmaktadır. Tablo 3.2 piyasada bulunan ısı çifti tiplerini ve bileşimlerini göstermektedir.

Tablo 3.2: Standart ısı çiftlerinin gösterimleri ve bileşenleri [25]

Isıl Çift Tipi	İletken - Pozitif	İletken - Negatif
B	Platin – 30 % Rodyum	Platin – 6 % Rodyum
E	Nikel – krom alaşımı	Bakır – nikel alaşımı
J	Demir	Bakır – nikel alaşımı
K	Nikel – krom alaşımı	Nikel – alüminyum alaşımı
N	Nikel – krom – silikon alaşımı	Nikel – silikon – magnezyum alaşımı
R	Platin – 13 % Rodyum	Platin
S	Platin – 10 % Rodyum	Platin
T	Bakır	Bakır – nikel alaşımı

Bu çalışmada, Boğaziçi Üniversitesi Biyofotonik Laboratuvarı'nda bulunan Şekil 3.3 (a)'da gösterilen K-tipi (GKMQSS-040G-6, düşük gürültülü, .040 çaplı, topraklı, 6 inch uzunluklu) ısı çifti kullanılmıştır. K-tipi ısı çiftlerinin pozitif ucu % 90 nikel ve % 10 krom alaşımından (Chromel) imal edilir ve sarı renk kodu ile kodlanır. Negatif ucu ise % 95 nikel, % 2 alüminyum, %2 mangan ve %1 silikon (Alumel) alaşımından imal edilir ve kırmızı renk kodu ile kodlanır. Bu tip ısı çiftleri -270 °C ile 1370 °C sıcaklıkları arasındaki ölçümler için kullanılır.



(a)



(b)

Şekil 3.3: (a) K-tipi ısı çifti (b) Veri alıcısı

Isıl çiftler, ölçümlerini bilgisayara aktarmak için önce Şekil 3.3 (b)'de gösterilen 8-kanallı veri alıcısı (Omega, OM-CP-OCTTEMP)'na bağlanmaktadır. Veri alıcısı olarak adlandırılan veri kayıt sistemleri birçok sinyali uzun süre kayıt altına almakta, eş zamanlı görüntüleme yapmakta, uzaktan izleme ve kontrolde kullanılmaktadır.

3.2. Kızılaltı (Infrared, IR) Algılayıcı

Kızılaltı Işınım

Elektromanyetik spektrumda biraz daha uzun dalga boyunda ve (0.75 μm (1.65 eV)'den 1000 μm (1.2 meV)'ye) görünen bölüm spektrumun kızılaltı (IR) bölümüdür. IR ışınların enerjileri elektronların enerjilerini değiştirmek için çok küçüktür. Bunun yerine, kızılaltı ışınım; moleküllerin titreşim durumlarını değiştirmeye eğilimindedir ki bu, bir moleküldeki atomların çok hızlı ileri ve geri titreşmesi anlamına gelir. Moleküller kızılaltı ışınları soğurduklarında atomları daha hızlı hareket eder ve böylece moleküllerin sıcaklıkları artar. 0.75 μm ile 3 μm arası yakın

kızılaltı, 3 µm ile 6 µm arası orta kızılaltı, 6 µm ile 15 µm arası ise uzak kızılaltı bölge olarak adlandırılmaktadır.

IR ışınım aşağıdaki özelliklere sahiptir:

- 1) Uzun dalgaboyludur.
- 2) Düşük enerjilidir.
- 3) Gözle görülemez.
- 4) Bütün objelerden yayılır.

IR Algılama

IR ışınım çok geniş uygulama alanında kullanılmakta ve yeni uygulamalar geliştirilmeye devam etmektedir. Şekil 3.4 genel olarak kızılaltı ışıma algılama sistemini göstermektedir. Kızılaltı yayılımın, iletim ortamından geçerek algılayıcılarla alınması ve işlenmesi ifade edilmektedir.



Şekil 3.4: Kızılaltı Algı Sistemi [26]

İki tip IR algılayıcı üretilmektedir: dalgaboyuna bağlı olmayan ısıtılı ve dalgaboyuna bağlı olan kuantum tipli. Kızılaltı ışıma enerjisi Denklem (3.2) ile ifade edilmektedir.

$$E = \frac{hc}{\lambda} = \frac{1.24}{\lambda} \quad (3.2)$$

Burada, $h = 6.626 \times 10^{-34} [J.s] = 4.14 \times 10^{-15} [eV.s]$ Planck katsayısını, $c = 3 \times 10^{10} [cm/s]$ ışık hızını, $\lambda [\mu m]$ dalga boyunu göstermektedir.

Görünür ve mor ötesi ışınlarla karşılaştırıldığında, kızılaltı ışıma düşük enerjilidir. Kızılaltı algılama verimini artırmak için algılayıcının soğutulması gerekmektedir. IR algılayıcı başarımını gösteren temel özellikler foto duyarlılık, gürültüye eşdeğer güç (Noise equivalent power, NEP) ve dedektivite D^* 'dir.

- 1) Işıl duyarlılık (Photo sensitivity): Işıl duyarlılık gürültü ihmal edildiğinde algılayıcı üzerine düşen enerjiye bağlı olarak:

$$R = \frac{S}{PA} [V / W] \quad (3.3)$$

ile ifade edilmektedir. Burada;

$S : [V]$, Çıkış gerilimini,

$P : [W / cm^2]$, Algılayıcı üzerine düşen enerjiyi,

$A : [cm^2]$, Algılayıcı alanını göstermektedir.

- 2) Gürültüye Eşdeğer Güç (NEP): Algılayıcının işaret / gürültü oranı bire eşit olduğu anda giriş işaret miktarıdır ve

$$NEP = \frac{PA}{S / N \cdot \sqrt{\Delta f}} [W / Hz^{1/2}] \quad (3.4)$$

ile gösterilmektedir. Burada,

$N : [V]$, Gürültü gerilimi,

$\Delta f : [Hz]$, Gürültü band genişliği'dir.

- 3) Dedektivite (Detectivity, D^*): Dedektivite algılayıcının birim alanı başına ısı duyarlılıktır. Farklı algılayıcıların özelliklerini karşılaştırmak için tanımlanmaktadır. Çoğu algılayıcıda NEP, algılayıcı alanının kareköküyle orantılıdır. Bu nedenle D^* , Denklem (3.5)'de gösterildiği üzere

$$D^* = \frac{S / N \cdot \sqrt{\Delta f}}{P \cdot \sqrt{A}} = \frac{\sqrt{A}}{NEP} [cm.Hz^{1/2} / W] \quad (3.5)$$

şeklinde ifade edilir.

Genelde, dedektivite D^* (A, B, C) olarak ifade edilir. Burada, A [K] biriminde sıcaklığı veya $[\mu m]$ olarak dalgaboyunu, B frekansı ve C band genişliğini göstermektedir. D^* ne kadar yüksekse dedektörün duyarlılığının o kadar iyi olduğu anlaşılmaktadır.

3.2.1. Kızılaltı Algılayıcı Tipleri

IR algılayıcılar ısı ve kuantum tipli olmak üzere iki çeşittir. Tablo 3.3 IR algılayıcı tiplerini göstermektedir.

Tablo 3.3: IR algılayıcılar ve özellikleri [26]

Type		Detector	Spectral response (μm)	Operating temperature (K)	D* (cm · Hz ^{1/2} / W)	
Thermal type	Thermocouple · Thermopile	Golay cell, condenser-microphone PZT, TGS, LiTaO ₃	Depends on window material	300	D* (λ,10,1) = 6 × 10 ⁸	
	Bolometer		300	D* (λ,10,1) = 1 × 10 ⁸		
	Pneumatic cell		300	D* (λ,10,1) = 1 × 10 ⁸		
	Pyroelectric detector		300	D* (λ,10,1) = 2 × 10 ⁸		
Quantum type	Intrinsic type	Photoconductive type	PbS	1 to 3.6	300	D* (500,600,1) = 1 × 10 ⁸
			PbSe	1.5 to 5.8	300	D* (500,600,1) = 1 × 10 ⁸
			InSb	2 to 6	213	D* (500,1200,1) = 2 × 10 ⁹
			HgCdTe	2 to 16	77	D* (500,1000,1) = 2 × 10 ¹⁰
		Photovoltaic type	Ge	0.8 to 1.8	300	D* (λp) = 1 × 10 ¹¹
			InGaAs	0.7 to 1.7	300	D* (λp) = 5 × 10 ¹²
			Ex. InGaAs	1.2 to 2.55	253	D* (λp) = 2 × 10 ¹¹
			InAs	1 to 3.1	77	D* (500,1200,1) = 1 × 10 ¹⁰
			InSb	1 to 5.5	77	D* (500,1200,1) = 2 × 10 ¹⁰
			HgCdTe	2 to 16	77	D* (500,1000,1) = 1 × 10 ¹⁰
	Extrinsic type		Ge : Au	1 to 10	77	D* (500,900,1) = 1 × 10 ¹¹
			Ge : Hg	2 to 14	4.2	D* (500,900,1) = 8 × 10 ⁸
			Ge : Cu	2 to 30	4.2	D* (500,900,1) = 5 × 10 ⁸
			Ge : Zn	2 to 40	4.2	D* (500,900,1) = 5 × 10 ⁸
			Si : Ga	1 to 17	4.2	D* (500,900,1) = 5 × 10 ⁸
			Si : As	1 to 23	4.2	D* (500,900,1) = 5 × 10 ⁸

Isıl algılayıcılar, IR enerjiiyi ısı olarak kullanır ve dalgaboyundan bağımsız çalışır. Isıl algılayıcıların soğutulması gerekmez, fakat bunların yanıt sürelerinin yavaş ve algılama kapasitelerinin düşük olması olumsuz özellikleridir. Buna karşın, kuantum tipli algılayıcılar dalgaboyuna bağlı olmalarına rağmen, daha yüksek algılama başarımları ve daha hızlı yanıt süresine sahiptirler. Doğru ölçümler için, yakın kızılaltı bölgede kullanılanlar dışında kuantum algılayıcıların mutlaka soğutulması gerekmektedir.



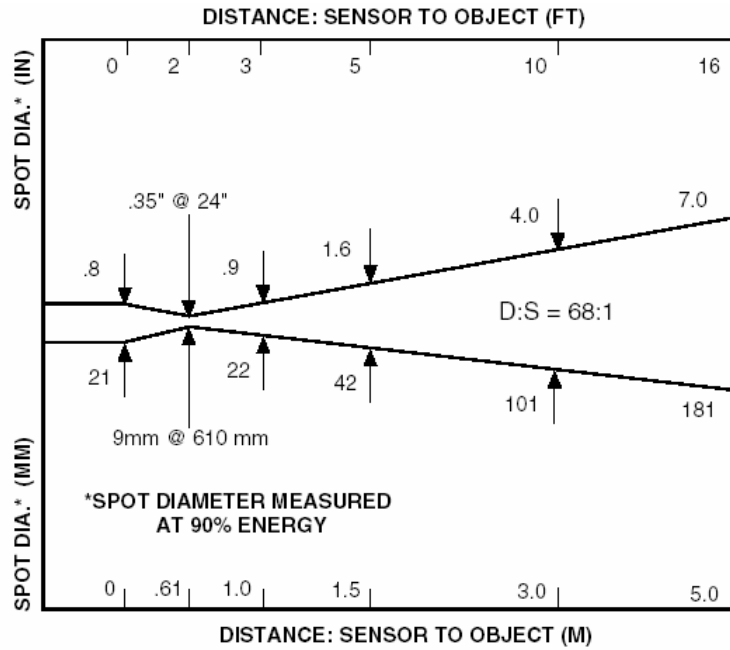
Şekil 3.5: OMEGA kızılaltı algılayıcı

Bu çalışmada, Boğaziçi Üniversitesi Biyomedikal Mühendislik Enstitüsü Biyofotonik Laboratuvarı'nda bulunan Şekil 3.5'de gösterilen IR algılayıcı (OMEGA

OS552-V1-1) kullanılmıştır. OMEGA IR algılayıcılar arasında OS552 0 ile +1000°F (-18 ile + 540°C) sıcaklık aralığını, V1 0-5 VDC çıkış gerilimini, 1 de .35" @ 24" olarak ölçüm yaptığı alanın büyüklüğünü ifade etmektedir.

OMEGA OS552-V1-1 IR Algılayıcı Özellikleri

- Doğruluk ± 1 %
- Sıcaklık ölçüm aralığı (-18 - 538°C).
- 0.1'den 1'e kadar 0.01 basamaklarla ayarlanabilir emisivite
- 100 noktaya kadar sıcaklık verilerinin kaydı
- RS-232 çıkışı
- Analog çıkış, 4-20 mA veya 0-5 VDC.
- °C / °F seçeneği
- Farksal sıcaklık gösterimi
- Min / Max sıcaklık gösterimi
- Yüksek / düşük alarm ayarlanabilme
- Parametreler ekran üzerinde ayarlanabilir ve kapatılıncaya kadar bellekte kalır.



Şekil 3.6: OS552-V1-1 IR algılayıcı görüş alanı

Şekil 3.6 kızılaltı algılayıcının çalışması sırasında dikkat edilmesi gereken algılayıcının ölçüm uzaklığı ile ölçüm alanı büyüklüğünün oranını göstermektedir. Burada, ölçüm alanının büyüklüğü hem inch hem de mm ile verilmiştir. Benzer olarak algılayıcının ölçüm uzaklığı için de metre ve feet olarak iki ayrı gösterim verilmiştir. Şekilde D:S olarak mesafenin ölçüm alanı büyüklüğüne oranı gösterilmektedir. Görüş alanı (field of view) olarak ifade edilen bu grafiğe göre, hedeften 61 cm uzaklıkta sensörün 9 mm'lik ölçüm alanı büyüklüğüne sahip olduğu ortaya çıkmaktadır ve bu durum D:S= 68:1 olarak ifade edilmektedir.

3.3. Sığır Jelatini (Bovine Gelatin)

Jelatin (gelatin), memelilerin dokularında, kasları kemiklere bağlayan kıkırdak dokuda, kemikleri birbirine ve diğer organlara bağlayan bağ dokularında bulunan ve bir protein olan kolajenden çıkartılan bir protein maddesidir [27]. Hayvanların (çoğunlukla sığır ve domuzların) deri, kemik ve bağ dokularının kaynatılması ile üretilir. Jelatinin güçlü biçimlendirilme özelliği, saydam jel oluşturması, esnek film haline gelmesi, hazmının kolay olması, sıcak suda eriyebilmesi ve şekil alma kolaylığı gıda işlemede, ilaç ve kozmetik ürünlerinde, fotoğrafçılıkta ve kağıt ürünlerinde kullanılan değerli bir madde olmasını sağlamıştır. Bir gıda maddesi olarak jelatin, jellenmiş tatlı ve diğer gıda ürünleri için ana kaynaktır. Meyve ve etlerin korunmasında yüzey kaplama maddesi olarak, süt tozu yapımında, pasta, beze ve kremlerinde ve diğer şekerleme türlerinde, meyve sularında, dondurmada, yoğurta, eritme peynirlerinde, diş macunu, şampuan, parfüm gibi kozmetik ürünlerinde ve ilaç sanayiinde, kapsül ve tabletlerin film tabakalanmasında kullanılmaktadır. Hayvan kemikleri, derileri ve dokuları kesimhanelerden toplanır. Jelatin işleme fabrikaları bu nedenle kesimhanelere yakın yerlerde kurulur. 1 kg jelatin elde etmek için 30 kg ham madde kullanılmaktadır. Hayvan parçalarından bakteri ve mineralleri uzaklaştırmak için kostik kireç veya sodyum karbonat gibi asit ve alkalikler kullanılır. Gıda jelatinlerinde tatlandırıcı, tat verici ve renklendirici eklenir. İki çeşit jelatin bulunmaktadır; A-tipi jelatin (pH=6.3-9.5) domuz derisinden veya kemikten yapılmaktadır. B-tipi jelatin ise (pH=4.5-5.2) sığır derisinden yapılmaktadır. Jelatinler, dayanımlarını ifade eden 50'den 300'e kadar Bloom numaralarına göre de ikiye ayrılırlar. F-tipi jelatinler düşük dayanımlı, G-tipi jelatinler ise yüksek dayanımlıdır [27].

Bloom Numarası

Bilinen yoğunlukta bir çözeltiden oluşmuş jelin dayanımını gösteren bir niceliktir. Bloom numarası, ortalama moleküler ağırlıkla orantılıdır [27].

Bloom Numarası	Ortalama Moleküler Ağırlık
50-125 (Düşük Bloom)	20,000-25,000
175-225 (Orta Bloom)	40,000-50,000
225-325 (Yüksek Bloom)	50,000-100,000

Jelatin, kolajende bulunan yüksek ortalama moleküler ağırlıklı suda çözülebilir proteinlerin heterojen karışımıdır. Tablo 3.4 jelatinlerin seçimi hakkında bilgi vermektedir. Bu tabloda farklı jelatin tiplerinin Bloom numaraları, saklama sıcaklıkları ve kullanım alanları gösterilmektedir. Bu çalışmada, Sigma G 9391 B-tipi sığır jelatini laser uygulaması ile IR sıcaklık ölçümlerinin alındığı doku benzetiminin hazırlanmasında kullanılmaktadır.

Tablo 3.4: Jelatin seçim rehberi [27]

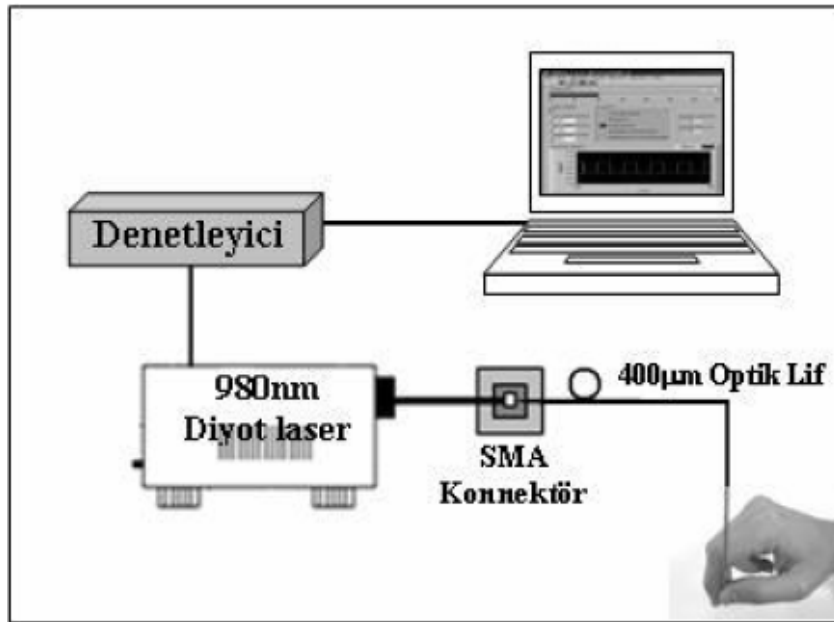
Product Number	Description	Bloom	Storage Temperature	Notes	Applications
G8144	Gelatin from porcine skin, Type A	90-110	Room temperature	Derived from acid-cured tissue	Recommended for use as a cell culture substratum.*
G2625	Gelatin from porcine skin, Type A	~175	Room temperature	Derived from acid-cured tissue	Recommended for use as a cell culture substratum.*
G2500	Gelatin from porcine skin, Type A	~300	Room temperature	Derived from acid-cured tissue	Recommended for use as a cell culture substratum.*
G1890	Gelatin from porcine skin, Type A, powder, cell culture tested	~300	Room temperature	Derived from acid-cured tissue	Recommended for use as a cell culture substratum.*
G8150	Gelatin from porcine skin, for electrophoresis, Type A	~300	Room temperature	Derived from acid-cured tissue. Protease, none detected	Suitable for use as a blocking reagent for Western blots.
G9136	Gelatin from porcine skin, Type A, lyophilized powder, γ -irradiated, cell culture tested	~300	Room temperature	Derived from acid-cured tissue	Recommended for use as a cell culture substratum.*
G0411	Prionex® Highly purified Type A, aqueous solution		Room temperature	Aseptically processed; ~10% protein; derived from porcine source	A protein stabilizer, an alternative to BSA and HSA.
G8650	Gelatin from bovine skin, Type B	~75	Room temperature	Derived from lime-cured tissue	Recommended for use as a cell culture substratum.*
G9382	Gelatin from bovine skin, Type B	~225	Room temperature	Derived from lime-cured tissue	Recommended for use as a cell culture substratum.*
G1393	Gelatin solution, Type B (from bovine skin), 2%, cell culture tested	~225	2-8 °C	Derived from lime-cured tissue. Prepared in tissue culture grade water. Endotoxin tested	Recommended for use as a cell culture substratum.*
G9391	Gelatin from bovine skin, Type B, powder, cell culture tested	~225	Room temperature	Derived from lime-cured tissue	Recommended for use as a cell culture substratum.*
G7765	Gelatin from cold water fish skin, ~45% in H ₂ O		2-8 °C	Contains 0.15% propyl p-hydroxybenzoate and 0.2% methyl p-hydroxybenzoate as preservatives; mol wt ~60 kDa	Used as a blocking agent in immunochemistry.
G7041	Gelatin from cold water fish skin, solid		Room temperature		Used as a blocking agent in immunochemistry.

*Recommended for use as a cell culture substratum at 0.1-0.2 mg/cm² or 5-10 μ l/cm². Optimal concentration will depend on cell type as well as the application or research objectives. Prionex is a registered trademark of Pentapharm AG, Basel.

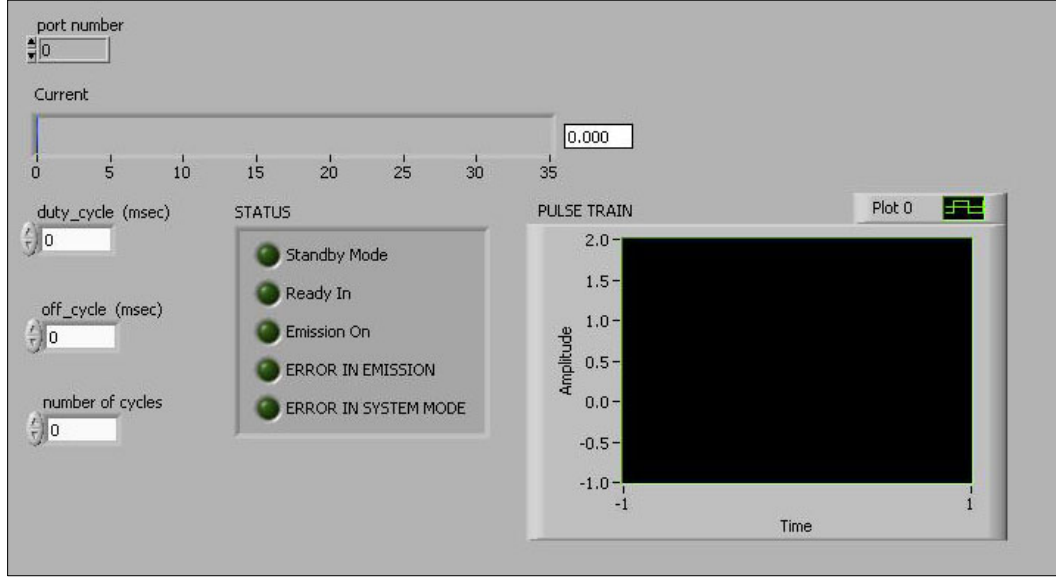
4. MALZEMELER VE YÖNTEMLER

4.1. Laser Sistemi

Bu çalışmada, 1998 yılında bir DPT projesi kapsamında alınan yüksek güçlü 980-nm diyot laser (OPC-D010-980-FCPS, Opto Power Corp., Tuscon, AZ, ABD; boyutlar, 181 mm x 193 mm x 292 mm; ağırlık 5.4 kg) kullanılmıştır. 980-nm diyot laser en fazla 10 W çıkış gücü vermekte ve bu güç aralığı diyot akımının 0 ile 35 A aralığında değiştirilmesiyle elde edilmektedir. Laser sistemi, Şekil 4.1’de gösterildiği gibi mikrodenetleyici birim, diyot laser, laser optik lif çıkışı ile 400 μ m silika kaplı optik lif bağlantısını sağlayan SMA bağlayıcı (connector) (OPC-OC01S/N:648 437, Opto Power Corp., Tuscon, AZ, ABD) ve PC tabanlı kullanıcı arayüz programından oluşmaktadır. Diyot laser çıkışı SMA bağlayıcı ile 400 μ m’lik fiber optik kabloya bağlanır. Laser parametreleri (güç, uygulama süresi ve modu (sürekli dalga veya darbeli)), Şekil 4.2’de gösterilen Boğaziçi Üniversitesi Biyofotonik Laboratuvar’ında yazılmış bir kullanıcı arayüz programı (Labview 6.0) yardımıyla denetlenmiştir.



Şekil 4.1: Laser Sistemi [5]



Şekil 4.2: 980-nm diyot laser kullanıcı arayüz ekranı

4.2. Siyah Cisim (Black body) Kalibrasyonu

Isıl ışıının sonlu ısıdaki bütün objelerden yayılır ve kızılaltı (IR) ışımayı elektriksel işaretlere çeviren dönüştürücüler tarafından algılanır [28]. Algılanan kızılaltı işaretlerin dağılımı sıcaklığın bir fonksiyonu olarak Planck-Einstein Işıım yasasına göre ideal bir siyah cisimden monokromatik (tek dalgaboylu) yayılan güç

$$W_{\lambda}(T) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{\exp(ch/\lambda kT) - 1} [Wm^{-2}\mu m^{-1}] \quad (4.1)$$

olarak ifade edilir. Burada, $h = 6.625 \times 10^{-34} [W \text{ sec}^2]$ Planck katsayısını, $c = 3 \times 10^8 [m \text{ sec}^{-1}]$ ışık hızını, $k = 1.38 \times 10^{-23} [JK^{-1}]$ Boltzmann katsayısını, $\lambda [m]$ veya $[\mu m]$ yayılım dalga boyunu ve $T [K]$ mutlak sıcaklığı göstermektedir. Planck-Einstein Işıım yasasından en fazla spektral yayılım gücü için dalgaboyuyla mutlak sıcaklığı ilişkilendiren Wien yasası

$$\lambda_{\max} T = 2897.8 [\mu m K] \quad (4.2)$$

olarak türetilir. Böylece, bir hedef için bilinen sıcaklık aralığına bakılarak en uygun dalgaboyu ve bu aralıktaki sıcaklık ölçümleri için kullanılacak sensörün tipi

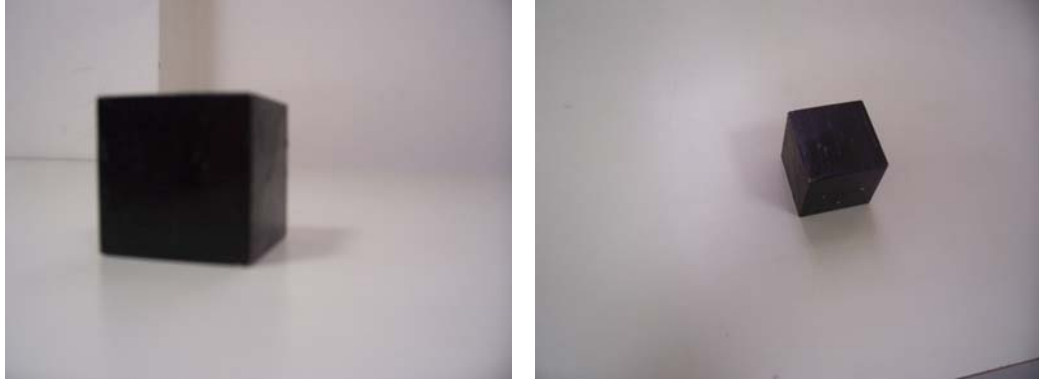
tanımlanabilir. Monokromatik yayım gücünün dalgaboyu üzerinden integrali Stefan-Boltzmann yasası olarak bilinir:

$$W(T) = \int_{\lambda} W_{\lambda}(T) d\lambda = \frac{2\pi^5 k^4}{15c^2 h^3} T^4 = \sigma T^4 [Wm^{-2}] \quad (4.3)$$

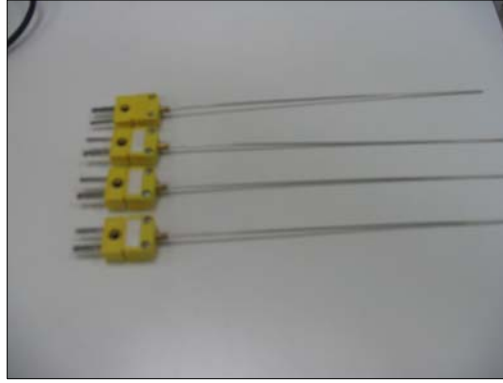
Burada, $\sigma = 5,6703 \times 10^{-8} W / m^2 K^4$ Stefan-Boltzmann katsayısını, $T (K)$ sıcaklığı göstermektedir. Siyah cisim, emdiği bütün enerjiyi yayan mükemmel bir ışıncı olarak bilinir. “Black body” terimi 1860’da Gustav Kirchhoff tarafından bulunmuştur. 1879’da, Josef Stefan siyah cisim tarafından birim alan başına yayılan güç ve sıcaklık arasında deneysel bir ilişki buldu. Birkaç yıl sonra bu ilişkiyi Ludwig Boltzmann kuramsal olarak türetti. Çoğu obje, siyah cisim gibi etkin değildir. Gri cisim olarak adlandırılan böyle nesnelerin monokromatik yayım gücünü tanımlamak için, aynı sıcaklıkta siyah cismin monokromatik yayım gücünün gri cismin monokromatik yayım gücüne oranı olarak ifade edilen $\varepsilon_{\lambda}(T)$ yani emisivite Denklem (4.4)’de tanımlanır.

$$\varepsilon_{\lambda}(T) = \frac{W'_{\lambda}(T)}{W_{\lambda}(T)} \quad (4.4)$$

Dolayısıyla emisivite dalgaboyu ve sıcaklığın fonksiyonudur. İlgilenilen tüm dalgaboyu ve sıcaklık değerleri için siyah cismin emisivitesi $\varepsilon = 1$ ’dir. Siyah cisimler, kızılaltı sistemleri test etmek için kullanılırlar. Bu çalışmada, yapılacak sıcaklık ölçümlerinde Boğaziçi Üniversitesi Biyomedikal Mühendislik Enstitüsü Biyofotonik Laboratuvarı’nda bulunan IR algılayıcıyı (Omega OS552-V1-1) kullanabilmek için bir siyah cisim oluşturulmuştur. Öncelikle içi dolu büyük bir Al parçadan $4cm \times 4cm \times 4cm$ ’lük bir küp kesilerek, çıkarılmıştır. Bu küpün bir yüzeyine, üst kenarından 1 cm aşağıda olacak biçimde uygun matkap ucuyla 1 mm çaplı ve yüzeyden 1 cm derinliğe ulaşan bir delik açılmıştır. Bu deliğin açılmasındaki amaç, ısı çiftin buraya girmesiyle siyah cismin sıcaklığının en doğru biçimde ölçülmesidir. Dolayısıyla, açılan deliğin büyüklüğü ısı çiftin çapına (1.02 mm) bağlı olarak, fiberin etrafında herhangi bir boşluk kalmayacak şekilde ayarlanmıştır. Daha sonra, oluşturulan bu Al küp, yüksek ısıya dayanıklı siyah soba boyasının tüm yüzeylerine püskürtülmesiyle tamamen siyah hale getirilmiştir. Böylece, emisivitesi artırılarak istenilen siyah cisim Şekil 4.3’de gösterildiği gibi oluşturulmuştur.



Şekil 4.3: Hazırlanan $4\text{cm} \times 4\text{cm} \times 4\text{cm}$ Al siyah cisim

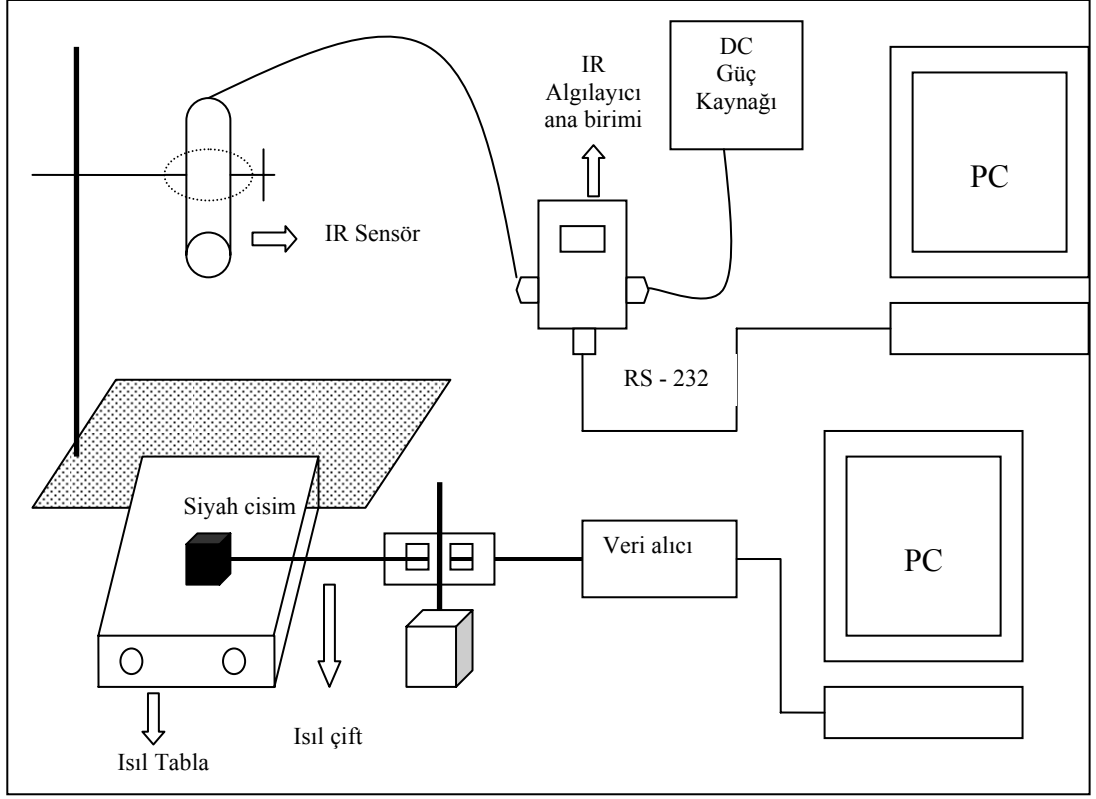


Şekil 4.4: Isıl çift

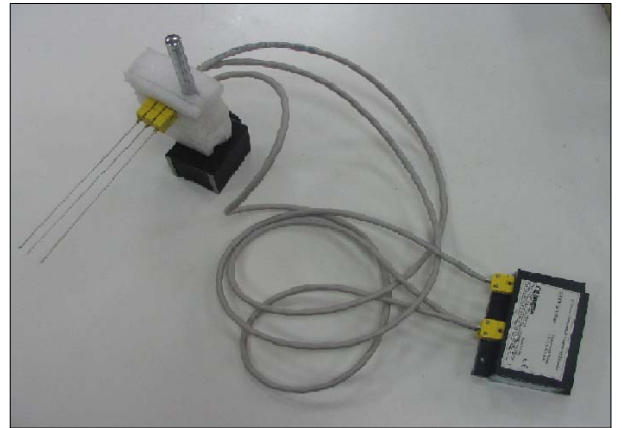
Bu çalışmada, laboratuvarında bulunan IR algılayıcının ölçümlerinin doğruluğunu anlayabilmek ve üzerinde emisivite ayarını yapabilmek için siyah cisim kalibrasyonunun yapılması gerekmektedir. Bu nedenle, siyah cisim kullanılarak hem ısı çifti hem de IR algılayıcı ile eş zamanlı olarak sıcaklık ölçümleri alınmıştır. Kalibrasyonun gerçekleştirildiği deney düzeneği Şekil 4.5’de gösterilmektedir.

Şekil 4.5’de verilen deney düzeneğinde gösterildiği gibi siyah cisim, ısı tabla (hot plate) üzerine yerleştirilmiştir. IR algılayıcının sensörü, 9 mm’lik ölçüm alanı büyüklüğüne sahip olacak biçimde siyah cismin yüzeyinden 61 cm yukarıya yerleştirilmiş ve algılayıcı ana birimine uygun biçimde bağlanmıştır. 7V-DC gerilim uygulanan ve üzerinde sıcaklık ölçümlerini gösteren IR algılayıcı ana birimi RS-232 ile Omega Engineering IR_TEMPSOFT yazılımı bulunan bilgisayara bağlanmıştır. Aynı zamanda, Şekil 4.4’de gösterilen ısı çifti siyah cisimde açılmış deliğe yerleştirilmiş ve manyetik taban aracılığı ile sabitleştirilmiştir. Sonra, ısı çifti ve veri alıcısının bağlantısı Şekil 4.6’daki gibi yapılmıştır. Isıl çift sıcaklık ölçümleri OMEGA 2.00 yazılımı aracılığıyla kaydedilmiştir. Daha sonra, ısı tabla üzerine

yerleştirilen siyah cisim ısıtılmıştır. Isının siyah cisim üzerinde homojen dağılması tamamlanincaya kadar beklenmiş ve ardından 1 dk boyunca eş zamanlı olarak hem IR algılayıcıdan hem ısıl çiftten sıcaklık ölçümleri alınmıştır. Sonra da, her iki ölçümle kaydedilen sıcaklık değerleri karşılaştırılmıştır.



Şekil 4.5: Siyah cisim kalibrasyonu deney düzeneği

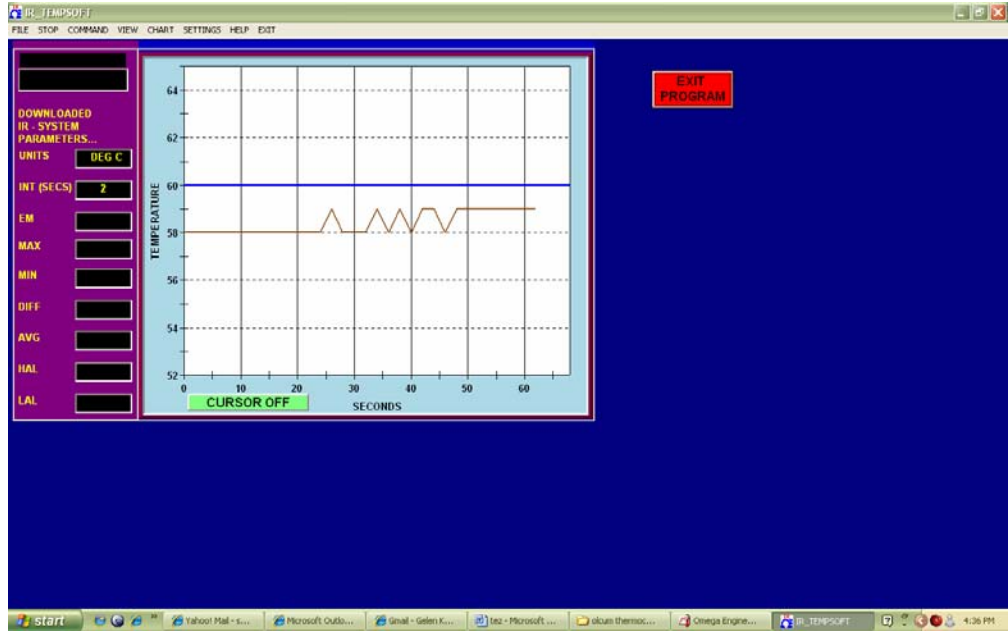


Şekil 4.6: Isıl çiftin manyetik taban ve veri alıcısı bağlantısı

Isıl çift ile IR sensör sıcaklık ölçümlerinin aynı veya mümkün olduğunca yakın olduğu yüzey emisivite değerinin bulunması gerekmektedir. Böylece, bundan sonraki ölçümlerde IR algılayıcının biyolojik fantomlardan en doğru ölçümü alacağı yüzey emisivite değeri ayarlanmış olacaktır.



(a)



(b)

Şekil 4.7: $\varepsilon = 0.98$ değerinde (a) OMEGA 2.00 ile ısı çifti (b) IR_TEMPSOFT ile algılayıcı sıcaklık ölçümü

Önce, algılayıcı ana birimi üzerinde emisivite 0.95 değerine ayarlanarak, algılayıcı ve ısı çiftin eş zamanlı kullanılmasıyla 1 dk'lık sıcaklık ölçümü alınmıştır. Daha sonra, sırasıyla, emisivite 0.96, 0.97, 0.98 ve 0.99 değerlerine ayarlanarak ısı tabla ile ısıtılan siyah cismin sıcaklık ölçümleri kaydedilmiştir. Sonuçta, $\varepsilon = 0.98$ değerinde IR algılayıcının, ısı çift ölçümleriyle en fazla yakınlık gösterdiği bulunmuştur. Bu değerde IR algılayıcı ve ısı çift sıcaklık ölçümleri Şekil 4.7'de gösterilmektedir. Her iki ölçüm yöntemi arasında 2°C 'lik fark kaydedilmiştir. Yani, algılayıcı ölçümlerinin ısı çift ölçümlerinden 2°C daha yüksek olduğu ortaya çıkmıştır. Örneğin, aynı anda kaydedilen değerlere bakıldığında ısı çift ölçümlerinde bu değer 56°C iken, algılayıcıda 58°C 'dir.

Şekil 4.7 (a) 60 sn boyunca ısı çift tarafından kaydedilen sıcaklık ölçümlerini göstermektedir. Şekil'de, üst kısımda tek olarak gösterilen eğri siyah cisim içerisinde bulunan ve veri alıcı üzerinde Kanal-2'ye bağlanan ısı çiftin sıcaklık ölçümünü göstermektedir. Alt kısımda yer alan diğer eğriler ise veri alıcısındaki kalan 7 kanalın çevre sıcaklık ölçümlerini göstermektedir. Burada, Kanal-2 en düşük 56.19°C , en yüksek 57.09°C olarak sıcaklık ölçümlerini kaydetmiştir. Bu 1 dk'lık ölçümün ortalama değeri 56.70°C ve standart sapması 0.247521'dir. Şekil 4.7 (b) ise ısı çift ile eş zamanlı yapılan IR algılayıcı sıcaklık ölçümünü göstermektedir. Bu ekranın sol bölümünde INT (SECS) olarak gösterilen kısım algılayıcı ana birimi üzerinden ayarlanmakta ve 1'den 1999'a kadar değerler olarak sensörün okuma aralığını göstermektedir. Atanan ön değeri 2 sn'dir. Böylece 2 saniyelik aralıklarla ölçümler kaydedilmekte ve kaydedilen bu ölçümler o süre boyunca görülen sıcaklıkların ortalamasını göstermektedir. Ekran üzerinde mavi düz çizgi şeklinde görülen eğri, önceden ayarlanmış olan alarm değerini ve bunun altında yer alan değişim algılayıcının sıcaklık ölçümünü göstermektedir.

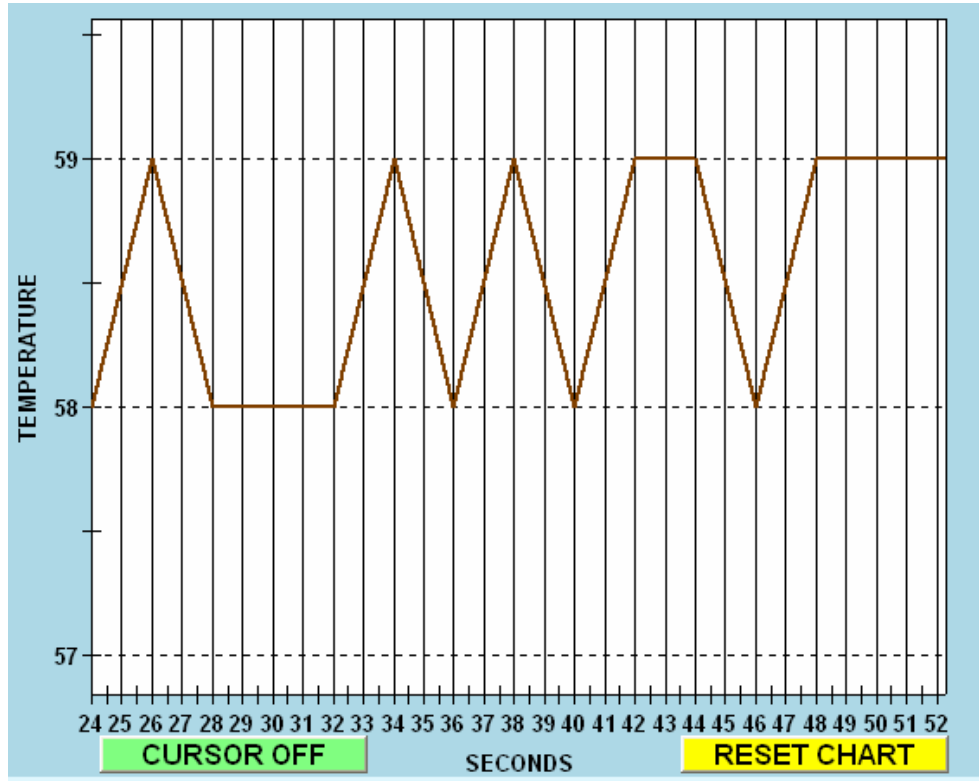
Şekil 4.8'de IR_TEMPSOFT üzerinde bazı ayarlamalar yapılarak algılayıcı ölçümünde değişimi gözlenen 24 - 52 sn aralığı daha net gösterilmiştir. Böylece algılayıcı ölçümlerini, Tablo 4.1'de 2 sn aralıklarla ayrıntılı olarak kaydedilmiş ısı çift değerleriyle karşılaştırma olanağı doğacaktır. 34. sn'de alınan değerlere bakıldığında IR algılayıcı eğrisinin 58°C 'den 59°C 'ye yükseldiği, ısı çiftin ise 56.92°C 'lik o ana kadarki en yüksek sıcaklığı ölçtüğü gözlenmektedir. Benzer biçimde, algılayıcının 59°C 'lik ölçüm kaydettiği 50. sn'de, ısı çift yaklaşık

57.00°C 'yi okumaktadır. Dolayısıyla, $\varepsilon = 0.98$ 'e ayarlandığında algılayıcı ve ısı çift ölçümleri arasında 2°C 'lik fark gözlenmektedir.

Tablo 4.1: Isıl çift ölçüm değerleri

Okuma Numarası	Tarih ve zaman	Kanal 2 Sıcaklık Ölçümü
		Isıl çift (°C)
1	2007-10-19 13:29:00	56.19
2	2007-10-19 13:29:02	56.42
3	2007-10-19 13:29:04	56.48
4	2007-10-19 13:29:06	56.59
5	2007-10-19 13:29:08	56.42
6	2007-10-19 13:29:10	56.34
7	2007-10-19 13:29:12	56.34
8	2007-10-19 13:29:14	56.74
9	2007-10-19 13:29:16	56.69
10	2007-10-19 13:29:18	56.51
11	2007-10-19 13:29:20	56.63
12	2007-10-19 13:29:22	56.51
13	2007-10-19 13:29:24	56.69
14	2007-10-19 13:29:26	56.34
15	2007-10-19 13:29:28	56.69
16	2007-10-19 13:29:30	56.81
17	2007-10-19 13:29:32	56.63
18	2007-10-19 13:29:34	56.92
19	2007-10-19 13:29:36	56.81
20	2007-10-19 13:29:38	56.86
21	2007-10-19 13:29:40	56.86
22	2007-10-19 13:29:42	56.63
23	2007-10-19 13:29:44	56.97
24	2007-10-19 13:29:46	56.97
25	2007-10-19 13:29:48	56.86
26	2007-10-19 13:29:50	56.92
27	2007-10-19 13:29:52	57.09
28	2007-10-19 13:29:54	57.04
29	2007-10-19 13:29:56	56.92
30	2007-10-19 13:29:58	57.09
31	2007-10-19 13:30:00	56.97

Daha sonra, siyah cisim 30 dk içerisinde belirli bir sıcaklığa kadar ısıtılıp, ısıl tabla kapatılarak soğumaya bırakılmış ve bir müddet sonra tekrar ısıtılmaya başlanarak sıcaklığın değişimi her iki ölçüm yöntemiyle izlenmiştir ve Şekil 4.9'da ayrı ayrı gösterilmiştir.

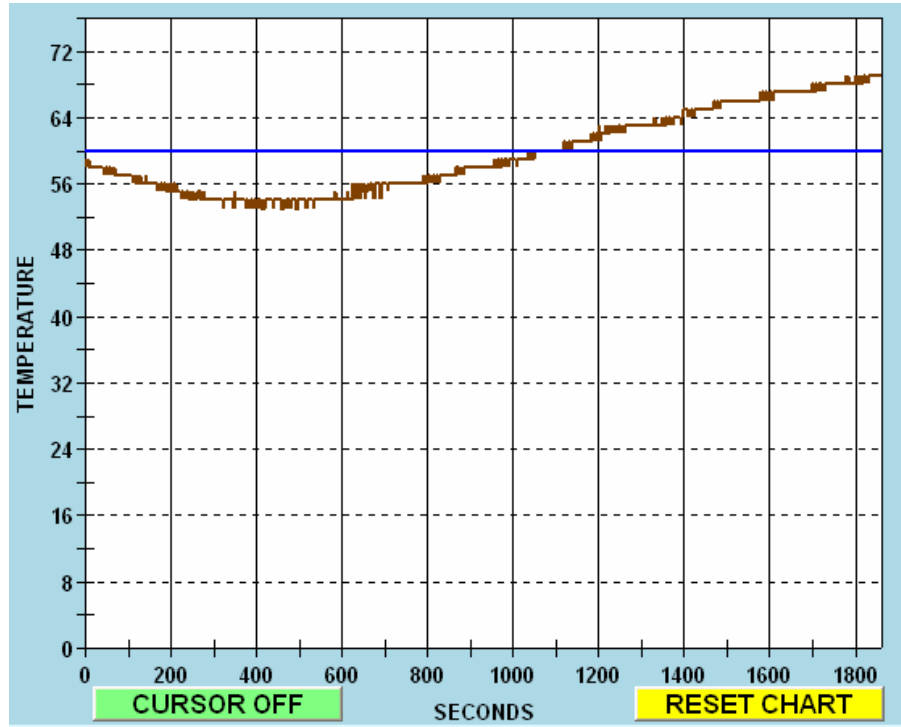


Şekil 4.8: IR sensörün 24 - 52 sn aralığında sıcaklık ölçümü



(a)

Şekil 4.9: $\varepsilon = 0.98$ iken 30 dk'lık sıcaklık ölçümü
(a) Isıl çift, (b) IR algılayıcı



(b)

Şekil 4.9 (devamı): $\varepsilon = 0.98$ iken 30 dk'lık sıcaklık ölçümü
(a) Isıl çift, (b) IR algılayıcı

4.3. Fantom Hazırlanması

Bu çalışmada, 980-nm diyot laser kullanılarak IR sıcaklık ölçümlerinin alınması için doku benzetimi yapmak amacıyla fantomlar hazırlanmıştır. Fantom, sığır jelatini (Sigma, G9391, B-type), intralipid-% 10 (Fresenius kabı) ve siyah dolma kalem mürekkebi (pelikan 4001) karışımından oluşturulmuştur. Sığır jelatini çoğu uygulamada biyolojik dokuya benzetim için kullanılmaktadır [29]. Yağ emülsiyonu olarak da bilinen intralipid ise biyomedikal optik uygulamalarda hazırlanan fantomlarda saçıcılık sağlamak için kullanılmaktadır [29]. Fantomun 980-nm diyot laser emilimini artırmak için karışıma siyah mürekkep eklenmiştir. Bu çalışmada, laser ışıması ile IR sıcaklık ölçümlerini alabilmek için iki ayrı yoğunluklu fantom hazırlanmıştır. I. ve II. grup ölçümlerde, fantomlar 4 gr sığır jelatini, 100 ml intralipid ve 150 cc siyah boya karışımından oluşturulmuştur. III. Grup ölçümlerde ise yalnızca karışımdaki boya miktarı artırılarak 200 cc yapılmış ve fantomlar hazırlanmıştır.

Fantomu oluşturabilmek için öncelikle yukarıda belirtilen miktarlar ölçölüp karıştırılarak Şekil 4.10 (a)'da gösterildiği gibi ısıtılabilir tabla üzerinde 15 dk ısıtılmaktadır. Daha sonra, bu karışım 8.5 cm çapında ve 1.3 cm yükseklikte olan 2 petri kaba eşit miktarda boşaltılıp, 15 dk oda sıcaklığında soğumaya bırakılmaktadır. Bu süre sonunda karışımın Şekil 4.10 (b)'de gösterildiği gibi katılaşarak, jölemsi üzerinde laser uygulamalarının yapılabilceği hale geldiği gözlenmektedir.



(a)



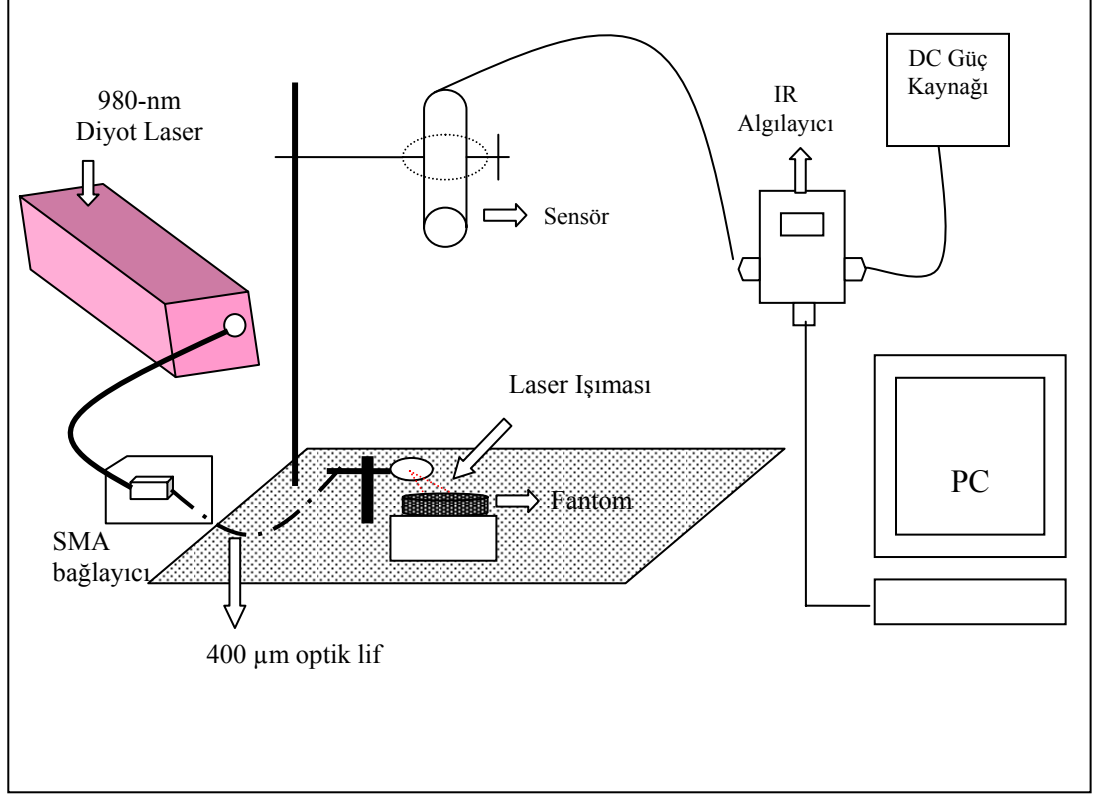
(b)

Şekil 4.10: Laser uygulamasının yapıldığı fantomun (a) hazırlanışı, (b) görünümü

Böylece üzerinde 980-nm laser uygulamasının yapılabileceği doku eşdeğeri yapılar oluşturulmuştur. Oluşturulan bu fantomlar özelliklerini yitirmemeleri için hazırlandıktan sonra buzdolabı vb. de saklanmayıp hemen kullanılmaktadırlar.

4.4. Sıcaklık Ölçümü Deney Düzeneği

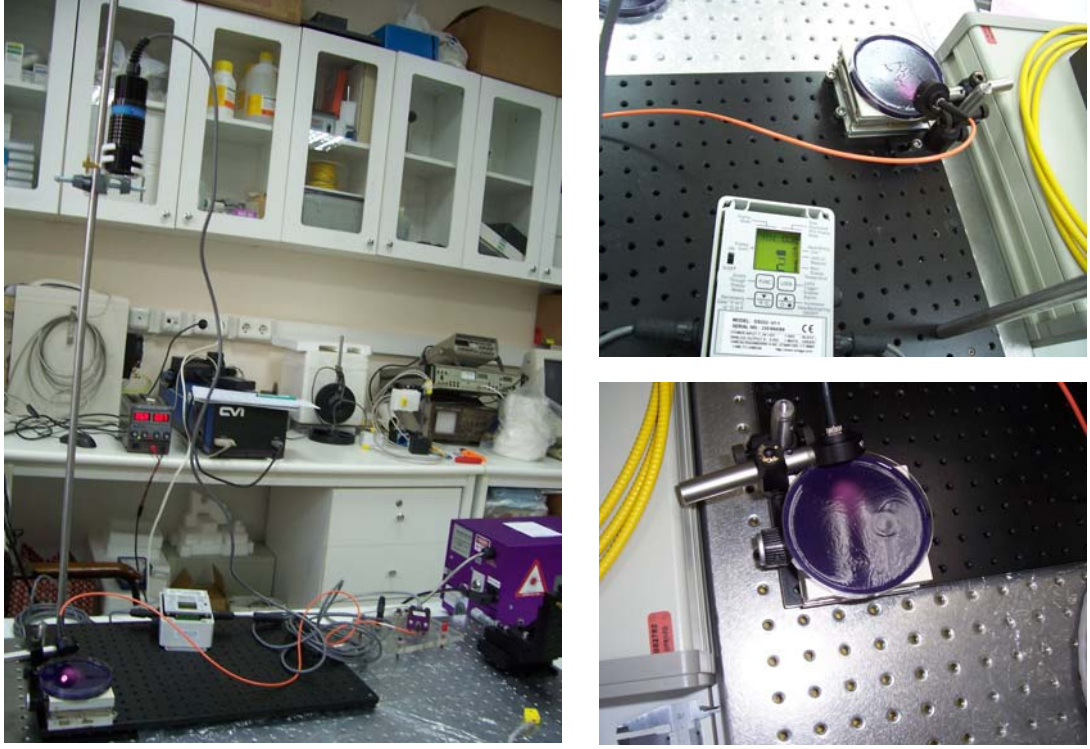
Gerçekleştirilen deneylerde, 980-nm diyot laser ışıması sırasında biyolojik dokuya benzeyen fantomlar üzerinden IR sıcaklık ölçümlerinin alınması için kullanılan sistem Şekil 4.11’de gösterilmektedir.



Şekil 4.11: Deney düzeneği

Şekil 4.11’de gösterildiği gibi 980-nm diyot laser çıkışı SMA bağlayıcı üzerinden optik lif aracılığıyla hazırlanan fantom üzerindeki 1 cm çaplı bir alana uygulanmaktadır. Deneyler sırasında laser ışını 1 cm çaplı alana yaymak için optik lif ile birlikte iki yüzü dışbükey (biconvex) lens kullanılmıştır. IR algılayıcı sensörünün fantom yüzeyine dik olarak yerleştirilmesi gerektiğinden, laser lifi yaklaşık 45°’lik açıyla sensörün görüş mesafesini kapatmayacak biçimde ve olabildiğince fantom yüzeyine yakın olarak uygulanmıştır. Ölçüm alanı içinde ortalama alındığından ve laser demet çapı boyunca sıcaklık değiştiğinden, doğru ölçümlerin alınabilmesi için laser uygulanan alanın sensörün ölçüm alanı büyüklüğünden büyük olması gerekmektedir. IR algılayıcının spot büyüklüğü ve mesafe grafiğinden (Şekil 3.6) 61 cm’lik mesafede 9 mm’lik spot büyüklüğüne sahip olduğu görülmektedir. Dolayısıyla, laserin uygulandığı 1 cm çaplı alandaki sıcaklık

değişimlerini ölçmek için kullanılan IR algılayıcının sensörü, laser ışığının yapıldığı fantom yüzeyinden 61 cm mesafeye yerleştirilmiştir. Sensör bu mesafeden 9 mm'lik ölçüm alanı büyüklüğüne sahip alandaki ortalama sıcaklığı kaydetmektedir. Sensörü tarafından algılanan sıcaklık değerleri IR algılayıcının ana biriminde gösterilirken aynı zamanda RS-232 üzerinden IR_TEMPSOFT yazılımının bulunduğu bilgisayara da aktarılmaktadır.



Şekil 4.12: IR sıcaklık ölçüm deney düzeneği

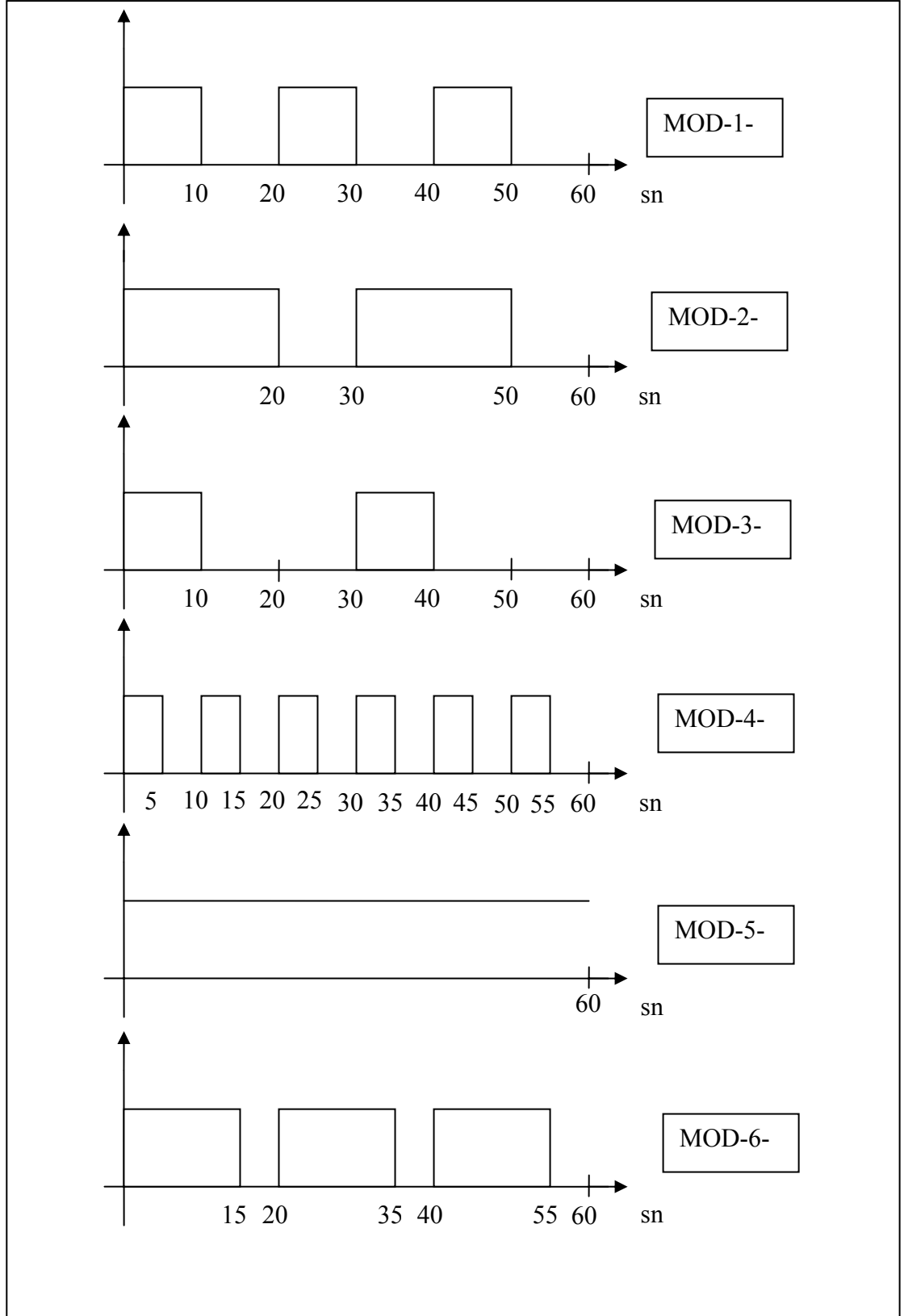
Şekil 4.12’de laser uygulaması sırasında IR sıcaklık ölçümlerinin gerçekleştirildiği deney düzeneği gösterilmektedir. Hazırlanan fantomlar şekilde gösterildiği gibi yerleştirilmiş ve IR sıcaklık ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Deney düzeneğinin kurulması sırasında yaşanan en büyük sorun yalnızca laser uygulanan alandaki sıcaklık değişiminin sensör tarafından algılanmasını sağlamaktır. IR algılayıcı sensörünün 61 cm’lik mesafeden hangi 9 mm’lik spot büyüklüğündeki alanın sıcaklığını ölçtüğünü gösteren herhangi bir laser pointer benzeri belirteci olmadığından, Şekil 4.12’de gösterilen deney düzeneği en doğru ölçümlerin alındığı tespit edilen konuma göre kurulduktan sonra tüm ölçümler bitene kadar bozulmamıştır. Böylece ölçümlerin birbirleriyle en yüksek derecede tutarlı olması sağlanmıştır.

5. SONUÇLAR

Bu çalışmada, IR algılayıcı kullanılarak laser ışıması süresince fantom üzerindeki sıcaklık değişimi izlenmiştir. Deneysel çalışma, Boğaziçi Üniversitesi Biyofotonik Laboratuvarı'nda gerçekleştirilmiş ve 980-nm diyot laser kullanılmıştır. Deneylerde, sığır jelatini, intralipid-% 10 ve siyah mürekkep karışımından oluşturulan fantom doku benzetimi amacıyla hazırlanmıştır [28]. Fantom üzerinde oluşan sıcaklık değişimleri, farklı güçler (2W, 3W, 4W, 5W, 6W ve 7W) ve Şekil 5.1'de verilen farklı modülasyonlar kullanılarak 3 dk boyunca 0.5 Hz örnekleme hızıyla algılayıcı tarafından kaydedilmiştir. Laser parametreleri (güç, uygulama süresi ve işletme modu (sürekli dalga veya atımlı)), Labview 6.0 kullanıcı arayüz programı yardımıyla denetlenmiştir. Belirlenen bu modülasyonları uygulayabilmek için laser kullanıcı arayüzü programı üzerinde modülasyon tipine bağlı olarak Tablo 5.1'de verilen parametre ayarları yapılmıştır. Her bir laser gücü ve modülasyonu ayarlanarak, kızılaltı algılayıcı ile toplam 250 sıcaklık ölçümü alınmıştır.

Tablo 5.1: Modülasyon Tiplerine göre 980-nm Diyot Laser Parametreleri

	Modülasyon		Döngü Sayısı
	Açık (sn)	Kapalı (sn)	
MOD-1	10	10	9
MOD-2	20	10	6
MOD-3	10	20	6
MOD-4	5	5	18
MOD-5	180	0	1
MOD-6	15	5	9

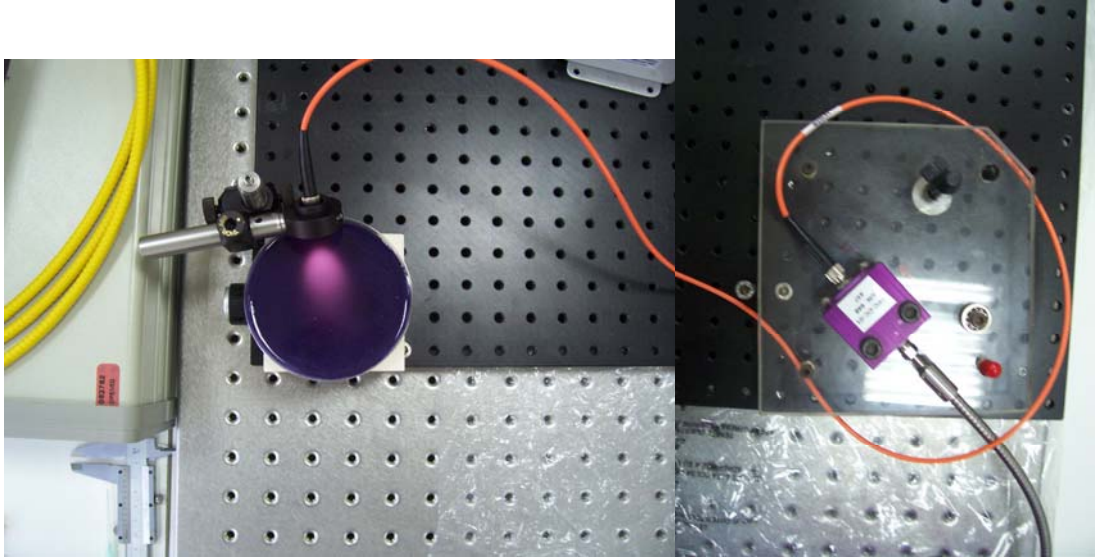


Şekil 5.1: Laser Modülasyon Tipleri

Yapılan deneyler 3 grup içerisinde yorumlanmaktadır. İlk grup ölçümler, deney düzeneğinde SMA bağlayıcı ve optik lif kullanılarak elde edilmiştir. İkinci grup ölçümlerde laser çıkışı doğrudan fantom üzerindeki 1 cm çaplı alana lif kullanılmaksızın uygulanmıştır. Üçüncü grup ölçümler ise, ikinci grup ölçümlerden farklı olarak fantomda siyah boya yoğunluğu değiştirilerek elde edilmiştir.

5.1. I. Grup Ölçümler

Burada, 980-nm diyot laserin çıkışı Şekil 5.2’de görüldüğü gibi SMA bağlayıcı üzerinden optik lifle fantom üzerinde 1 cm çaplı alana uygulanmıştır ve kızılaltı algılayıcı ile bu bölgedeki sıcaklık değişimi 3 dk boyunca kaydedilmiştir. Fantom, 4 gr sığır jelatini, 100 ml intralipid-% 10 ve 150 cc siyah dolma kalem mürekkebinden hazırlanmıştır.



Şekil 5.2: I. Grup ölçümlerin yapıldığı deney düzeneği

2W-3W-4W-5W-6W-7W güç değerlerinde her bir laser modülasyon tipi ayrı ayrı kullanılarak fantom yüzeyinin sıcaklık ölçümleri kaydedilmiştir. Belirlenen laser güç ve modülasyonları kullanılarak toplam 87 ölçüm alınmıştır. Aynı güç değeri ve modülasyon tipi kullanılarak alınan iki ayrı ölçüm sonucu Tablo 5.2’de ilk sıcaklık, son sıcaklık ve oluşan sıcaklık artışları açısından gösterilmiştir.

Tablo 5.2’deki verilerden, her bir laser gücü ve modülasyonunun neden olduğu sıcaklık artışı yapılan iki ayrı ölçüm sonucunda açıkça görülmektedir.

Tablo 5.2: İki ayrı ölçüm için her bir güç değerinde farklı modülasyonlarla oluşan sıcaklık artışları (a) 2W, (b) 3W, (c) 4W, (d) 5W, (e) 6W, (f) 7W

<u>2W Laser Gücü</u>	İlk sıcaklık °C		Son sıcaklık °C		Sıcaklık artışı °C	
	1. ölçüm	2.ölçüm	1. ölçüm	2.ölçüm	1. ölçüm	2.ölçüm
Mod-1	21	23	23	24	2	1
Mod-2	22	22	23	23	1	1
Mod-3	22	22	22	22	0	0
Mod-4	22	21	23	22	1	1
Mod-5	22	21	24	23	2	2
Mod-6	22	22	23	23	1	1

(a)

<u>3W Laser Gücü</u>	İlk sıcaklık °C		Son sıcaklık °C		Sıcaklık artışı °C	
	1. ölçüm	2.ölçüm	1. ölçüm	2.ölçüm	1. ölçüm	2.ölçüm
Mod-1	20	22	21	23	1	1
Mod-2	18	22	21	24	3	2
Mod-3	18	22	18	23	0	1
Mod-4	18	23	19	24	1	1
Mod-5	22	18	25	21	3	3
Mod-6	17	22	20	24	3	2

(b)

<u>4W Laser Gücü</u>	İlk sıcaklık °C		Son sıcaklık °C		Sıcaklık artışı °C	
	1. ölçüm	2.ölçüm	1. ölçüm	2.ölçüm	1. ölçüm	2.ölçüm
Mod-1	22	22	24	23	2	1
Mod-2	23	22	25	24	2	2
Mod-3	23	22	24	23	1	1
Mod-4	22	22	24	23	2	1
Mod-5	22	22	27	26	5	4
Mod-6	22	22	26	25	4	3

(c)

Tablo 5.2 (devamı): İki ayrı ölçüm için her bir güç değerinde farklı modülasyonlarla oluşan sıcaklık artışları (a) 2W, (b) 3W, (c) 4W, (d) 5W, (e) 6W, (f) 7W

<u>5W Laser Gücü</u>	İlk sıcaklık °C		Son sıcaklık °C		Sıcaklık artışı °C	
	1. ölçüm	2.ölçüm	1. ölçüm	2.ölçüm	1. ölçüm	2.ölçüm
Mod-1	21	22	24	24	3	2
Mod-2	22	22	25	24	3	2
Mod-3	22	22	23	23	1	1
Mod-4	21	22	23	24	2	2
Mod-5	21	22	27	26	6	4
Mod-6	22	22	24	25	2	3

(d)

<u>6W Laser Gücü</u>	İlk sıcaklık °C		Son sıcaklık °C		Sıcaklık artışı °C	
	1. ölçüm	2.ölçüm	1. ölçüm	2.ölçüm	1. ölçüm	2.ölçüm
Mod-1	18	22	21	24	3	2
Mod-2	19	22	22	26	3	4
Mod-3	18	21	20	23	2	2
Mod-4	18	22	21	24	3	2
Mod-5	19	22	24	29	5	7
Mod-6	19	23	23	27	4	4

(e)

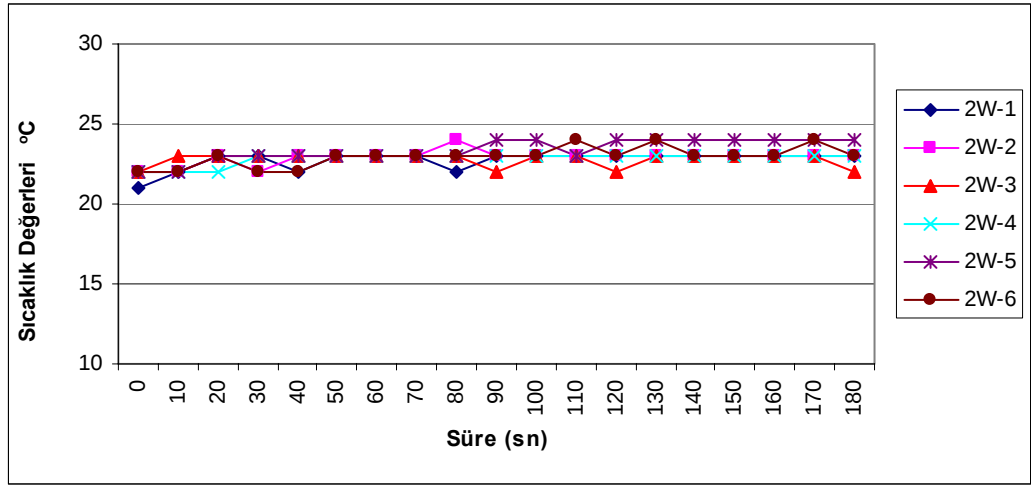
<u>7W Laser Gücü</u>	İlk sıcaklık °C		Son sıcaklık °C		Sıcaklık artışı °C	
	1. ölçüm	2.ölçüm	1. ölçüm	2.ölçüm	1. ölçüm	2.ölçüm
Mod-1	22	22	26	25	4	3
Mod-2	23	23	28	26	5	3
Mod-3	23	24	25	26	2	2
Mod-4	22	23	26	27	4	4
Mod-5	22	23	29	29	7	6
Mod-6	23	23	28	26	5	3

(f)

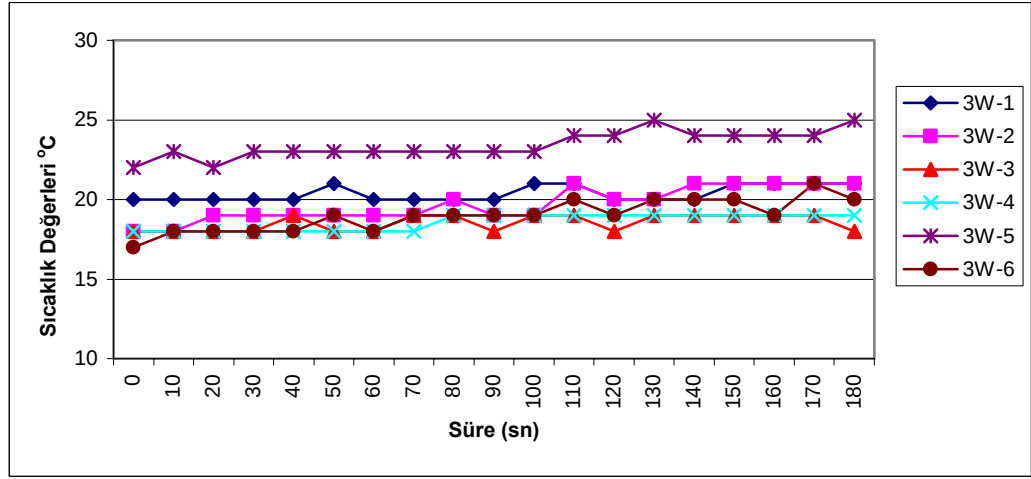
Tablolardaki her bir güç ve modülasyon tipindeki sıcaklık artışını daha net karşılaştırabilmek ve yorumlayabilmek için algılayıcı tarafından kaydedilen verilerin Excel’de grafikleri çizdirilmiştir. Burada, tüm grafikler Tablodaki 1. ölçümlere göre çizdirilmiştir. Öncelikle, aynı laser gücü için tanımlanan farklı modülasyonların sıcaklık değişimlerine etkisi incelenmiştir. Şekil 5.3, 2W, 3W ve 4W laser güçleri için farklı modülasyonların sıcaklık ölçüm eğrilerinin 180 sn boyunca 10 sn aralıklarla nasıl değiştiğini göstermektedir. Şekil 5.3 (a)’da 2W laser gücünün farklı modülasyonlarla uygulanmasıyla oluşan sıcaklık değişimleri, (b)’de 3W laser gücünün farklı modülasyonlarla uygulanmasıyla oluşan sıcaklık değişimleri ve (c)’de 4W laser gücünün farklı modülasyonlarla uygulanmasıyla oluşan sıcaklık değişimleri gösterilmektedir.

Şekil 5.4 ise 5W, 6W ve 7W güç seviyeleri için farklı modülasyonların oluşturduğu sıcaklık değişimlerini zaman ekseninde karşılaştırmak üzere elde edilmiştir. Şekil 5.4 (a)’da 5W laser gücünün farklı modülasyonlarla uygulanmasıyla oluşan sıcaklık değişimleri, (b)’de 6W laser gücünün farklı modülasyonlarla uygulanmasıyla oluşan sıcaklık değişimleri ve (c)’de 7W laser gücünün farklı modülasyonlarla uygulanmasıyla oluşan sıcaklık değişimleri zaman ekseninde 10 sn’lik aralıklarla gösterilmektedir.

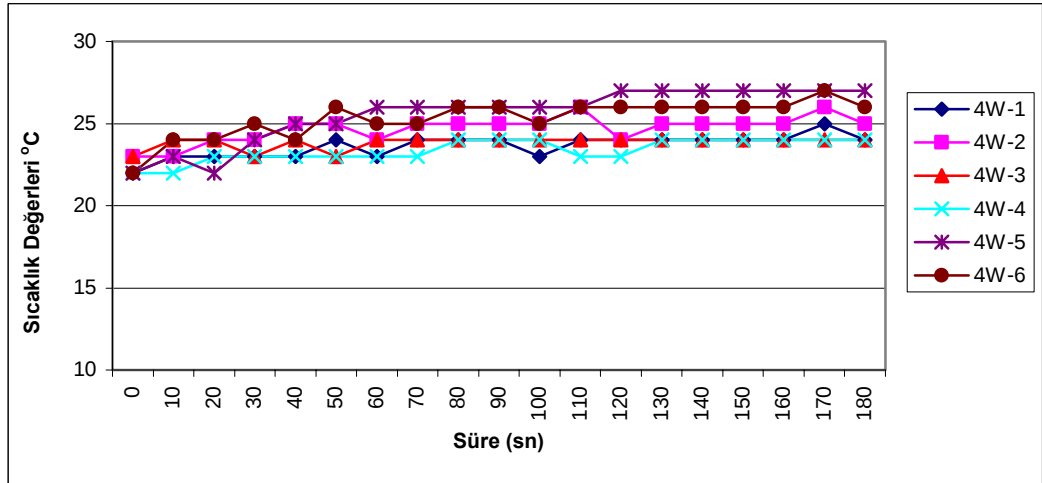
Tablo 5.2’deki sıcaklık ölçüm verilerinden, Şekil 5.3 ve Şekil 5.4’deki aynı güç değerinde farklı modülasyonların kullanılmasının karşılaştırılmasını gösteren çizimlerden, laser ışımasının SMA bağlayıcı ve optik lif kullanılarak fantoma aktarıldığı I. Grup ölçümlerde kızılaltı algılayıcı tarafından ölçülen sıcaklık artışlarının oldukça düşük olduğu ortaya çıkmaktadır. Aynı laser gücünde ilk ve son sıcaklıklar baz alındığında en fazla sıcaklık artışının, laserin sürekli dalga durumunda yani Mod-5 kullanılarak uygulanması ile oluştuğu gözlenmektedir. Aynı zamanda, her bir laser güç değerinde en az sıcaklık artışının laserin Mod-3 kullanılarak fantoma aktarılması ile oluştuğu ortaya çıkmaktadır.



(a)

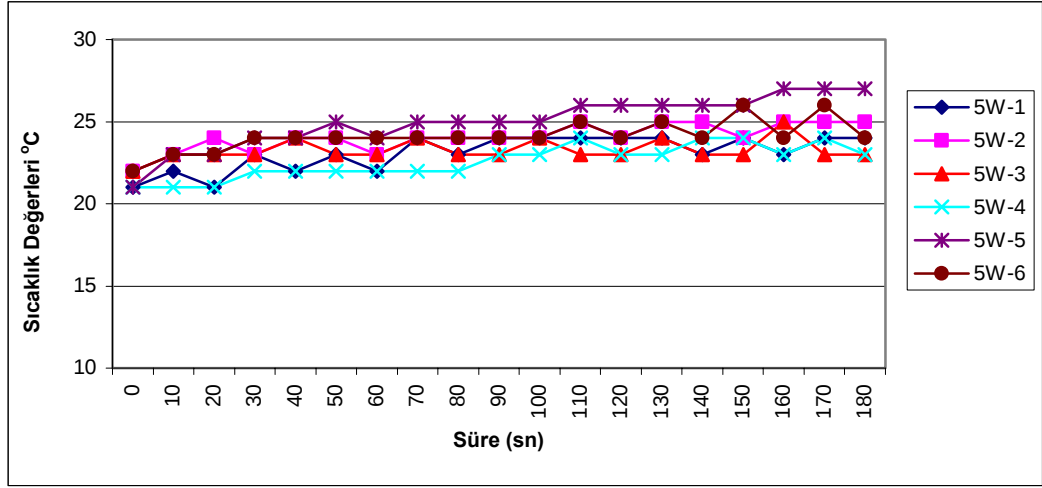


(b)

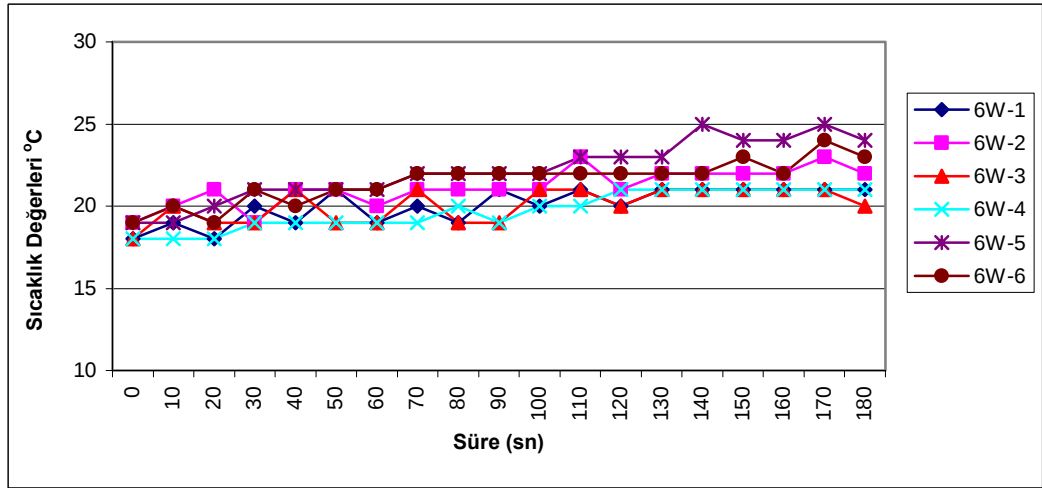


(c)

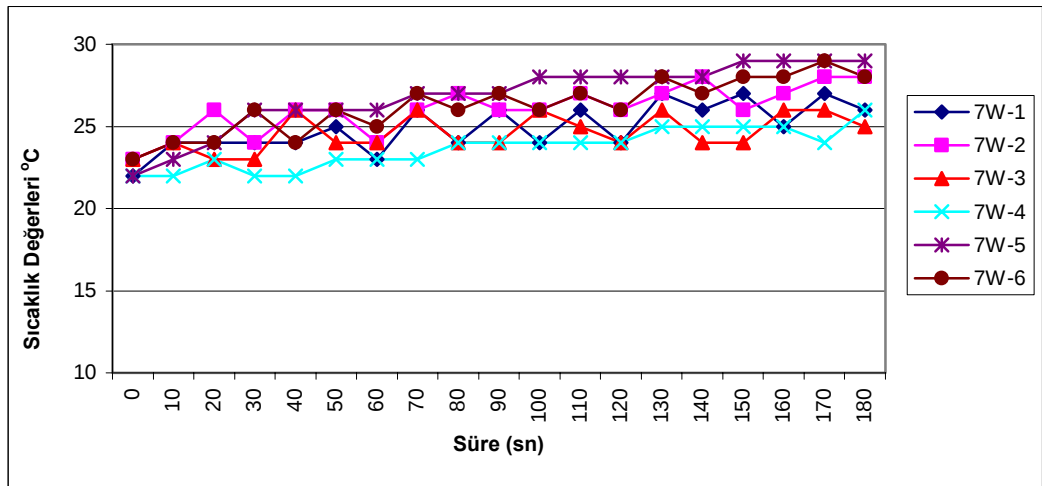
Şekil 5.3: Farklı modülasyonlarda oluşan sıcaklık değişimlerinin zaman ekseninde incelenmesi (a) 2W, (b) 3W, (c) 4W



(a)



(b)



(c)

Şekil 5.4: Farklı modülasyonlarda oluşan sıcaklık değişimlerinin zaman ekseninde incelenmesi (a) 5W, (b) 6W, (c) 7W

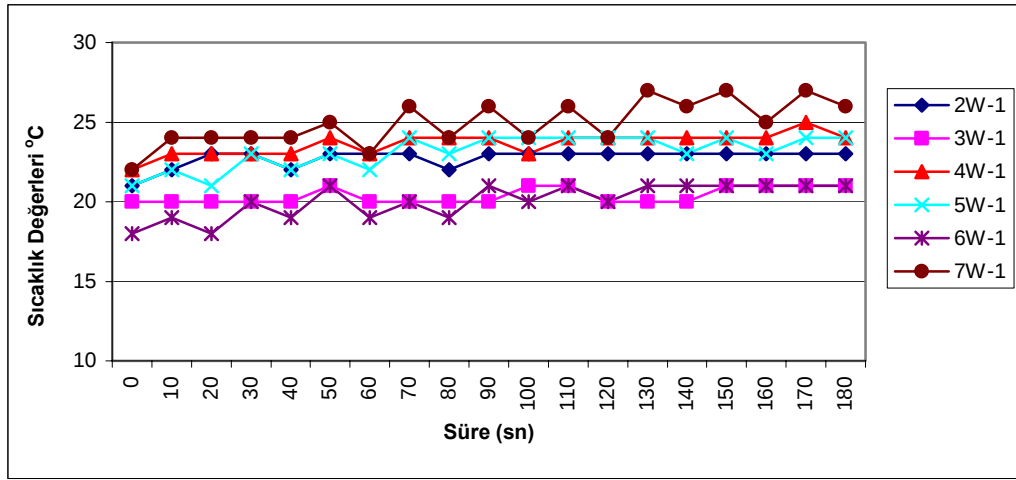
Daha ayrıntılı inceleme yapabilmek adına, Tablo 5.2'deki ölçümlerden aynı laser modu uygulandığında farklı güçlerin 180 sn boyunca oluşturduğu sıcaklık değişimleri incelenmiştir ve grafikleri çizdirilmiştir. Burada da, çizimler Tablo 5.2'deki 1. ölçümlere göre yapılmıştır.

Şekil 5.5, Mod-1, Mod-2 ve Mod-3'ün farklı güçlerle fantoma uygulanmasının oluşturduğu sıcaklık değişimlerini zaman ekseninde göstermektedir. Şekil 5.5 (a)'da Mod-1'in farklı güçlerde uygulanmasının oluşturduğu sıcaklık değişimleri, (b)'de Mod-2'nin farklı güçlerde uygulanması sonucunda oluşan sıcaklık değişimleri, (c)'de ise Mod-3'ün farklı güçlerde oluşturduğu sıcaklık değişimleri zaman ekseninde açıkça gözlenmektedir.

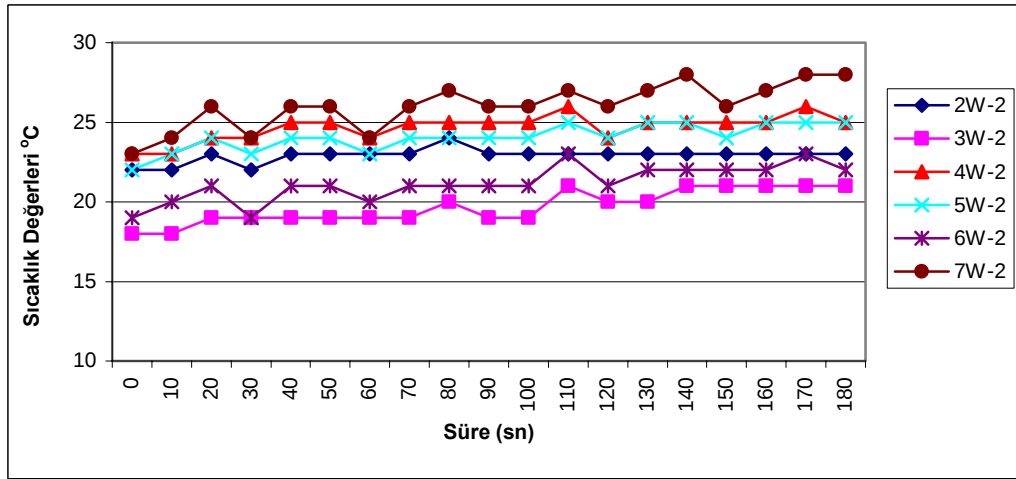
Şekil 5.6 ise Mod-4, Mod-5 ve Mod-6'nın farklı güçlerle uygulanmasının oluşturduğu sıcaklık değişimlerini karşılaştırmak üzere elde edilmiştir. Şekil 5.6 (a)'da Mod-4'ün farklı güçlerde uygulanmasının, (b)'de Mod-5'in farklı güçlerde uygulanmasının, (c)'de ise Mod-6'nın farklı güçlerde uygulanmasının oluşturduğu sıcaklık değişimleri zaman ekseninde 10 sn aralıklarla gösterilmiştir.

Şekil 5.5 ve Şekil 5.6'daki çizimlerden, laser modu sabit tutulduğunda sıcaklık artışının beklendiği üzere uygulanan güç arttıkça arttığı ortaya çıkmaktadır. Bu çizimlerde, laser ışıması başlamadan önce (0. sn'de) ortamın ve dolayısıyla da fantomun sıcaklığının farklı olduğu açığa çıkmaktadır. Bu nedenle, grafiklerdeki sıcaklık artışlarını daha net karşılaştırebilmek için ilk sıcaklık değerinin dikkate alınması gerekmektedir.

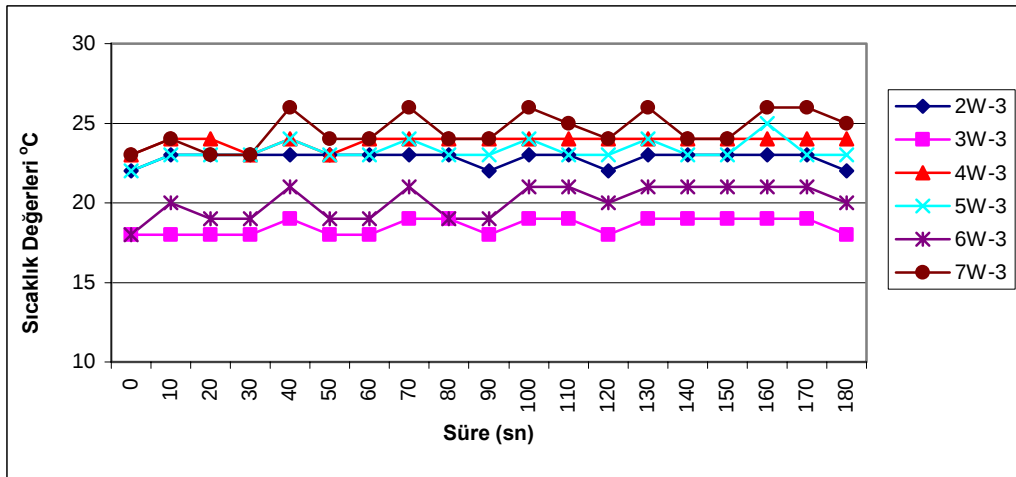
Ayrıca, Şekil 5.5 (b)'de ayrıntılı olarak gösterildiği gibi kızılaltı algılayıcının sıcaklık ölçümlerinin, laser ışımasının uygulanma modunun değişimini izlediği gözlenmektedir. Başka bir ifadeyle, laserin açık olduğu sürelerde sıcaklık artışı, kapalı olduğu sürelerde de sıcaklık azalışı ya da sıcaklıkta herhangi bir değişim gözlenmektedir. 10 sn süreyle ışıma yaptıktan sonra 20 sn kapalı olan Mod-2 kullanılarak alınan sıcaklık ölçümleri bu durumu açıkça göstermektedir.



(a)

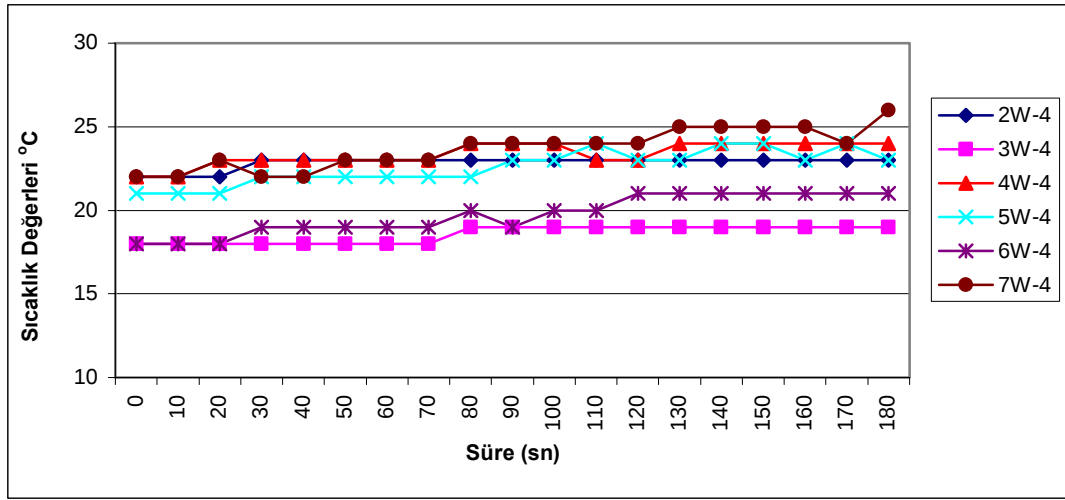


(b)

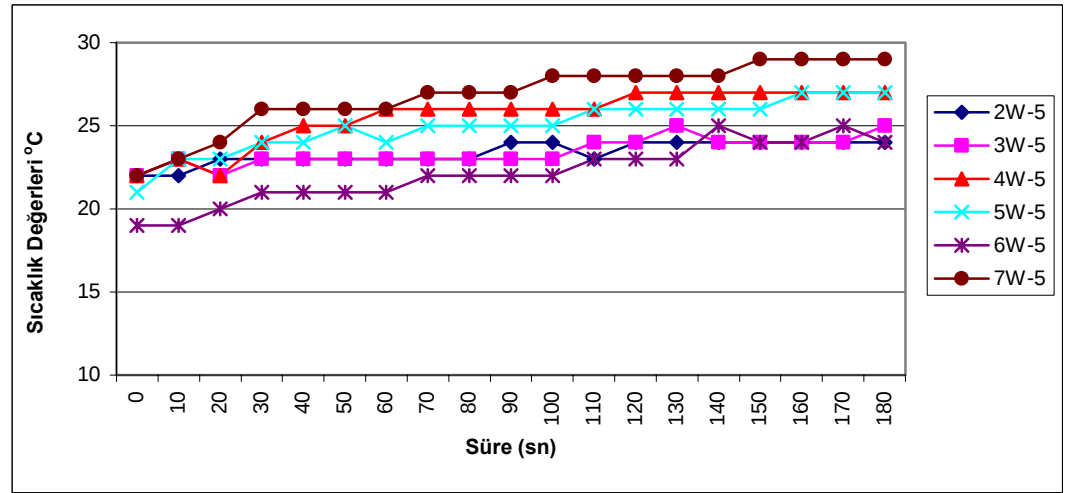


(c)

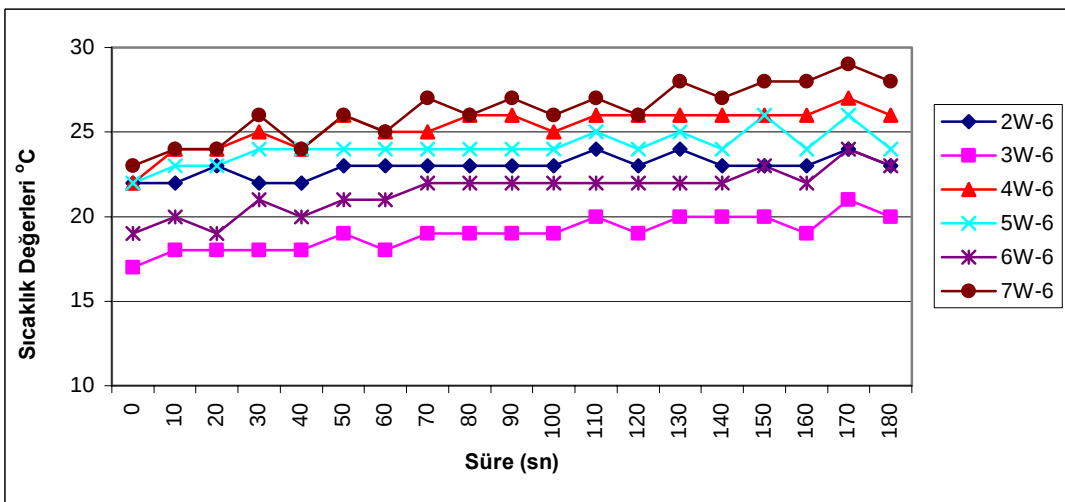
Şekil 5.5: Farklı güçlerin oluşturduğu sıcaklık değişimlerinin zaman ekseninde incelenmesi (a) Mod-1, (b) Mod-2, (c) Mod-3



(a)



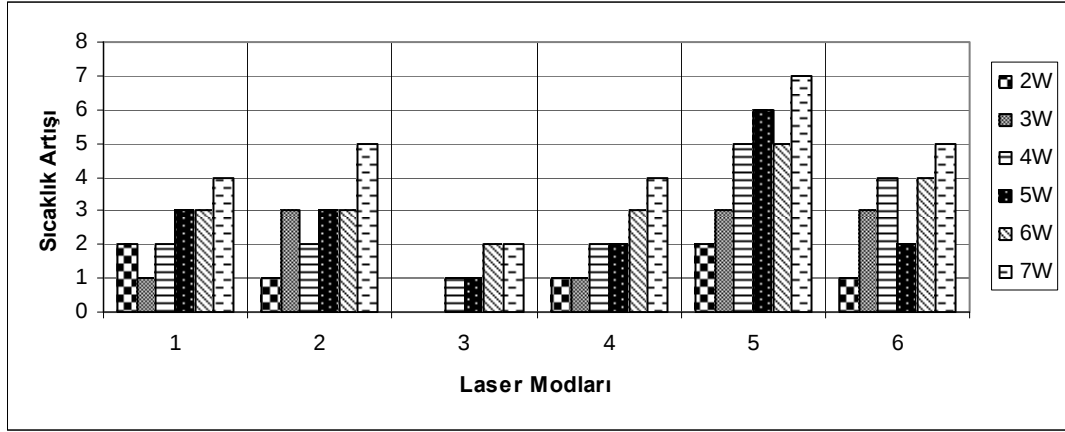
(b)



(c)

Şekil 5.6: Farklı güçlerin oluşturduğu sıcaklık değişimlerinin zaman ekseninde incelenmesi (a) Mod-4, (b) Mod-5, (c) Mod-6

Sonra, Şekil 5.3, 5.4, 5.5 ve 5.6'daki çizimleri daha iyi yorumlayabilmek ve aralarında karşılaştırma yapabilmek için sıcaklık artışlarının sütun grafikleri çizdirilmiştir. Şekil 5.7'de her bir laser modunda farklı güçlerin oluşturduğu sıcaklık artışları verilmektedir. Bu grafikten, sıcaklık artışının aynı modülasyon için güç arttıkça arttığı net biçimde görülmektedir.

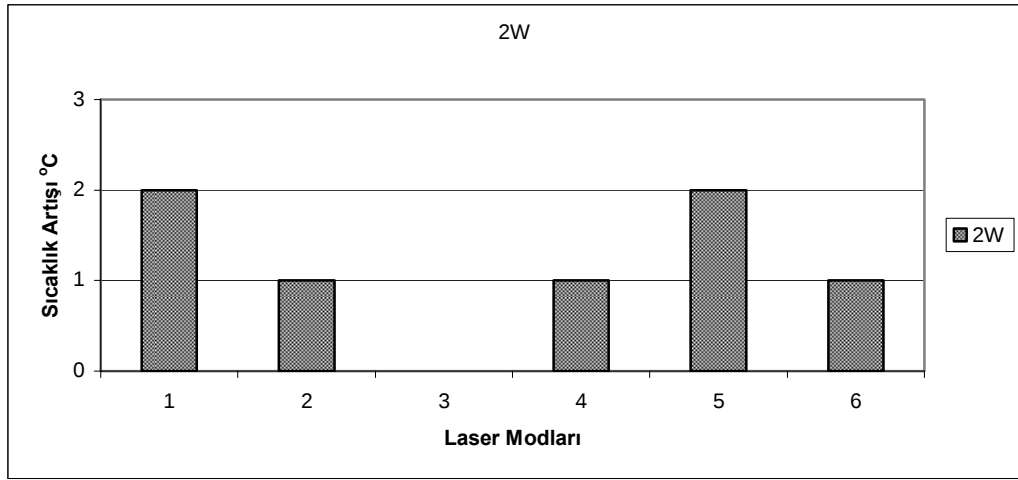


Şekil 5.7: Farklı laser modları ve güçleri için sıcaklık artışı

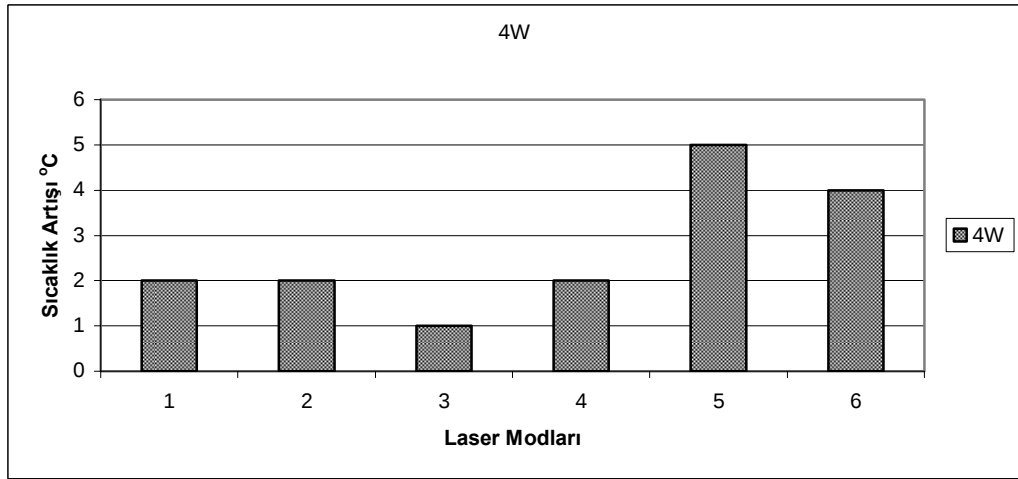
Şekil 5.7'den çıkarılan bir başka sonuç ise Mod-5 ile elde edilen artışların diğer modlara göre fazla olmasıdır. En az artış ise Mod-3 kullanılmasıyla elde edilmiştir. Bir sonraki adımda, her bir güç değerinde farklı laser modülasyonlarının oluşturdukları sıcaklık artışları incelenmiştir.

Şekil 5.8'de 2W, 4W ve 7W güç seviyelerinde farklı modülasyonların kullanılmasıyla oluşan sıcaklık artışlarının sütun grafikleri çizdirilmiştir. Şekil 5.8 (a)'da 2W için her bir laser modunun oluşturduğu sıcaklık artışı, (b)'de 4W için farklı laser modlarının oluşturduğu sıcaklık artışı ve (c)'de 7W için farklı laser modlarında oluşan sıcaklık artışı görülmektedir. Diğer güç değerlerinin farklı modülasyonlarda sıcaklık artışlarını gösteren grafikleri Ek kısmında Şekil A.1'de verilmektedir.

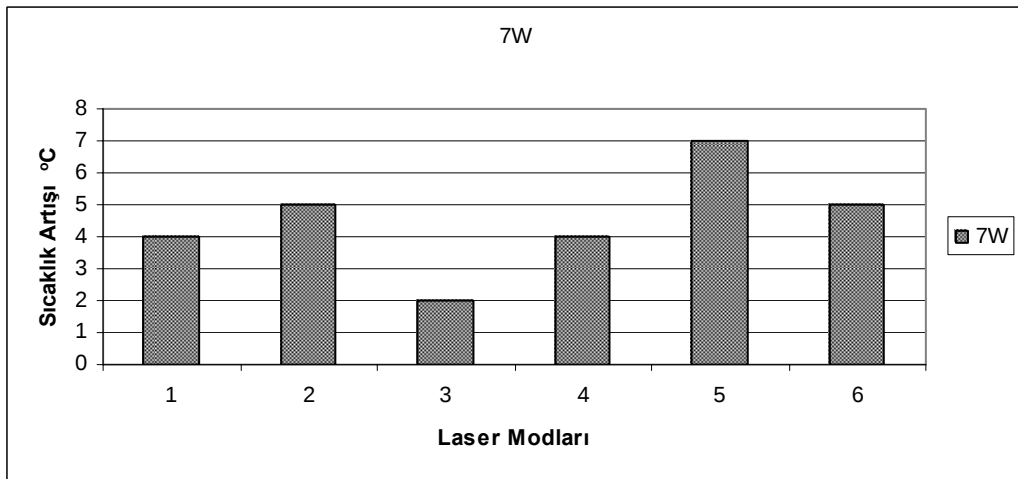
Son olarak da, aynı laser modu kullanıldığında farklı laser güç değerlerinin oluşturduğu artışları karşılaştırmak için grafikler çizdirilmiştir. Şekil 5.9'da Mod-1, Mod-4 ve Mod-6'nın farklı güçlerle uygulanmasının sıcaklık artışını ifade eden grafikleri elde edilmiştir. Diğer modülasyonların grafikleri Ek kısmında Şekil A.2'de gösterilmektedir.



(a)

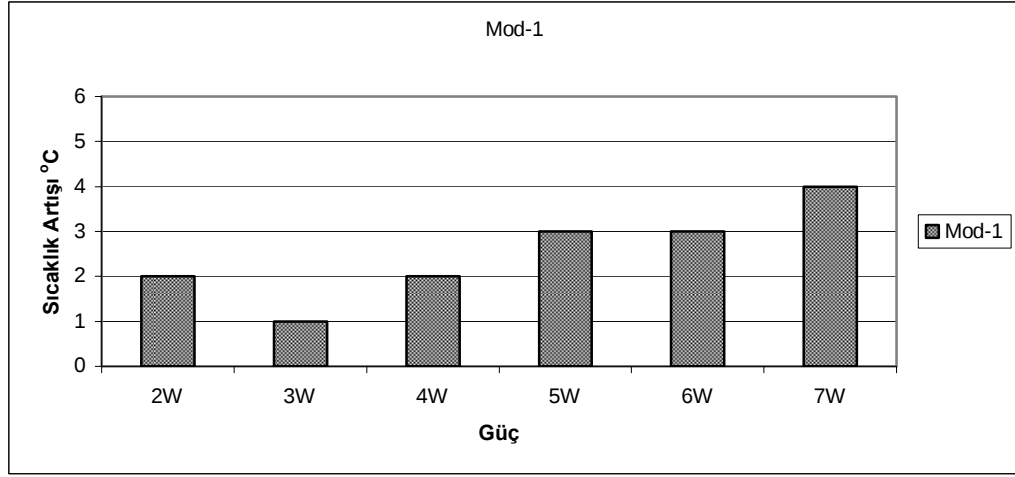


(b)

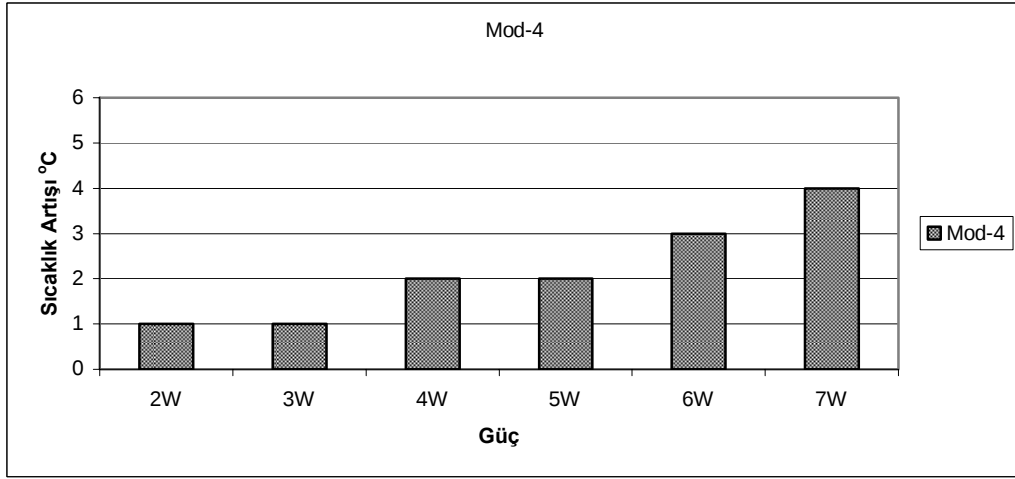


(c)

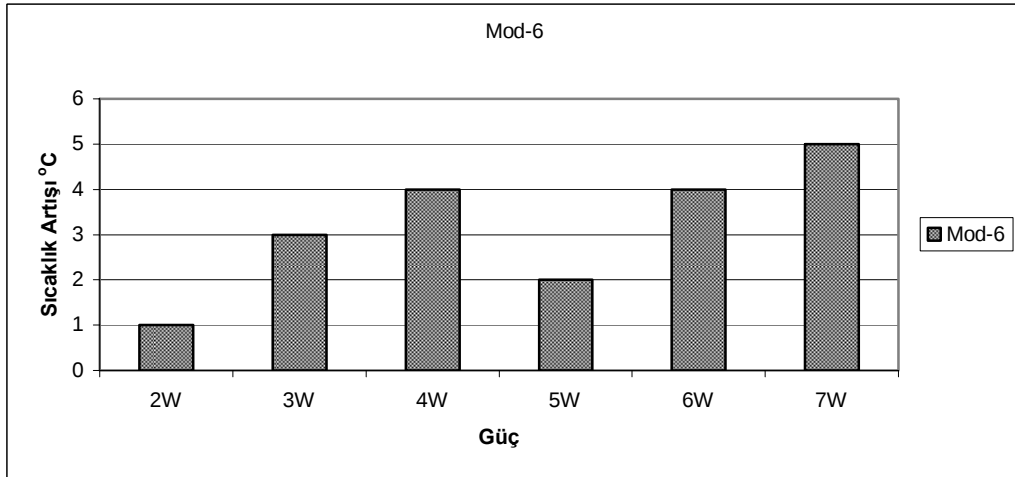
Şekil 5.8: Farklı laser modlarında oluşan sıcaklık artışları
(a) 2W, (b) 4W, (c) 7W



(a)



(b)



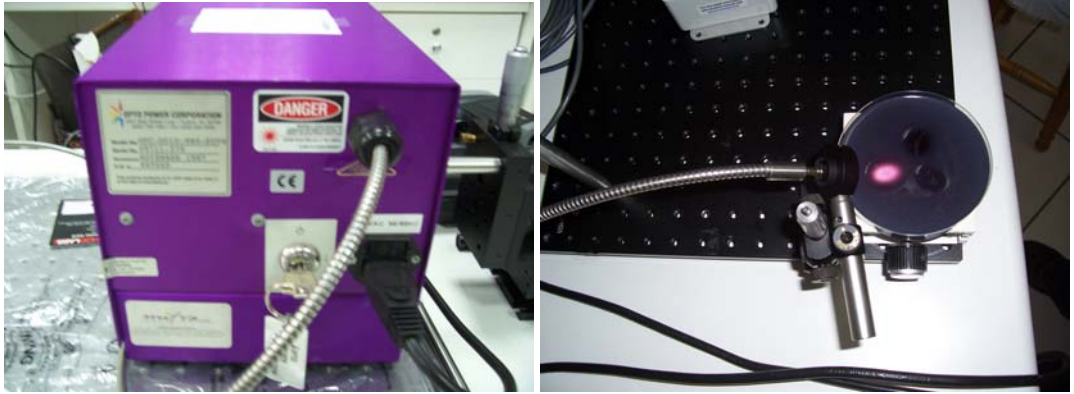
(c)

Şekil 5.9: Farklı laser güçlerinde oluşan sıcaklık artışları
(a) Mod-1, (b) Mod-4, (c) Mod-6

Şekil 5.8'deki grafiklerde aynı laser gücünde en fazla sıcaklık artışının tüm modülasyonlar içinde en fazla Mod-5'de olduğu bir kez daha gözlenmektedir. Ayrıca, bu grafiklerden tüm modülasyonlar içerisinde en az sıcaklık artışının aynı güç değeri için Mod-3'de gözlemlendiği de ortaya çıkmaktadır. Mod-3, 2W değerlerinde ilk ve son sıcaklıklara bakıldığında herhangi bir artışa neden olmazken, 4W için 1 °C'lik, 7W için ise 2 °C'lik artış oluşturmaktadır. Mod-5 ise, 2W'da 2 °C, 4W'da 5 °C, 7W'da 7 °C'lik artışlara neden olmaktadır. Şekil 5.9'da ise Mod-1, Mod-4 ve Mod-6'nın farklı güçlerde uygulanmasını gösteren grafiklerinde, aynı modülasyon tipi kullanıldığında uygulanan laser gücü arttıkça ölçülen sıcaklık artışının arttığı açığa çıkmıştır.

5.2. II. Grup Ölçümler

Bu kısımda, 980-nm diyot laserin çıkışı Şekil 5.12'de gösterildiği gibi SMA bağlayıcı ve optik lif kullanılmaksızın doğrudan fantom üzerinde 1 cm çaplı alana uygulanmıştır ve algılayıcı ile bu bölgedeki sıcaklık değişimi kaydedilmiştir.



Şekil 5.10: II. Grup ölçümlerin yapıldığı deney düzeneği

Fantom, I. Grupta olduğu gibi 4 gr sığır jelatini, 100 ml intralipid-% 10 ve 150 cc siyah dolma kalem mürekkebinden hazırlanmıştır. I. Grup ölçümlerde olduğu gibi 2W-3W-4W-5W-6W-7W güç değerlerinde her bir laser modülasyon tipi ayrı ayrı kullanılarak fantom yüzeyinin 3 dk'lık sıcaklık ölçümleri kaydedilmiştir. Belirlenen laser güç ve modülasyonları kullanılarak toplam 83 ölçüm alınmıştır. Aynı güç değeri ve modülasyon tipi kullanılarak alınan iki ayrı ölçüm sonucu Tablo 5.3'de ilk sıcaklık, son sıcaklık ve oluşan sıcaklık artışları açısından gösterilmiştir.

Tablo 5.3: İki ayrı ölçüm için her bir güç değerinde farklı modülasyonlarla oluşan sıcaklık artışları (a) 2W, (b) 3W, (c) 4W, (d) 5W, (e) 6W, (f) 7W

<u>2W Laser Gücü</u>	İlk sıcaklık °C		Son sıcaklık °C		Sıcaklık artışı °C	
	1. ölçüm	2.ölçüm	1. ölçüm	2.ölçüm	1. ölçüm	2.ölçüm
Mod-1	19	22	24	26	5	4
Mod-2	23	22	29	28	6	6
Mod-3	22	22	26	25	4	3
Mod-4	23	22	28	26	5	4
Mod-5	23	22	33	31	10	8
Mod-6	21	22	27	28	6	6

(a)

<u>3W Laser Gücü</u>	İlk sıcaklık °C		Son sıcaklık °C		Sıcaklık artışı °C	
	1. ölçüm	2.ölçüm	1. ölçüm	2.ölçüm	1. ölçüm	2.ölçüm
Mod-1	19	18	27	26	8	8
Mod-2	21	17	32	26	11	9
Mod-3	22	18	29	23	7	5
Mod-4	22	18	32	27	10	9
Mod-5	18	20	35	38	17	18
Mod-6	22	18	32	30	10	12

(b)

<u>4W Laser Gücü</u>	İlk sıcaklık °C		Son sıcaklık °C		Sıcaklık artışı °C	
	1. ölçüm	2.ölçüm	1. ölçüm	2.ölçüm	1. ölçüm	2.ölçüm
Mod-1	21	18	29	31	8	13
Mod-2	23	19	34	33	11	14
Mod-3	22	19	31	26	9	7
Mod-4	22	18	33	28	11	10
Mod-5	23	18	41	39	18	21
Mod-6	21	18	34	34	13	16

(c)

Tablo 5.3 (devamı): İki ayrı ölçüm için her bir güç değerinde farklı modülasyonlarla oluşan sıcaklık artışları (a) 2W, (b) 3W, (c) 4W, (d) 5W, (e) 6W, (f) 7W

<u>5W Laser Gücü</u>	İlk sıcaklık °C		Son sıcaklık °C		Sıcaklık artışı °C	
	1. ölçüm	2.ölçüm	1. ölçüm	2.ölçüm	1. ölçüm	2.ölçüm
Mod-1	21	18	31	31	10	13
Mod-2	23	18	37	32	14	14
Mod-3	22	19	31	27	9	8
Mod-4	23	18	37	32	14	14
Mod-5	20	21	46	48	26	27
Mod-6	22	18	39	35	17	17

(d)

<u>6W Laser Gücü</u>	İlk sıcaklık °C		Son sıcaklık °C		Sıcaklık artışı °C	
	1. ölçüm	2.ölçüm	1. ölçüm	2.ölçüm	1. ölçüm	2.ölçüm
Mod-1	21	18	34	33	13	15
Mod-2	23	19	38	41	15	22
Mod-3	23	19	34	29	11	10
Mod-4	23	19	36	32	13	13
Mod-5	23	19	53	46	30	27
Mod-6	22	20	39	36	17	16

(e)

<u>7W Laser Gücü</u>	İlk sıcaklık °C		Son sıcaklık °C		Sıcaklık artışı °C	
	1. ölçüm	2.ölçüm	1. ölçüm	2.ölçüm	1. ölçüm	2.ölçüm
Mod-1	21	19	37	35	16	16
Mod-2	23	19	41	38	18	19
Mod-3	22	19	33	30	11	11
Mod-4	23	18	41	37	18	19
Mod-5	21	21	55	57	34	36
Mod-6	22	18	46	46	24	28

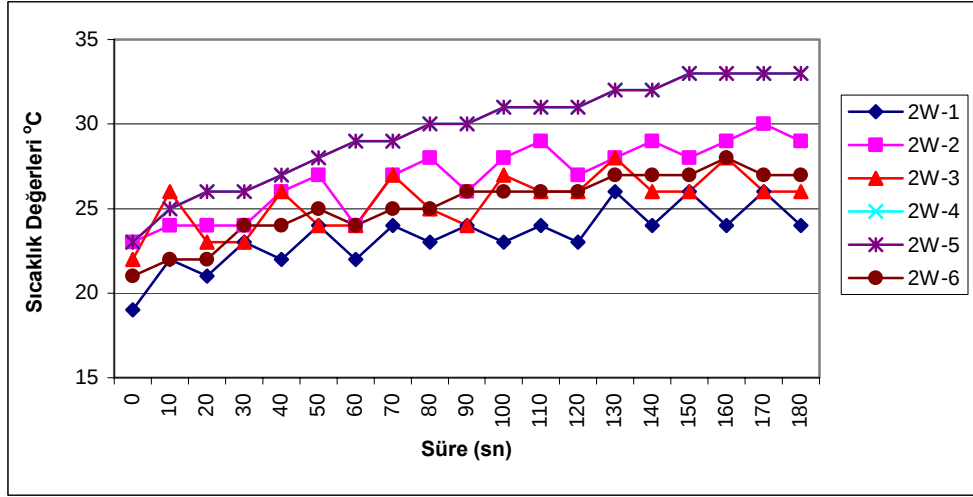
(f)

Tablo 5.3'deki verilerden her bir laser gücü ve modülasyonunun oluşturduğu sıcaklık artışı yapılan iki ayrı ölçüm sonucunda görülmektedir. Tablolardaki her bir güç ve modülasyon tipindeki sıcaklık artışlarını karşılaştırabilmek için I. Grup ölçümlerde olduğu gibi algılayıcı tarafından kaydedilen verilerin Excel'de grafikleri çizdirilmiştir. Burada belirtilmesi gereken nokta, II. Grup ölçümlerinin grafiklerinin de Tablo 5.3'de gösterilen 1. ölçümlere göre çizdirilmiş olmasıdır.

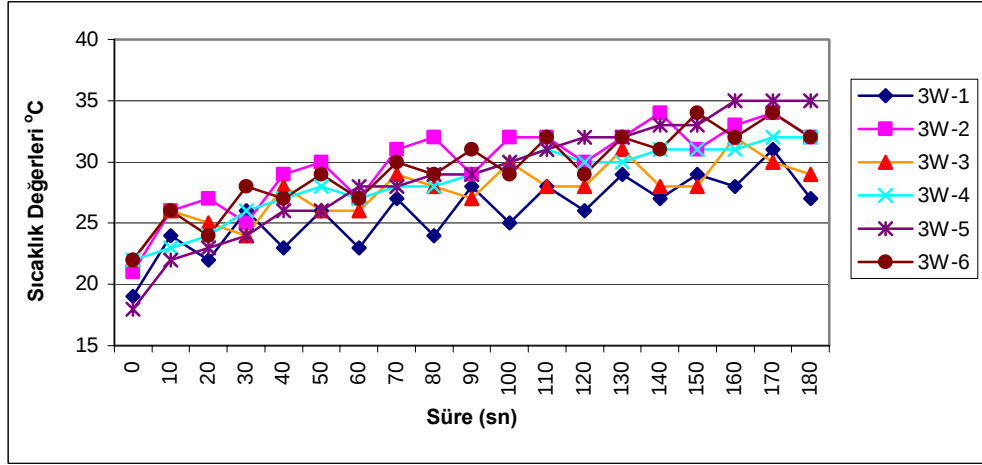
Öncelikle, tanımlanan farklı modülasyonların sıcaklık değişimlerine etkisi incelenmiştir. Buna göre, Şekil 5.11 2W, 3W ve 4W laser güçleri için farklı modülasyonların sıcaklık ölçüm eğrilerinin 180 sn boyunca 10 sn aralıklarla nasıl değiştiğini göstermektedir. Şekil 5.11 (a)'da 2W laser gücünün farklı modülasyonlarla uygulanmasıyla oluşan sıcaklık değişimleri, (b)'de 3W laser gücünün farklı modülasyonlarla uygulanmasıyla oluşan sıcaklık değişimleri ve (c)'de 4W laser gücünün farklı modülasyonlarla uygulanmasıyla oluşan sıcaklık değişimleri gösterilmektedir.

5W, 6W ve 7W laser güçleri için farklı modülasyonların kullanılmasıyla oluşan sıcaklık değişimleri ise Şekil 5.12'de gösterilmektedir. Şekil 5.12(a)'da 5W laser gücünün farklı modülasyonlarla uygulanmasıyla oluşan sıcaklık değişimleri, (b)'de 6W laser gücünün farklı modülasyonlarla uygulanmasıyla oluşan sıcaklık değişimleri ve (c)'de 7W laser gücünün farklı modülasyonlarla uygulanmasıyla oluşan sıcaklık değişimleri gösterilmektedir.

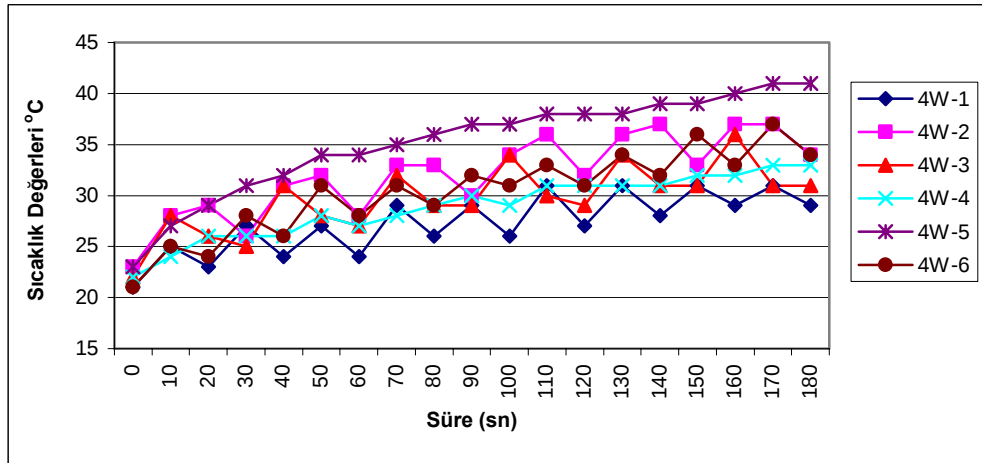
Tablo 5.3'deki sıcaklık ölçüm verilerinden, Şekil 5.11 ve Şekil 5.12'deki aynı güç değerinde farklı modülasyonların karşılaştırılmasını gösteren çizimlerden, laser ısımasının SMA bağlayıcı ve optik lif kullanılmaksızın fantoma aktarıldığı II. Grup ölçümlerde kızılaltı algılayıcı tarafından ölçülen sıcaklık artışlarının, I. Grup ölçümlerden fazla olduğu ortaya çıkmaktadır. Aynı laser gücünde ilk ve son sıcaklıklar baz alındığında en fazla sıcaklık artışının, laserin sürekli dalga durumunda yani Mod-5 kullanılarak uygulanması ile oluştuğu gözlenmektedir. Aynı zamanda, her bir laser güç değerinde en az sıcaklık artışının laserin Mod-3 kullanılarak fantoma aktarılması ile oluştuğu ortaya çıkmaktadır.



(a)

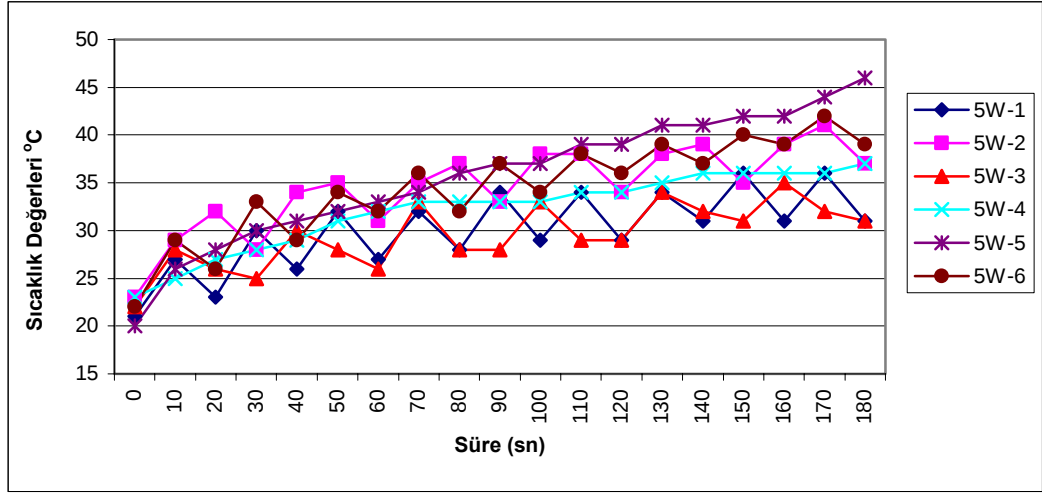


(b)

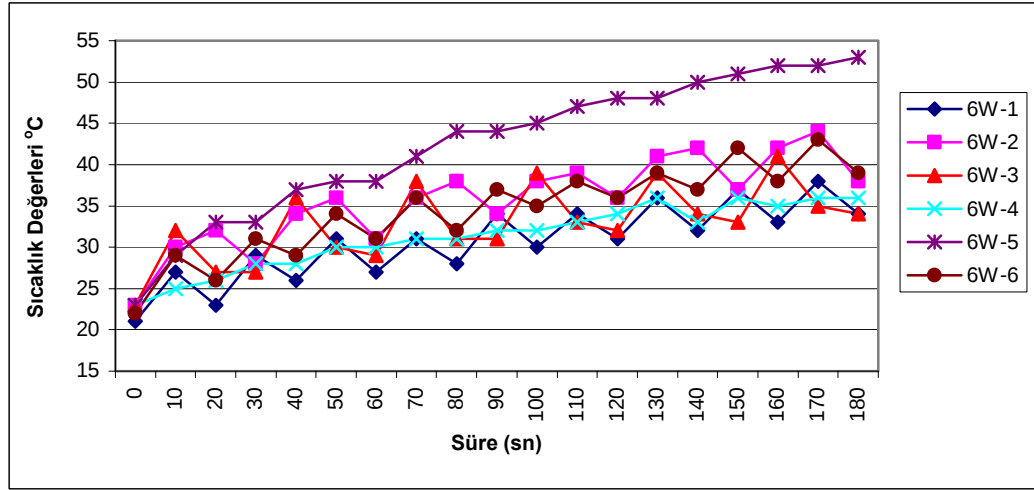


(c)

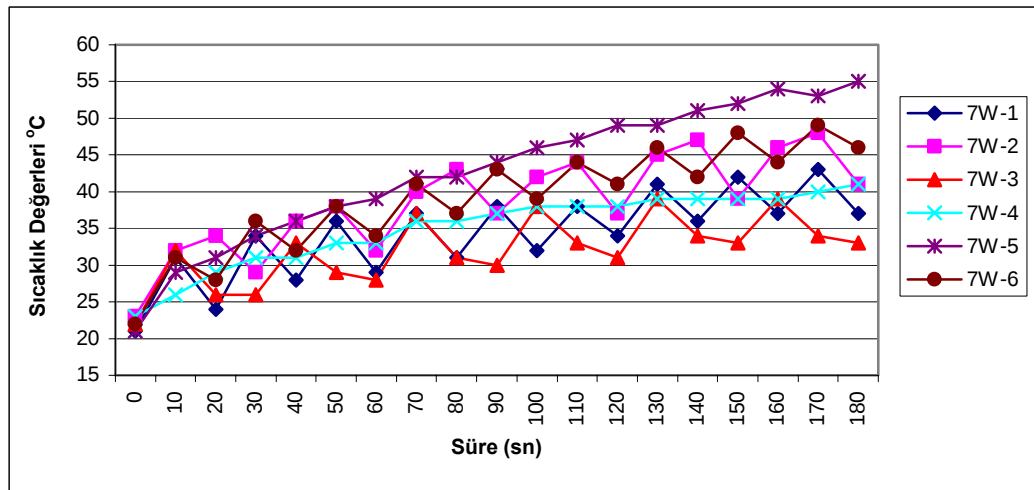
Şekil 5.11: Farklı modülasyonlarda oluşan sıcaklık değişimlerinin zaman ekseninde incelenmesi (a) 2W, (b) 3W, (c) 4W



(a)



(b)



(c)

Şekil 5.12: Farklı modülasyonlarda oluşan sıcaklık değişimlerinin zaman ekseninde incelenmesi (a) 5W, (b) 6W, (c) 7W

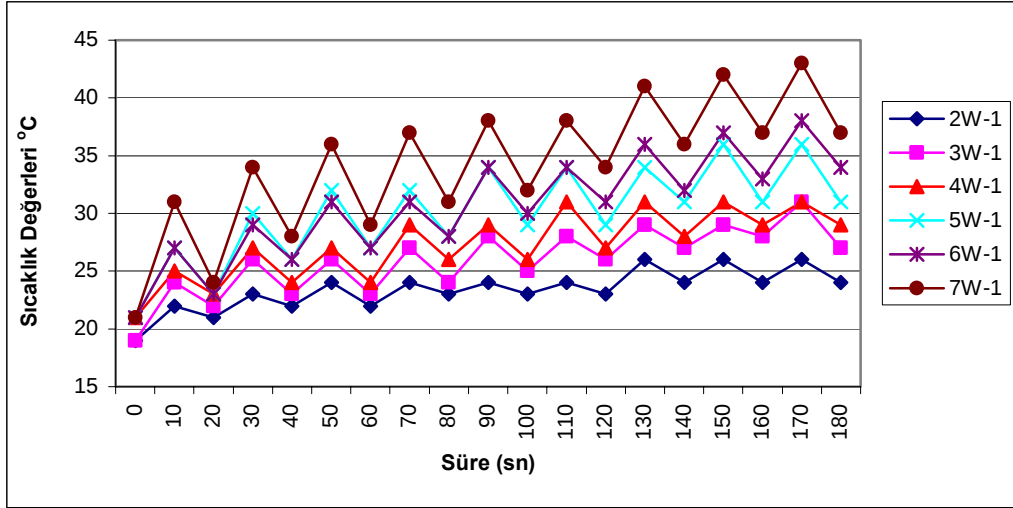
Daha ayrıntılı inceleme yapabilmek için Tablo 5.3'deki ölçümlerden aynı laser modu uygulandığında farklı güçlerin 180 sn boyunca oluşturduğu sıcaklık değişimleri incelenmiştir ve grafikleri çizdirilmiştir. Burada da, çizimler Tablo 5.3'deki 1. ölçümlere göre yapılmıştır.

Şekil 5.13, Mod-1, Mod-2 ve Mod-3'ün farklı güçlerde oluşturdukları sıcaklık değişimlerini zaman ekseninde göstermektedir. Şekil 5.13 (a)'da Mod-1'in farklı güçlerde uygulanmasının oluşturduğu sıcaklık değişimleri, (b)'de Mod-2'nin farklı güçlerde uygulanması sırasında oluşan sıcaklık değişimleri, (c)'de ise Mod-3'ün farklı güçlerde oluşturduğu sıcaklık değişimleri açıkça gözlenmektedir.

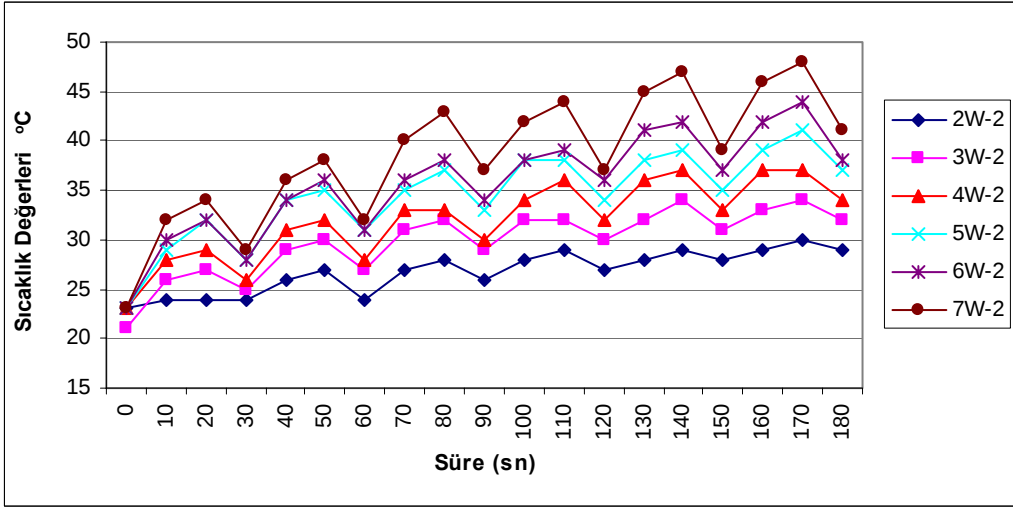
Mod-4, Mod-5 ve Mod-6'nın farklı güçlerle uygulanmasının oluşturduğu sıcaklık değişimlerinin zaman ekseninde değişimi Ek kısmında Şekil A.3'de gösterilmektedir. Şekil A.3 (a)'da Mod-4'ün farklı güçlerde uygulanmasının, (b)'de Mod-5'in farklı güçlerde uygulanmasının, (c)'de ise Mod-6'nın farklı güçlerde uygulanmasının oluşturduğu sıcaklık değişimleri zaman ekseninde 10 sn aralıklarla gösterilmiştir.

Şekil 5.13 ve Şekil A.3'deki çizimlerden, laser modu sabit tutulduğunda sıcaklık artışının beklendiği üzere uygulanan güç arttıkça arttığı ortaya çıkmaktadır. Bu çizimlerde, laser ışıması başlamadan önce (0. sn'de) ortamın ve dolayısıyla da fantomun sıcaklığının farklı olduğu açığa çıkmaktadır. Bu nedenle, grafiklerdeki sıcaklık artışlarını daha net karşılaştırabilmek için ilk sıcaklık değerinin dikkate alınması gerekmektedir.

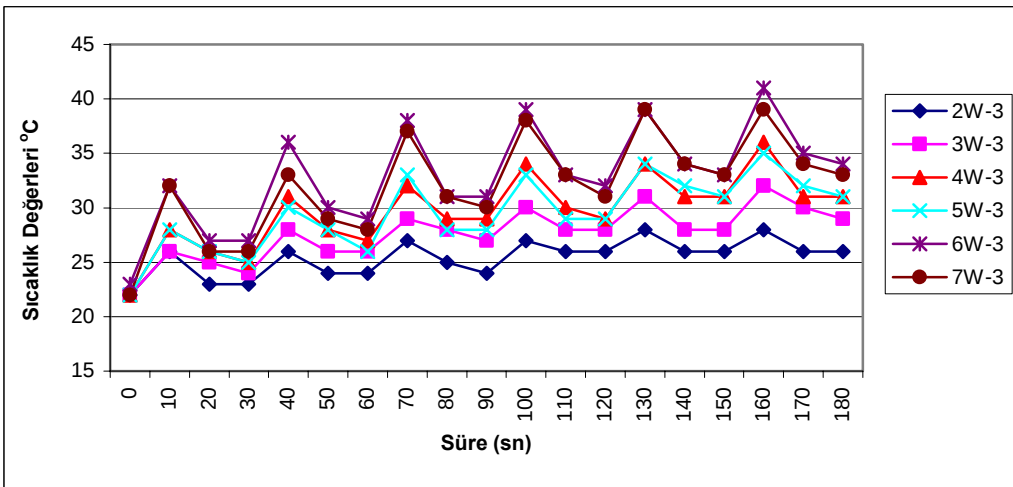
Ayrıca, Şekil 5.13'de ayrıntılı olarak gösterildiği gibi kızılaltı algılayıcının sıcaklık ölçümlerinin, laser ışımasının uygulanma modunun değişimini izlediği gözlenmektedir. Başka bir ifadeyle, laserin açık olduğu sürelerde sıcaklık artışı, kapalı olduğu sürelerde de sıcaklık azalışı ya da sıcaklıkta herhangi bir değişim gözlenmektedir. Şekil 5.13 (a)'da Mod-1'in farklı laser güçleriyle uygulanması sonucunda ölçülen sıcaklık değişimlerinin 10 sn artış, 10 sn azalış şeklinde olduğu, (b)'de Mod-2'nin farklı laser güçleriyle uygulanması sonucunda ölçülen sıcaklık değişimlerinin 20 sn artış, 10 sn azalış şeklinde olduğu, (c)'de ise Mod-3'ün farklı laser güçleriyle uygulanması sonucunda ölçülen sıcaklık değişimlerinin 10 sn artış, 20 sn azalış şeklinde olduğu gözlenmektedir.



(a)



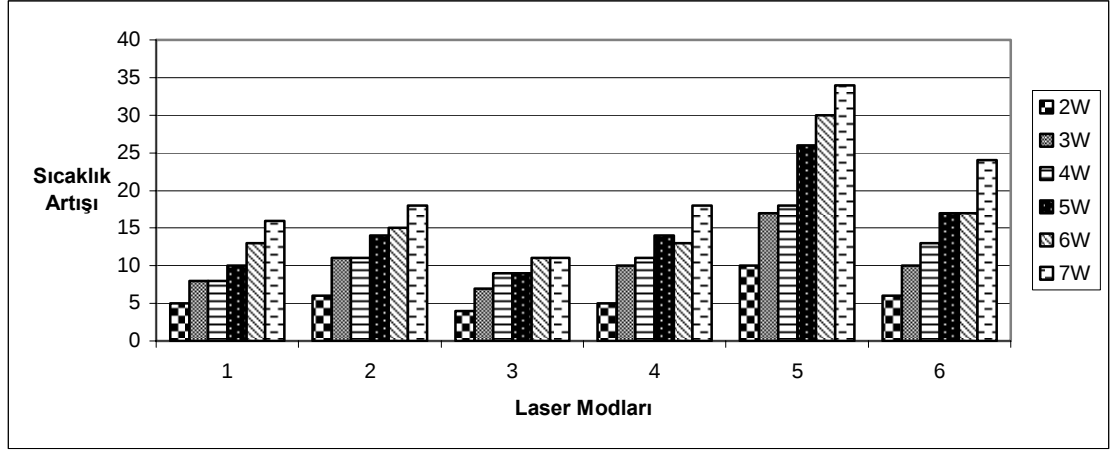
(b)



(c)

Şekil 5.13: Farklı güçlerin oluşturduğu sıcaklık değişimlerinin zaman ekseninde incelenmesi (a) Mod-1, (b) Mod-2, (c) Mod-3

Sonra, Şekil 5.11, 5.12 ve 5.13'deki çizimleri daha iyi yorumlayabilmek ve aralarında karşılaştırma yapabilmek için sıcaklık artışlarının sütun grafikleri çizdirilmiştir. Şekil 5.14'de her bir laser modunda farklı güçlerin oluşturduğu sıcaklık artışları verilmektedir. Bu grafikten, sıcaklık artışının aynı modülasyon için güç arttıkça arttığı net biçimde görülmektedir.



Şekil 5.14: Farklı laser modları ve güçleri için sıcaklık artışı

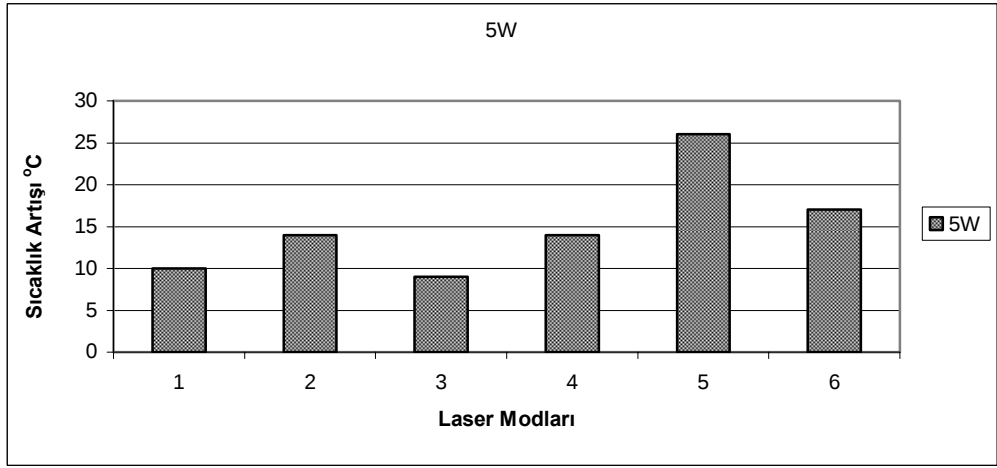
Şekil 5.14'de dikkat edilmesi gereken diğer bir sonuç yine Mod-5'de kaydedilen sıcaklık artışlarının diğer modlardan fazla olduğudur. En az artış ise Mod-3 kullanılmasıyla elde edilmiştir.

Sonra, 3 dk boyunca oluşan sıcaklık artışlarını karşılaştırmak için önce güç değerleri sabit tutulup farklı modülasyonlarda inceleme yapılmıştır. Şekil 5.15'de 3W, 5W ve 6W için sıcaklık artış grafikleri farklı modülasyonlar açısından çizdirilmiştir. Şekil 5.15 (a)'da 3W için her bir laser modunun oluşturduğu sıcaklık artışı, (b)'de 5W için farklı laser modlarının oluşturduğu sıcaklık artışı ve (c)'de 6W için farklı laser modlarında oluşan sıcaklık artışı görülmektedir. Diğer güç değerlerinin farklı modülasyonlarda sıcaklık artışlarını veren grafikleri Ek'lerde Şekil A.4'de gösterilmektedir.

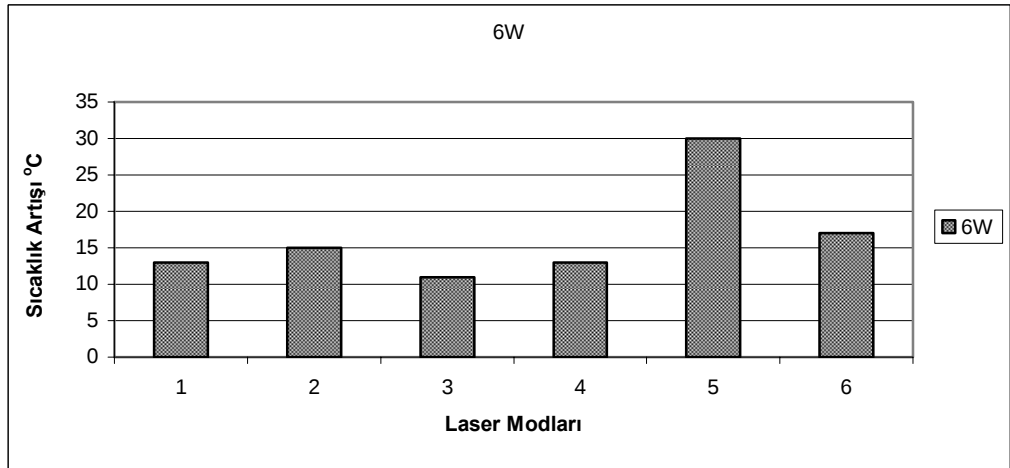
Son olarak da, aynı laser modu kullanıldığında farklı laser güç değerlerinin oluşturduğu artışları karşılaştırmak için grafikler çizdirilmiştir. Şekil 5.16'da Mod-2, Mod-3 ve Mod-5'in farklı güçlerle uygulanmasının sıcaklık artışını ifade eden grafikleri elde edilmiştir. Diğer modülasyonların grafikleri Ek kısmında Şekil A.5'de gösterilmektedir.



(a)

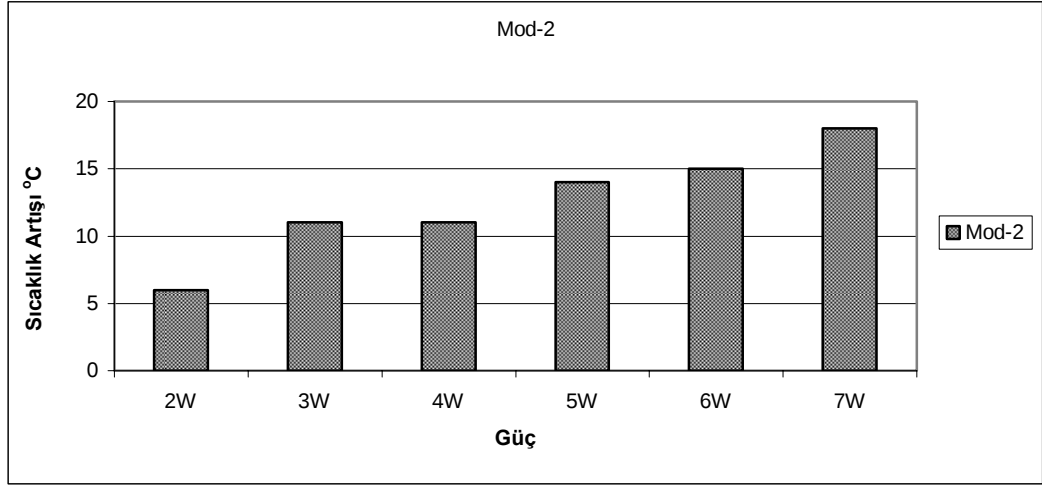


(b)

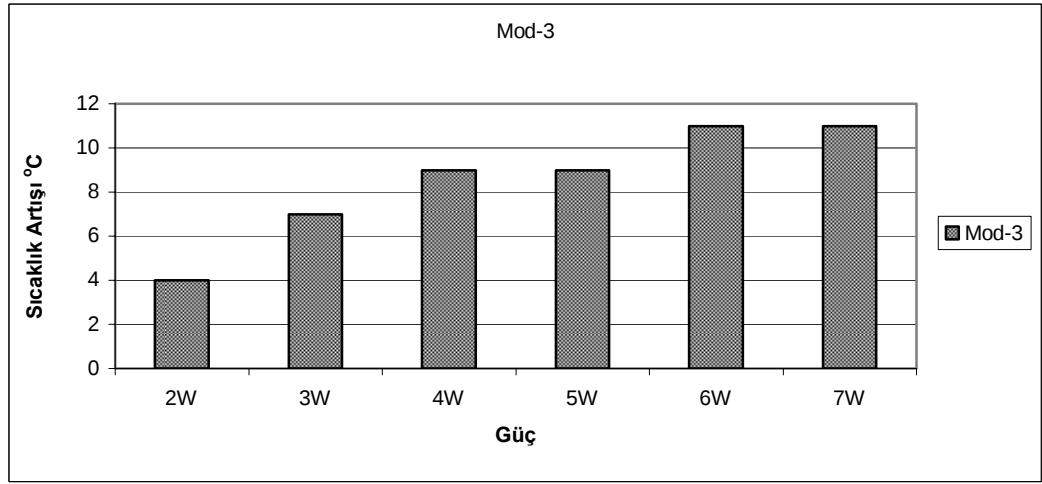


(c)

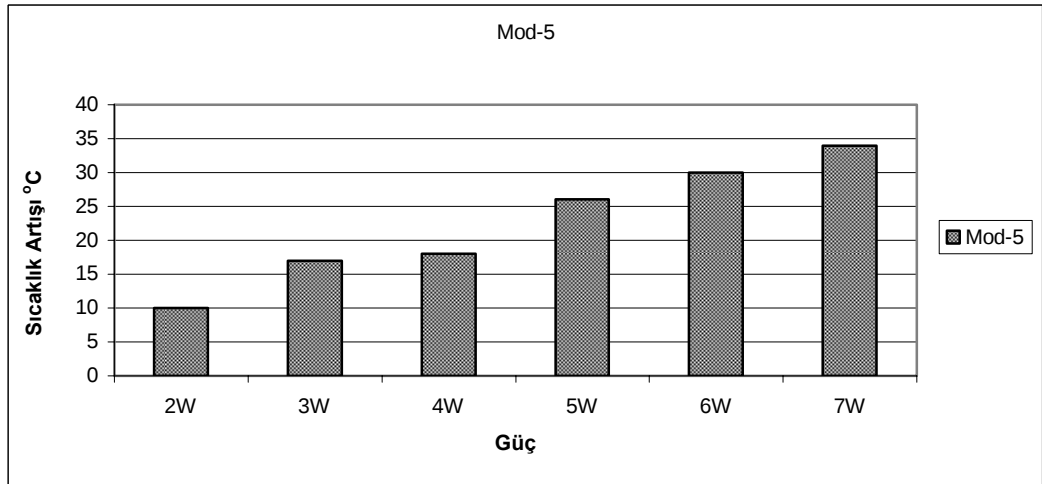
Şekil 5.15: Farklı laser modlarında oluşan sıcaklık artışları
(a) 3W, (b) 5W, (c) 6W



(a)



(b)



(c)

Şekil 5.16: Farklı laser güçlerinde oluşan sıcaklık artışları
(a) Mod-2, (b) Mod-3, (c) Mod-5

Buraya kadar verilen grafiklerdeki sıcaklık artışlarını, modülasyon tipi ve uygulanan laser gücüne göre karşılaştırabilmek için modülasyon tipine bağlı olarak her bir laser gücünün 3 dk boyunca fantoma aktardığı toplam enerji hesaplanmış ve Tablo 5.4’de gösterilmiştir.

Tablo 5.4: Her bir modülasyon tipi ve laser gücü için fantoma aktarılan toplam enerji

Laser Gücü	Enerji (J cm ⁻²)					
	Mod-1	Mod-2	Mod-3	Mod-4	Mod-5	Mod-6
2W	230	306	153	230	459	344
3W	342	456	228	342	684	513
4W	459	612	306	459	918	689
5W	572	763	382	572	1145	859
6W	688	917	459	688	1375	1031
7W	803	1070	535	803	1606	1204

Tablo 5.4’de hesaplanan değerlere bakıldığında her bir güç seviyesinde fantoma aktarılan enerjiler arasında;

1. Mod-1 = Mod-4
2. Mod-6 > Mod-2
3. Mod-2 = 2 x Mod-3
4. Mod-5 = 2 x Mod-1
5. Mod-5 = 2 x Mod-4

ilişkilerinin varlığı gözlenmiştir.

1. Tablo 5.4’de, 3 dk boyunca aynı laser gücü için Mod-1 ve Mod-4’ün fantoma aynı enerjiyi verdiği gözlenmektedir. Bu durumun her iki modda oluşan sıcaklık artışlarına etkisini karşılaştırmak için Tablo 5.5 elde edilmiştir.

Tablo 5.5: Mod-1 ve Mod-4’ün oluşturdukları sıcaklık artışları

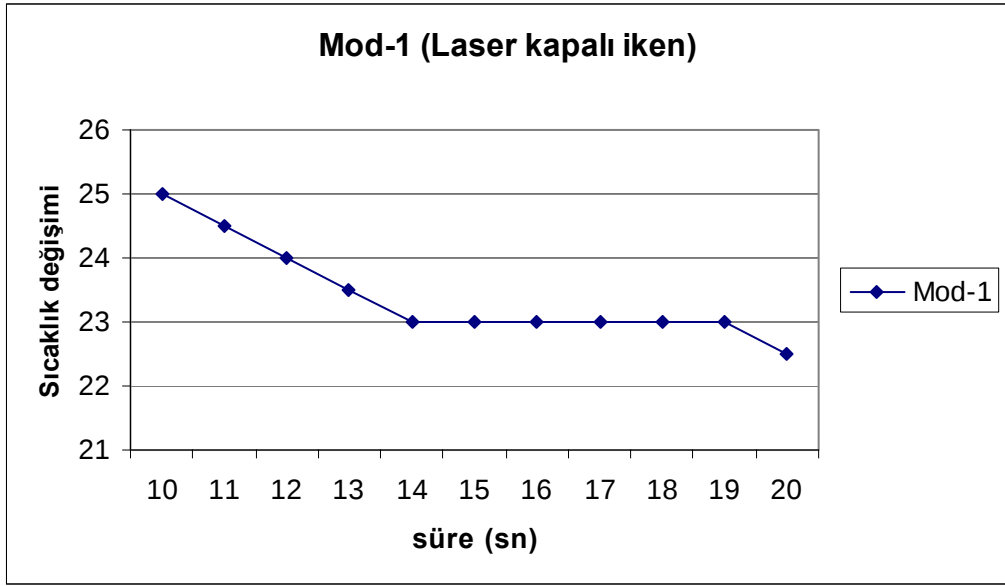
°C Sıcaklık Artışı	I. ölçüm		II. ölçüm	
	Mod-1	Mod-4	Mod-1	Mod-4
2W	5	5	4	4
3W	8	10	8	9
4W	8	11	8	10
5W	10	14	13	14
6W	13	15	15	13
7W	16	18	16	19

Tablo 5.5, 150 cc siyah mürekkep kullanılan II. Grup ölçümlerde iki ayrı ölçümle gözlenen sıcaklık artışlarını karşılaştırmaktadır. Buradan, hem Mod-1’in hem Mod-4’ün 2W laser gücü için aynı sıcaklık artışına neden olduğu gözlenmektedir. Diğer tüm güç değerlerinde ise Mod-4 durumunda Mod-1’e göre daha fazla sıcaklık artışı elde edildiği gözlenmektedir. Bu durumu açıklayabilmek için ısıl gevşeme süreleri Denklem (2.7)’de verilen Biyo-ısı denklemini kullanılarak incelenmiştir.

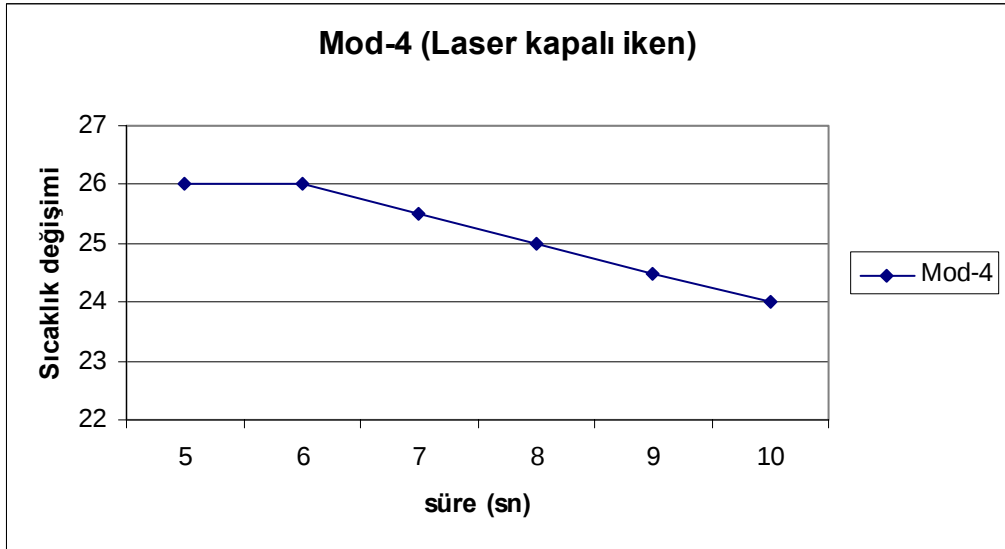
Mod-1 ve Mod-4 uygulanmasıyla elde edilen sıcaklık artışlarını karşılaştırabilmek için Biyo-ısı denkleminin radyal ısı iletimini içeren Denklem (2.9)’daki hali kullanılmıştır. Bilindiği üzere Mod-1, 10 sn laser ışıması yaptıktan sonra 10 sn kapalı konumda beklemektedir. Mod-4 ise 5 sn laser ışımasından sonra 5 sn beklemektedir.

Şekil 5.17, 4W laser gücünde Mod-1 ve Mod-4 kullanımına bağlı olarak, laserin kapalı olduğu zamanda bir sonraki atım gelene kadar gözlenen sıcaklık değişimlerini göstermektedir.

Şekil 5.17’de 4W laser gücünde Mod-1 uygulanması durumunda yeni bir laser darbesi gelene kadar oluşan ısıl gevşemenin, Mod-4 uygulanması durumunda oluşan ısıl gevşemeden daha fazla olduğu gözlenmektedir. Bu durum da Mod-4’ün neden Mod-1’den daha fazla ısı artışı oluşturduğunu açıklamaktadır. Çünkü Mod-4’de atım daha sık uygulanmakta ve ısıl gevşeme Mod-1’e göre daha az olmaktadır.



(a)



(b)

Şekil 5.17: 4W laser gücünde laser kapalı iken ısıl gevşemelerin gösterimi
(a) Mod-1, (b) Mod-4

Ayrıca, bu grafiklerde gözlenen sonuçlar Mod-1 ve Mod-4 uygulanması durumunda ölçülen en yüksek sıcaklıklarda da açığa çıkmaktadır. Tablo 5.6, aynı laser gücü için Mod-4'ün uygulanması durumunda Mod-1'e göre daha yüksek sıcaklıkların ölçüldüğünü göstermektedir.

Tablo 5.6: II. Grup ölçümler için Mod-1 ve Mod-4'ün her bir güç değerinde karşılaştırılması (a) İlk ve max. sıcaklıklar, (b) İlk ve max. sıcaklık arasındaki fark

Sıcaklık(°C)	Mod-1		Mod-4	
	İlk sıcaklık	Max sıcaklık	İlk sıcaklık	Max sıcaklık
2W	19	26	23	29
3W	19	31	22	35
4W	21	32	22	36
5W	21	36	23	37
6W	21	38	18	33
7W	21	44	23	48

(a)

Sıcaklık Farkı (°C)	Mod-1	Mod-4
2W	7	6
3W	12	13
4W	11	14
5W	15	17
6W	17	18
7W	23	25

(b)

Tablo 5.6 (a)'dan aynı laser gücünde Mod-1 veya Mod-4 kullanılımasının ölçülen en yüksek sıcaklıklara nasıl yansıdığı açığa çıkmaktadır. Laser ışıması Mod-4 kullanılarak yapıldığında, fantom yüzeyinde ısı gevşeme daha az olduğundan daha yüksek sıcaklıklara ulaşılmıştır. Buna karşın, Mod-1 kullanılarak aynı laser gücünde yapılan ışımalarda en yüksek sıcaklık olarak alınan daha düşük değerlere ulaşıldığı gözlenmektedir. Tablo 5.6 (b)'de ise her iki modun ulaştığı en yüksek sıcaklığın kaydedilen ilk sıcaklıktan farkı gözlenmektedir.

2. Tablo 5.4'deki enerji hesaplamalarından, yakın olmakla birlikte Mod-6'da Mod-2'ye göre 1.125 kat daha fazla enerjinin fantoma aktarıldığını görülmektedir. Bu durumun sıcaklık artışlarını nasıl etkilediği Tablo 5.7'de verilmektedir.

Tablo 5.7: Mod-6 ve Mod-2'nin oluşturdukları sıcaklık artışları ve oranları

II. Grup ölçümler	Mod-2		Mod-6		Mod-6 / Mod-2	
	Sıcaklık artışı °C		Sıcaklık artışı °C		Sıcaklık artış oranı	
	1. ölçüm	2. ölçüm	1. ölçüm	2. ölçüm	1. ölçüm	2. ölçüm
2W	6	6	6	6	1	1
3W	11	9	10	12	-	1.33
4W	11	12	13	16	1.18	1.33
5W	14	14	17	17	1.2	1.2
6W	15	16	17	16	1.1	1
7W	18	19	24	28	1.33	1.5

Tablo 5.7'den 3 dk boyunca Mod-6'da Mod-2'ye göre 1.125 kat fazla enerjinin uygulanmasının her iki modun oluşturduğu sıcaklık artışlarına da yansıdığı ortaya çıkmaktadır. 2W hariç diğer güçlerde Mod-6'nın Mod-2'ye göre daha fazla sıcaklık artışı oluşturduğu gözlenmektedir. Ayrıca Tablo'da Mod-6 / Mod-2 olarak her bir güç değerinde Mod-6'daki sıcaklık artışının Mod-2'deki sıcaklık artışına oranı iki ayrı ölçüm için verilmektedir ve burada enerjiler arasındaki oranın sıcaklık artışları arasındaki oranla yakınlığı anlaşılmaktadır.

3. Tablo 5.4'deki enerji hesaplamalarından Mod-2 kullanılarak fantoma aktarılan toplam enerjinin Mod-3 kullanılarak aktarılan enerjiden 2 kat fazla olduğu ortaya çıkmaktadır. Bu durumun sıcaklık artışlarına nasıl yansıdığını incelemek için Tablo 5.8 elde edilmiştir. Beklendiği üzere, Mod-2'nin Mod-3'e göre fantoma daha fazla enerji aktarması sıcaklık artışlarına da yansımıştır. Tablo 5.8'de Mod-2 / Mod-3 olarak her bir güç değerinde Mod-2'deki sıcaklık artışının Mod-3'deki sıcaklık artışına oranı iki ayrı ölçüme göre gösterilmektedir.

Tablo 5.8: Mod-2 ve Mod-3'ün oluşturdukları sıcaklık artışları ve oranları

II. Grup ölçümler	Mod-2 Sıcaklık artışı °C		Mod-3 Sıcaklık artışı °C		Mod-2 / Mod-3 Sıcaklık artış oranı	
	1. ölçüm	2. ölçüm	1. ölçüm	2. ölçüm	1. ölçüm	2. ölçüm
2W	6	6	4	3	1.5	2
3W	11	9	7	5	1.5	1.8
4W	14	12	9	7	1.5	1.7
5W	14	14	9	8	1.5	1.7
6W	15	16	11	10	1.4	1.6
7W	18	19	11	11	1.6	1.7

4. Tablo 5.4'deki enerji hesaplamalarından 3 dk boyunca Mod-5'in fantoma aktardığı enerjinin Mod-1'in aktardığı enerjiden 2 kat fazla olduğu ortaya çıkmaktadır.

Tablo 5.9: Mod-1 ve Mod-5'in oluşturdukları sıcaklık artışları ve oranları

II. Grup ölçümler	Mod-1 Sıcaklık artışı °C		Mod-5 Sıcaklık artışı °C		Mod-5 / Mod-1 Sıcaklık artış oranı	
	1. ölçüm	2. ölçüm	1. ölçüm	2. ölçüm	1. ölçüm	2. ölçüm
2W	5	4	10	9	2	2.25
3W	8	8	17	18	2.1	2.25
4W	8	8	18	20	2.25	2.5
5W	10	13	26	27	2.6	2.1
6W	13	15	30	27	2.3	1.8
7W	16	16	34	36	2.1	2.25

Beklendiği üzere, Mod-5'in Mod-1'e göre fantoma 2 kat fazla enerji aktarması sıcaklık artışlarına da yansımıştır. Tablo 5.9'da Mod-5 / Mod-1 olarak her bir güç değeriinde Mod-5'deki sıcaklık artışının Mod-1'deki sıcaklık artışına oranı değersel olarak iki ayrı ölçüme göre gösterilmektedir.

5. Aynı zamanda, Tablo 5.4'deki enerji hesaplamalarından 3 dk boyunca Mod-5'in fantoma aktardığı enerjinin Mod-4'ün aktardığı enerjiden 2 kat fazla olduğu ortaya çıkmaktadır.

Tablo 5.10: Mod-4 ve Mod-5'in oluşturdukları sıcaklık artışları ve oranları

II. Grup ölçümler	Mod-4		Mod-5		Mod-5 / Mod-4	
	Sıcaklık artışı °C		Sıcaklık artışı °C		Sıcaklık artış oranı	
	1. ölçüm	2. ölçüm	1. ölçüm	2. ölçüm	1. ölçüm	2. ölçüm
2W	5	4	10	9	2	2.25
3W	10	9	17	18	1.7	2
4W	12	10	18	20	1.5	2
5W	14	14	26	27	1.8	1.9
6W	13	13	30	27	2.3	2.1
7W	18	19	34	36	1.9	1.9

Beklendiği gibi, Mod-5'in Mod-4'e göre fantoma 2 kat fazla enerji aktarması sıcaklık artışlarına da yansımıştır. Tablo 5.10'da Mod-5 / Mod-4 olarak her bir güç değeriinde Mod-5'deki sıcaklık artışının Mod-4'deki sıcaklık artışına oranı değersel olarak iki ayrı ölçüm için gösterilmektedir.

Bir sonraki adımda, her bir modülasyon tipinde uygulanan güçler arasındaki oranın, bu güçlerin oluşturdukları sıcaklık artışları arasındaki orana etkisi incelenmiştir ve bunun için Tablo 5.11 elde edilmiştir. Aslında, burada yapıldığı gibi sıcaklık artışları arasında oran vermek pek rastlanan bir durum değildir, yalnızca sonuçları yorumlamak için yapılmıştır. Örneğin, Mod-1 kullanılması durumunda 2W laser gücü fantom yüzeyinde 5 °C sıcaklık artışı oluştururken, 7W 16 °C sıcaklık artışı oluşturmaktadır. Aynı laser modu kullanılan bu durumlarda uygulanan güçler arasındaki oranın 3.5 olduğu, bu iki ayrı laser gücünün aynı süre sonucunda oluşturdukları sıcaklık artışları arasındaki oranın ise $16 / 5 = 3.2$ olduğu gözlenmektedir. Tablo 5.11, böylece güç değeriilerinin ve bu güç değeriilerinde oluşan sıcaklık artışlarının oranlanmasıyla elde edilmiştir. Tablo 5.11, sonuçta her bir modülasyonda güçler arasındaki oranın ölçüm sonuçlarındaki sıcaklık artışları arasındaki oranla paralel olduğunu göstermektedir. Bu da uyguladığımız laser güçleri arasındaki orana bakarak, ölçeceğimiz sıcaklık artışını önceden kestirebilme olanağı sağladığından önemli bulunmaktadır.

Tablo 5.11: Uygulanan laser güçleri ve ölçülen sıcaklık artışlarının oranlanması

Güç oranı	Sıcaklık artışı oranı					
	Mod-1	Mod-2	Mod-3	Mod-4	Mod-5	Mod-6
$7W/2W= 3.5$	3.2	3.2	3.6	3.6	3.4	3.5
$7W/3W= 2.3$	2	2.1	2.2	2.1	2	2.3
$7W/4W=1.75$	2	1.6	1.6	1.9	1.8	1.75
$7W/5W= 1.4$	1.6	1.3	1.4	1.4	1.3	1.4
$7W/6W= 1.2$	1.2	1.2	1.1	1.2	1.1	1.4
$6W/2W= 3$	2.6	2.6	3.3	2.6	3	2.8
$6W/3W= 2$	1.8	1.4	2	1.7	1.8	1.7
$6W/4W= 1.5$	1.6	1.4	1.4	1.5	1.4	1.3
$6W/5W= 1.2$	1.3	1.1	1.25	1.1	1.1	1
$5W/2W= 2.5$	2	2.3	2.6	2.8	2.6	2.8
$5W/3W= 1.6$	1.6	1.5	1.6	1.5	1.5	1.7
$5W/4W= 1.2$	1.2	1.3	1.2	1.2	1.3	1.3
$4W/2W= 2$	2	2	2.3	2.4	2.2	2
$4W/3W= 1.3$	1	1.3	1.3	1.2	1.1	1.3
$3W/2W= 1.5$	1.6	1.5	1.6	2	1.7	1.5

Bilindiği gibi laser ışıması sürekli modda uygulanabileceği gibi modüle edilerek de dokuya aktarılabilir. Belirli modülasyonlarla enerjinin dokuya ulaştırılması, laserin kapalı olduğu zaman aralıklarında dokunun sıcaklık açısından gevşemeye girmesine neden olur. Böylelikle atımlı uygulamalarda hedef alanın çevresinde sıcaklık artışı en aza indirgenmiş ve ısı haraplaması azaltılmış olur. Bu çalışmada, 980-nm diyot laser, ısı-ısı etkileşim derecesini belirlemek için farklı güç düzeyleri ve uygulama modülasyonlarıyla kullanmıştır. Sonuçta, fantoma toplamda eşit miktarda enerji veren farklı laser güç ve modülasyonları hem sıcaklık artışları hem de etkiledikleri alanlar açısından karşılaştırılarak daha az ısı haraplaması yapan parametreler belirlenmiştir. Tablo 5.4'deki enerji hesaplamalarına bakıldığında, bazı laser modülasyonu ve güçlerinde fantoma teorikde aynı enerjinin verildiği gözlenmektedir. Aynı enerjileri veren bu modülasyon ve güç değerlerinin sıcaklık artışlarını karşılaştırmak için Tablo 5.12 elde edilmiştir.

Tablo 5.12: Farklı güç ve modülasyonlarla aynı enerjiyi fantoma aktaran ölçümlerin sıcaklık artışları cinsinden karşılaştırılması

Enerji (J cm ⁻²)	Laser gücü - modu	Sıcaklık artışı (°C)	
		1. ölçüm	2. ölçüm
230	2W-1	5	4
	2W-4	5	4
	3W-3	7	5
306	2W-2	6	6
	4W-3	9	7
342	3W-1	8	8
	3W-4	10	9
	2W-6	6	8
459	4W-1	8	8
	4W-4	12	10
	3W-2	11	9
	6W-3	11	10
	2W-5	11	9
688	6W-1	13	15
	6W-4	13	13
	3W-5	17	18
	4W-6	13	16
917	6W-2	15	16
	4W-5	18	20

Tablo 5.12’de 2W-1, 2W-4 ve 3W-3 uygulanması durumunda fantoma aynı enerjinin verildiği ortaya çıkmaktadır. 2W için Mod-1 veya Mod-4 kullanılması aynı sıcaklık artışlarına neden olurken, 3W en düşük enerji veren modülasyonla uygulanmasına rağmen daha fazla artışa neden olmaktadır. Burada, laseri daha uzun süre uygulamak yerine Mod-3 kullanmanın uygun olabileceği anlaşılmaktadır. İkinci olarak, aynı enerjiyi fantoma aktaran 2W-2 ve 4W-3 uygulanmasının sıcaklık artışlarına etkisi görülmektedir. 2W-2 6 °C’lik artışa neden olurken, 4W-3 uygulanması 9 °C’lik sıcaklık artışı oluşturmuştur. Buradan da, laserin Mod-3 kullanılarak ve güç artırılarak uygulanabileceği anlaşılmaktadır. Benzer biçimde, 3W-1, 3W-4 ve 2W-6

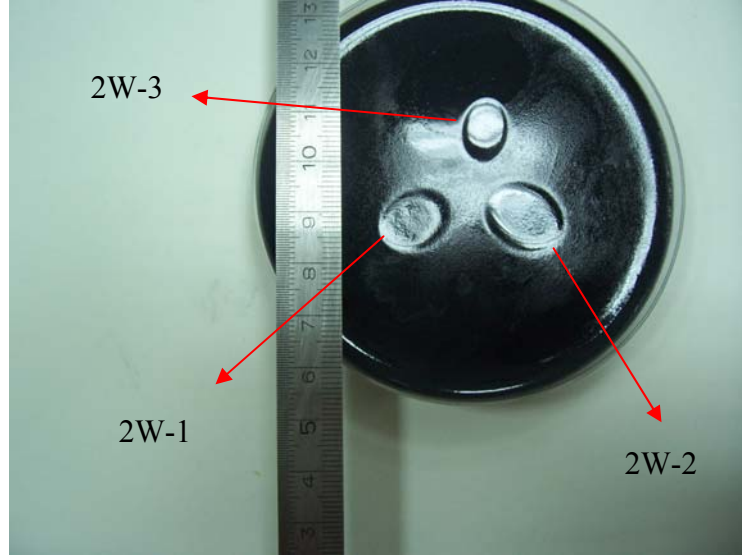
toplamda (zamana yayılı olarak) fantoma aynı miktarda enerji vermektedir. Ancak 3W-4 10 °C'lık, 2W-6 ise 6 °C'lık sıcaklık artışı oluşturmuştur. Bu durum da, laserin daha kısa süreli atımlarla ve daha sık uygulanmasının daha yüksek artış oluşturduğu açığa çıkmaktadır. Son olarak da, 6W-2 ve 4W-5'in fantoma eşit miktarda enerji verdiği hesaplanmıştır. Özellikle, sürekli laser ışığının tercih edilmemesinden dolayı laser gücü değiştirilmeden Mod-6'nın kullanılması dokuya daha az zarar verecek ve 6W-2'de görülene yakın bir sıcaklık artışı elde edilebilecektir. Böylece farklı laser güçleri ve modülasyonlarının oluşturdukları sıcaklık artışlarına bakılarak en uygun laser parametrelerinin belirlenebileceği anlaşılmaktadır.

Son olarak II. Grup ölçümlerde farklı laser güçleri ve modülasyonlarının fantom üzerinde oluşturdukları fiziksel etkiler incelenmiştir. Şekil 5.18, 6W laser gücünün Mod-1, Mod-2 ve Mod-3 kullanılarak uygulanmasının fantom üzerindeki etkisini göstermektedir.

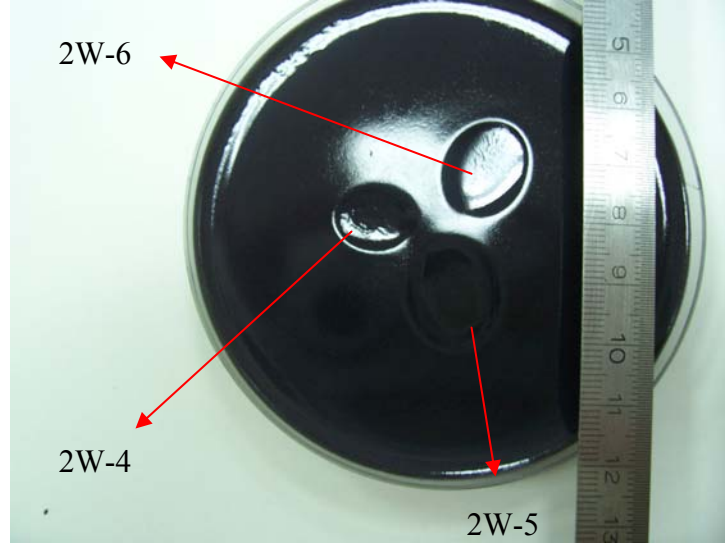


Şekil 5.18: Fantom yüzeyinde 6W uygulanmasıyla oluşan fiziksel alanların karşılaştırılması (Mod-1, Mod-2, Mod-3)

Şekil 5.19'da, 2W laser ışması sonucunda her bir modülasyon tipinde fantom üzerinde etkilenen alanlar karşılaştırılabilmektedir. Oluşan bu alanların büyüklüğü uygulanan laser modlarına bağlı olarak değişmektedir. Örneğin, 2W-3 olarak gösterilen ve 2W'ın Mod-3 kullanılarak uygulanması durumunda en az alan etkilenmektedir. En büyük ısıl haraplama ise Mod-5 kullanılması durumunda ortaya çıkmaktadır. Benzer olarak, 4W laser gücünün farklı modülasyonlarla uygulanması sonucunda fantom üzerinde oluşan alanlar Ek'lerde Şekil A.6'da gösterilmektedir.



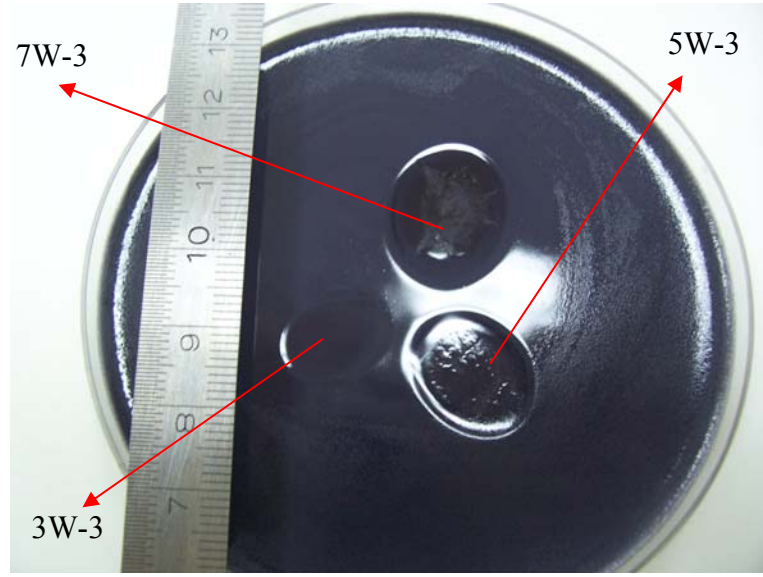
(a)



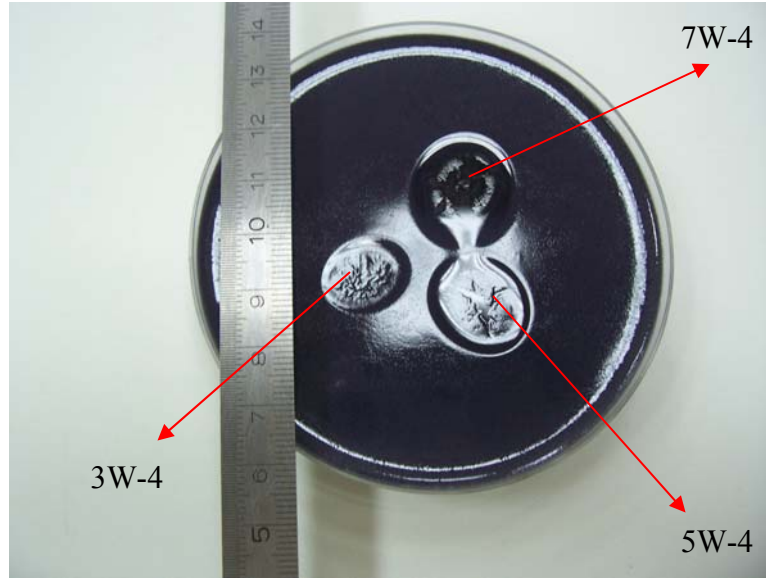
(b)

Şekil 5.19: Fantom yüzeyinde 2W uygulanmasıyla oluşan alanların karşılaştırılması
(a) Mod-1, Mod-2, Mod-3, (b) Mod-4, Mod-5, Mod-6

Şekil 5.20’de ise aynı modülasyon tipinde farklı güçlerin etkilediği alanları karşılaştırmak mümkündür. Şekil 5.20 (a)’da Mod-3’ün 3W, 5W ve 7W kullanılarak uygulanmasının fantom yüzeyinde oluşan alanlara etkisi açıkça görülmektedir. Şekil 5.20 (b) ise Mod-4’ün 3W, 5W ve 7W kullanılarak uygulanmasının etki ettiği alanları göstermektedir. Aynı modülasyon tipi kullanıldığında, uygulanan laser gücü arttıkça fantom üzerinde etkilenen alanın büyüklüğü de artmaktadır. Başka bir deyişle, ısı iletkenlikten dolayı laser ışıması boyunca sıcaklık daha fazla alana yayılmakta ve daha fazla alanı etkilemektedir.



(a)



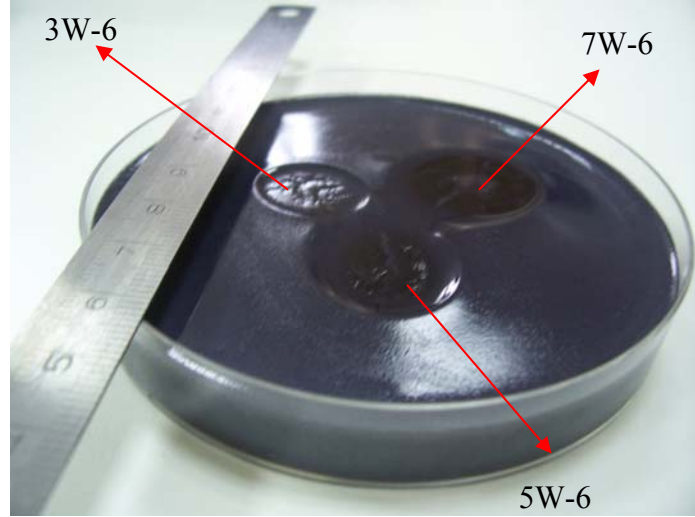
(b)

Şekil 5.20: 3W, 5W, 7W güç değerlerinin fantom yüzeyinde oluşturdukları fiziksel alanların karşılaştırılması (a) Mod-3, (b) Mod-4

Burada belirtilmesi gereken bir başka nokta da her bir laser gücü ve modülasyonu için Tablo 5.4’de hesaplanan enerji değerleri arasındaki ilişkinin fiziksel anlamda fantom üzerinde oluşan alanlarla paralel olduğu gerçeğidir. Aynı güç değeri için Mod-3’ün diğer tüm modülasyonlardan daha az alana etki ettiği açıkça görülmektedir. Aynı şekilde Mod-5 uygulanması durumunda aynı laser gücü için diğer tüm modülasyonlardan daha büyük alana ısı dağılımı olduğu açığa çıkmaktadır. Tablo 5.4’deki hesaplamalar sonucunda fantoma aktarılan toplam enerjiler karşılaştırıldığında $\text{Mod-5} > \text{Mod-6} > \text{Mod-2} > \text{Mod-1} = \text{Mod-4} > \text{Mod-3}$ enerji

ilişkisinin fantom üzerinde laser ışımasının oluşturduğu alanlar arasındaki ilişkiye yansıdığı açık olarak görülmektedir.

Şekil 5.21 ise laser ışımasının Mod-6 kullanılarak 3W, 5W ve 7W güçlerinde fantoma aktarılması ile oluşan alanları göstermektedir. Beklenildiği gibi, uygulanan laser gücü arttıkça fantom üzerinde oluşan etkileşim alanı büyümektedir. Yani, ısı daha fazla soğurulmakta ve ısı iletkenlikten dolayı daha fazla alana yayılmaktadır.



Şekil 5.21: 3W, 5W ve 7W güç değerlerinin Mod-6 kullanılarak uygulanmasının fantom üzerindeki fiziksel etkisi

5.3. III. Grup Ölçümler

Bu kısımda, II. Grup ölçümlerde olduğu gibi 980-nm diyot laserin çıkışı Şekil 5.10'da gösterildiği gibi SMA bağlayıcı ve optik lif kullanılmaksızın doğrudan fantom üzerinde 1 cm çaplı alana uygulanmış ve kızılaltı algılayıcı ile bu bölgedeki sıcaklık değişimleri kaydedilmiştir. Bu ölçümlerde yapılan tek fark fantom yoğunluğunun değiştirilmesidir. Fantom, I. ve II. Gruplardan farklı olarak 4 gr sıgır jelatini, 100 ml intralipid-% 10 ve 200 cc siyah dolma kalem mürekkebinden hazırlanmıştır. Önceki ölçümlerde olduğu gibi 2W-3W-4W-5W-6W-7W güç değerlerinde her bir laser modülasyon tipi ayrı ayrı kullanılarak fantom yüzeyinin 3 dk'lık sıcaklık ölçümleri kaydedilmiştir. Belirlenen laser güç ve modülasyonları kullanılarak toplam 80 ölçüm alınmıştır. Aynı güç değeri ve modülasyon tipi kullanılarak alınan iki ayrı ölçüm sonucu Tablo 5.13'de ilk sıcaklık, son sıcaklık ve oluşan sıcaklık artışları açısından gösterilmiştir.

Tablo 5.13: İki ayrı ölçüm için her bir güç değerinde farklı modülasyonlarla oluşan sıcaklık artışları (a) 2W, (b) 3W, (c) 4W, (d) 5W, (e) 6W, (f) 7W

<u>2W Laser Gücü</u>	İlk sıcaklık °C		Son sıcaklık °C		Sıcaklık artışı °C	
	1. ölçüm	2. ölçüm	1. ölçüm	2. ölçüm	1. ölçüm	2. ölçüm
Mod-1	20	22	24	27	4	5
Mod-2	22	23	29	31	7	8
Mod-3	21	23	24	26	3	3
Mod-4	22	22	29	28	7	6
Mod-5	19	23	32	34	13	11
Mod-6	22	21	29	30	7	9

(a)

<u>3W Laser Gücü</u>	İlk sıcaklık °C		Son sıcaklık °C		Sıcaklık artışı °C	
	1. ölçüm	2. ölçüm	1. ölçüm	2. ölçüm	1. ölçüm	2. ölçüm
Mod-1	17	23	24	32	7	9
Mod-2	18	21	29	32	11	11
Mod-3	19	22	26	27	7	5
Mod-4	22	19	31	29	9	10
Mod-5	18	22	36	37	18	15
Mod-6	22	22	33	31	11	9

(b)

<u>4W Laser Gücü</u>	İlk sıcaklık °C		Son sıcaklık °C		Sıcaklık artışı °C	
	1. ölçüm	2. ölçüm	1. ölçüm	2. ölçüm	1. ölçüm	2. ölçüm
Mod-1	18	23	29	32	11	9
Mod-2	22	23	34	36	12	13
Mod-3	22	23	27	28	5	5
Mod-4	22	23	32	33	10	10
Mod-5	21	24	42	47	21	23
Mod-6	22	23	37	38	15	15

(c)

Tablo 5.13 (devamı): İki ayrı ölçüm için her bir güç değerinde farklı modülasyonlarla oluşan sıcaklık artışları (a) 2W, (b) 3W, (c) 4W, (d) 5W, (e) 6W, (f) 7W

<u>5W Laser Gücü</u>	İlk sıcaklık °C		Son sıcaklık °C		Sıcaklık artışı °C	
	1. ölçüm	2. ölçüm	1. ölçüm	2. ölçüm	1. ölçüm	2. ölçüm
Mod-1	18	24	30	36	12	12
Mod-2	19	22	36	39	17	17
Mod-3	21	22	29	31	8	9
Mod-4	22	22	34	34	12	12
Mod-5	21	23	46	48	25	25
Mod-6	22	22	41	37	19	15

(d)

<u>6W Laser Gücü</u>	İlk sıcaklık °C		Son sıcaklık °C		Sıcaklık artışı °C	
	1. ölçüm	2. ölçüm	1. ölçüm	2. ölçüm	1. ölçüm	2. ölçüm
Mod-1	20	23	34	37	14	14
Mod-2	22	23	41	43	19	20
Mod-3	21	23	29	31	8	8
Mod-4	22	23	37	38	15	15
Mod-5	20	24	48	56	28	32
Mod-6	22	23	43	47	21	24

(e)

<u>7W Laser Gücü</u>	İlk sıcaklık °C		Son sıcaklık °C		Sıcaklık artışı °C	
	1. ölçüm	2. ölçüm	1. ölçüm	2. ölçüm	1. ölçüm	2. ölçüm
Mod-1	18	23	33	41	15	18
Mod-2	21	22	42	43	21	21
Mod-3	22	22	32	33	10	11
Mod-4	22	23	38	41	16	18
Mod-5	19	22	58	54	39	32
Mod-6	21	22	48	49	27	27

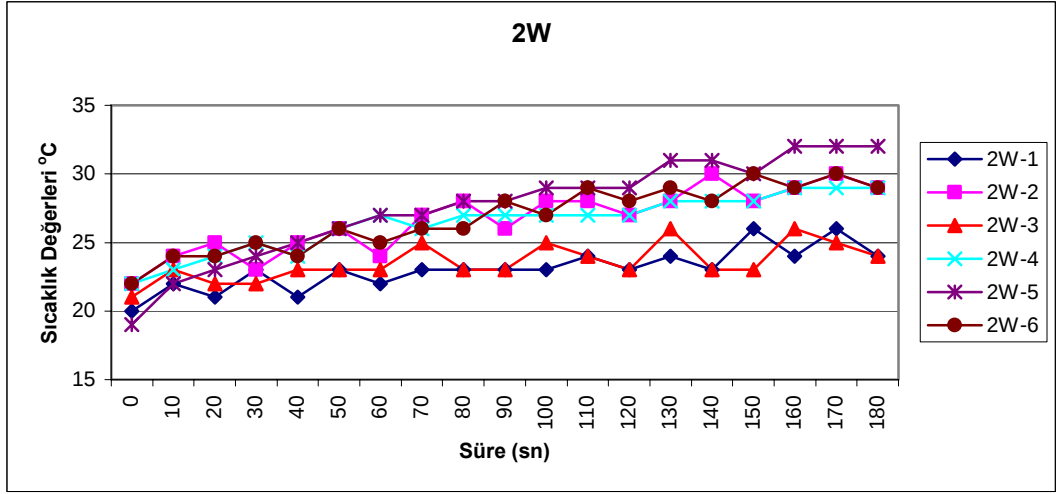
(f)

Tablo 5.13'deki verilerden her bir laser gücü ve modülasyonunun oluşturduğu sıcaklık artışı yapılan iki ayrı ölçüm sonucunda görülmektedir. Tablolardaki her bir güç ve modülasyon tipindeki sıcaklık artışlarını karşılaştırabilmek için önceki ölçümlerde olduğu gibi kızılaltı algılayıcı tarafından kaydedilen verilerin Excel'de grafikleri çizdirilmiştir. Burada belirtilmesi gereken nokta, önceki ölçümlerin grafiklerinde olduğu gibi III. Grup ölçümlerinin de grafikleri Tablo 5.13'de gösterilen 1. ölçümlere göre çizdirilmiştir.

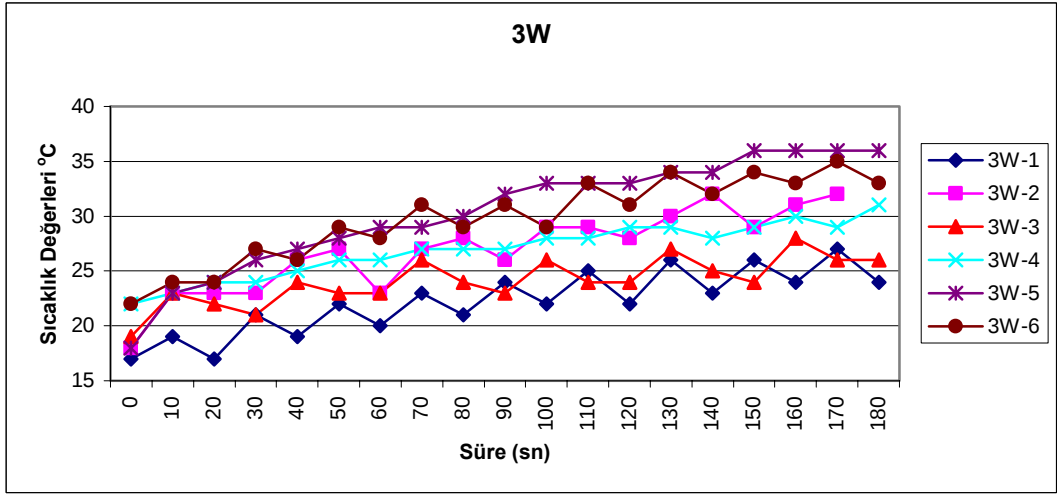
Öncelikle, tanımlanan farklı modülasyonların sıcaklık değişimlerine etkisi incelenmiştir. Buna göre, Şekil 5.22 2W, 3W ve 4W laser güçleri için farklı modülasyonların sıcaklık ölçüm eğrilerinin 180 sn boyunca 10 sn aralıklarla nasıl değiştiğini göstermektedir. Şekil 5.22 (a)'da 2W laser gücünün farklı modülasyonlarla uygulanmasıyla oluşan sıcaklık değişimleri, (b)'de 3W laser gücünün farklı modülasyonlarla uygulanmasıyla oluşan sıcaklık değişimleri ve (c)'de 4W laser gücünün farklı modülasyonlarla uygulanmasıyla oluşan sıcaklık değişimleri gösterilmektedir.

5W, 6W ve 7W laser güçleri için farklı modülasyonların kullanılmasıyla oluşan sıcaklık değişimleri ise Şekil 5.23'de gösterilmektedir. Şekil 5.23 (a)'da 5W laser gücünün farklı modülasyonlarla uygulanmasıyla oluşan sıcaklık değişimleri, (b)'de 6W laser gücünün farklı modülasyonlarla uygulanmasıyla oluşan sıcaklık değişimleri ve (c)'de 7W laser gücünün farklı modülasyonlarla uygulanmasıyla oluşan sıcaklık değişimleri gösterilmektedir.

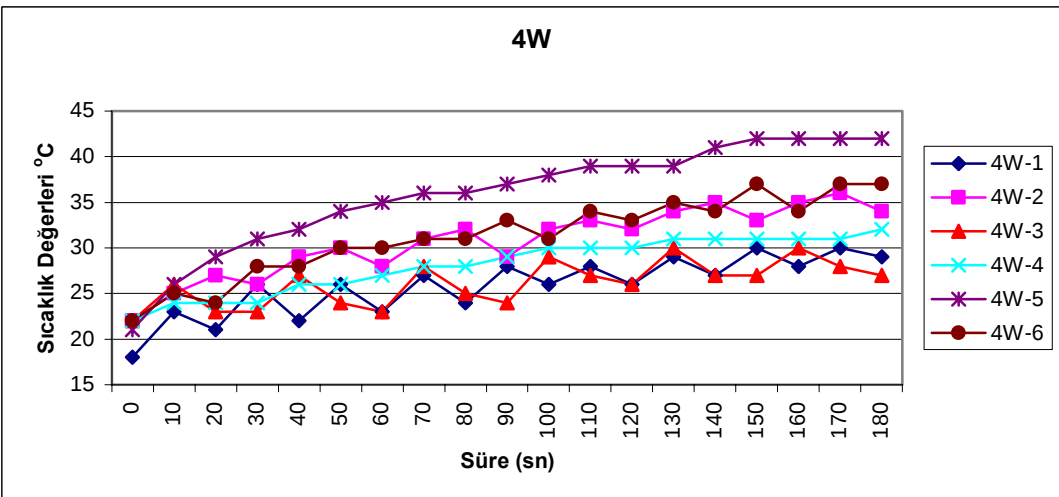
Tablo 5.13'deki sıcaklık ölçüm verilerinden, Şekil 5.22 ve Şekil 5.23'deki aynı güç değerinde farklı modülasyonların karşılaştırılmasını gösteren çizimlerden, laser ışığının SMA bağlayıcı ve optik lif kullanılmaksızın 200 cc'lik siyah boyayla hazırlanan fantoma aktarıldığı III. Grup ölçümlerde kızılaltı algılayıcı tarafından ölçülen sıcaklık artışlarının, I. Grup ölçümlerden fazla olduğu ortaya çıkmaktadır. Aynı laser gücünde ilk ve son sıcaklıklar baz alındığında en fazla sıcaklık artışının, laserin sürekli dalga durumunda yani Mod-5 kullanılarak uygulanması ile olduğu gözlenmektedir. Aynı zamanda, her bir laser güç değerinde en az sıcaklık artışının laserin Mod-3 kullanılarak fantoma aktarılması ile olduğu ortaya çıkmaktadır.



(a)

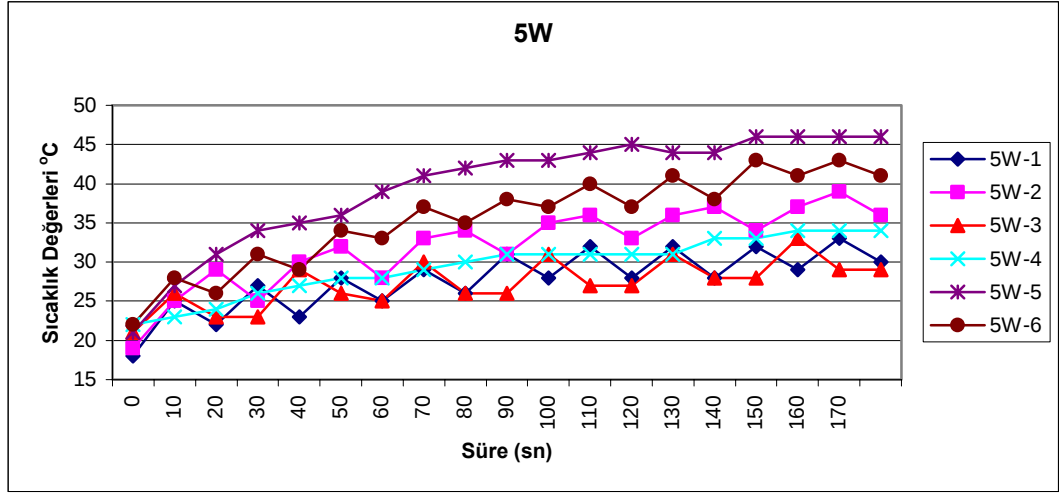


(b)

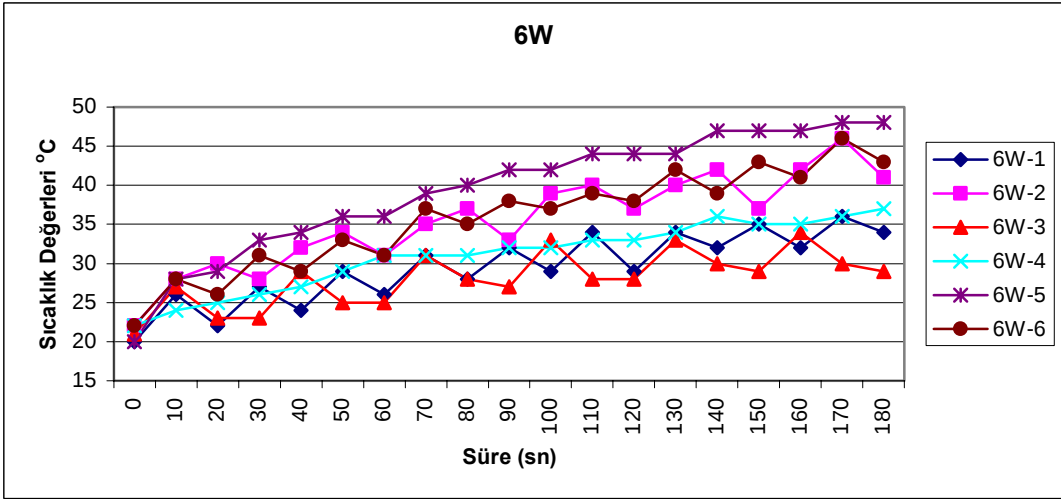


(c)

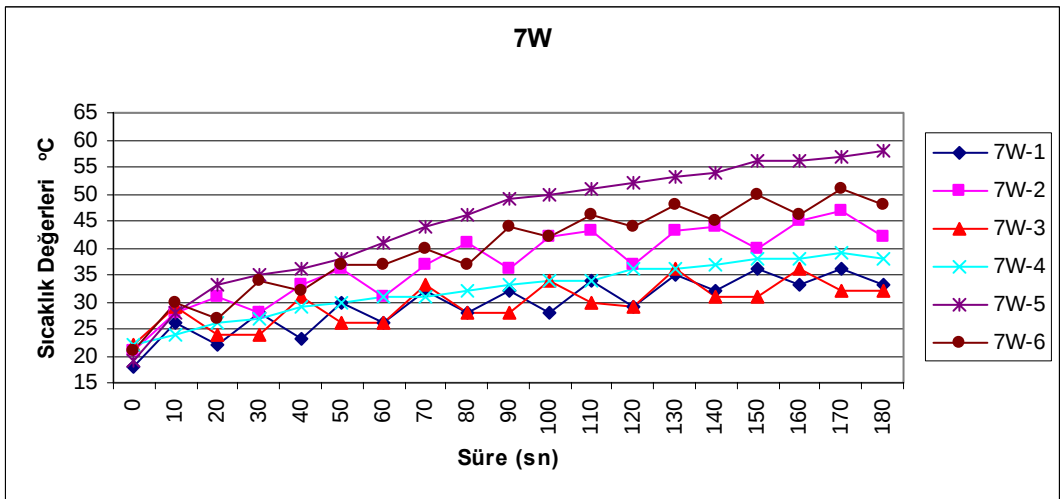
Şekil 5.22: Farklı modülasyonlarda oluşan sıcaklık değişimlerinin zaman ekseninde incelenmesi (a) 2W, (b) 3W, (c) 4W



(a)



(b)



(c)

Şekil 5.23: Farklı modülasyonlarda oluşan sıcaklık değişimlerinin zaman ekseninde incelenmesi (a) 5W, (b) 6W, (c) 7W

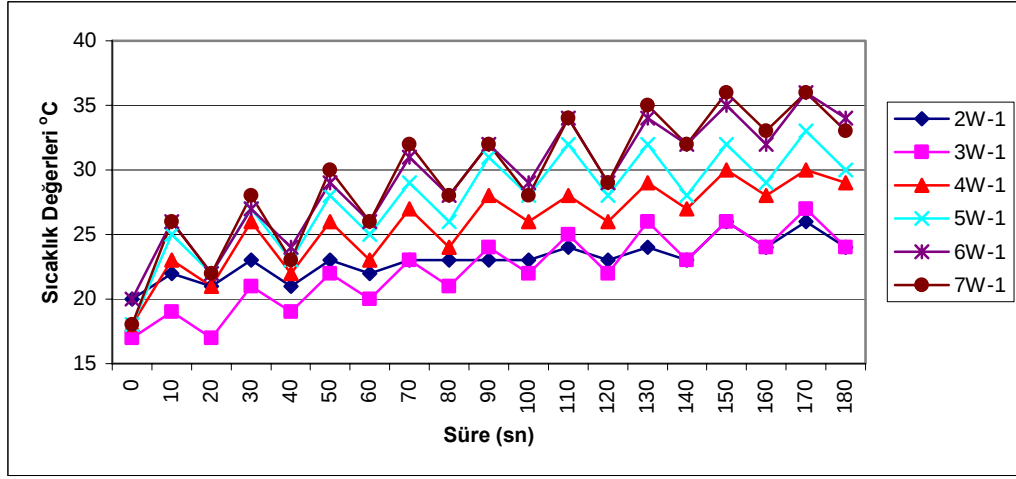
Daha ayrıntılı inceleme yapabilmek için Tablo 5.13'deki ölçümlerden aynı laser modu uygulandığında farklı güçlerin 180 sn boyunca oluşturduğu sıcaklık değişimleri incelenmiştir ve grafikleri çizdirilmiştir. Burada da, çizimler Tablo 5.13'deki 1. ölçümlere göre yapılmıştır.

Şekil 5.24, Mod-1, Mod-2 ve Mod-3'ün farklı güçlerde oluşturdukları sıcaklık değişimlerini zaman ekseninde göstermektedir. Şekil 5.24 (a)'da Mod-1'in farklı güçlerde uygulanmasının oluşturduğu sıcaklık değişimleri, (b)'de Mod-2'nin farklı güçlerde uygulanması sırasında oluşan sıcaklık değişimleri, (c)'de ise Mod-3'ün farklı güçlerde oluşturduğu sıcaklık değişimleri açıkça gözlenmektedir.

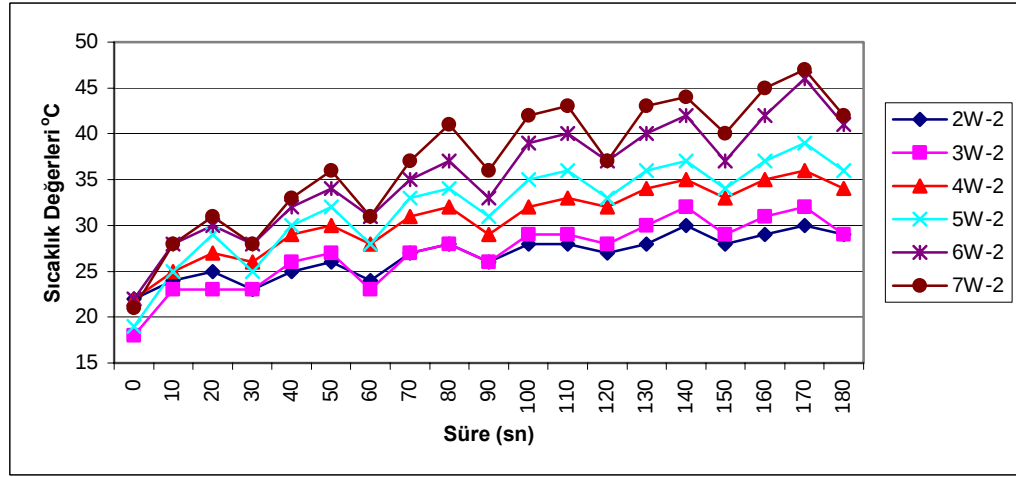
Mod-4, Mod-5 ve Mod-6'nın farklı güçlerle uygulanmasının oluşturduğu sıcaklık değişimlerinin zaman ekseninde değişimi Ek kısmında Şekil A.7'de gösterilmektedir. Şekil A.7 (a)'da Mod-4'ün farklı güçlerde uygulanmasının, (b)'de Mod-5'in farklı güçlerde uygulanmasının, (c)'de ise Mod-6'nın farklı güçlerde uygulanmasının oluşturduğu sıcaklık değişimleri zaman ekseninde 10 sn aralıklarla gösterilmiştir.

Şekil 5.24 ve Şekil A.7'deki çizimlerden, laser modu sabit tutulduğunda sıcaklık artışının beklendiği üzere uygulanan güç arttıkça arttığı ortaya çıkmaktadır. Bu çizimlerde, laser ışıması başlamadan önce (0. sn'de) ortamın ve dolayısıyla da fantomun sıcaklığının farklı olduğu açığa çıkmaktadır. Bu nedenle, grafiklerdeki sıcaklık artışlarını daha net karşılaştırabilmek için ilk sıcaklık değerinin dikkate alınması gerekmektedir.

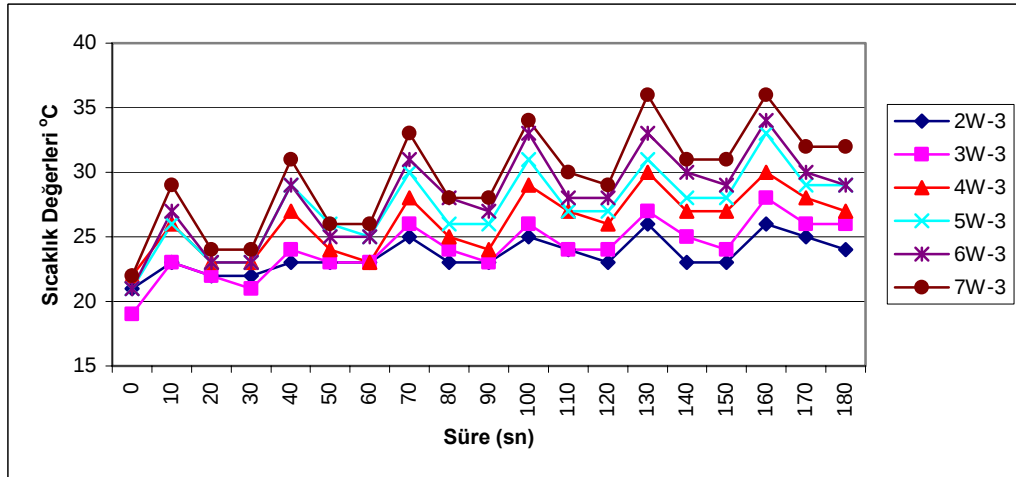
Ayrıca, Şekil 5.24'de ayrıntılı olarak gösterildiği gibi kızılaltı algılayıcının sıcaklık ölçümlerinin, laser ışımasının uygulanma modunun değişimini izlediği gözlenmektedir. Başka bir ifadeyle, laserin açık olduğu sürelerde sıcaklık artışı, kapalı olduğu sürelerde de sıcaklık azalışı ya da sıcaklıkta herhangi bir değişmeme durumu gözlenmektedir. Şekil 5.24 (a)'da Mod-1'in farklı laser güçleriyle uygulanması sonucunda ölçülen sıcaklık değişimlerinin 10 sn artış, 10 sn azalış şeklinde olduğu, (b)'de Mod-2'nin farklı laser güçleriyle uygulanması sonucunda ölçülen sıcaklık değişimlerinin 20 sn artış, 10 sn azalış şeklinde olduğu, (c)'de ise Mod-3'ün farklı laser güçleriyle uygulanması sonucunda ölçülen sıcaklık değişimlerinin 10 sn artış, 20 sn azalış şeklinde olduğu gözlenmektedir.



(a)



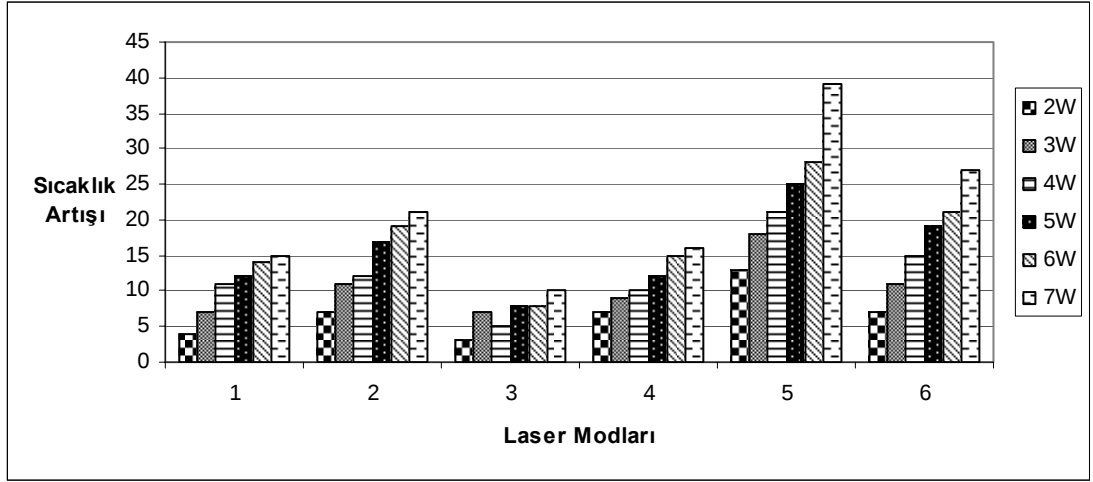
(b)



(c)

Şekil 5.24: Farklı güçlerin oluşturduğu sıcaklık değişimlerinin zaman ekseninde incelenmesi (a) Mod-1, (b) Mod-2, (c) Mod-3

Sonra, Şekil 5.22, 5.23 ve 5.24'deki çizimleri daha iyi yorumlayabilmek ve aralarında karşılaştırma yapabilmek için sıcaklık artışlarının sütun grafikleri çizdirilmiştir. Şekil 5.25'de her bir laser modunda farklı güçlerin oluşturduğu sıcaklık artışları verilmektedir. Bu grafikten, sıcaklık artışının aynı modülasyon için güç arttıkça arttığı net biçimde görülmektedir.

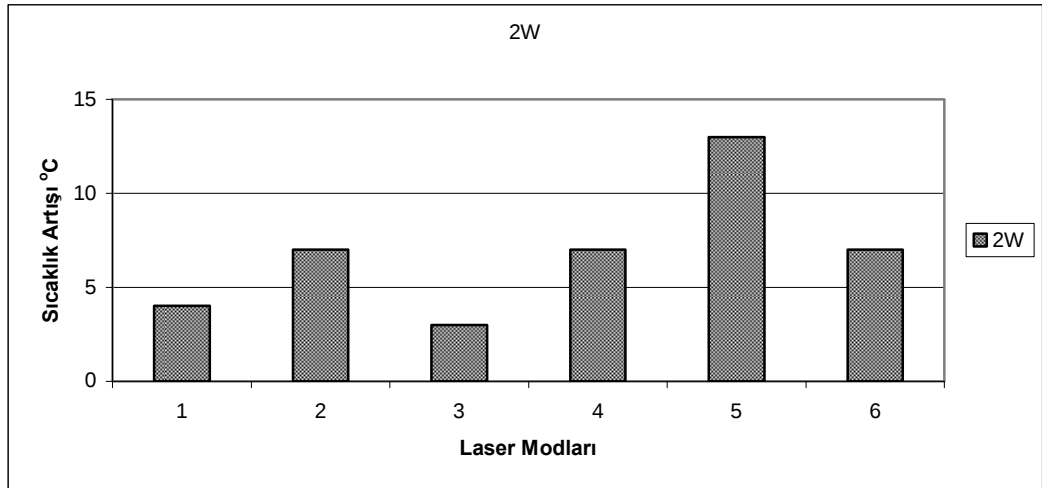


Şekil 5.25: Farklı laser modları ve güçleri için sıcaklık artışı

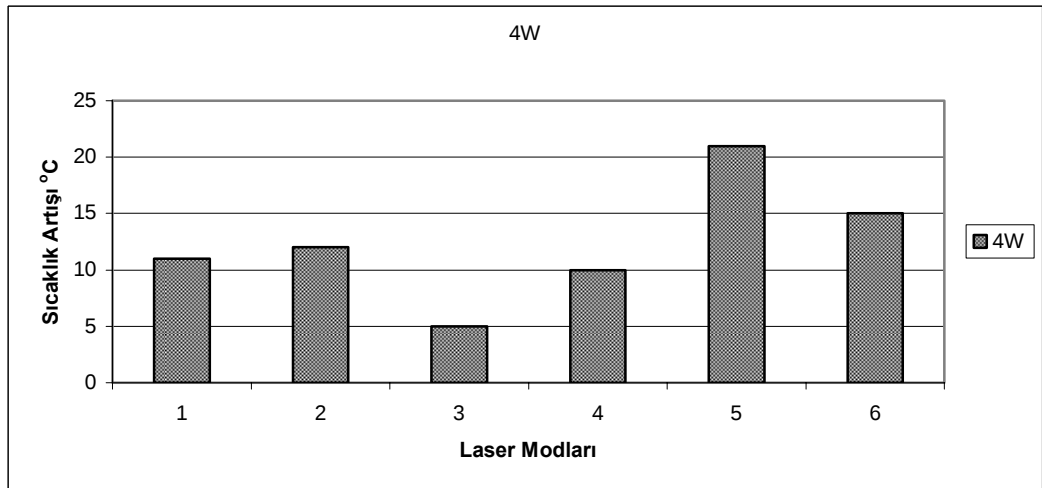
Şekil 5.25'de dikkat edilmesi gereken diğer bir sonuç yine Mod-5'de kaydedilen sıcaklık artışlarının diğer modlardan fazla olduğudur. En az artış ise Mod-3 kullanılmasıyla elde edilmiştir.

Sonra, 3 dk boyunca oluşan sıcaklık artışlarını karşılaştırabilmek için önce güç değerleri sabit tutulup farklı modülasyonlarda inceleme yapılmıştır. Şekil 5.26'da 2W, 4W ve 6W için sıcaklık artış grafikleri farklı modülasyonlar açısından çizdirilmiştir. Şekil 5.26 (a)'da 2W için her bir laser modunun oluşturduğu sıcaklık artışı, (b)'de 4W için farklı laser modlarının oluşturduğu sıcaklık artışı ve (c)'de 6W için farklı laser modlarında oluşan sıcaklık artışı görülmektedir. Diğer güç değerlerinin farklı modülasyonlarda sıcaklık artışlarını veren grafikleri Ek'lerde Şekil A.8'de gösterilmektedir.

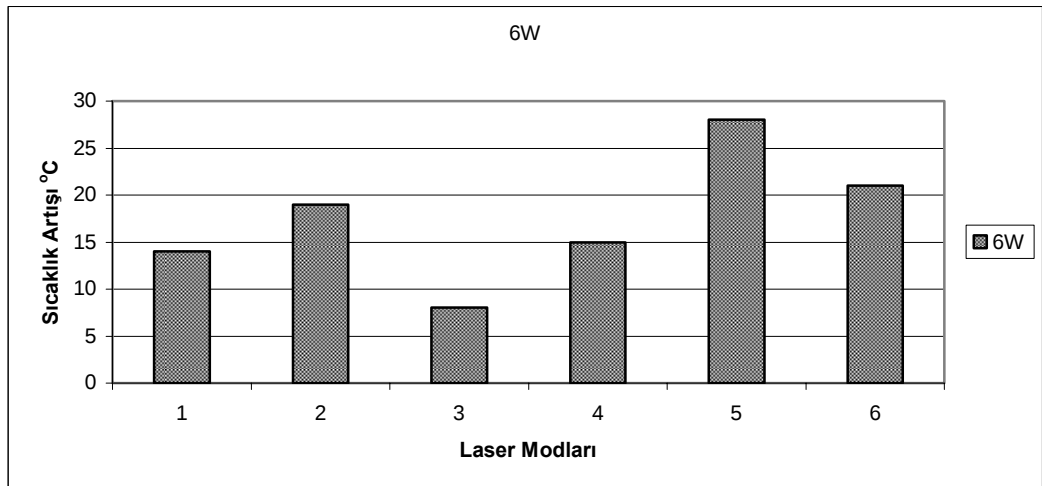
Son olarak da, aynı laser modu kullanıldığında farklı laser güç değerlerinin oluşturduğu artışları karşılaştırmak için grafikler çizdirilmiştir. Şekil 5.27'de Mod-1, Mod-2 ve Mod-3'ün farklı güçlerle uygulanmasının sıcaklık artışını ifade eden grafikleri elde edilmiştir. Diğer modülasyonların grafikleri Ek kısmında Şekil A.9'da gösterilmektedir.



(a)

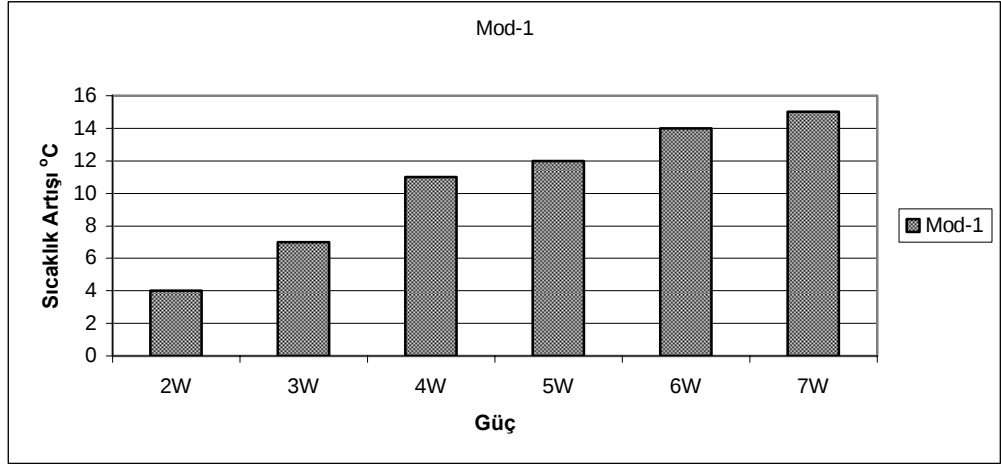


(b)

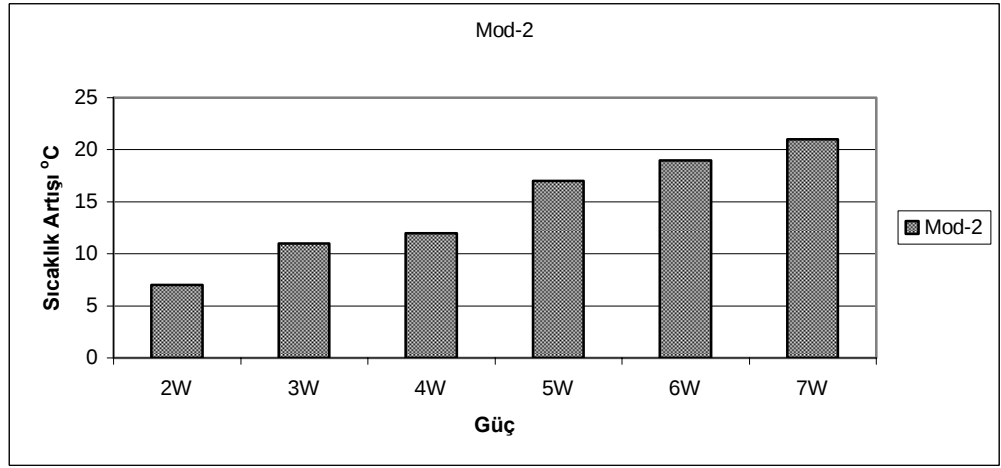


(c)

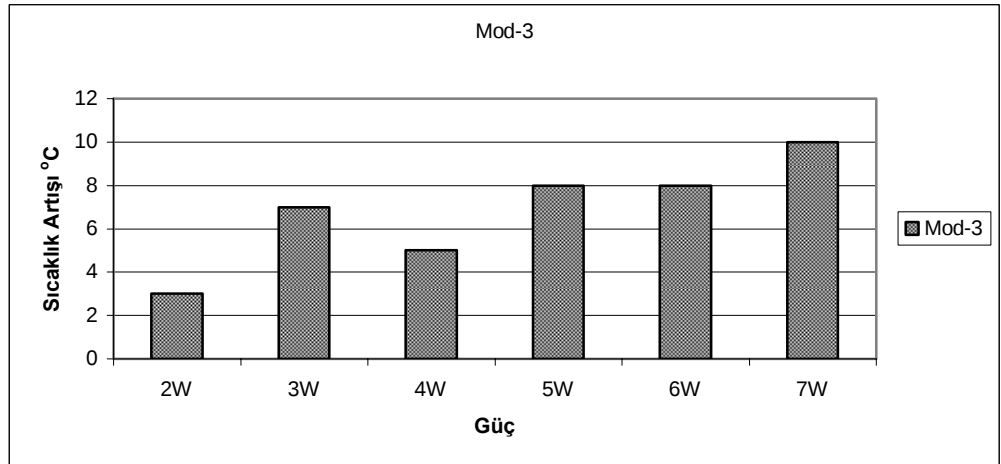
Şekil 5.26: Farklı laser modlarında oluşan sıcaklık artışları
(a) 2W, (b) 4W, (c) 6W



(a)



(b)



(c)

Şekil 5.27: Farklı laser güçlerinde oluşan sıcaklık artışları
(a) Mod-1, (b) Mod-2, (c) Mod-3

III. Grup ölçümlerde de Tablo 5.4'deki fantoma aktarılan toplam enerjiler ve bu enerjiler arasındaki ilişki kullanılarak modülasyon tipine ve laser gücüne bağlı olan sıcaklık artışları karşılaştırılmıştır:

1. Tablo 5.4'de, 3 dk boyunca aynı laser gücü için Mod-1 ve Mod-4'ün fantoma aynı enerjiyi verdiği gözlenmektedir. Bu durumun her iki modda oluşan sıcaklık artışlarına etkisini karşılaştırmak adına Tablo 5.14 elde edilmiştir.

Tablo 5.14: Mod-1 ve Mod-4'ün oluşturdukları sıcaklık artışları

°C Sıcaklık Artışı	I. Ölçüm		II. Ölçüm	
	Mod-1	Mod-4	Mod-1	Mod-4
2W	4	7	5	6
3W	7	9	9	10
4W	11	10	9	10
5W	12	12	12	12
6W	14	15	14	15
7W	15	16	18	18

Tablo 5.14, fantom karışımında 200 cc siyah mürekkep kullanılan III. Grup ölçümlerde, iki ayrı ölçümle Mod-1 ve Mod-4 sonucu gözlenen sıcaklık artışlarını karşılaştırmaktadır. Buradan, hem Mod-1'in hem Mod-4'ün özellikle 4W, 5W, 6W ve 7W laser güçlerinde hemen hemen aynı sıcaklık artışına neden olduğu gözlenmektedir. II. Grup ölçümlerde olduğu gibi, bu ölçümlerde de aynı laser gücünde Mod-1 ve Mod-4 uygulanmasının neden olduğu sıcaklık artışlarını karşılaştırmak için Biyo-ısı denkleminin radyal ısı iletimini içeren Denklem (2.9)'daki hali kullanılabilir. Fantoma toplamda aynı enerjiyi veren Mod-1 ve Mod-4, siyah boya yoğunluğunda yapılan değişikliklerle, burada II. Grup ölçümlerden daha yakın sıcaklık artışlarına neden olmaktadır. Yani, aynı laser gücünde Mod-1 veya Mod-4 kullanılmasının oluşturduğu sıcaklık artışları arasındaki fark Tablo 5.5'de 150 cc'lik mürekkeple hazırlanan fantomlarda daha net gözlenirken, 200 cc'lik mürekkep yoğunluğuyla hazırlanan fantomların ölçümlerinin gösterildiği Tablo 5.14'de azalmıştır. Bu durum da, fantomun soğurmasının ve ısıl sığasının artması ve dolayısıyla da daha fazla ısıyı üzerinde biriktirmesi ile açıklanabilir. Ayrıca, bu durum II. Grup ölçümlerden farklı olarak Mod-1 ve Mod-4 uygulanması durumunda

ölçülen en yüksek sıcaklıklarda da gözlenmektedir. Tablo 5.15 (a) Mod-1 veya Mod-4 uygulanması durumunda ölçülen ilk sıcaklığı ve en yüksek sıcaklığı göstermektedir. Tablo 5.15 (b)'de ise Mod-1 ve Mod-4 kullanılmasına bağlı olarak en yüksek sıcaklıkla ilk sıcaklık arasındaki fark gösterilmiştir.

Tablo 5.15: III. Grup ölçümler için Mod-1 ve Mod-4'ün her bir güç değerinde karşılaştırılması (a) İlk ve max. sıcaklıklar, (b) İlk ve max. sıcaklık arasındaki fark

Sıcaklık(°C)	Mod-1		Mod-4	
	İlk sıcaklık	Max sıcaklık	İlk sıcaklık	Max sıcaklık
2W	20	26	22	29
3W	17	27	22	32
4W	18	31	22	34
5W	18	33	22	38
6W	20	36	22	39
7W	18	37	22	43

(a)

Sıcaklık Farkı (°C)	Max. sıcaklık – İlk sıcaklık	
	Mod-1	Mod-4
2W	6	7
3W	10	10
4W	13	12
5W	15	15
6W	16	17
7W	19	21

(b)

Mod-1 veya Mod-4 kullanılarak max. ve ilk sıcaklıklar arasında kaydedilen sıcaklık farkı, siyah boya yoğunluğunda yapılan değişikliklerle II. Grup ölçümlere göre daha yakın elde edilmiştir.

2. Tablo 5.4'de aynı laser gücünde Mod-6'nın Mod-2'ye göre 1.125 kat fazla enerjiyi fantoma aktardığı görülmektedir. Bu durumun sıcaklık artışlarını nasıl etkilediği Tablo 5.16'da verilmektedir.

Tablo 5.16: Mod-6 ve Mod-2'nin oluşturdukları sıcaklık artışları ve oranları

III. Grup ölçümler	Mod-2 Sıcaklık artışı °C		Mod-6 Sıcaklık artışı °C		Mod-6 / Mod-2 Sıcaklık artış oranı	
	1. ölçüm	2. ölçüm	1. ölçüm	2. ölçüm	1. ölçüm	2. ölçüm
2W	7	8	7	9	1	1.28
3W	11	11	11	9	1	-
4W	12	13	15	15	1.25	1.15
5W	17	17	19	15	1.12	-
6W	19	20	21	24	1.11	1.2
7W	21	21	27	27	1.28	1.28

Tablo 5.16'da Mod-6 / Mod-2 olarak her bir güç değeriinde Mod-6'daki sıcaklık artışının Mod-2'deki sıcaklık artışına oranı iki ayrı ölçüm için verilmektedir. Böylece, teorik hesaplamalara göre 3 dk boyunca Mod-6'da Mod-2'ye göre 1.125 kat fazla enerjinin uygulanmasının, her iki modun oluşturduğu sıcaklık artışlarına nasıl yansıdığı ortaya çıkmaktadır. Beklendiğı üzere, Mod-6, Mod-2'den daha fazla sıcaklık artışı oluşturmuştur. Ancak bu fark II. Grup ölçümlerdeki kadar fazla olmamıştır. Örneğın, 150 cc'lik boya kullanılan II. Grup ölçümlerde 7W değeriinde her iki modun oluşturdukları sıcaklık artışları arasında yaklaşık 1.5 kat fark gözlenirken, 200 cc boya kullanılan III. Grup ölçümlerde bu fark 1.3'lerde kalmaktadır. Yani, fantom yoğunluğundaki boya miktarının artması Mod-6 ve Mod-2 ölçümleriyle elde edilen sıcaklık artışlarını az da olsa yaklaştırmıştır.

3. Tablo 5.4'de aynı laser gücünde Mod-2'nin Mod-3'e göre 2 kat fazla enerjiyi fantoma aktardığı görülmektedir. Bu durumun sıcaklık artışlarını nasıl etkilediğı Tablo 5.17'de verilmektedir. Tablo 5.17'de Mod-2 / Mod-3 olarak her bir güç değeriinde Mod-2'deki sıcaklık artışının Mod-3'deki sıcaklık artışına oranı iki ayrı ölçüme göre gösterilmektedir.

Tablo 5.17: Mod-2 ve Mod-3'ün oluşturdukları sıcaklık artışları ve oranları

III. Grup ölçümler	Mod-2		Mod-3		Mod-2 / Mod-3	
	Sıcaklık artışı °C		Sıcaklık artışı °C		Sıcaklık artış oranı	
	1. ölçüm	2. ölçüm	1. ölçüm	2. ölçüm	1. ölçüm	2. ölçüm
2W	7	8	3	3	2.33	2.66
3W	11	11	7	5	1.57	2.2
4W	12	13	5	5	2.4	2.6
5W	17	17	8	9	2.12	1.88
6W	19	20	8	8	2.37	2.5
7W	21	21	10	11	2.1	1.9

Tablo 5.17’de Mod-2 / Mod-3 olarak her bir güç değeriinde Mod-2’deki sıcaklık artışının Mod-3’deki sıcaklık artışına oranı iki ayrı ölçüm için verilmektedir. Böylece, teorik hesaplamalara göre 3 dk boyunca Mod-2’de Mod-3’e göre 2 kat fazla enerjinin uygulanmasının, her iki modun oluşturduğu sıcaklık artışlarına nasıl yansıdığı ortaya çıkmaktadır. Beklendiğı üzere, tüm güç değeriinde Mod-2, Mod-3’den daha fazla sıcaklık artışı oluşturmuştur. Bu fark, II. Grup ölçümlerde her iki mod arasında oluşan farktan fazla olmuştur. Yani, fantom yoğunluğundaki boya miktarının artması Mod-2 ve Mod-3 ölçümleriyle elde edilen sıcaklık artışları arasındaki farkı az da olsa artırmıştır.

4. Tablo 5.4’deki enerji hesaplamalarından 3 dk boyunca Mod-5’in fantoma aktardığı enerjinin Mod-1’in aktardığı enerjiden 2 kat fazla olduğu ortaya çıkmaktadır.

Beklendiğı üzere, Mod-5’in Mod-1’e göre fantoma 2 kat fazla enerji aktarması sıcaklık artışlarına da yansımıştır. Tablo 5.18’de Mod-5 / Mod-1 olarak her bir güç değeriinde Mod-5’deki sıcaklık artışının Mod-1’deki sıcaklık artışına oranı değersel olarak iki ayrı ölçüme göre gösterilmektedir. Ancak bu fark, II. Grup ölçümlerde her iki mod arasında oluşan farktan fazla olmuştur. Yani, fantom yoğunluğunda boya miktarının artması Mod-1 ve Mod-5 ölçümleriyle elde edilen sıcaklık artışları arasındaki farkı az da olsa artırmıştır.

Tablo 5.18: Mod-1 ve Mod-5'in oluşturdukları sıcaklık artışları ve oranları

III. Grup ölçümler	Mod-1 Sıcaklık artışı °C		Mod-5 Sıcaklık artışı °C		Mod-5 / Mod-1 Sıcaklık artış oranı	
	1. ölçüm	2. ölçüm	1. ölçüm	2. ölçüm	1. ölçüm	2. ölçüm
2W	4	5	13	11	3.3	2.2
3W	7	9	18	15	2.6	1.7
4W	11	9	21	23	1.9	2.6
5W	12	12	25	25	2.1	2.1
6W	14	14	28	32	2	2.3
7W	15	18	39	32	2.6	1.8

5. Aynı zamanda, Tablo 5.4'deki enerji hesaplamalarından 3 dk boyunca Mod-5'in fantoma aktardığı enerjinin, Mod-4'ün aktardığı enerjiden 2 kat fazla olduğu ortaya çıkmaktadır.

Tablo 5.19: Mod-4 ve Mod-5'in oluşturdukları sıcaklık artışları ve oranları

III. Grup ölçümler	Mod-4 Sıcaklık artışı °C		Mod-5 Sıcaklık artışı °C		Mod-5 / Mod-4 Sıcaklık artış oranı	
	1. ölçüm	2. ölçüm	1. ölçüm	2. ölçüm	1. ölçüm	2. ölçüm
2W	7	6	13	11	1.85	1.83
3W	9	10	18	15	2	1.5
4W	10	10	21	23	2.1	2.3
5W	12	12	25	25	2.1	2.1
6W	15	15	28	32	1.86	2.1
7W	16	18	39	32	2.4	1.77

Beklendiği üzere, Mod-5'in Mod-4'e göre fantoma 2 kat fazla enerji aktarması sıcaklık artışlarına da yansımıştır. Tablo 5.19'da Mod-5 / Mod-4 olarak her bir güç değerinde Mod-5'deki sıcaklık artışının Mod-4'deki sıcaklık artışına oranı değersel olarak iki ayrı ölçüm için gösterilmektedir.

6. Burada, her bir modülasyon tipinde uygulanan güçler arasındaki oranın, bu güçlerin oluşturdukları sıcaklık artışları arasındaki orana etkisi incelenmiştir ve

bunun için Tablo 5.20 elde edilmiştir. Sonuçta, her bir modülasyonda güçler arasındaki oranın ölçüm sonuçlarındaki sıcaklık artışları arasındaki oranla paralel olduğu açığa çıkmıştır. Bu da uyguladığımız laser güçleri arasındaki orana bakarak, ölçeceğimiz sıcaklık artışını önceden kestirebilme imkanı sağladığından önemli bulunmaktadır.

Tablo 5.20: Uygulanan laser güçleri ve ölçülen sıcaklık artışlarının oranlanması

Güç oranı	Sıcaklık artışı oranı					
	Mod-1	Mod-2	Mod-3	Mod-4	Mod-5	Mod-6
$7W/2W= 3.5$	3.75	3	3.6	3	3	3.8
$7W/3W= 2.3$	2.1	2	2.2	1.8	2.2	2.5
$7W/4W=1.75$	2	1.75	2	1.8	1.8	1.8
$7W/5W= 1.4$	1.3	1.2	1.3	1.3	1.6	1.4
$7W/6W= 1.2$	1.1	1.1	1.3	1.1	1.4	1.3
$6W/2W= 3$	2.8	2.7	2.7	2.5	2.9	3
$6W/3W= 2$	2	1.8	1.6	1.7	2.1	2
$6W/4W= 1.5$	1.3	1.6	1.6	1.5	1.4	1.4
$6W/5W= 1.2$	1.2	1.1	1	1.3	1.1	1.1
$5W/2W= 2.5$	2.4	2.4	2.7	2	2.3	2.7
$5W/3W= 1.6$	1.7	1.5	1.8	1.3	1.7	1.7
$5W/4W= 1.2$	1.1	1.3	1.6	1.2	1.2	1.3
$4W/2W= 2$	1.8	1.6	1.7	1.7	2.1	2.1
$4W/3W= 1.3$	1.6	1.1	1	1.1	1.2	1.4
$3W/2W= 1.5$	1.7	1.6	1.7	1.3	1.4	1.6

7. Tablo 5.4'deki enerji hesaplamalarına bakıldığında, bazı laser modülasyonu ve güçlerinde fantoma teorikde aynı enerjinin verildiği gözlenmektedir. Burada da, II. Grup ölçümlerdeki gibi fantoma toplamda eşit enerji veren bu modülasyon ve güç değerlerinin sıcaklık artışlarını karşılaştırmak için Tablo 5.21 elde edilmiştir.

Tablo 5.21'de ilk olarak fantoma eşit enerji veren 2W-1, 2W-4 ve 3W-3'ün iki ayrı ölçüme göre sıcaklık artışları verilmiştir. Buradan, fantoma aynı enerjiyi vermek için

2W-1 ya da 2W-4 yerine laser gücünün 1W artırılıp, modülasyonun en düşük atım süresine sahip olan durumu olan Mod-3 kullanılabileceği ortaya çıkmaktadır.

Tablo 5.21: Farklı güç ve modülasyonlarla aynı enerjiyi fantoma aktaran ölçümlerin sıcaklık artışları cinsinden karşılaştırılması

Enerji (J cm ⁻²)	Laser gücü - modu	Sıcaklık Artışı (°C)	
		1. ölçüm	2. ölçüm
230	2W-1	4	5
	2W-4	7	6
	3W-3	7	5
306	2W-2	7	8
	4W-3	5	5
342	3W-1	7	9
	3W-4	9	10
	2W-6	7	9
459	4W-1	11	9
	4W-4	10	10
	3W-2	11	11
	6W-3	8	8
	2W-5	13	11
688	6W-1	14	14
	6W-4	15	15
	3W-5	18	15
	4W-6	15	15
917	6W-2	19	20
	4W-5	21	23

İkinci olarak, 2W-2 ve 4W-3'ün fantoma aynı enerjiyi aktardığı görülmektedir. Burda da, daha uzun laser atımlarıyla fantoma ısıma yapan 2W-2 yerine, laser gücünün artırılıp, Mod-3 kullanılmasının mümkün olduğu anlaşılmaktadır. Üçüncü grupta 3W-1, 3W-4 ve 2W-6'nın fantoma toplamda aynı enerjiyi verdikleri gözlenmiştir. Bu 3 durumun oluşturdukları sıcaklık artışına bakıldığında aralarında büyük bir farklılığın olmadığı görülmüştür. Dolayısıyla da, daha uzun laser ısıma

sureleriyle fantoma enerji aktaran 2W-6 durumu yerine, laser gücünün artırılıp, Mod-1 ya da Mod-4 kullanılabileceği ortaya çıkmaktadır. Dördüncü grupta, 4W-1, 4W-4, 3W-2, 6W-3 ve 2W-5'in kullanılmasıyla eşit miktarda enerjinin fantoma aktarıldığı gözlenmektedir. Buradan da, en kısa süre ışıma yapan Mod-3'ün yüksek güçlerde kullanılmasıyla aynı ısı etkinin oluşacağı ortaya çıkmaktadır. Tablonun en alt kısmında gösterilen 6W-2 veya 4W-5 durumunda da aynı sonuç çıkmaktadır. Laseri sürekli halde uygulamak yerine gücün artırılmasının ve ışımının daha düşük sürelerle yapıldığı Mod-2'nin kullanılmasının daha uygun olacağı anlaşılmaktadır. Diğer gruplarda da, benzer biçimde laseri daha uzun atımlarla ya da sürekli kullanmak yerine, laser gücünü artırarak istenilen miktarda enerjinin fantoma aktarılmasının mümkün olacağı ortaya çıkmaktadır.

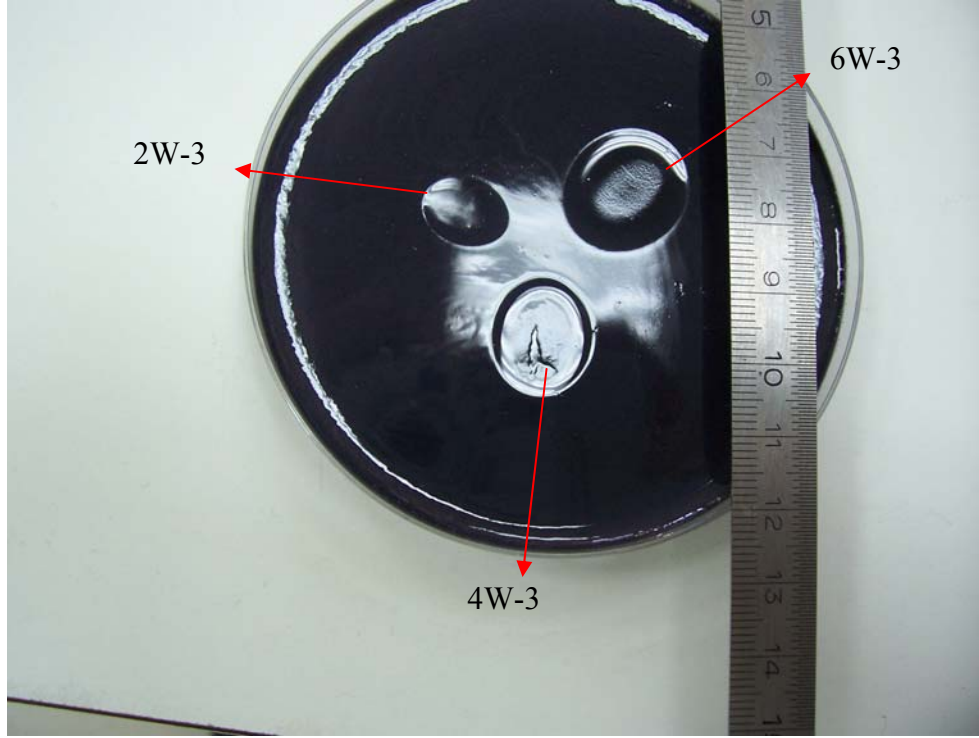
8. Son olarak da, II. Grup ölçümlerde olduğu gibi III. Grup ölçümlerde farklı laser güçleri ve modülasyonlarının fantom üzerindeki fiziksel etkileri incelenmiştir. Şekil 5.28'de 6W laser gücünün Mod-1 kullanılarak fantoma aktarılması sırasında laser ışıması gösterilmektedir. Ayrıca, Şekilde 5.28'de 2W, 4W ve 6W laser güçlerinin uygulanması sonucunda fantom yüzeyinde oluşan alanların büyüklüğü de karşılaştırılabilmektedir.



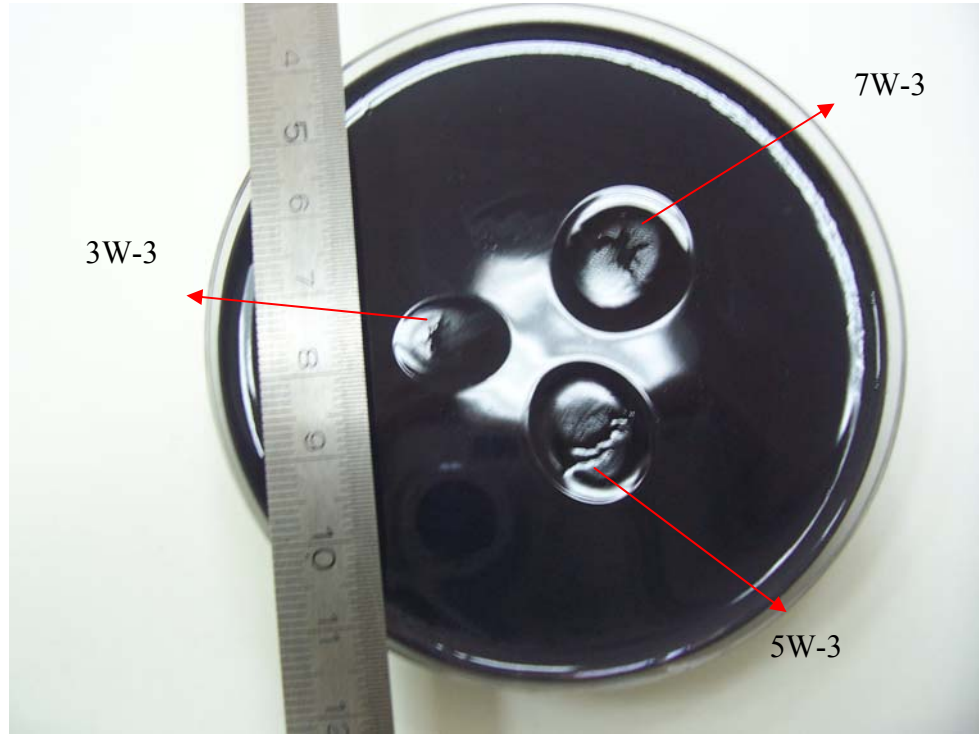
Şekil 5.28: 6W laser gücünün Mod-1 kullanılarak fantoma aktarılması

Şekil 5.29'da fantom üzerinde aynı modülasyon kullanılması (Mod-3) durumunda farklı güçlerin oluşturduğu fiziksel değişimler gözlenmektedir. Burada, her bir laser gücünün oluşturduğu alanların çapları karşılaştırıldığında, ölçülen değerlerin laser

güçleriyle paralel olduğu gözlenmiştir. Fantom üzerinde, 2W 0.8 cm çaplı, 4W 1.3 cm çaplı, 6W 1.5 cm çaplı; 3W 1 cm çaplı, 5W 1.4 cm çaplı, 7W ise 1.7 cm çaplı alanı etkilemiştir.

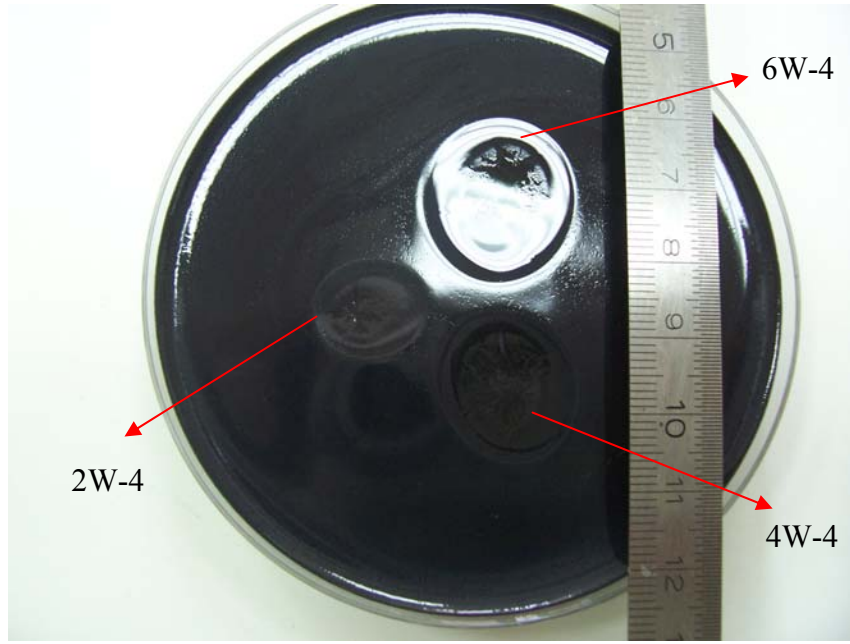


(a)



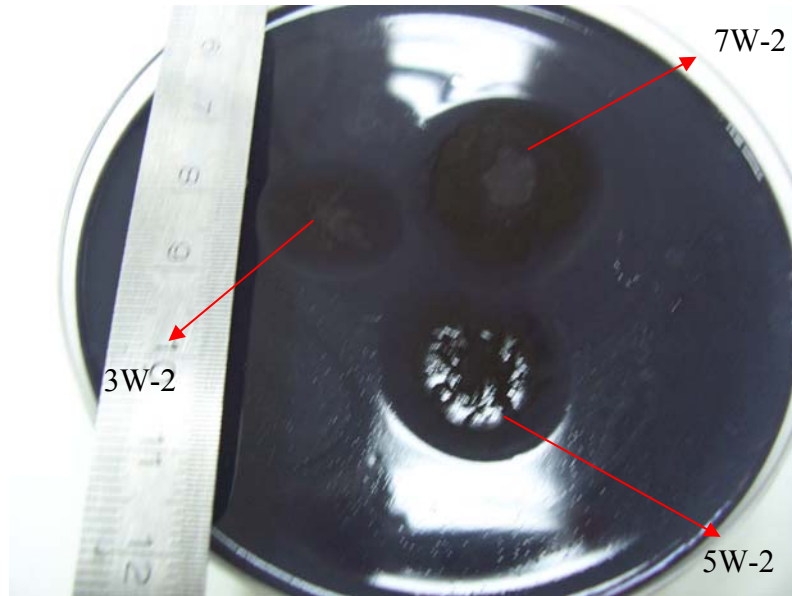
(b)

Şekil 5.29: Mod-3'ün (a) 2W, 4W, 6W, (b) 3W, 5W, 7W laser güçlerinde kullanılmasının fantom yüzeyinde etkileri



Şekil 5.30: 2W, 4W, 6W güç değerlerinin fantom yüzeyinde oluşturdukları fiziksel alanların karşılaştırılması (Mod-4)

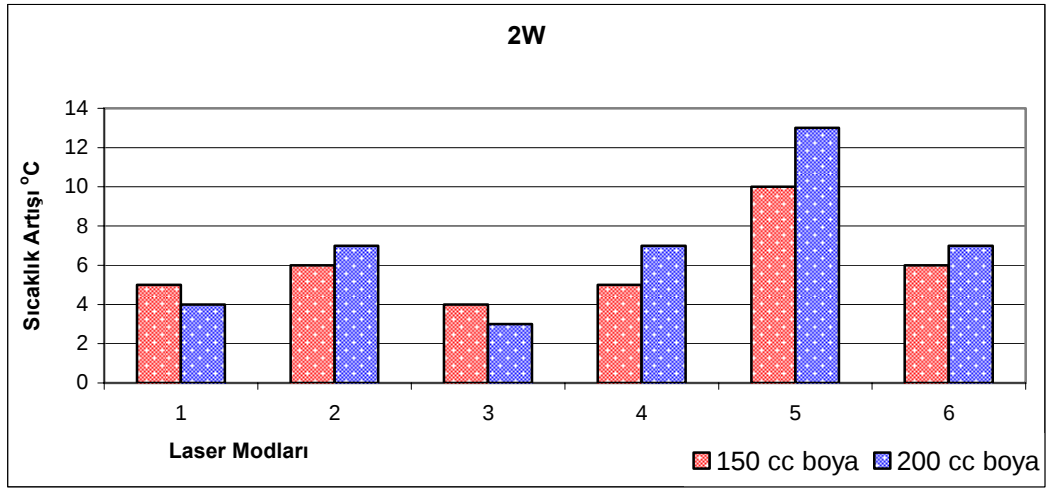
Şekil 5.30 ve 5.31’de ise aynı modülasyon tipinde farklı güçlerin etkilediği alanları karşılaştırmak mümkündür. Şekil 5.30, Mod-4 kullanılarak 2W, 4W ve 6W’ın fantoma uygulanması sonucunda, Şekil 5.31 ise Mod-2 kullanılarak 3W, 5W ve 7W’ın uygulanması sonucunda oluşan ısı etkileşim alanlarını göstermektedir.



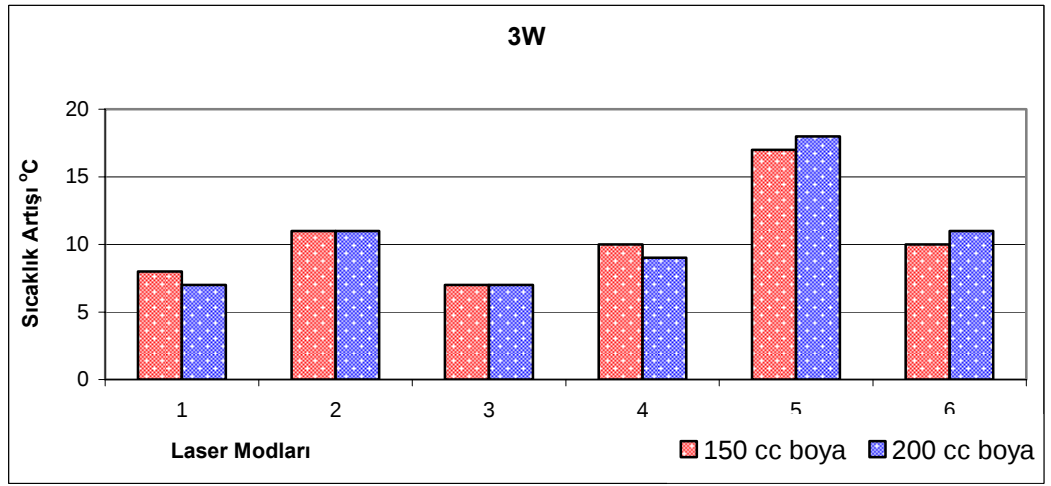
Şekil 5.31: 3W, 5W, 7W laser güçlerinde Mod-2 kullanılması

Son olarak, II. ve III. Grup ölçümlerde fantom karışımındaki siyah boya miktarının alınan sıcaklık artışlarına etkisi karşılaştırılmıştır. Bu değişimin etkisi, her bir laser güç ve modülasyonunda oluşan sıcaklık artışları cinsinden Şekil 5.32’de gösterilmektedir. Burada, hem 150 cc’lik hem de 200 cc’lik boya miktarıyla hazırlanan fantomlarda (a) 2W, (b) 3W, (c) 4W, (d) 5W, (e) 6W ve (f) 7W laser güçlerinin farklı modülasyonlarla uygulanması sonucunda oluşan sıcaklık artışları karşılaştırılmaktadır.

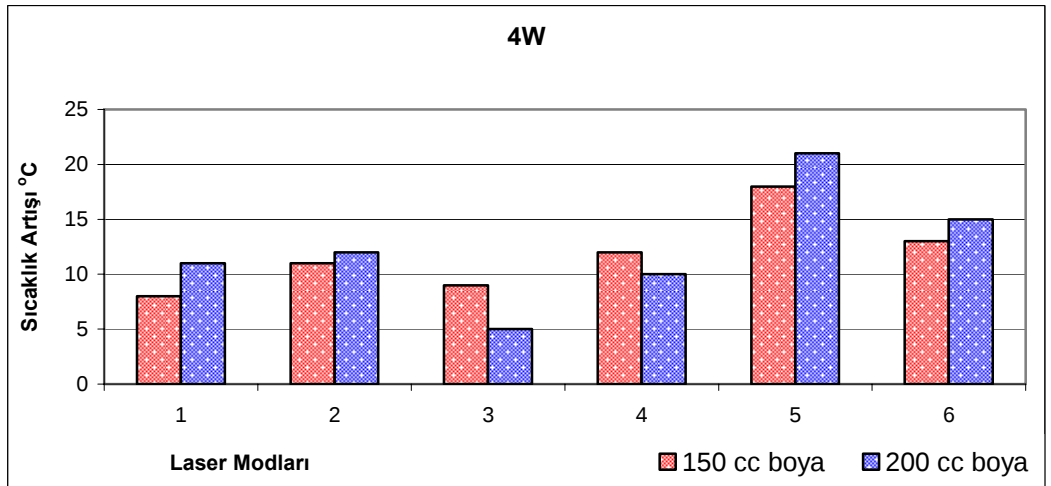
Fantom yoğunluğundaki siyah boya miktarının değiştirilmesi, 2W laser gücünün farklı modülasyonlarında oluşan sıcaklık artışları cinsinden karşılaştırıldığında sürekli dalga durumu yani Mod-5 hariç herhangi bir fark gözlenmemiştir. Yalnızca, Mod-5 ile sürekli dalga uygulanması durumunda boya miktarının artırılıp 200 cc yapılması daha fazla sıcaklık artışına neden olmaktadır. 3W laser gücünün kullanılması durumunda dikkate değer bir fark gözlenmemiştir. 4W’ın ise Mod-5 veya Mod-1 ile uygulanması durumunda karışımındaki boya miktarının artması daha fazla sıcaklık artışına neden olmuştur. 5W laser gücü incelendiğinde, yalnızca Mod-2’nin kullanılması durumunda boya miktarının artması sıcaklık artışına yansımıştır. 6W ve 7W uygulanması durumlarında ise bu fark, Mod-2 ve Mod-6’da net olarak ortaya çıkmıştır. Ayrıca, 7W’ın Mod-5 kullanılarak uygulanması 200 cc’lik siyah boyayla hazırlanan fantomlarda en fazla artışa neden olmuştur. Diğer durumlarda, siyah boya miktarında yapılan bu değişikliğin sıcaklık artışlarını çok fazla etkilemediği, hatta özellikle her bir laser gücü için Mod-3’ün kullanılması durumunda daha az artışa neden olduğu gözlenmiştir. Buradan da, siyah boya miktarında yapılan değişikliği karşılaştırmanın kullanılan laser modülasyonlarının dikkate alınmasıyla mümkün olacağı sonucuna varılmaktadır. Şekil 5.32’de gösterilen grafikler incelendiğinde, özellikle fantoma 3 dk boyunca daha fazla enerji aktaran Mod-5, Mod-6, Mod-2 gibi laser modülasyonlarının, kullanılması durumunda karışımındaki boya miktarının artmasının sıcaklık artışlarında daha etkili olduğu sonucuna varılmaktadır.



(a)

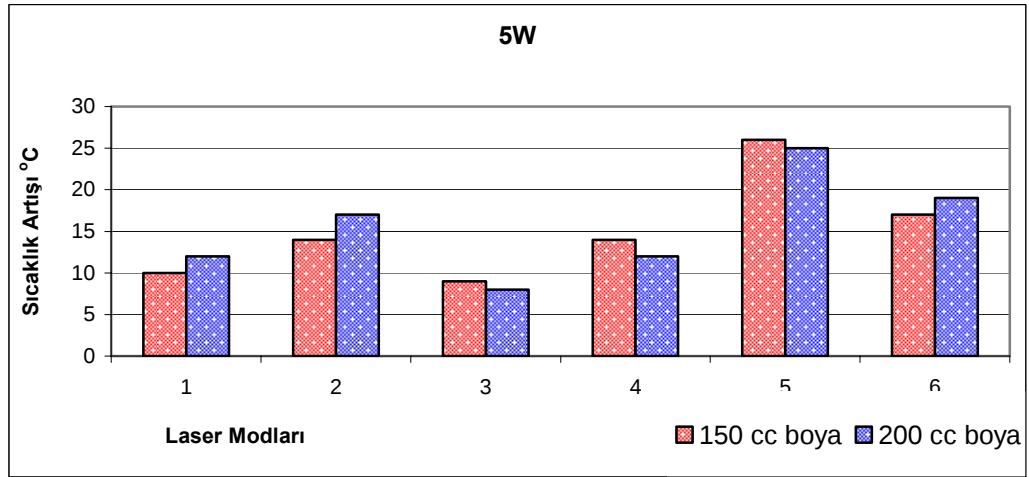


(b)

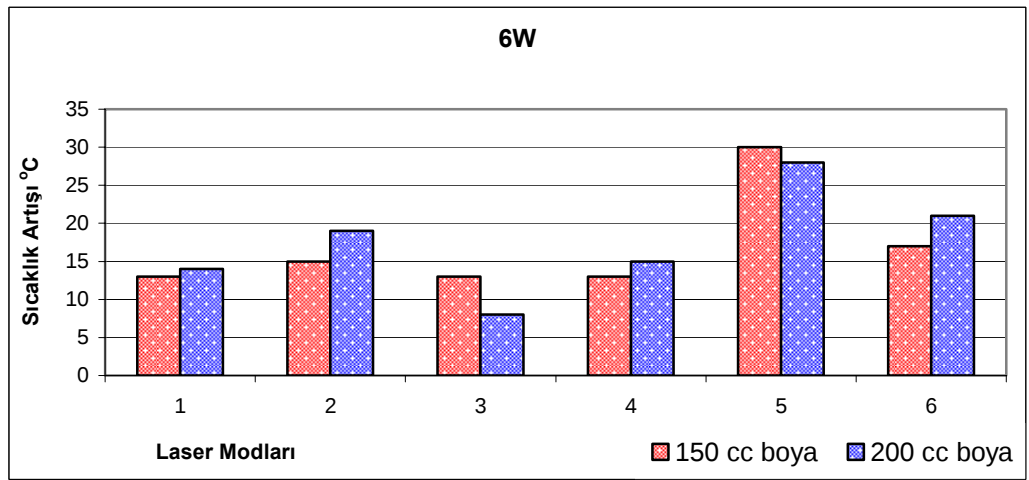


(c)

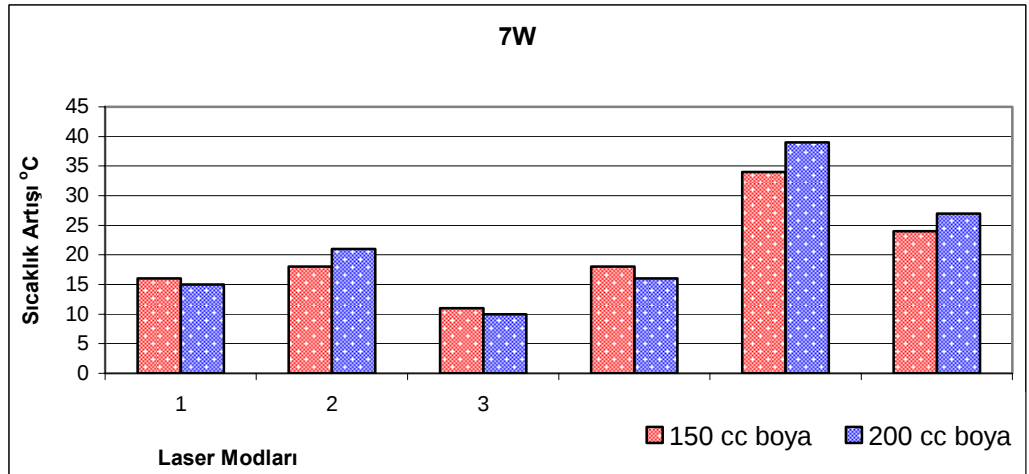
Şekil 5.32: Fantomdaki siyah boya miktarının sıcaklık artışlarına yansıması
(a) 2W, (b) 3W, (c) 4W



(d)



(e)



(f)

Şekil 5.32 (devamı): Fantomdaki siyah boya miktarının sıcaklık artışlarına yansımaları (a) 5W, (b) 6W, (c) 7W

6. TARTIŞMA

Laser doku etkileşimi, son yıllarda hızla gelişen doku kaynağı araştırmalarında, cerrahi uygulamalarda, tümör tedavisi gibi ısılsıl uygulamalarda doz problemini anlamayı kolaylaştıran önemli bir araştırma alanıdır [1, 4-6]. Doku üzerinde laserin etkisi hedef dokuyla uygulanan ışığın etkileşim mekanizmalarına bağlıdır. Yakın kızılaltı laser sistemlerinin doku üzerindeki temel etkisi ısıdır [1]. Literatürde, laserle gerçekleştirilen ısılsıl tedavilerde, yüzey sıcaklığının ölçümünün ısılsıl haraplananın ölçeğinin belirlenmesinde önemli bir gösterge olduğu belirtilmektedir.

Bu çalışmada, daha önce yapılan uygulamalardan farklı olarak 980-nm diyot laser farklı güçler ve modülasyonlarla jelatinden hazırlanmış fantoma uygulanmış ve aynı anda IR algılayıcı ile yüzey sıcaklıkları ölçülmüştür. Gücü, süresi ve modu ayarlanan laser, fantom üzerine uygulanmış ve sıcaklık ölçümleri 3 dakika boyunca 0.5 Hz örnekleme hızıyla kaydedilmiştir. Sıcaklık ölçümleri için deneyler 3 grup halinde yapılmıştır. İlk grup ölçümler, deney düzeneğinde SMA bağlayıcı ve optik lif kullanılarak elde edilmiştir. İkinci grup ölçümlerde, laser çıkışı doğrudan fantom üzerindeki 1 cm çaplı alana lif kullanılmaksızın uygulanmıştır. Üçüncü grup ölçümler ise, ikinci grup ölçümlerden farklı olarak fantom yoğunluğundaki siyah boya miktarı artırılarak (200 cc) elde edilmiştir. Aynı laser güç değeri ve modülasyon tipi kullanılarak her grupta iki kez IR sıcaklık ölçümü alınmıştır ve bir ölçüm için oluşan sıcaklık artışları karşılaştırılmıştır.

Yapılan tüm deneylerde IR algılayıcı sıcaklık ölçüm eğrisinin, laser modunun değişimini izlediği gözlenmiştir. Farklı güçler ve modlarla yapılan ölçümlerde kaydedilen sıcaklık artışları fantomun ve ortamın ilk sıcaklığından bağımsız olmuştur. Aynı laser gücü kullanıldığında, en fazla sıcaklık artışının sürekli durumda yani Mod-5, en az sıcaklık artışının ise Mod-3 uygulanması durumunda gözleendiği ortaya çıkmıştır. Ayrıca, aynı modla laser uygulanması durumunda sıcaklık artışının, beklendiği üzere, uygulanan güç arttıkça arttığı ortaya çıkmıştır.

Deneylerde oluşan sıcaklık artışlarını, modülasyon tipine ve uygulanan laser gücüne göre karşılaştırabilmek için, modülasyona bağlı olarak her bir laser gücünün 3 dk boyunca fantoma aktardığı toplam enerji hesaplanmıştır. Fantoma aktarılan toplam enerjiler arasındaki ilişki kullanılarak, modülasyon tipine ve laser gücüne bağlı olan sıcaklık artışları karşılaştırılmıştır. Fantoma toplamda eşit miktarda enerji veren farklı laser güç ve modülasyonları, hem sıcaklık artışları hem de etkiledikleri alanlar açısından karşılaştırılarak daha az ısı haraplama yapan parametreler belirlenmiştir. Örneğin, 2W laser gücünün Mod-2 (2W-2) ile ya da 4W laser gücünün Mod-3 (4W-3) ile uygulanması fantoma eşit miktarda enerji vermektedir. III. Grup ölçümlerde bu iki durum karşılaştırıldığında, laser gücü iki katına çıkarılsa bile Mod-3 kullanılarak laser ışıması yapmanın daha az ısı haraplama yapacağı sonucuna varılmıştır.

Aynı fantom yoğunluğunun kullanılmasıyla yapılan I. ve II. Grup ölçümlerdeki sonuçlara bakılarak lif kullanımının en az % 71 güç kaybına neden olduğu kestirilmiştir. Bu durum, 400 μm 'lik optik lifin daha önceki kullanımlar sonucunda zarar görmesiyle ortaya çıkmıştır.

Herhangi bir modülasyon tipinde uygulanan iki ayrı güç arasındaki oranın, bu güçlerin oluşturdukları sıcaklık artışları arasındaki oranla ilişkisi incelenmiştir. Sonuçta, her bir modülasyonda güçler arasındaki oranın ölçüm sonuçlarındaki sıcaklık artışları arasındaki oranla paralel olduğu ortaya çıkmıştır. Bu da uyguladığımız laser güçleri arasındaki orana bakarak, ölçeceğimiz sıcaklık artışını önceden kestirebilme imkanı sağladığından önemli bulunmuştur.

II. ve III. Grup ölçümlere göre, fantom yoğunluğundaki siyah boya miktarında yapılan değişikliği, oluşan sıcaklık artışlarına göre karşılaştırmanın ancak kullanılan laser modülasyonlarının dikkate alınmasıyla mümkün olacağı sonucuna varılmaktadır. Şekil 5.41'de gösterilen grafikler incelendiğinde, özellikle fantoma daha fazla enerji aktaran Mod-5, Mod-6, Mod-2 gibi laser modülasyonlarının kullanılması durumunda boya miktarının artırılıp 200 cc yapılmasının daha fazla sıcaklık artışına neden olduğu anlaşılmaktadır.

KAYNAKLAR

- [1] **Bozkulak, Ö., Yamacı, R., ve Gülsoy, M.,** 2006. 809-nm Diyot Laser ile ICG-PDT, *Biyomedikal Mühendisliği Ulusal Toplantısı, BİYOMUT*, Bebek, İstanbul, Türkiye, 19-23.
- [2] **Kim S. Y., Chang S. Y., and Song T. H.,** 1993. Evaporative Removal of Gelatin by Nd: YAG Laser, *Phys. Med. Biol.*, **38**, 1299-1310.
- [3] **Gnyowali S., Chen Y., Wu F., Bartels K., Wicksted J., Liu H., Sen C. and Chen W.,** 2007. Temperature Measurements on Tissue Surface during Laser Irradiation, *G International Federation for Medical and Biological Engineering*, **46**, 159-168.
- [4] **Geldi C., Bozkulak Ö., Tabakoğlu Ö., İşçi Ş., Kurt A., and Gülsoy M.,** 2006. Development of a Surgical Diode-Laser System: Controlling the Mode of Operation, *Photomedicine and Laser Surgery*, **24**, 723-729.
- [5] **Dereli Z., Tabakoğlu Ö., Bozkulak Ö., Aksel A., ve Gülsoy M.,** 2005. 980-nm Diyot Laser ile Doku Kaynağı: Optimal Parametrelerin Saptanmasına Yönelik Önçalışma, *Biyomedikal Mühendisliği Ulusal Toplantısı, BİYOMUT*, Bebek, İstanbul, Türkiye, 120-124.
- [6] **Zweig A. D. and Weber H. P.,** 1987. Mechanical and Thermal Parameters in Pulsed Laser Cutting of Tissue, *IEEE, J. Quantum Electronics*, **23**, 1787-1793.
- [7] Electromagnetic Spectrum, National Aeronautics and Space Administration, <http://son.nasa.gov/tass/content/electrospectrum.htm>, erişim tarihi: 28.04.2008.
- [8] **Stratigos A. J. and Dover J. S.,** 2006. Overview of Lasers and Their Properties, *Dermatologic Therapy*, **13**, 2-16.
- [9] **Aksay S.,** 1998. Atomların Kuantumlu Yapısı, Anadolu Üniversitesi Açıköğretim Fakültesi Yayınları, No: 586, 61-73.

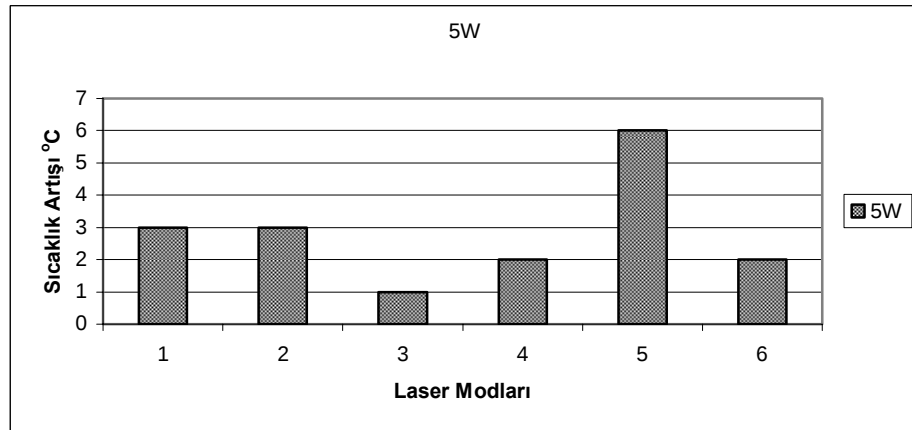
- [10] Argon İyon Laser Sunum, Stimulated emission,
http://latarum.kocaeli.edu.tr/_sunumlar/argoniylazeri.pps, erişim
tarihi:08.03.2008
- [11] Spontaneous and Stimulated Processes, Molecular Expressions,
[http://micro.magnet.fsu.edu/primer/java/lasers/electroncycle/index.ht
ml](http://micro.magnet.fsu.edu/primer/java/lasers/electroncycle/index.html), erişim tarihi: 01.05.2008.
- [12] Population Inversion, Georgia State University,
<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/hframe.html>, erişim tarihi:
29.04.2008.
- [13] **Niemz M. H.**, 2004. Laser-Tissue Interactions: Fundamentals and Applications,
Third, Revised Edition, Springer- Verlag, Berlin.
- [14] **Sarpun İ. H.**, 2004. Afyon Kocatepe Üniversitesi, Laser Fiziği Ders Notları,
<http://www2.aku.edu.tr/~sarpun/laser-iso.doc>, 1-38, erişim tarihi:
12.04.2008.
- [15] **Sirenko A.**, 2008. High Power Lasers, Phys. 402 Lecture Notes,
<http://web.njit.edu/~sirenko/Phys402/Lecture1-402lasers.pdf>, erişim
tarihi: 01.05.2008.
- [16] **Gülsoy M.**, 2000. Laser Systems for Biomedicine: Introduction the 980-nm
Diode Laser, *Doktora Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [17] **Gemert M. J. C. and Welch A. J.**, 1989. Clinical Use of Laser - Tissue
Interaction, *IEEE, Engineering in Medicine and Biology*, **12**, 10-13.
- [18] **Tabakoğlu Ö. ve Bozkulak Ö.**, 2005. Laserler, *Boğaziçi Üniversitesi
Biyomedikal Mühendisliği Enstitüsü Bülteni*, 1-5.
- [19] **Çilesiz İ.**, 2005. Biyofotonik Etkileşimler, *Biyomedikal Mühendisliği Ulusal
Toplantısı, BİYOMUT*, Bebek, İstanbul, Türkiye, Mayıs, 103-107.
- [20] **Welch A. J. and Gemert M. J. C.**, 1995. Optical – Thermal Response of Laser
– Irradiated Tissue, Plenum Press, New York.
- [21] **Prasad N. P.**, 2003. Introduction to Biophotonics, John Wiley & Sons Inc,
Hoboken, New Jersey.

- [22] **Trotman F. and Heney A.**, 2003. Greenlight PVP for the treatment of PVP, *Perioperative Registered Nurses Association of Ontario Biennial Conference*, Toronto, USA, June.
- [23] **Cox B.**, 2007. Introduction to Laser-Tissue Interactions, PHAS 4886, *Optics in Medicine*, 1-62, October.
- [24] **Gemert M. J. C., Lucassen G. W. and Welch A. J.**, 1996. Time Constants in Thermal Laser Medicine: II. Distributions of Time Constants and Thermal Relaxation of Tissue, *Phys. Med. Biol.* **41**, 1381-1399.
- [25] Thermocouple Application Datasheet, Section 3, Precision Analog Applications Seminar, Texas Instrument,
<http://focus.ti.com/lit/ml/slyp161/slyp161.pdf>, erişim tarihi: 01.05.2008.
- [26] Characteristics and use of infrared detectors, Hamamatsu,
http://sales.hamamatsu.com/assets/applications/SSD/infrared_kird9001e03.pdf, erişim tarihi: 29.01.2008.
- [27] Sigma, Bovine Gelatin,
<https://www.sigmaaldrich.com/catalog/search/ProductDetail/SIGMA/G9391>, erişim tarihi: 26.10.2007.
- [28] **Çilesiz İ.**, 2001. Value of Infrared Radiometry to Medical Laser Applications with Reference to Temperature Feedback and Tissue Welding Options, *Lasers in the Musculoskeletal System*, Springer Verlag, Heidelberg, Germany, Part II: Chapter 3: 18-24.
- [29] **Cubeddu R., Pifferi A., Taroni P., Torricelli A. and Valentini G.**, 1997. A Solid Tissue Phantom for Photon Migration Studies, *Phys. Med. Biol.* **42**, 1971-1979.

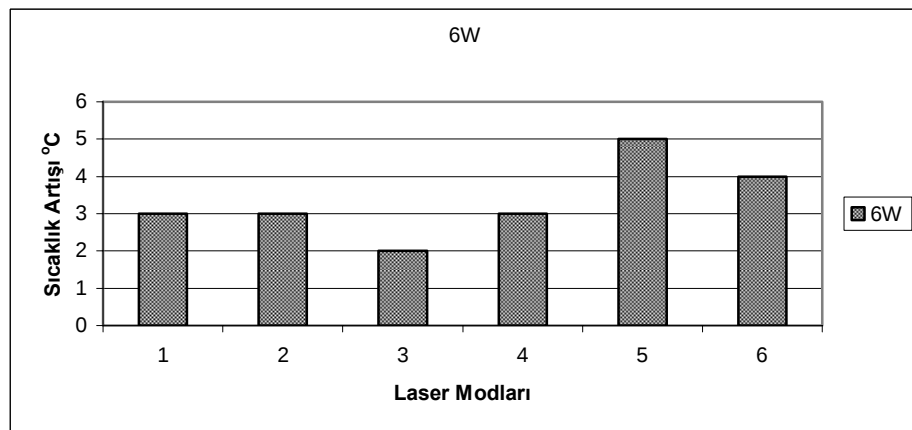
EKLER



(a)

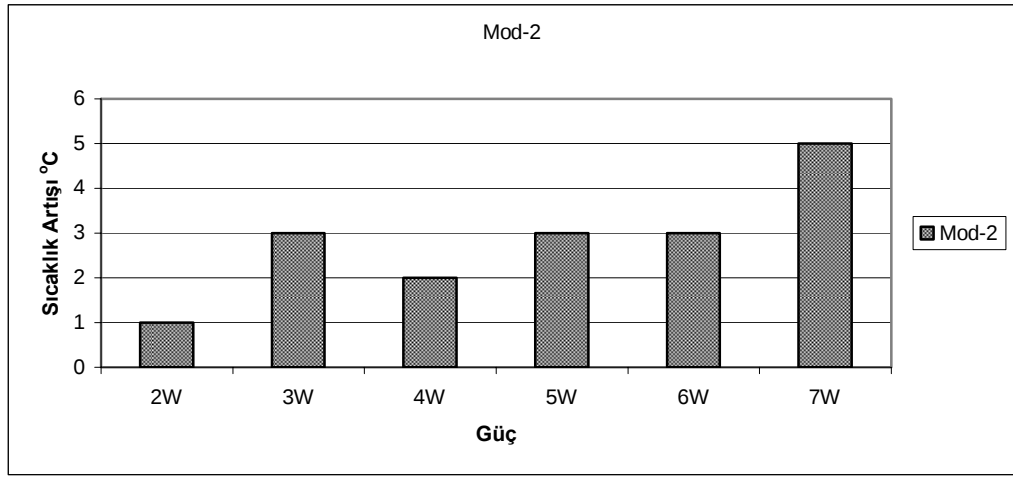


(b)

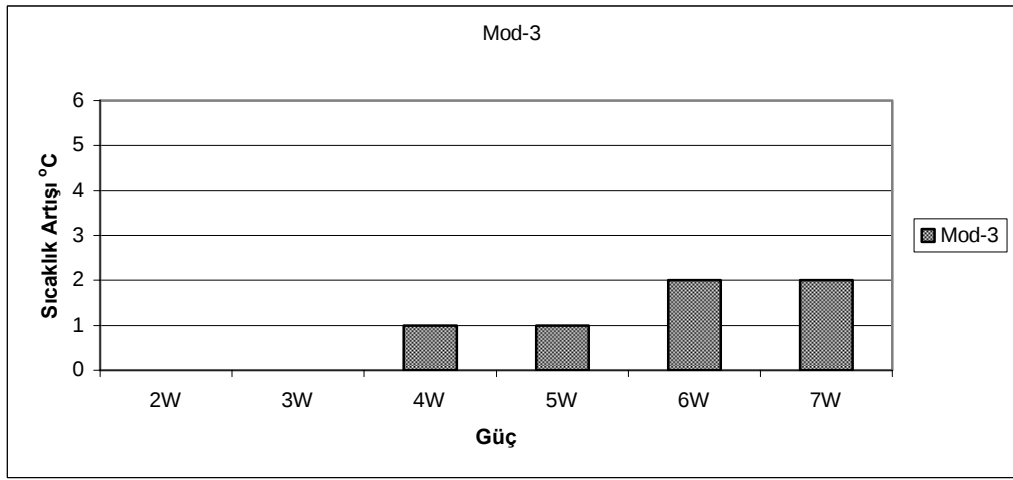


(c)

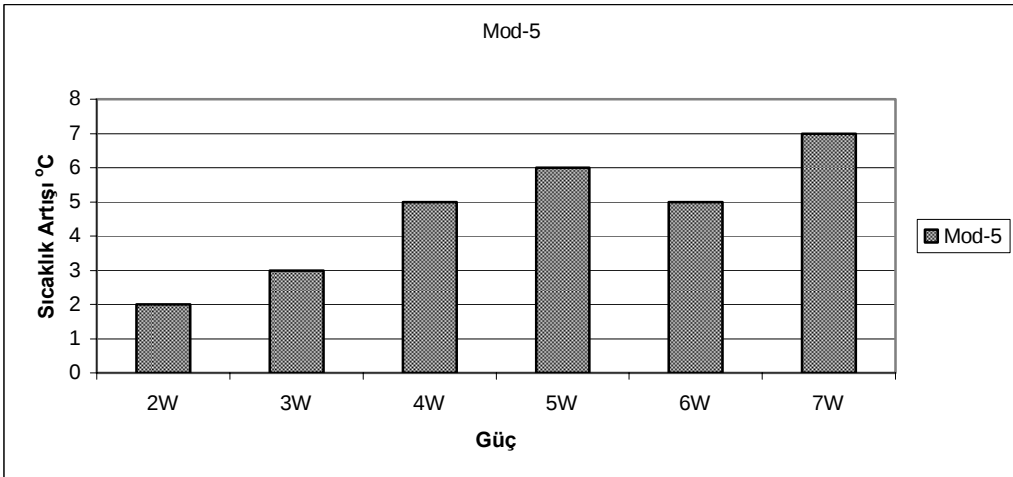
Şekil A.1: Farklı laser modlarında oluşan sıcaklık artışları
(a) 3W, (b) 5W, (c) 6W



(a)

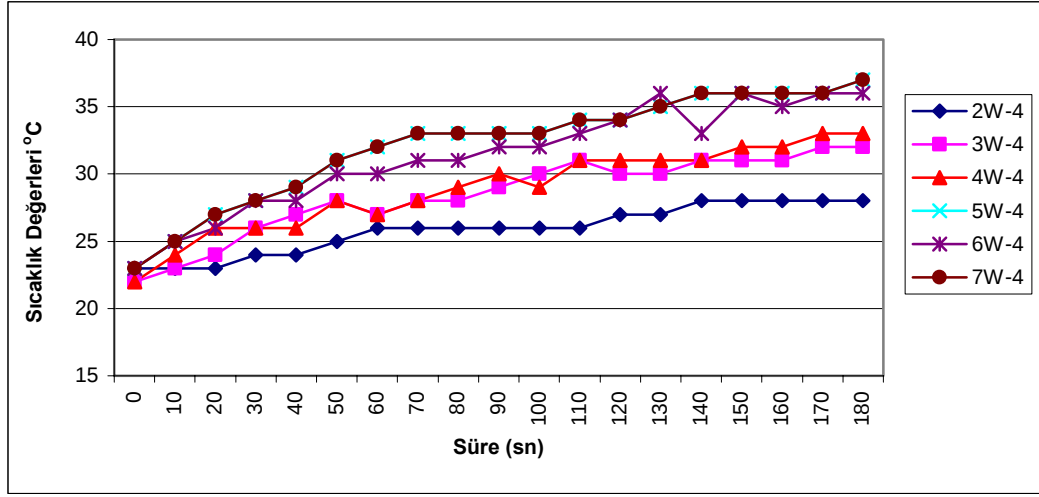


(b)

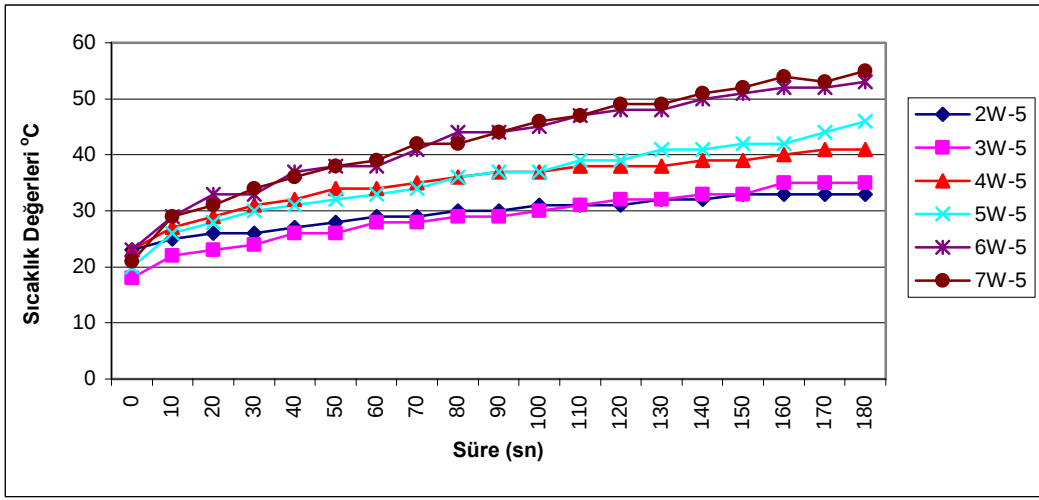


(c)

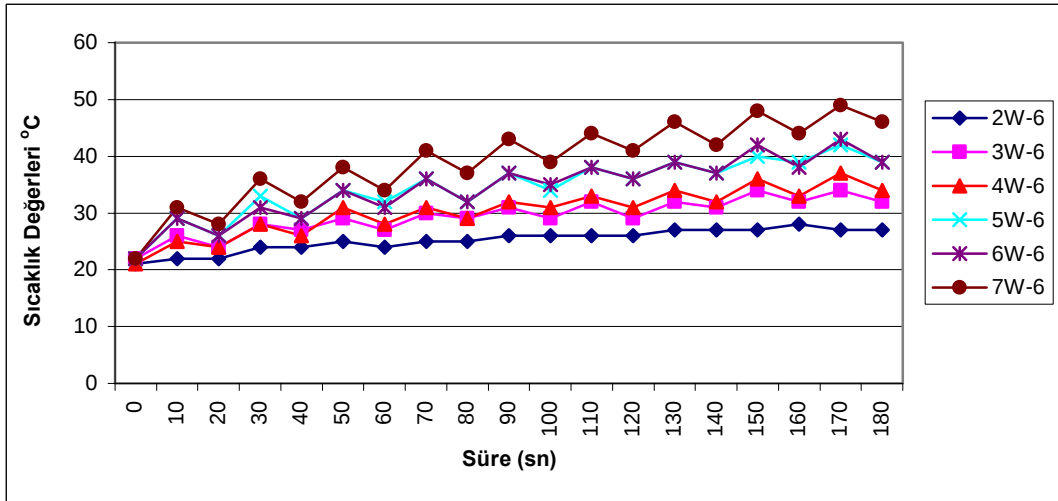
Şekil A.2: Farklı laser güçlerinde oluşan sıcaklık artışları
(a) Mod-2, (b) Mod-3, (c) Mod-5



(a)

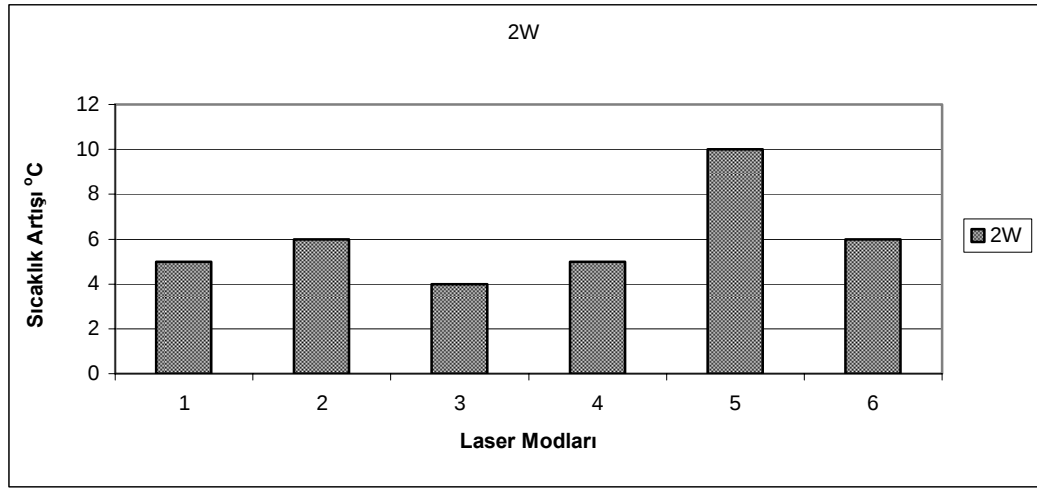


(b)

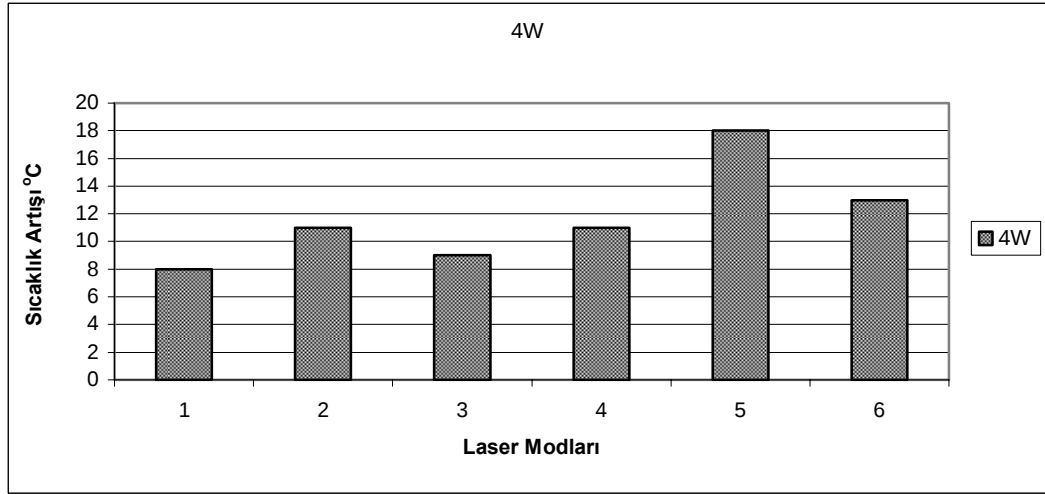


(c)

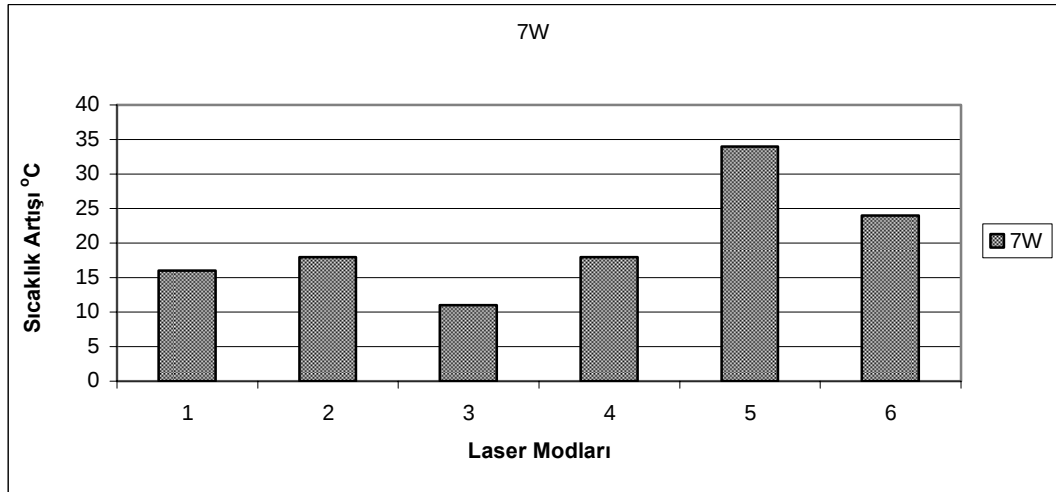
Şekil A.3: Farklı güçlerin oluşturduğu sıcaklık değişimlerinin zaman ekseninde incelenmesi (a) Mod-4, (b) Mod-5, (c) Mod-6



(a)

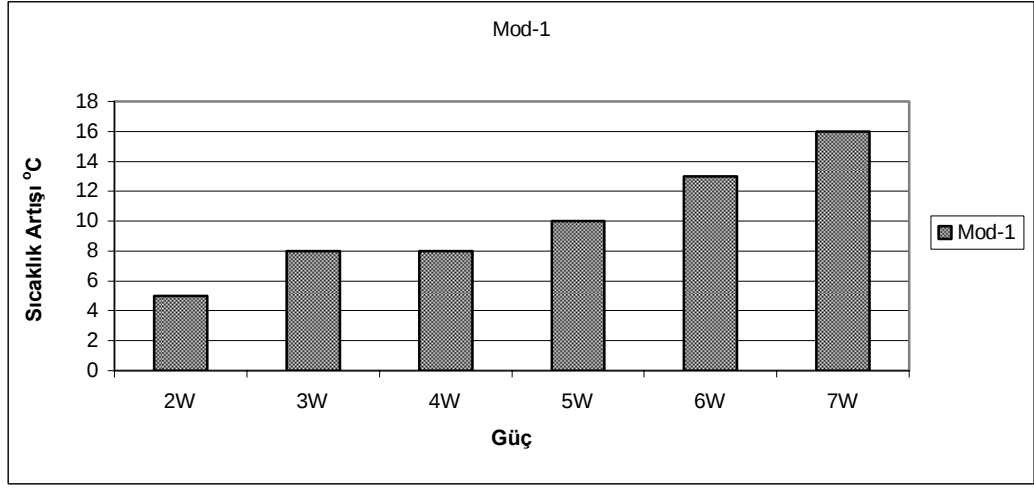


(b)

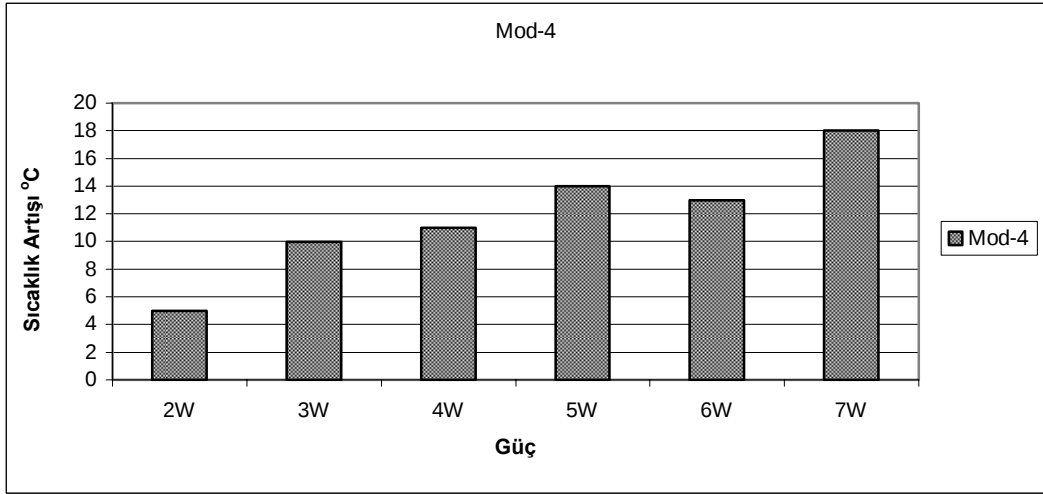


(c)

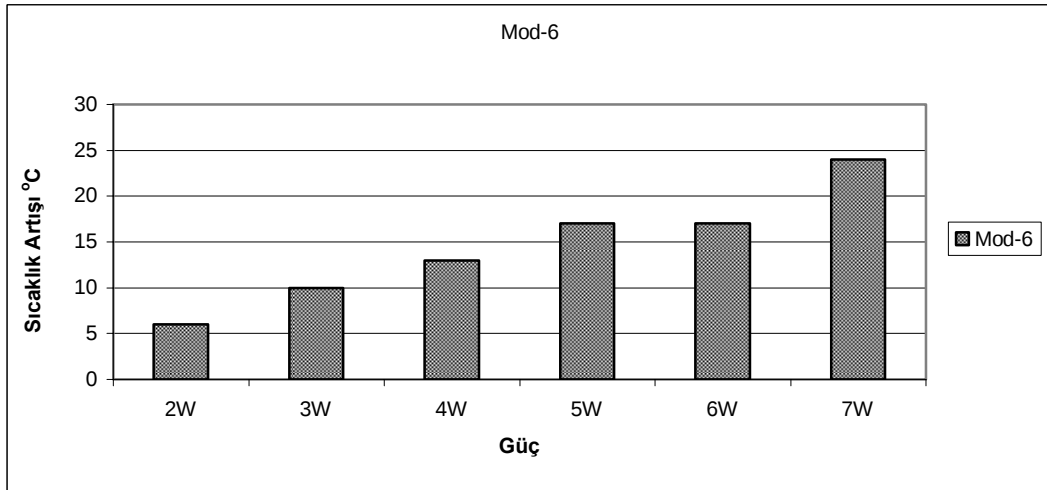
Şekil A.4: Farklı laser modlarında oluşan sıcaklık artışları
(a) 2W, (b) 4W, (c) 7W



(a)

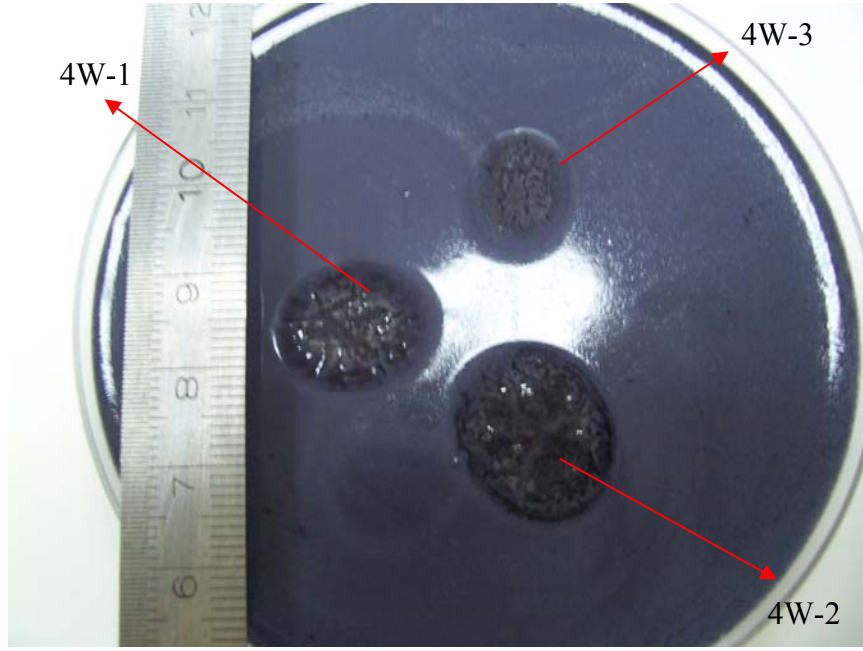


(b)

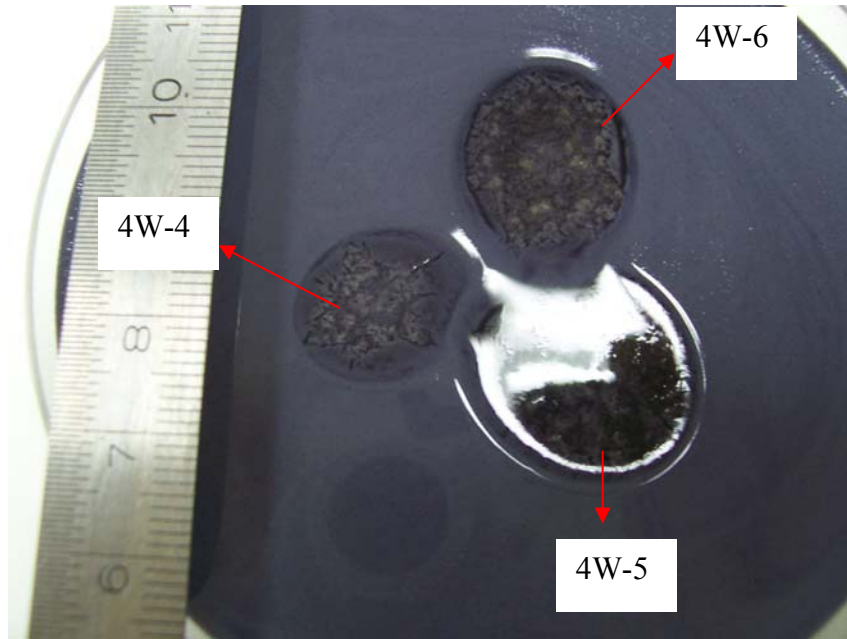


(c)

Şekil A.5: Farklı laser güçlerinde oluşan sıcaklık artışları
(a) Mod-1, (b) Mod-4, (c) Mod-6



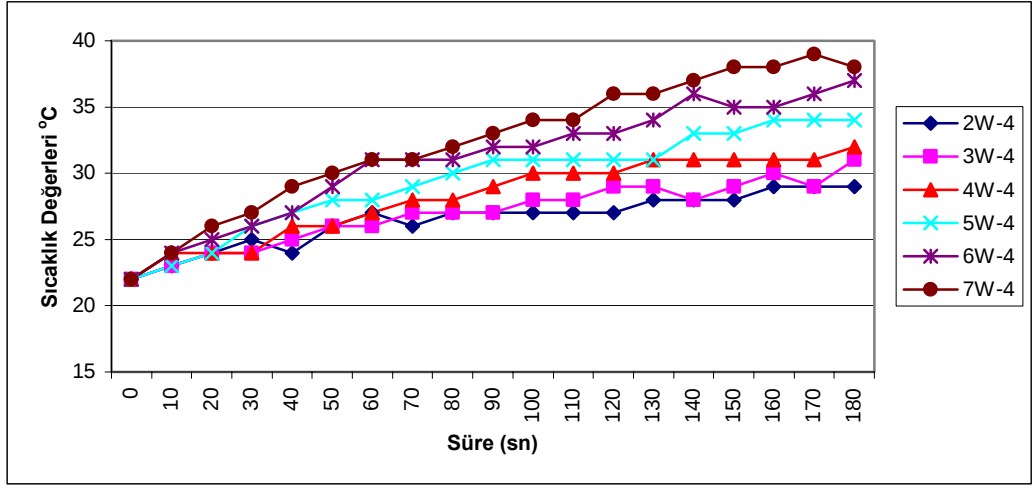
(a)



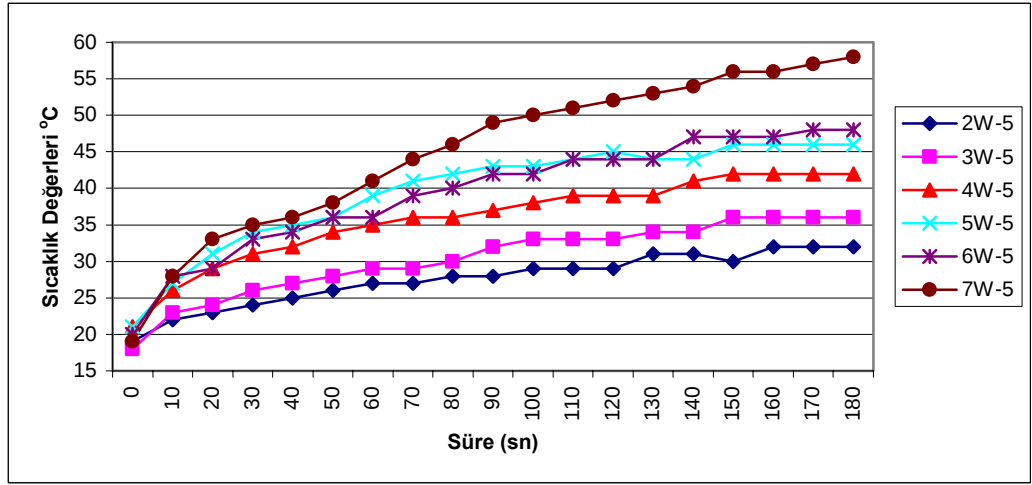
(b)

Şekil A.6: Fantom yüzeyinde 4W uygulanmasıyla oluşan fiziksel alanların karşılaştırılması

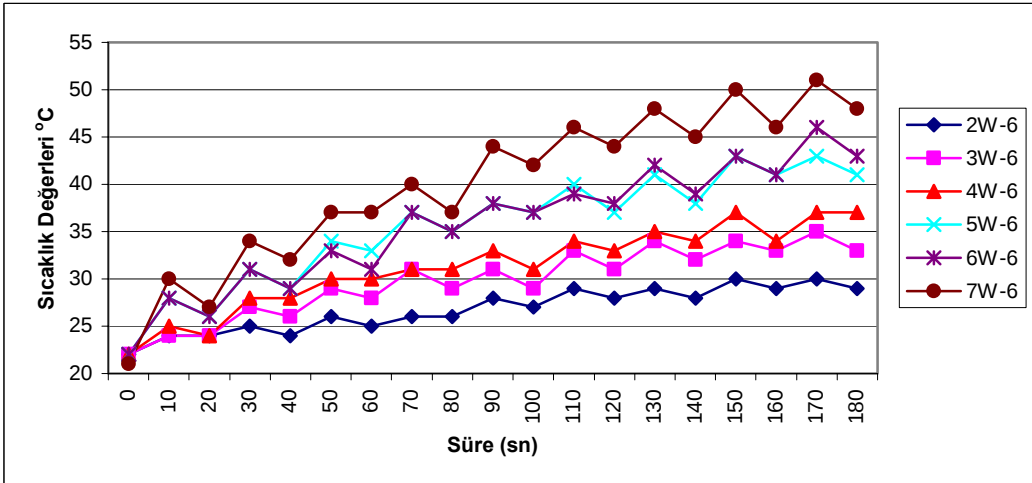
(a) Mod-1, Mod-2, Mod-3, (b) Mod-4, Mod-5, Mod-6



(a)



(b)

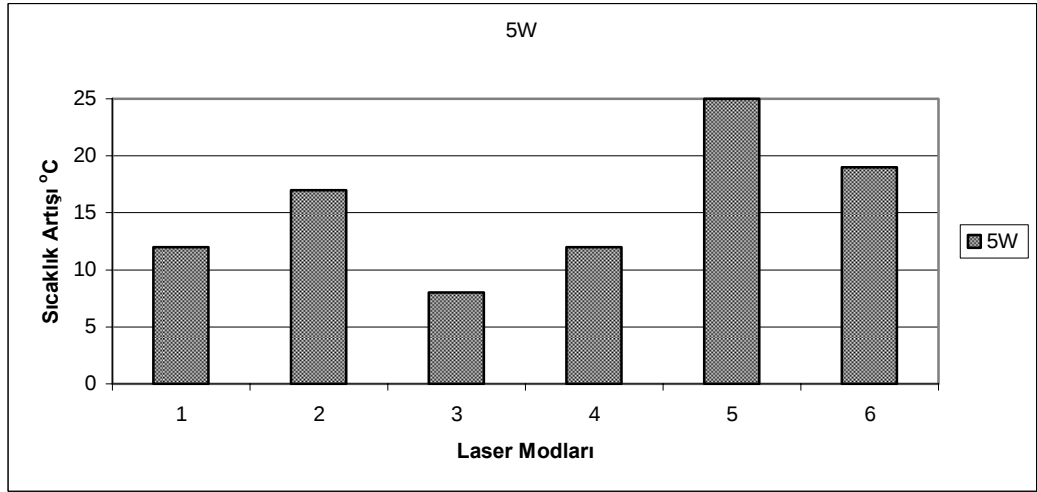


(c)

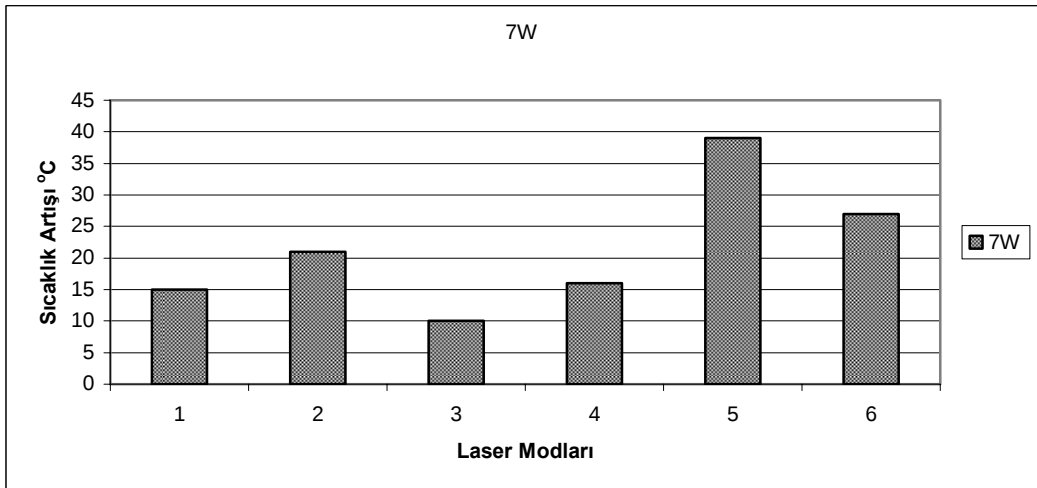
Şekil A.7: Farklı güçlerin oluşturduğu sıcaklık değişimlerinin zaman ekseninde incelenmesi (a) Mod-4, (b) Mod-5, (c) Mod-6



(a)

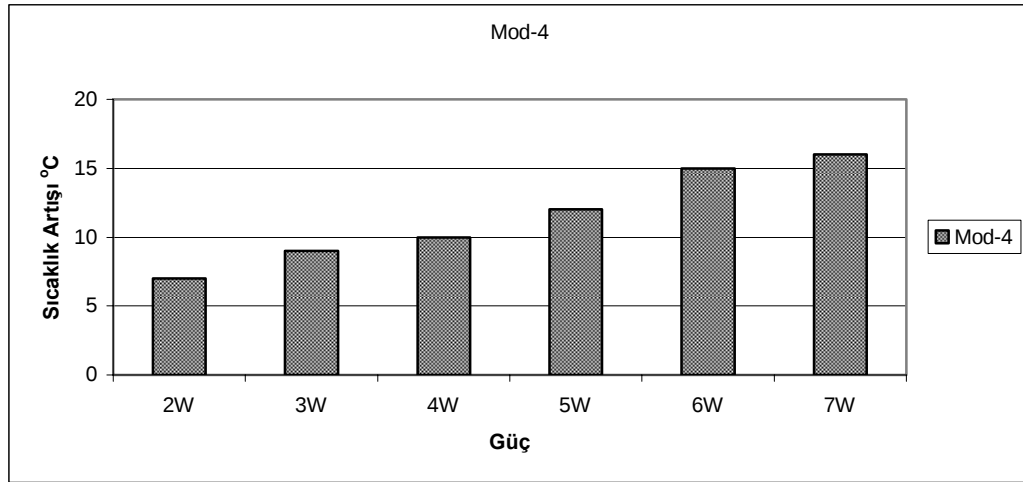


(b)

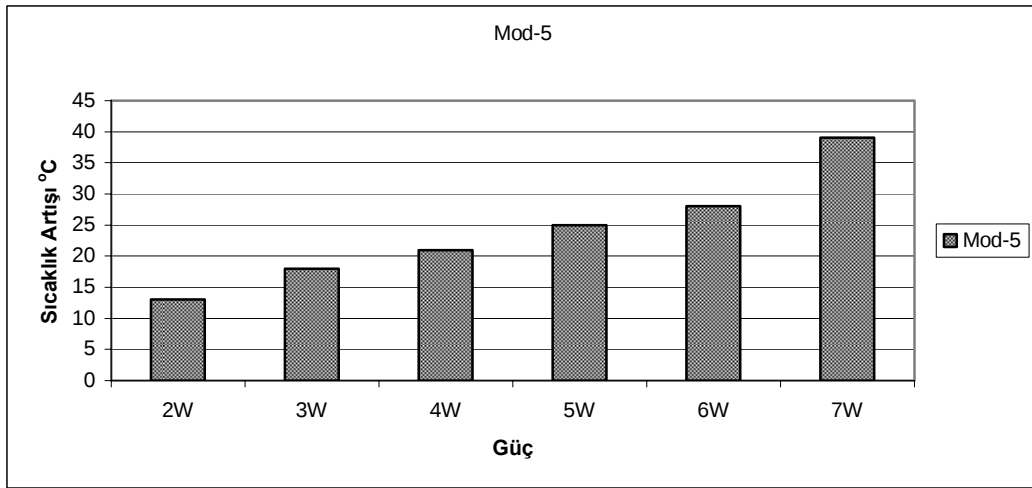


(c)

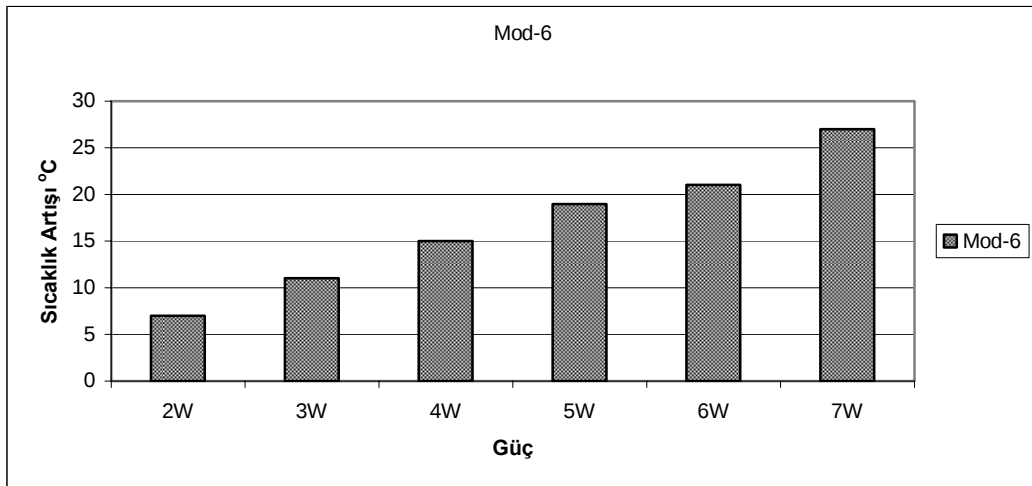
Şekil A.8: Farklı laser modlarında oluşan sıcaklık artışları
(a) 3W, (b) 5W, (c) 7W



(a)



(b)



(c)

Şekil A.9: Farklı laser güçlerinde oluşan sıcaklık artışları
(a) Mod-4, (b) Mod-5, (c) Mod-6

ÖZGEÇMİŞ

Saime AKDEMİR, Ankara’da 1983 yılında doğdu. İlk ve orta öğrenimini Kayseri’de tamamladıktan sonra, 2001 yılında Nevşehir Hüseyin Avni İncekara Fen Lisesi’nden mezun oldu ve Erciyes Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektronik Mühendisliği Bölümü’ne girdi. 2005 yılında Elektronik Mühendisi ünvanıyla mezun oldu. Eylül 2005’de İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Biyomedikal Mühendisliği Programı’nda yüksek lisans öğrenimine başladı.