



**T.C.
RECEP TAYYİP ERDOĞAN ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**680 nm’de DARALAN KILAVUZ YAPILI DİYOTLA UYARILAN
Tm:YAG VE Tm:LuAG LAZERLERİNİN GELİŞTİRİLEREK
PERFORMANSLARININ İNCELENMESİ**

(Yüksek Lisans Tezi)

Fatma KAYA

**Danışman
Doç. Dr. Ersen BEYATLI**

**RİZE
2025**

KABUL VE ONAY

Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında, Doç. Dr. Ersen BEYATLI danışmanlığında, Fatma KAYA tarafından hazırlanan *680 nm’de Daralan Kılavuz Yapılı Diyotla Uyarılan Tm:YAG ve Tm:LuAG Lazerlerinin Geliştirilerek Performanslarının İncelenmesi* adlı bu tez çalışması, 30/01/2025 tarihinde yapılan savunma sınavı sonucunda oy birliğiyle/~~oy çokluğuyla~~ başarılı bulunarak jürimiz tarafından **Yüksek Lisans Tezi** olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri	Ünvanı, Adı SOYADI	İmza
Başkan	: Doç. Dr. Övgü Ceyda YELGEL	
Üye	: Doç. Dr. Ersen BEYATLI	
Üye	: Prof. Dr. Kadir TÜRK	

ETİK BEYAN

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Tezli Yüksek Lisans Programından mezun olmak üzere teslim ettiğim “680 nm’de Daralan Kılavuz Yapılı Diyotla Uyarılan Tm:YAG ve Tm:LuAG Lazerlerinin Geliştirilerek Performanslarının İncelenmesi” adlı tezim, bilim ve araştırma etiği prensiplerine riayet edilerek tarafımdan yazılmıştır.

Tez çalışmamda, başka kaynaklardan aktarılan bütün bilgi ve alıntılar, Enstitünüz Tez Yazım Kılavuzuna uygun olarak açıkça gösterilmiştir. Kaynağı gösterilenler dışında kalan bütün bilgiler uygun araştırma yöntemi kullanılarak tarafımdan edinilmiş ve esere bu şekilde yansıtılmıştır. Şahsıma ait olmayan hiçbir bilgi, kasıt veya kusurlar, şahsıma aitmiş gibi gösterilmemiştir. İnternet kaynakları dâhil, sahibine/kaynağına atıf yapılmaksızın hiçbir bilgi kullanılmamıştır. Aksinin ortaya çıkması halinde doğacak bütün hukuki, idari, akademik ve etik sorumluluk tarafıma ait olacaktır. Eserin tesliminden sonra herhangi bir zamanda, bilim etiğine aykırılık tespit edilmesi ve / veya eserimle ilgili intihal veya intihal şeklinde anlaşılabilecek bir durumun ortaya çıkması halinde; Üniversiteniz ve eğitim kadronuzun hiçbir şekilde sorumlu tutulmayacağını hür irademle kabul, beyan ve taahhüt ederim.

09 /01/2025

Fatma KAYA

ÖN SÖZ

Lazer teknolojisi, yüksek yoğunluklu ve koherent ışık üretmesi ile teknolojinin ve modern bilimin önemli bir yapı taşı olmuştur. Katı-hal lazerlerinin yüksek verimliliğe ve uygulama alanlarındaki çeşitliliklerinden ötürü önemlidirler. Bu çalışmada, 2 μm dalga boyunda ışık yayabilen Tm:YAG ve Tm:LuAG katı-hal lazerlerinin 680 nm’de daralan kılavuz yapıları diyotlarla uyarılmasının etkileri incelenmiştir. Lazer sistemlerinin performansı; kristal değişkenlerine bağlı olarak analiz edilmiştir. Ayrıca optik verimliliği arttırmak için öneriler sunmayı ve kullanım alanlarının yelpazesini genişletmeyi amaçlamaktadır.

Yüksek lisans sürecim boyunca bana bu değerli akademik fırsatı sunduğu için Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi’ne, çalışmamın gerçekleştirilmesine maddi destek sağlayan TÜBİTAK’a, gerekli ekipman ve cihaz desteği için Ferdinand-Braun Enstitüsü’ne, teşekkürlerimi sunarım.

Yüksek lisans tez çalışmamın her aşamasında bilgi ve tecrübesi ile yol gösteren, yardım ve desteğini esirgemeyen hocam Sayın Doç. Dr. Ersen BEYATLI’ya ve değerli önerileri için hocam Sayın Prof. Dr. Ümit DEMİRBAŞ’a en derin şükranlarımı sunarım. Her zaman destek ve katkılarıyla yanımda olan kıymetli dostum Hatice BİLİCİ’ye tüm kalbimle teşekkür ederim. Varlığın bana güç verdi.

Bu süreçte, kelimelerle ifade edilemeyen fedakarlıkları, içten şefkati ve karşılıksız sevgisiyle her zaman yanımda olan değerli aileme en içten teşekkürlerimi sunuyorum. Bir evladın sahip olabileceği en harika aileye sahip olduğum için kendimi çok şanslı hissediyorum. Hayatım boyunca yanımda olduğunuz, rehberlik ettiğiniz ve bana sağladığınız her şey için sonsuz minnettarım.

Bu tez TÜBİTAK-1001 Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Projelerini Destekleme Programı kapsamında yürütülen 119F308 numaralı “680 nm’de Daralan Kılavuz Yapılı ve 1,6 μm Bölgesinde Yüksek Parlaklığa Sahip Diyotlarla Uyarılan Tm:YAG ve Tm:LuAG Lazerlerinin Geliştirilip Performanslarının İncelenmesi ve Modellenmesi” isimli projeden destek alınarak gerçekleştirilmiştir.

Fatma KAYA
RİZE/2025

İÇİNDEKİLER

KABUL VE ONAY	I
ETİK BEYAN	II
ÖN SÖZ	III
İÇİNDEKİLER	IV
ÖZET	VII
ABSTRACT.....	VIII
KISALTMALAR	IX
TABLolar LİSTESİ.....	XIII
ŞEKİLLER LİSTESİ	XIV
GİRİŞ	1
1. KURAMSAL TEMELLER	5
1.1. Lazerin Temelleri	5
1.1.1. Lazer Fiziği.....	5
1.1.2. Lazer Bileşenleri.....	7
1.1.3. Lazer Çalışma Modları	8
1.1.3.1. Sürekli Mod	8
1.1.3.2. Darbeli Mod.....	9
1.2. Katı-Hal Lazerleri	12
1.2.1. Tm^{+3} Lazerleri	13
1.2.1.1. Tm:YAG Lazerleri	15
1.2.1.2. Tm:LuAG Lazerleri	16
1.2.2. Tm^{+3} Lazerlerini Pompalama Yöntemleri	17
1.2.2.1. Flaş Lambası ile Pompalama	17
1.2.2.2. Ti:Safir Lazerlerinin Çıkışı ile Pompalama	18
1.2.2.3. Lazer Diyotlar ile Pompalama	18
1.2.2.3.1. Lazer Diyotların Çalışma Modları	21
1.2.2.3.2. Lazer Diyotlarda Parlaklık	22
1.2.2.3.3. Yüksek parlaklığa sahip daralan kılavuz yapılı lazer diyotlar	25
2. MATERYAL ve DENEYSEL KURULUM YÖNTEMİ.....	27
2.1. 680 nm’de daralan kılavuz yapılı lazer diyotların karakterizasyonu	30

2.2. Verim Eğimi Performanslarının İncelenmesi	31
2.3. Kristal Su Sıcaklığına ve Kristal Sıcaklığına Bağlı Lazer Çıkış Gücü Değişiminin İncelenmesi.....	31
2.4. Lazer Çıkışının Kip İdeallığının İncelenmesi (M^2 Ölçümü).....	32
2.5. Dalga Boyu Değişim Aralıklarının ve Çift Dalga Boyu Işımlarının İncelenmesi	33
2.6. SESAM Tabanlı Darbeli Rejimdeki Performanslarının İncelenmesi.....	33
3. DENEYSEL BULGULAR	35
3.1. Tm:YAG ve Tm:LuAG lazerlerinin Sürekli Dalga Rejimi Performansları ...	35
3.1.1. %1,5 Katkılı 9-mm Tm:YAG Kristali Verim Eğrileri	38
3.1.2. %1,5 Katkılı 7-mm Tm:YAG Kristali Verim Eğrileri	39
3.1.3. %1,5 Katkılı 5-mm Tm:YAG Kristali Verim Eğrileri	41
3.1.4. %1,5 Katkılı 3-mm Tm:YAG Kristali Verim Eğrileri	43
3.1.5. %3 Katkılı 7-mm Tm:YAG Kristali Verim Eğrileri	45
3.1.6. %3 Katkılı 5-mm Tm:YAG Kristali Verim Eğrileri	47
3.1.7. %3 Katkılı 3-mm Tm:YAG Kristali Verim Eğrileri	49
3.1.8. %6 Katkılı 7-mm Tm:YAG Kristali Verim Eğrileri	51
3.1.9. %6 Katkılı 5-mm Tm:YAG Kristali Verim Eğrileri	53
3.1.10. %6 Katkılı 3-mm Tm:YAG Kristali Verim Eğrileri	55
3.1.11. %2 Katkılı 9-mm Tm:LuAG Kristali Verim Eğrileri	57
3.1.12. %2 Katkılı 7-mm Tm:LuAG Kristali Verim Eğrileri	59
3.1.13. %2 Katkılı 5-mm Tm:LuAG Kristali Verim Eğrileri	61
3.1.14. %2 Katkılı 3-mm Tm:LuAG Kristali Verim Eğrileri	63
3.1.15. %4 Katkılı 7-mm Tm:LuAG Kristali Verim Eğrileri	65
3.1.16. %4 Katkılı 5-mm Tm:LuAG Kristali Verim Eğrileri	67
3.1.17. %4 Katkılı 3-mm Tm:LuAG Kristali Verim Eğrileri	69
3.1.18. %6 Katkılı 7-mm Tm:LuAG Kristali Verim Eğrileri	71
3.1.19. %6 Katkılı 5-mm Tm:LuAG Kristali Verim Eğrileri	73
3.1.20. %6 Katkılı 3-mm Tm:LuAG Kristali Verim Eğrileri	75
3.2. Tm:YAG ve Tm:LuAG Lazerlerinin Çıkış Gücünün Kristal Sıcaklığına ve Kristal Su Sıcaklığına Bağlı Değişim Grafikleri.....	77

3.3. Tm:YAG ve Tm:LuAG Lazer Sistemlerindeki Işın Yarıçapının M^2 Ölçüm Sonucu Grafikleri.....	94
3.4. Tm:YAG ve Tm:LuAG Lazer Sistemlerinin Dalga Boyu Değişim Aralığı Grafikleri.....	109
3.5. Tm:YAG ve Tm:LuAG Lazer Sistemlerinin Çift Dalga Boyu Işıma Spektrum Grafikleri.....	116
3.6. Tm:YAG ve Tm:LuAG Lazer Sistemlerinin Q-Anahtarlama Rejimi Grafikleri	123
4. TARTIŞMA VE SONUÇ	135
KAYNAKÇA.....	141



Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Anabilim Dalı : Elektrik-Elektronik Mühendisliği
Tez Türü : Yüksek Lisans Tezi
Danışman : Doç. Dr. Ersen BEYATLI
Hazırlayan : Fatma KAYA
Yıl : 2025
Sayfa Sayısı : 147

ÖZET

**680 nm’de DARALAN KILAVUZ YAPILI DİYOTLA UYARILAN Tm:YAG VE
Tm:LuAG LAZERLERİNİN GELİŞTİRİLEREK PERFORMANSLARININ
İNCELENMESİ**

785-808 nm, 1150 nm ve 600-700 nm aralıklarında uyarılıp 2 μm ’de ışıma yapabilen Tm^{+3} lazerleri sağlıkta, endüstride, bilimsel araştırmalarda, askeri uygulamalarda, ışıık gösterileri gibi çok geniş bir yelpazede kullanılmaktadırlar. Tm^{+3} lazerleri çapraz sönümleme etkisi ve gerekli ekipmanlara kolaylıkla ulaşılabilinmesinden ötürü genellikle 785 nm’de uyarılmaktadırlar. Geçmişten bugüne kadar Tm^{+3} lazerlerinin 680 nm’de uyarılma yapabilmek için uygun pompalama ekipmanlarına erişim zor olmasından ötürü bu dalga boyunda Tm^{+3} lazer sistemlerinin oldukça az olduğu gözlemlenmiştir. Ancak Tm^{+3} lazerlerinin soğurma bandı incelendiğinde 680 nm’de uyarılan lazerler 785 nm’de uyarılan lazerlere göre üç kat daha fazla soğurulmaktadır ve 680 nm’de uyarılan lazerler 785 nm’de uyarılan lazerlere göre daha fazla çapraz sönümleme etkisinin olduğu görülmektedir.

Yapılan bu çalışmada son yıllarda geliştirilen yüksek parlaklığa sahip 1W’lık daralan kılavuz yapılı AlGaInP lazer diyotlar ile 680 nm’de Tm:YAG ve Tm:LuAG lazer sistemleri uyarılmıştır. %1,5 katkılı 9,7,5 ve 3 mm uzunluğunda; %3 katkılı 7,5 ve 3 mm uzunluğunda; %6 katkılı 7,5 ve 3 mm uzunluğunda Tm:YAG lazerleri ve %2 katkılı 9,7,5 ve 3 mm; %4 katkılı 7,5 ve 3 mm uzunluğunda; %6 katkılı 7,5 ve 3 mm uzunluğunda TmLuAG lazerleri olmak üzere 20 farklı lazer sistemi kurulmuştur. Her bir sistem için sürekli dalga rejimi, dalga boyu değişimi, çift dalga boyu ışıma spektrumu, M^2 ölçümü ve Q-anahtarlama darbe rejimleri incelenmiştir. Yapılan incelemelerde Tm:YAG lazerleri için sürekli dalga rejimlerinde en yüksek 332 mW’a kadar çıkış gücü ve %45’e varan verimler elde edilmiştir. Çift kırınımlı prizma ile yapılan dalga boyu değişiminde 216 nm’ye varan dalga boyu değişim aralığı gözlemlenmiştir. Birbirine en uzak 48 mW gücünde 1878 ile 2082 nm’de çift dalga boyu ışıması gözlenmiştir. SESAM ile yapılan Q-anahtarlama rejiminde 2,83 μJ enerji, 0,872 μs genişlik, 1180 mW tepe gücü, 37,88 kHz frekans’a varan darbeler gözlemlenmiştir. Tm:LuAG lazerleri için ise sürekli dalga rejimlerinde en yüksek 268 mW’a kadar çıkış gücü ve %44’e varan verimler elde edilmiştir. Çift kırınımlı prizma ile yapılan dalga boyu değişiminde 208 nm’ye varan dalga boyu değişim aralığı gözlemlenmiştir. Birbirine en uzak 55 mW gücünde 1882 ile 2066 nm’de çift dalga boyu ışıması gözlenmiştir. SESAM ile yapılan Q-anahtarlama rejiminde 2,87 μJ enerji, 1,36 μs genişlik, 1207 mW tepe gücü, 30,53 kHz frekans’a varan darbeler gözlemlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Katı-Hal Lazerleri, Lazer Diyot, Tm:YAG Lazerleri, Tm:LuAG Lazerleri, Q-Anahtarlama Lazerler

Recep Tayyip Erdogan University Institute of Graduate Studies

Department : Electrical-Electronics Engineering
Thesis Type : Master's Thesis
Supervisor : Associate Prof. Dr. Ersen BEYATLI
Author : Fatma KAYA
Year : 2025
Pages : 147

ABSTRACT

**DEVELOPMENT AND INVESTIGATION OF THE PERFORMANCE OF
Tm:YAG AND Tm:LuAG LASERS EXCITED WITH NARROWING GUIDE
STRUCTURED DIODE AT 680 nm**

Tm³⁺ lasers, which can be excited in the ranges of 785-808 nm, 1150 nm and 600-700 nm and emit at 2 μ m, are used in a wide range of areas such as health, industry, scientific research, military applications, and light shows. Tm³⁺ lasers are generally excited at 785 nm due to the cross-fading effect and easy access to the necessary equipment. From the past to the present, it has been observed that Tm³⁺ laser systems are quite rare at this wavelength due to the difficulty of accessing suitable pumping equipment to excite Tm³⁺ lasers at 680 nm. However, when the absorption band of Tm³⁺ lasers is examined, lasers excited at 680 nm are absorbed three times more than lasers excited at 785 nm, and it is seen that lasers excited at 680 nm have more cross-fading effect than lasers excited at 785 nm.

In this study, Tm:YAG and Tm:LuAG laser systems were excited at 680 nm with recently developed high brightness 1 W narrow guide structure AlGaInP laser diodes. 20 different laser systems were established including 1.5% doped 9, 7.5 and 3 mm in length; 3% doped 7.5 and 3 mm in length; 6% doped 7.5 and 3 mm in length Tm:YAG lasers and 2% doped 9, 7.5 and 3 mm in length; 4% doped 7.5 and 3 mm in length; 6% doped 7.5 and 3 mm in length TmLuAG lasers. Continuous wave regime, wavelength change, dual wavelength radiation spectrum, M^2 measurement and Q switching pulse regimes were investigated for each system. In the investigations, the highest output power up to 332 mW and efficiencies up to 45% were obtained for Tm:YAG lasers in continuous wave regime. In the wavelength change made with a double-refractive prism, a wavelength change range of up to 216 nm was observed. Dual wavelength radiation was observed between 1878 and 2082 nm at the farthest power of 48 mW. In the Q-switching regime performed with SESAM, pulses with an energy of 2.83 μ J, a width of 0.872 μ s, a peak power of 1180 mW, and a frequency of up to 37.88 kHz were observed. For Tm:LuAG lasers, a maximum output power of up to 268 mW and efficiencies of up to 44% were obtained in the continuous wave regime. A wavelength change range of up to 208 nm was observed in the wavelength change made with a double-refractive prism. Dual wavelength radiation was observed between 1882 and 2066 nm at the farthest power of 55 mW. In the Q switching regime with SESAM, pulses with energy of 2.87 μ J, width of 1.36 μ s, peak power of 1207 mW, and frequency of up to 30.53 kHz were observed.

Keywords: Solid-State Lasers, Laser Diode, Tm:YAG Lasers, Tm:LuAG Lasers, Q-Switched Lasers

KISALTMALAR

AL	:	Asferik lens
Al	:	Alüminyum
Al ₂ O ₃	:	Korundum, Safır, Alümiyum oksit
AlGaAs	:	Alüminyum galyum arsenid
AlGaInP	:	Alüminyum galyum indiyum fosfit
AlGaP	:	Alüminyum galyum fosfit
As	:	Arsenik
B	:	Bor
Bi ₂ Te ₃	:	Bismut tellür doymuş soğurucu
CL	:	Silindirik lens
CM ₁	:	Çukur ayna
CM ₂	:	Çukur ayna
CM ₃	:	Çukur ayna
CO ₂	:	Karbondioksit
Cr	:	Krom
Cr:LiCAF	:	Krom katkılı lityum kalsiyum alüminyum florür
Cr:LiSAF	:	Krom katkılı lityum stronsiyum alüminyum florür
E	:	Fotonun enerjisi
E_1	:	Taban seviyedeki enerji
E_2	:	Yüksek seviyedeki enerji
Er	:	Erbiyum
f	:	İnce bir merceğin odak uzaklığı
fs	:	Femtosaniye
Ga	:	Galyum
GaAs	:	Galyum arsenit
Gd	:	Gadolinyum
GHz	:	Gigahertz
$g(x)$	:	Işığın yoğunluk fonksiyonu
h	:	Plank sabiti
Ho	:	Holmiyum

HR	:	Yüksek yansıtıcı ayna
HWP	:	Yarım dalga dönüştürücü
Hz	:	Hertz
J	:	Joule
kHz	:	Kilohertz
KrF	:	Kripton florür
LD	:	C-yapılı diyot tutucular
LiSAF	:	Lityum stronsiyum alüminyum florür
M^2	:	Işın kalite faktörü
ML	:	Mercek
mm	:	Milimetre
MoS ₂	:	Molibden disülfür doyurulmuş soğurucu
MHz	:	Megahertz
mJ	:	Milijoule
ms	:	Milisaniye
mW	:	Miliwatt
n_0	:	Kırılma indisi
Nd	:	Neodimyum
Nd:CAM	:	Neodimyum katkılı kalsiyum alüminyum monosilikat
Nd:YAG	:	Neodimyum katkılı itriyum alüminyum garnet
nJ	:	Nano-Joule
nm	:	Nanometre
ns	:	Nanosaniye
OC	:	Çıkış aynası
P	:	Fosfor
PBS	:	Polarize ışın ayırıcı
PbMoO ₄	:	Kurşun molibdat
P ₂ O ₅	:	Fosfat, Fosfor pentoksit
Pr	:	Praseodimyum
ps	:	Pikosaniye
R ₀	:	Kritik mesafe parametresi
R ²	:	Verilerin anlamlandırılma oranı

s	:	Saniye
Sb	:	Antimon
SESAM	:	Yarı iletken doyuma ulaşabilen soğurucu ayna
SiO ₂	:	Silikat, Silisyum dioksit
SWCNT_SA	:	Tek duvarlı karbon nanotüp doyurulmuş soğurucu
T	:	Periyot
TDL	:	Ayarlanabilir diyot lazer
Ti	:	Titanyum
Ti:Safir	:	Titanyum katkılı safir
Tm	:	Tulyum
Tm:LuAG	:	Tulyum katkılı lutesyum alüminyum garnet
Tm:YAG	:	Tulyum katkılı itriyum alüminyum garnet
ν	:	Lazer ışığının frekansı
vb.	:	Ve benzeri, ve benzerleri, ve bunun gibi
vd.	:	Ve devamı; ve diğerleri
W	:	Watt
Xtal	:	Kristal
YAG	:	İtriyum alüminyum garnet
Yb	:	İterbiyum
Yb:Tm:YLF	:	İterbiyum ve tulyum katkılı itriyum lityum florür
YLF	:	İtriyum lityum florür
z	:	Lokasyon
z_0	:	Rayleigh aralığı
z_f	:	Işının odak noktasından uzaklığı
$\omega(z)$	:	Uzak noktadaki bir ışının genişliği
ω_0	:	Işının odaklandığı yerdeki ışının yarıçapı
θ	:	Gauss ışınının sapma açısı
λ	:	Işının dalga boyu
μm	:	Mikrometre
μs	:	Mikrosaniye
°C	:	Santigrat derece
δ	:	Işının merkezi

σ : Standart sapma, ışının yayılma genişliği
 x : Yerdeki konumu



TABLÖLAR LİSTESİ

Tablo 1. Tm:YAG lazerlerinin sürekli dalga rejiminde çalışması sonucunda elde edilen sonuçlar.....	36
Tablo 2. Tm:LuAG lazerlerinin sürekli dalga rejiminde çalışması sonucunda elde edilen sonuçlar	37
Tablo 3. Tm:YAG ve Tm:LuAG lazerlerinin bıçak kenar yöntemi ile elde edilen M^2 ölçüm sonuçları.....	95
Tablo 4. Tm:YAG ve Tm:LuAG lazerler sistemlerine çift kırınımlı prizma eklenmesi ile elde edilen dalga boyu değişimi.....	109
Tablo 5. Tm:YAG ve Tm:LuAG lazer sistemlerine çift kırınımlı prizma eklenmesi ile elde edilen çift dalga boyu ışıma spektrumu	117
Tablo 6. Tm:YAG ve Tm:LuAG lazerlerinin Q-anahtarlama rejiminde çalışması sonucunda elde edilen sonuçlar	124

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1. İki seviyeli sistemde lazer ışınının üretilmesinin şematik gösterimi.....	6
Şekil 2. Üç ve dört seviyeli sistemlerde lazer ışının üretilmesinin şematik gösterimi	7
Şekil 3. Lazer bileşenlerinin şeması	7
Şekil 4. Sürekli dalga rejiminde çalışan lazerin güç-zaman grafiği	9
Şekil 5. Darbeli modda çalışan lazerin enerji-zaman grafiği.....	10
Şekil 6. Q-Anahtarlama rejiminde darbelerin genişlik ve periyodunun gösterimi.....	11
Şekil 7. Tm^{+3} iyonlarının bant diyagramı ve çapraz sönümleme etkisi.....	15
Şekil 8. Tm^{+3} iyonlarının soğurma grafiği.....	15
Şekil 9. Lazer diyotun şematik gösterimi	19
Şekil 10. Lazer diyotlarda lazer ışığının üretilmesinin şematik gösterimi	20
Şekil 11. Gauss ışının şematik gösterimi	23
Şekil 12. Işın kalite faktörünün şematik gösterimi	23
Şekil 13. Daralan kılavuz yapıları lazer diyotların görüntüsü	25
Şekil 14. Daralan kılavuz yapıları lazer diyotların yaydığı lazer ışın özelliklerinin şematik gösterimi	26
Şekil 15. Tm^{+3} katkılı lazer sistemlerinin teoriksel düzeneği	27
Şekil 16. Tm^{+3} katkılı lazer sistemlerinin pompalanma deneysel düzeneği	28
Şekil 17. Tm^{+3} katkılı lazer sistemlerinin rezonatör deneysel şeması	29
Şekil 18. Tm^{+3} katkılı lazer sistemlerinin kazanç ortamı için kullanılan kristal	29
Şekil 19. Tm^{+3} katkılı lazer sistemlerinin deneysel düzeneği.....	30
Şekil 20. Tm:YAG ve Tm:LuAG lazer sistemlerinde kullanılan portatif termal kamera	32
Şekil 21. Tm:YAG ve Tm:LuAG lazer sistemlerinde M^2 ölçümleri için bıçak kenar yöntem düzeneği	32
Şekil 22. Tm:YAG ve Tm:LuAG lazer sistemlerine eklenen çift kırınımlı prizmanın şeması ve görüntüsü.....	33
Şekil 23. Tm:YAG ve Tm:LuAG lazer sistemlerinde Q-anahtarlama darbeli rejimler için kurulan çukur ayna (CM_3) ve SESAM düzeneğinin şeması ve görüntüsü	34
Şekil 24. %1,5 Katkılı 9-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminin 15 °C'deki verim eğrisi	38

Şekil 25. %1,5 Katkılı 9-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminin 10 °C'deki verim eğrisi	38
Şekil 26. %1,5 Katkılı 9-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminin 20 °C'deki verim eğrisi	39
Şekil 27. %1,5 Katkılı 9-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminin 25 °C'deki verim eğrisi	39
Şekil 28. %1,5 Katkılı 7-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminin 15 °C'deki verim eğrisi	40
Şekil 29. %1,5 Katkılı 7-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminin 10 °C'deki verim eğrisi	40
Şekil 30. %1,5 Katkılı 7-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminin 20 °C'deki verim eğrisi	41
Şekil 31. %1,5 Katkılı 7-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminin 25 °C'deki verim eğrisi	41
Şekil 32. %1,5 Katkılı 5-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminin 15 °C'deki verim eğrisi	42
Şekil 33. %1,5 Katkılı 5-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminin 10 °C'deki verim eğrisi	42
Şekil 34. %1,5 Katkılı 5-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminin 20 °C'deki verim eğrisi	43
Şekil 35. %1,5 Katkılı 5-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminin 25 °C'deki verim eğrisi	43
Şekil 36. %1,5 Katkılı 3-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminin 15 °C'deki verim eğrisi	44
Şekil 37. %1,5 Katkılı 3-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminin 10 °C'deki verim eğrisi	44
Şekil 38. %1,5 Katkılı 3-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminin 20 °C'deki verim eğrisi	45
Şekil 39. %1,5 Katkılı 3-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminin 25 °C'deki verim eğrisi	45
Şekil 40. %3 Katkılı 7-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminin 15 °C'deki verim eğrisi.....	46

Şekil 41. %3 Katkılı 7-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminin 10 °C'deki verim eğrisi.....	46
Şekil 42. %3 Katkılı 7-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminin 20 °C'deki verim eğrisi.....	47
Şekil 43. %3 Katkılı 7-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminin 25 °C'deki verim eğrisi.....	47
Şekil 44. %3 Katkılı 5-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminin 15 °C'deki verim eğrisi.....	48
Şekil 45. %3 Katkılı 5-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminin 10 °C'deki verim eğrisi.....	48
Şekil 46. %3 Katkılı 5-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminin 20 °C'deki verim eğrisi.....	49
Şekil 47. %3 Katkılı 5-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminin 25 °C'deki verim eğrisi.....	49
Şekil 48. %3 Katkılı 3-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminin 15 °C'deki verim eğrisi.....	50
Şekil 49. %3 Katkılı 3-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminin 10 °C'deki verim eğrisi.....	50
Şekil 50. %3 Katkılı 3-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminin 20 °C'deki verim eğrisi.....	51
Şekil 51. %3 Katkılı 3-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminin 25 °C'deki verim eğrisi.....	51
Şekil 52. %6 Katkılı 7-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminin 15 °C'deki verim eğrisi.....	52
Şekil 53. %6 Katkılı 7-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminin 10 °C'deki verim eğrisi.....	52
Şekil 54. %6 Katkılı 7-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminin 20 °C'deki verim eğrisi.....	53
Şekil 55. %6 Katkılı 7-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminin 25 °C'deki verim eğrisi.....	53
Şekil 56. %6 Katkılı 5-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminin 15 °C'deki verim eğrisi.....	54

Şekil 57. %6 Katkılı 5-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminin 10 °C'deki verim eğrisi.....	54
Şekil 58. %6 Katkılı 5-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminin 20 °C'deki verim eğrisi.....	55
Şekil 59. %6 Katkılı 5-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminin 25 °C'deki verim eğrisi.....	55
Şekil 60. %6 Katkılı 3-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminin 15 °C'deki verim eğrisi.....	56
Şekil 61. %6 Katkılı 3-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminin 10 °C'deki verim eğrisi.....	56
Şekil 62. %6 Katkılı 3-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminin 20 °C'deki verim eğrisi.....	57
Şekil 63. %6 Katkılı 3-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminin 25 °C'deki verim eğrisi.....	57
Şekil 64. %2 Katkılı 9-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminin 15 °C'deki verim eğrisi	58
Şekil 65. %2 Katkılı 9-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminin 10 °C'deki verim eğrisi	58
Şekil 66. %2 Katkılı 9-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminin 20 °C'deki verim eğrisi	59
Şekil 67. %2 Katkılı 9-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminin 25 °C'deki verim eğrisi	59
Şekil 68. %2 Katkılı 7-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminin 15 °C'deki verim eğrisi	60
Şekil 69. %2 Katkılı 7-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminin 10 °C'deki verim eğrisi	60
Şekil 70. %2 Katkılı 7-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminin 20 °C'deki verim eğrisi	61
Şekil 71. %2 Katkılı 7-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminin 25 °C'deki verim eğrisi	61
Şekil 72. %2 Katkılı 5-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminin 15 °C'deki verim eğrisi	62

Şekil 73. %2 Katkılı 5-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminin 10 °C'deki verim eğrisi	62
Şekil 74. %2 Katkılı 5-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminin 20 °C'deki verim eğrisi	63
Şekil 75. %2 Katkılı 5-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminin 25 °C'deki verim eğrisi	63
Şekil 76. %2 Katkılı 3-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminin 15 °C'deki verim eğrisi	64
Şekil 77. %2 Katkılı 3-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminin 10 °C'deki verim eğrisi	64
Şekil 78. %2 Katkılı 3-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminin 20 °C'deki verim eğrisi	65
Şekil 79. %2 Katkılı 3-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminin 25 °C'deki verim eğrisi	65
Şekil 80. %4 Katkılı 7-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminin 15 °C'deki verim eğrisi	66
Şekil 81. %4 Katkılı 7-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminin 10 °C'deki verim eğrisi	66
Şekil 82. %4 Katkılı 7-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminin 20 °C'deki verim eğrisi	67
Şekil 83. %4 Katkılı 7-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminin 25 °C'deki verim eğrisi	67
Şekil 84. %4 Katkılı 5-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminin 15 °C'deki verim eğrisi	68
Şekil 85. %4 Katkılı 5-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminin 10 °C'deki verim eğrisi	68
Şekil 86. %4 Katkılı 5-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminin 20 °C'deki verim eğrisi	69
Şekil 87. %4 Katkılı 5-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminin 25 °C'deki verim eğrisi	69
Şekil 88. %4 Katkılı 3-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminin 15 °C'deki verim eğrisi	70

Şekil 89. %4 Katkılı 3-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminin 10 °C'deki verim eğrisi	70
Şekil 90. %4 Katkılı 3-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminin 20 °C'deki verim eğrisi	71
Şekil 91. %4 Katkılı 3-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminin 25 °C'deki verim eğrisi	71
Şekil 92. %6 Katkılı 7-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminin 15 °C'deki verim eğrisi	72
Şekil 93. %6 Katkılı 7-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminin 10 °C'deki verim eğrisi	72
Şekil 94. %6 Katkılı 7-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminin 20 °C'deki verim eğrisi	73
Şekil 95. %6 Katkılı 7-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminin 25 °C'deki verim eğrisi	73
Şekil 96. %6 Katkılı 5-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminin 15 °C'deki verim eğrisi	74
Şekil 97. %6 Katkılı 5-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminin 10 °C'deki verim eğrisi	74
Şekil 98. %6 Katkılı 5-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminin 20 °C'deki verim eğrisi	75
Şekil 99. %6 Katkılı 5-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminin 25 °C'deki verim eğrisi	75
Şekil 100. %6 Katkılı 3-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminin 15 °C'deki verim eğrisi	76
Şekil 101. %6 Katkılı 3-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminin 10 °C'deki verim eğrisi	76
Şekil 102. %6 Katkılı 3-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminin 20 °C'deki verim eğrisi	77
Şekil 103. %6 Katkılı 3-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminin 25 °C'deki verim eğrisi	77
Şekil 104. %1,5 Katkılı 9-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer çıkış gücünün kristal su sıcaklığına bağlı değişim grafiği	79

Şekil 105. %1,5 Katkılı 7-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer çıkış gücünün kristal su sıcaklığına bağlı değişim grafiği.....	80
Şekil 106. %1,5 Katkılı 5-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer çıkış gücünün kristal su sıcaklığına bağlı değişim grafiği.....	80
Şekil 107. %1,5 Katkılı 3-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer çıkış gücünün kristal su sıcaklığına bağlı değişim grafiği.....	80
Şekil 108. %3 Katkılı 7-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer çıkış gücünün kristal su sıcaklığına bağlı değişim grafiği.....	81
Şekil 109. %3 Katkılı 5-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer çıkış gücünün kristal su sıcaklığına bağlı değişim grafiği.....	81
Şekil 110. %3 Katkılı 3-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer çıkış gücünün kristal su sıcaklığına bağlı değişim grafiği.....	81
Şekil 111. %6 Katkılı 7-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer çıkış gücünün kristal su sıcaklığına bağlı değişim grafiği.....	82
Şekil 112. %6 Katkılı 5-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer çıkış gücünün kristal su sıcaklığına bağlı değişim grafiği.....	82
Şekil 113. %6 Katkılı 3-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer çıkış gücünün kristal su sıcaklığına bağlı değişim grafiği.....	82
Şekil 114. %2 Katkılı 9-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer çıkış gücünün kristal su sıcaklığına bağlı değişim grafiği.....	83
Şekil 115. %2 Katkılı 7-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer çıkış gücünün kristal su sıcaklığına bağlı değişim grafiği.....	83
Şekil 116. %2 Katkılı 5-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer çıkış gücünün kristal su sıcaklığına bağlı değişim grafiği.....	83
Şekil 117. %2 Katkılı 3-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer çıkış gücünün kristal su sıcaklığına bağlı değişim grafiği.....	84
Şekil 118. %4 Katkılı 7-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer çıkış gücünün kristal su sıcaklığına bağlı değişim grafiği.....	84
Şekil 119. %4 Katkılı 5-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer çıkış gücünün kristal su sıcaklığına bağlı değişim grafiği.....	84
Şekil 120. %4 Katkılı 3-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer çıkış gücünün kristal su sıcaklığına bağlı değişim grafiği.....	85

Şekil 121. %6 Katkılı 7-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer çıkış gücünün kristal su sıcaklığına bağlı değişim grafiği.....	85
Şekil 122. %6 Katkılı 5-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer çıkış gücünün kristal su sıcaklığına bağlı değişim grafiği.....	85
Şekil 123. %6 Katkılı 3-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer çıkış gücünün kristal su sıcaklığına bağlı değişim grafiği.....	86
Şekil 124. %1,5 Katkılı 9-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer çıkış gücünün kristal sıcaklığına bağlı değişim grafiği.....	86
Şekil 125. %1,5 Katkılı 7-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer çıkış gücünün kristal sıcaklığına bağlı değişim grafiği.....	86
Şekil 126. %1,5 Katkılı 5-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer çıkış gücünün kristal sıcaklığına bağlı değişim grafiği.....	87
Şekil 127. %1,5 Katkılı 3-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer çıkış gücünün kristal sıcaklığına bağlı değişim grafiği.....	87
Şekil 128. %3 Katkılı 7-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer çıkış gücünün kristal sıcaklığına bağlı değişim grafiği.....	87
Şekil 129. %3 Katkılı 5-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer çıkış gücünün kristal sıcaklığına bağlı değişim grafiği.....	88
Şekil 130. %3 Katkılı 3-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer çıkış gücünün kristal sıcaklığına bağlı değişim grafiği.....	88
Şekil 131. %6 Katkılı 7-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer çıkış gücünün kristal sıcaklığına bağlı değişim grafiği.....	88
Şekil 132. %6 Katkılı 5-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer çıkış gücünün kristal sıcaklığına bağlı değişim grafiği.....	89
Şekil 133. %6 Katkılı 3-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer çıkış gücünün kristal sıcaklığına bağlı değişim grafiği.....	89
Şekil 134. %2 Katkılı 9-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer çıkış gücünün kristal sıcaklığına bağlı değişim grafiği.....	89
Şekil 135. %2 Katkılı 7-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer çıkış gücünün kristal sıcaklığına bağlı değişim grafiği.....	90
Şekil 136. %2 Katkılı 5-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer çıkış gücünün kristal sıcaklığına bağlı değişim grafiği.....	90

Şekil 137. %2 Katkılı 3-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer çıkış gücünün kristal sıcaklığına bağlı değişim grafiği.....	90
Şekil 138. %4 Katkılı 7-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer çıkış gücünün kristal sıcaklığına bağlı değişim grafiği.....	91
Şekil 139. %4 Katkılı 5-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer çıkış gücünün kristal sıcaklığına bağlı değişim grafiği.....	91
Şekil 140. %4 Katkılı 3-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer çıkış gücünün kristal sıcaklığına bağlı değişim grafiği.....	91
Şekil 141. %6 Katkılı 7-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer çıkış gücünün kristal sıcaklığına bağlı değişim grafiği.....	92
Şekil 142. %6 Katkılı 5-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer çıkış gücünün kristal sıcaklığına bağlı değişim grafiği.....	92
Şekil 143. %6 Katkılı 3-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer çıkış gücünün kristal sıcaklığına bağlı değişim grafiği.....	92
Şekil 144. %6 Katkılı 3-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sistemin kristal su sıcaklığı 37.5 °C iken krisral üzerindeki sıcaklığın portatif termal kamera ölçümü ile alınan görüntüsü (termal kamera ile ölçülen değer 37,2 °C).....	93
Şekil 145. %1,5 Katkılı 3-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sistemin kristal su sıcaklığı 37.5 °C iken krisral üzerindeki sıcaklığın portatif termal kamera ölçümü ile alınan görüntüsü (termal kamera ile ölçülen değer 38,8 °C).....	93
Şekil 146. %6 Katkılı 7-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sistemin kristal su sıcaklığı 30 °C iken krisral üzerindeki sıcaklığın portatif termal kamera ölçümü ile alınan görüntüsü (termal kamera ile ölçülen değer 30,4 °C).....	93
Şekil 147. %2 Katkılı 7-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sistemin kristal su sıcaklığı 30 °C iken krisral üzerindeki sıcaklığın portatif termal kamera ölçümü ile alınan görüntüsü (termal kamera ile ölçülen değer 33 °C).....	94
Şekil 148. %1,5 Katkılı 9-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazerinin yatay eksenindeki M^2 ölçümü	95
Şekil 149. %1,5 Katkılı 9-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazerinin dikey eksenindeki M^2 ölçümü	96
Şekil 150. %1,5 Katkılı 7-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazerinin yatay eksenindeki M^2 ölçümü.	96

Şekil 151. %1,5 Katkılı 7-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazerinin dikey eksenindeki M^2 ölçümü	96
Şekil 152. %1,5 Katkılı 5-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazerinin yatay eksenindeki M^2 ölçümü	97
Şekil 153. %1,5 Katkılı 5-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazerinin dikey eksenindeki M^2 ölçümü	97
Şekil 154. %1,5 Katkılı 3-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazerinin yatay eksenindeki M^2 ölçümü	97
Şekil 155. %1,5 Katkılı 3-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazerinin dikey eksenindeki M^2 ölçümü	98
Şekil 156. %3 Katkılı 7-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazerinin yatay eksenindeki M^2 ölçümü	98
Şekil 157. %3 Katkılı 7-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazerinin dikey eksenindeki M^2 ölçümü	98
Şekil 158. %3 Katkılı 5-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazerinin yatay eksenindeki M^2 ölçümü	99
Şekil 159. %3 Katkılı 5-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazerinin dikey eksenindeki M^2 ölçümü	99
Şekil 160. %3 Katkılı 3-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazerinin yatay eksenindeki M^2 ölçümü	99
Şekil 161. %3 Katkılı 3-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazerinin dikey eksenindeki M^2 ölçümü	100
Şekil 162. %6 Katkılı 7-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazerinin yatay eksenindeki M^2 ölçümü	100
Şekil 163. %6 Katkılı 7-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazerinin dikey eksenindeki M^2 ölçümü	100
Şekil 164. %6 Katkılı 5-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazerinin yatay eksenindeki M^2 ölçümü	101
Şekil 165. %6 Katkılı 5-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazerinin dikey eksenindeki M^2 ölçümü	101
Şekil 166. %6 Katkılı 3-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazerinin yatay eksenindeki M^2 ölçümü	101

Şekil 167. %6 Katkılı 3-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazerinin dikey eksenindeki M^2 ölçümü	102
Şekil 168. %2 Katkılı 9-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazerinin yatay eksenindeki M^2 ölçümü	102
Şekil 169. %2 Katkılı 9-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazerinin dikey eksenindeki M^2 ölçümü	102
Şekil 170. %2 Katkılı 7-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazerinin yatay eksenindeki M^2 ölçümü	103
Şekil 171. %2 Katkılı 7-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazerinin dikey eksenindeki M^2 ölçümü	103
Şekil 172. %2 Katkılı 5-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazerinin yatay eksenindeki M^2 ölçümü	103
Şekil 173. %2 Katkılı 5-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazerinin dikey eksenindeki M^2 ölçümü	104
Şekil 174. %2 Katkılı 3-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazerinin yatay eksenindeki M^2 ölçümü	104
Şekil 175. %2 Katkılı 3-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazerinin dikey eksenindeki M^2 ölçümü	104
Şekil 176. %4 Katkılı 7-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazerinin yatay eksenindeki M^2 ölçümü	105
Şekil 177. %4 Katkılı 7-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazerinin dikey eksenindeki M^2 ölçümü	105
Şekil 178. %4 Katkılı 5-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazerinin yatay eksenindeki M^2 ölçümü	105
Şekil 179. %4 Katkılı 5-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazerinin dikey eksenindeki M^2 ölçümü	106
Şekil 180. %4 Katkılı 3-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazerinin yatay eksenindeki M^2 ölçümü	106
Şekil 181. %4 Katkılı 3-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazerinin dikey eksenindeki M^2 ölçümü	106
Şekil 182. %6 Katkılı 7-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazerinin yatay eksenindeki M^2 ölçümü	107

Şekil 183. %6 Katkılı 7-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazerinin dikey eksenindeki M^2 ölçümü	107
Şekil 184. %6 Katkılı 5-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazerinin yatay eksenindeki M^2 ölçümü	107
Şekil 185. %6 Katkılı 5-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazerinin dikey eksenindeki M^2 ölçümü	108
Şekil 186. %6 Katkılı 3-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazerinin yatay eksenindeki M^2 ölçümü	108
Şekil 187. %6 Katkılı 3-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazerinin dikey eksenindeki M^2 ölçümü	108
Şekil 188. %1,5 Katkılı 9-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminin dalga boyu değişim aralığı.....	110
Şekil 189. %1,5 Katkılı 7-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminin dalga boyu değişim aralığı.....	110
Şekil 190. %1,5 Katkılı 5-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminin dalga boyu değişim aralığı.....	110
Şekil 191. %1,5 Katkılı 3-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminin dalga boyu değişim aralığı.....	111
Şekil 192. %3 Katkılı 7-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminin dalga boyu değişim aralığı.....	111
Şekil 193. %3 Katkılı 5-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminin dalga boyu değişim aralığı.....	111
Şekil 194. %3 Katkılı 3-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminin dalga boyu değişim aralığı.....	112
Şekil 195. %6 Katkılı 7-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminin dalga boyu değişim aralığı.....	112
Şekil 196. %6 Katkılı 5-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminin dalga boyu değişim aralığı.....	112
Şekil 197. %6 Katkılı 3-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminin dalga boyu değişim aralığı.....	113
Şekil 198. %2 Katkılı 9-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminin dalga boyu değişim aralığı.....	113

Şekil 199. %2 Katkılı 7-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminin dalga boyu değişim aralığı.....	113
Şekil 200. %2 Katkılı 5-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminin dalga boyu değişim aralığı.....	114
Şekil 201. %2 Katkılı 3-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminin dalga boyu değişim aralığı.....	114
Şekil 202. %4 Katkılı 7-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminin dalga boyu değişim aralığı.....	114
Şekil 203. %4 Katkılı 5-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminin dalga boyu değişim aralığı.....	115
Şekil 204. %4 Katkılı 3-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminin dalga boyu değişim aralığı.....	115
Şekil 205. %6 Katkılı 7-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminin dalga boyu değişim aralığı.....	115
Şekil 206. %6 Katkılı 5-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminin dalga boyu değişim aralığı.....	116
Şekil 207. %6 Katkılı 3-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminin dalga boyu değişim aralığı.....	116
Şekil 208. %1,5 Katkılı 9-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminden elde edilen çift dalga boyu ışıma spektrumu.....	117
Şekil 209. %1,5 Katkılı 7-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminden elde edilen çift dalga boyu ışıma spektrumu.....	118
Şekil 210. %1,5 Katkılı 5-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminden elde edilen çift dalga boyu ışıma spektrumu.....	118
Şekil 211. %1,5 Katkılı 3-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminden elde edilen çift dalga boyu ışıma spektrumu.....	118
Şekil 212. %3 Katkılı 7-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminden elde edilen çift dalga boyu ışıma spektrumu.....	119
Şekil 213. %3 Katkılı 5-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminden elde edilen çift dalga boyu ışıma spektrumu.....	119
Şekil 214. %3 Katkılı 3-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminden elde edilen çift dalga boyu ışıma spektrumu.....	119

Şekil 215. %6 Katkılı 5-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminden elde edilen çift dalga boyu ışıma spektrumu	120
Şekil 216. %6 Katkılı 3-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminden elde edilen çift dalga boyu ışıma spektrumu	120
Şekil 217. %2 Katkılı 9-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminden elde edilen çift dalga boyu ışıma spektrumu	120
Şekil 218. %2 Katkılı 7-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminden elde edilen çift dalga boyu ışıma spektrumu	121
Şekil 219. %2 Katkılı 5-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminden elde edilen çift dalga boyu ışıma spektrumu	121
Şekil 220. %2 Katkılı 3-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminden elde edilen çift dalga boyu ışıma spektrumu	121
Şekil 221. %4 Katkılı 7-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminden elde edilen çift dalga boyu ışıma spektrumu	122
Şekil 222. %4 Katkılı 5-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminden elde edilen çift dalga boyu ışıma spektrumu	122
Şekil 223. %4 Katkılı 3-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminden elde edilen çift dalga boyu ışıma spektrumu	122
Şekil 224. %6 Katkılı 5-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminden elde edilen çift dalga boyu ışıma spektrumu	123
Şekil 225. %6 Katkılı 3-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminden elde edilen çift dalga boyu ışıma spektrumu	123
Şekil 226. %1,5 Katkılı 9-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminde elde edilen Q-anahtarlama darbelerinin periyodu ve (iç figür) darbe genişliği	125
Şekil 227. %1,5 Katkılı 7-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminde elde edilen Q-anahtarlama darbelerinin periyodu ve (iç figür) darbe genişliği	125
Şekil 228. %1,5 Katkılı 5-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminde elde edilen Q-anahtarlama darbelerinin periyodu ve (iç figür) darbe genişliği	126
Şekil 229. %1,5 Katkılı 3-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminde elde edilen Q-anahtarlama darbelerinin periyodu ve (iç figür) darbe genişliği	126
Şekil 230. %3 Katkılı 7-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminde elde edilen Q-anahtarlama darbelerinin periyodu ve (iç figür) darbe genişliği	127

Şekil 231. %3 Katkılı 5-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminde elde edilen Q-anahtarlama darbelerinin periyodu ve (iç figür) darbe genişliği	127
Şekil 232. %3 Katkılı 3-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminde elde edilen Q-anahtarlama darbelerinin periyodu ve (iç figür) darbe genişliği	128
Şekil 233. %6 Katkılı 7-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminde elde edilen Q-anahtarlama darbelerinin periyodu ve (iç figür) darbe genişliği	128
Şekil 234. %6 Katkılı 5-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminde elde edilen Q-anahtarlama darbelerinin periyodu ve (iç figür) darbe genişliği	129
Şekil 235. %6 Katkılı 3-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminde elde edilen Q-anahtarlama darbelerinin periyodu ve (iç figür) darbe genişliği	129
Şekil 236. %2 Katkılı 9-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminde elde edilen Q-anahtarlama darbelerinin periyodu ve (iç figür) darbe genişliği	130
Şekil 237. %2 Katkılı 7-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminde elde edilen Q-anahtarlama darbelerinin periyodu ve (iç figür) darbe genişliği	130
Şekil 238. %2 Katkılı 5-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminde elde edilen Q-anahtarlama darbelerinin periyodu ve (iç figür) darbe genişliği	131
Şekil 239. %2 Katkılı 3-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminde elde edilen Q-anahtarlama darbelerinin periyodu ve (iç figür) darbe genişliği	131
Şekil 240. %4 Katkılı 7-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminde elde edilen Q-anahtarlama darbelerinin periyodu ve (iç figür) darbe genişliği	132
Şekil 241. %4 Katkılı 5-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminde elde edilen Q-anahtarlama darbelerinin periyodu ve (iç figür) darbe genişliği	132
Şekil 242. %4 Katkılı 3-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminde elde edilen Q-anahtarlama darbelerinin periyodu ve (iç figür) darbe genişliği	133
Şekil 243. %6 Katkılı 7-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminde elde edilen Q-anahtarlama darbelerinin periyodu ve (iç figür) darbe genişliği	133
Şekil 244. %6 Katkılı 5-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminde elde edilen Q-anahtarlama darbelerinin periyodu ve (iç figür) darbe genişliği	134
Şekil 245. %6 Katkılı 3-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminde elde edilen Q-anahtarlama darbelerinin periyodu ve (iç figür) darbe genişliği	134

GİRİŞ

Nadir toprak elementlerinden birisi olan Tm^{+3} iyon katkılı katı-hal lazerleri, lazer teknolojisinde ki gelişmelerin ve yeniliklerin önemli bir parçasıdır. Geniş bir dalga boyu aralığında ışıma yapabilen Tm^{+3} katkılı lazerler flaş lambası (Quarles vd., 1990), Ti:Safir lazerlerinin çıkışı (Stoneman ve Esterowitz, 1990) veya yüksek güçlü lazer diyotlar tarafından pompalanmaktadırlar (Yang vd., 2019). Kullanılan bu pompa yöntemleri maliyetli, hantal, özel tasarım gereksinimi ve verimli olmadıklarından ötürü bunların yerine lazer diyotlar kullanılmaktadır. 2000'li yıllarda katı-hal lazerlerinin pompa kaynağı olarak kullanılmaya başlanmasıyla birlikte lazer diyotlar lazer teknolojisinin hayatına giriş yapmışlardır. Kullanılan bu özel lazer diyotları hem daha verimli, daha ekonomik, kompakt, kolay üretilir, ışın kalitesi yüksek ve dayanıklıdır. Geçmişten günümüze bu lazer diyotlar pompa kaynağı olarak 2 μm , yakın ve orta kızılötesi ve görünür ışık bölgesinde lazer ışıması yapabilen lazerleri uyarmıştır.

2 μm dalga boyunda ışıma yapan katı-hal kristal lazerleri uzaktan algılama (lidar) (Targ vd., 1996), atmosferik iletişim (Upendra vd., 1997) ve biyomedikal (Jackson ve Lauto, 2002) gibi alanlarda 2 μm bölgesinde ışıma yapmaktadır. Özellikle sağlık alanında diş hekimliğinde (Sievers vd., 1993), üroloji (Wolters vd., 2011), (Poppas ve Scherr, 1998), (Traxer ve Keller, 2019), cerrahi işlem (Yan vd., 2010) ve askeri alanda savunma sanayisi (Jackson, 2012) gibi alanlarda kullanılmaktadır. Birbirinden farklı bu uygulama alanlarında kullanım için Tm^{+3} iyon katkılı Tm:YAG (Stoneman ve Esterowitz, 1990), (Lai vd., 2000) ve Tm:LuAG (Barnes vd., 1995), (Li vd., 2008) kristalleri oldukça uygun olmaktadır.

Çapraz sönmeme etkisi ve sistem için gerekli olacak donanımların kolayca elde edilebilmesinden kaynaklı Tm^{+3} lazer sistemleri genelde 785 nm'de uyarılmaktadırlar (Mateos vd., 2006), (Yu vd., 2012), (Sudesh ve Piper, 2000). 785 nm'de uyarılan lazer sistemlerinde stokes limiti yaklaşık olarak %39'a denk gelmektedir. Ancak bu dalga boyunda uyarılan sistemlerde çapraz sönmeme etkisi olmasından ötürü stokes limitinin üzerinde verimler elde edilebilmektedir. Örneğin %12 katkılı Tm:YAG lazerleri 785 nm'de Ti:Safir lazerleri ile uyarılarak %59'luk bir verim elde edilmiştir (Stoneman ve Esterowitz, 1990). %59'luk verim değeri beklenen

%39'luk stokes limitinin üzerinde olması bizlere gösteriyor ki bu çalışma da 1,5 değerinde bir çapraz sönümlleme etkisi bulunmaktadır. Stoneman ve arkadaşları 1992 yılında Tm^{3+} katkılı lazerler sistemlerin 680 nm dalga boyunda uyarılmasını söylemişlerdir (Stoneman vd., 1992). 1992 yılında gelen bu öneriden sonra Tm^{3+} katkılı kristallerin soğurma bantlarına bir göz atıldığında Tm^{3+} katkılı lazer sistemlerini uyarabilmek için spektral bölgede emilim çizgilerinin çok yüksek olması yani yüksek soğurma katsayısına sahip olması nedeniyle en etkin dalga boylarından bir tanesi 680 nm bölgesi olduğu göze çarpmaktadır (Sudesh ve Goldys, 2000). 680 nm'de pompalama kaynağı olarak kullanılması fikri 2000'de gündeme getirilerek tartışılmıştır (Sudesh ve Goldys, 2000). Tm^{3+} soğurma bandına bakıldığında $^3H_6$ 'dan $^3H_4$ 'e (785 nm) geçişe göre $^3H_6$ 'dan $^3F_3$ 'deki (680 nm) geçişin uyarılma aralığı kısa dalga boyları tarafından yapıldığı için kazanç ortamındaki Tm^{3+} kristalleri için oldukça kısa boylarda kristaller daha kolay ve verimli şekilde kullanılacaktır. Çünkü kısa dalga boyları kullanılması ile kendiliğinden soğurulma kayıpları azalacaktır

680 nm'de pompalanan lazer sistemlerinin daha kısa kristallerde verimli şekilde çalışması gibi avantajları olduğu kadar dezavantajları da vardır. Örneğin 785 nm'de pompalanan lazer sistemleri için stokes limiti %39 iken 680 nm dalga boyu için %34'e düşmektedir. Çapraz sönümlleme ile iki katına çıkan verim eğimi 785 nm dalga boyu için maksimum %78 iken 680 nm'de ise %68'dir. 1992 yılında yapılan bir çalışmada sürekli dalga rejiminde dalga boyunun ayarlama aralığı daha kısa darbeli Kerr-odaklı kip-kilitli rejime izin vereceği söylenmiştir. Ayrıca bu çalışma 681 nm'de Ti:Safir lazerleri ile pompalanan Tm:YAG lazerlerinin verimi yaklaşık %35 olarak elde edilmiştir (Stoneman vd., 1992). Bu çalışma bize teoremin aksine çapraz sönümlleme etkisinin oldukça düşük olduğunu göstermektedir. Ayrıca lazer sistemlerinde daha büyük emme katsayıları olmasından dolayı sıcaklık etkilerinin de artması beklenmektedir

Yakın bir tarihte Cho ve arkadaşlarının yaptıkları çalışmada soğurma kayıplarının en az olacak şekilde yapıldığında 785 nm'de uyarılan Tm:YAG lazerlerinde kendiliğinden Q-anahtarlama darbe rejimini yok edeceğini ve Kerr-odaklı kip-kilitli rejim ile sürekli dalga kip-kilitli darbelerin üretilebileceğini göstermiştir (Cho vd., 2017). %29 verimle 1,22 W güç üretmiştir. Ayrıca 3 ps genişliğinde 3,376 GHz frekansında darbeler elde etmiştir. Cho ve arkadaşlarının bu çalışması 785 nm

için olsa da teoride 680 nm’de pompalama için daha etkin sonuçlar verebileceğinden bahsedilmiştir (Cho vd., 2017). 680 nm dalga boyunda pompalama için literatürde 2008 yılında yapılan bir çalışmada aynı anda 2,3 μm bölgesinde ışıma yapan 685 nm ve 960 nm lazer diyotlar ile %9,5 Yb^{+3} ve %1,15 Tm^{+3} eş katkılı Yb:Tm:YLF lazerlerini uyarması sonucunda lazer sisteminin en yüksek çıkış gücü 620 mW ve verimi %10 olarak bulunmuştur (Matos vd., 2008).

Mevcut piyasada bulunmayan ancak proje kapsamında iş birliği ile elde edilen ve bu tezde de kullanılacak olan Ferdinand Braun Enstitüsünün laboratuvarlarında geliştirilen yüksek parlaklığa sahip daralan kılavuz yapılı 1 W’lık lazer diyotlar 675 nm’de çalışmaktadır ve sıcaklığın etkisi ile birlikte merkez dalga boyu 682 nm’ye kadar kaydırılabilmektedir. Ayrıca bu lazer diyotların sırt dalga kılavuzun uzunluğunun 500 μm uzunluğunda olması, konik yükseltgeç uzunluğunun 1,5 mm olması, çıkış açıklığının 110 μm olması ve 3° genişleme açısına sahip olması gibi pek çok özelliğinden ötürü çok-kipli diyotlarla kıyaslandığında 4 kat daha yüksek parlaklıkta ışık üretmektedirler (Sumpf vd., 2011). Daralan kılavuz yapılı lazer diyotların pompa kaynağı olarak kullanılmasının çalışması 2011 yılında Cr^{+3} iyon katkılı Cr:LiCAF ve Cr:LiSAF lazerlerinde kullanılmıştır. Daralan kılavuz yapılı diyotlar ile yapılan bu çalışmada sürekli dalga rejimi ve kip-kilitli dalga rejimi çalışmaları gösterilmiştir. Bu çalışmaların sonucunda sürekli dalga rejiminde Cr:LiCAF lazerleri için %47 ve Cr:LiSAF lazerleri için %41 verim değerleri ve sırası ile 410 mW ve 500 mW ortalama çıkış güç değerleri elde edilmiştir. Kip-kilitli rejimde ise 200 mW-250 mW arasında ortalama güçte 100 fs’nin altında darbe genişliği ve tekrarlama frekansı 100 MHz olarak elde edilmiştir. Çalışmanın devamında iki tane konik diyot kullanılması ile birlikte sürekli dalga rejiminde güç değerlerinin sırasıyla Cr:LiCAF ve Cr:LiSAF ’ın 650 mW’a ve 850 mW’a çıktığı görülmüştür. Kip-kilitli rejimde ise Cr:LiCAF lazerinden 5,4 nJ enerjide 220 fs darbeler elde edilmiştir. Bu sonuçlar Cr^{+3} katkılı lazerlerde daralan kılavuz yapılı diyotların standart şekilde pompa kaynağı olarak kullanılabileceğini göstermiştir (Demirbaş vd., 2011).

Bu çalışmada da kullanılan daralan kılavuz yapılı lazer diyotlar 2019 yılında ilk kez Tm^{+3} katkılı katı hal lazerlerinin 1 W’lık güce sahip 681 nm’de uyarılan Tm:YAG ve Tm:LuAG lazerlerinin sürekli dalga rejim çalışması yapılmıştır (Beyatlı vd., 2019a), (Beyatlı vd., 2019b). Bu çalışmalarda Konik diyot tarafından uyarılan %6

katkılı 7 mm uzunluğunda Tm:YAG lazeri ve %6 katkı 7 mm uzunluğunda Tm:LuAG lazerlerinden sırası ile 336 mW çıkış gücünde %52 verim eğrisi ve 295 mW çıkış gücünde %51 verim eğrisi elde edilmiştir. Elde edilen değerler kristalin sıcaklığa bağlı değişimi incelenmiş olup sıcaklık arttığında değerlerin de düştüğü görülmüştür. Ayrıca lazer ışının karakteristiği yani M^2 ölçümü yapıldığında ideal değerde $M^2 < 1,1$ olduğu görülmüştür. Ek olarak %6 katkı 5 mm Tm:YAG lazerlerinin de ölçüm alınmış 340 mW çıkış gücünde %55 verim eğrisi elde edilmiştir. Bu sonuç diğer lazerlerden daha yüksek verim ve çıkış gücü elde edildiğini göstermektedir. Bu çalışma ile kristal uzunluğunun kendiliğinden soğurması nedeniyle lazer sistemlerinin performansını olumsuz etkilediğini göstermiştir ve 785 nm ile uyarılan lazer diyotların sonuçları ile karşılaştırılması yapılmış ve 680 nm’de konik lazer diyotlarının sonuçlarının daha yüksek olduğunu göstermiştir.

2019 yılında yapılan çalışmalarda 680 nm dalga boyunda daralan kılavuz yapıları diyotlar ile Tm^{+3} katkı 5 mm Tm:YAG lazerlerinin pompalanması ile ilgili yapılan çalışmalarda sadece iki farklı uzunlukta ki kristaller kullanılmıştır (Beyatlı vd., 2019a), (Beyatlı vd., 2019b). 785 nm’de uyarılan sistemler için bilinen çıkış dalga boyunun değişim aralığı, çift dalga boyunda çalışma, iyon-katkı oranının çapraz sönümlenme üzerinde olan etkisini, Q-anahtarlama darbeleri rejimin çalışma performansları bilinmektedir. Ancak bu işlemler 680 nm için bilinmemektedir. Bu çalışma kapsamında elimizde mevcut olan birçok daralan kılavuz diyotlarının dalga boyları sıcaklık kontrolü ile 680 nm dalga boyuna getirilmesi sağlanmıştır. Ardından da farklı boylarda ve katkı oranlarındaki Tm:YAG ve Tm:LuAG kristalleri uyarılarak lazerlerin verim eğimi ve çapraz sönümlenme etkisi, M^2 ölçümü, dalga boyu değişim aralığı, çift dalga boyunda çalışması, SESAM kullanılarak Q-anahtarlama rejim performanslarının incelenmesi yapılmıştır. Yapılan bu çalışma ile Tm^{3+} lazer sistemlerinin yüksek verime sahip, düşük maliyetli ve kompakt olarak elde edilmesi amaçlanarak gerçekleştirilen lazer sistemlerin akademik, ekonomik, toplumsal ve ulusal güvenlik açısından oldukça önemli bir yere sahip olması beklenmektedir. Günümüzde Tm^{3+} lazer sistemleri siber güvenlik, sınır güvenliği, ekonomik güvenlik ve enerji güvenliği gibi savunma alanında oldukça kullanışlı olduğu görülmektedir. Bu çalışma ile de ilerleyen yıllarda savunma sanayisi alanında kullanılması açısından bir kaynak olacaktır.

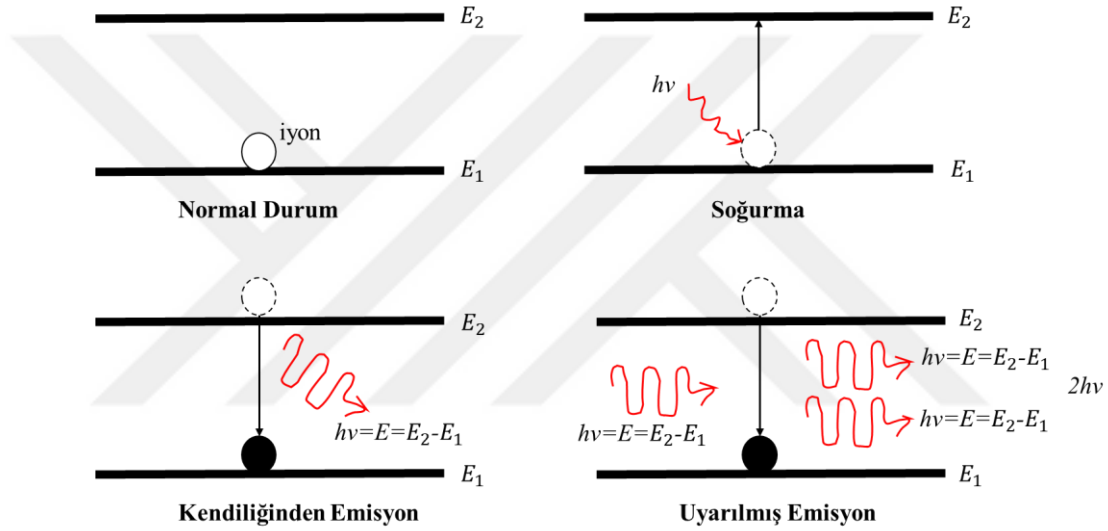
1. KURAMSAL TEMELLER

1.1. Lazerin Temelleri

1.1.1. Lazer Fiziği

Işığın uyarılmış radyasyonu ile birlikte yükseltilmesini sağlayan optik düzenek uyarılmış ışınma aracılığıyla kuvvetlendirilmiş ışık ya da kısaca lazer olarak adlandırılmaktadır. Lazer ışını monokromatiktir yani tek bir dalga boyuna sahiptir. Lazer ışını eş fazlı yani dalgaları aynı fazda düzenlidir. Lazer ışını monokromatik ve eş fazlı olmasının bir sonucu olarak geometrik bir düzene sahiptir. Lazer ışınını üretebilmek için bir malzemeye (aktif ortam adı verilen özel bir malzeme) ihtiyaç vardır. Bilinildiği üzere de bir malzemenin enerji seviyeleri vardır ve her bir seviyenin de enerjisi bulunmaktadır. Bütün seviyelerin hepsinde iyon sayısı aynı ise hepsi de temel seviyede demektir. Ancak ortamda bir enerji bulunursa uygun seviyeye geçmektedirler (genel olarak alt seviyededirler ama ortamda bir sıcaklık varsa üst seviyede de bulunabilirler.). Lazer ışının üretilme mekanizması soğurma, kendiliğinden emisyon ve uyarılmış emisyon olmak üzere Şekil 1'deki gibi üç aşamadan oluşmaktadır. İlk aşama olan emisyon temel seviyede bulunan iyonlara gönderilen ışın yeterli enerjiye sahipse iyon tarafından soğurulup enerjisi alınır ve bir üst seviyeye (uyarılmış seviye) çıkmaktadır. Bir iyonun temel dengede olduğu (yani iyonların kararlı halde olması) yer temel seviyedir. Bunun için iyon uyarılmış seviyede belli bir süre bekledikten sonra (bekleme süresi malzemeye göre farklılık göstermektedir) temel seviyeye yani eski seviyesine geri dönecektir ve üzerinde bulunmuş olan fazla enerjiyi (iki enerji seviyesi arasındaki fark kadar) rastgele bir yöne salarak ikinci aşama olan kendiliğinden emisyon gerçekleşmektedir. Üçüncü aşama olan uyarılmış emisyonda ise üst (uyarılmış) seviyede olan iyon temel seviyeye inmesi için süre dolmadan önce üst (uyarılmış) seviyedeki iyonun aynı enerjisinde bir tane daha foton gönderilir ve bunun sonucunda süresi daha dolmadan bir salınım gerçekleştiği için ışık kaynağı ile aynı yönde aynı fazda ve aynı frekansta ışın yapmaktadır. Uyarılmış seviyede bulunan iyonun temel seviyeye inmek için gereken süre dolmadan iyonu tutup tekrar sisteme sokularak birden fazla ışın elde edilebilmektedir. Sürekli bu işlemin tekrarlanması da aynalar ile yapılmaktadır. Şöyle

ki kendiliğinden saçılmış olan iyonların bir eksen üzerinde toplayabilmek için bir optik rezonatör gerekmektedir. Rezonatör, aktif ortamın iki ucuna biri tam yansımali diğeri kısmi geçirgenli aynalar kullanılmasıdır. Kullanılan aynalar ile yansıtılan iyonlar kendiliğinden emisyon gerçekleşmeden hemen önce uyarılmış enerji seviyesinde bulunan atomları uyararak uyarılmış emisyon elde edilmektedir. Böylece lazer ışını elde edilmektedir. Burada önemli olan husus nüfus terslenmesi denen kavram bu kavram olmadan lazer ışınının oluşturulması mümkün olmamaktadır. Bu kavram üst seviyede bulunan iyonların temel seviyede bulunan iyonlardan daha az olması gerektiridir.



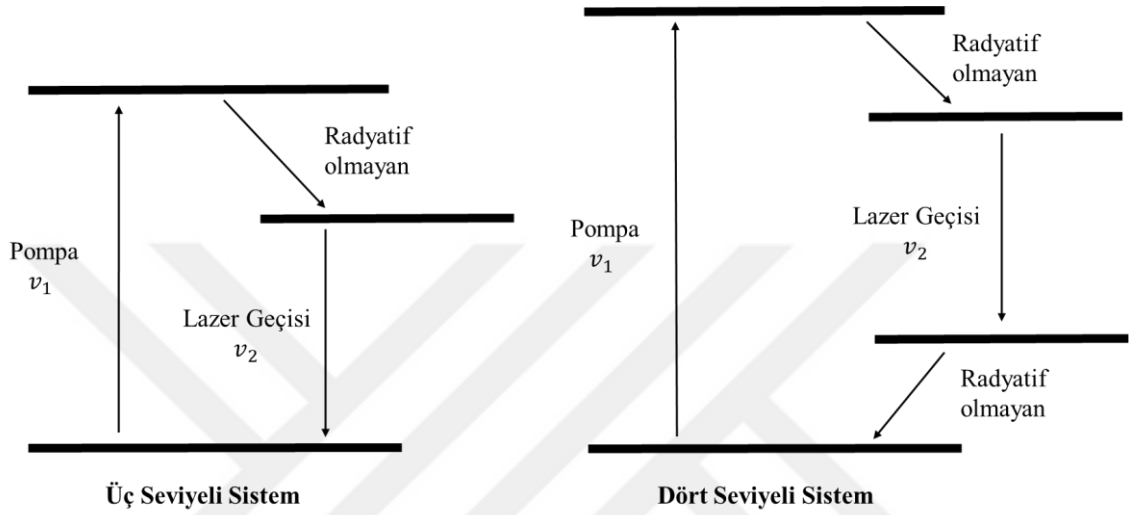
Şekil 1. İki seviyeli sistemde lazer ışınının üretilmesinin şematik gösterimi

Şekil 2’de fotonun enerjisi olan E , yüksek seviyedeki enerji E_2 ile taban seviyedeki enerji E_1 ’nin farkı kadar bir enerjiye sahiptir. Lazer ışığının frekansının bulunabilmesi için ise aşağıdaki (1.1) denklemi kullanılmaktadır. Denklemden h , Planck sabiti olup değeri $6,62 \times 10^{-34}$ Js/molekül’dür.

$$\nu = \frac{E_2 - E_1}{h} \quad (1.1)$$

Lazeri oluşturmak için her zaman iki seviye kullanılmaz. Kullanılan malzeme çeşidine göre seviye sayıları değişmektedir. Genellikle üç veya dört yapıli seviyeler kullanılmaktadır ve Şekil 2’de gösterilmektedir. Üç seviyeli sistemlerde temel ve

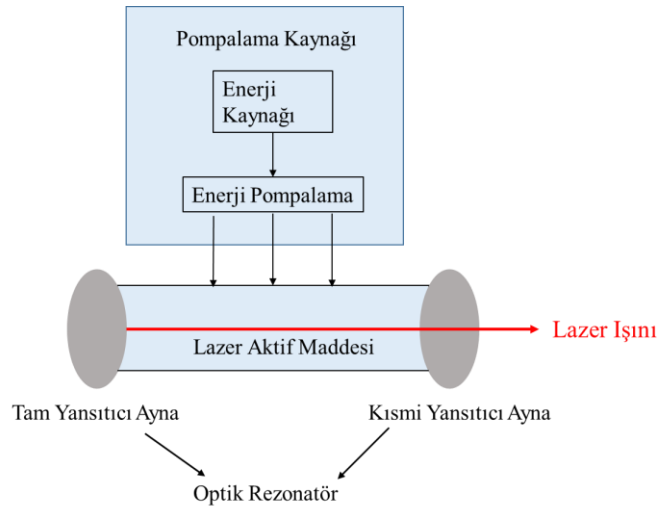
uyarılmış enerji seviyesi haricinde bir de yarı kararlı enerji seviyesi mevcuttur. Dört seviyeli sistemlerde üç seviyeli sistemlere ek olarak sadece çalışma enerji seviyesi bulunmaktadır (Kahraman, 2017). Bu çalışmada Tm^{+3} elementi ile çalışılmıştır ve genel olarak bu elemente sahip lazerler için üç yapıları seviye kullanılmaktadır (Sennaroglu, 2007).



Şekil 2. Üç ve dört seviyeli sistemlerde lazer ışının üretilmesinin şematik gösterimi

1.1.2. Lazer Bileşenleri

Lazer sisteminin oluşturulabilmesi için gerekli olan temel parçaları pompalama kaynağı, lazer aktif maddesi ve rezonatördür ve Şekil 3’de gösterilmektedir.



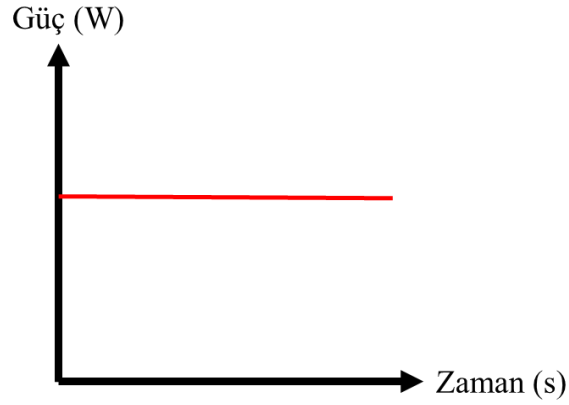
Şekil 3. Lazer bileşenlerinin şeması

Şekil 3'te görüldüğü üzere lazer aktif ortamındaki atomların uyarılabilmesi ve lazer ışığının üretilmesi için pompalama kaynağı kullanılmaktadır. Lazerlerde optik pompalama kaynakları (flaş lambaları, led'ler ve lazer diyotlar), elektriksel pompalama kaynakları, kimyasal pompalama kaynakları termal pompalama kaynakları gibi çeşitli pompalama kaynakları bulunmaktadır. Bir enerji kaynağı tarafından uyarılan ve fotonların üretildiği kısım olan aktif ortam katı, sıvı, gaz ve plazma halinde bulunmaktadır. Lazerin aktif ortamında belirli enerji seviyesine sahip atomlar, moleküller ya da yarı iletkenler vb. malzemeler kullanılmaktadır. Aktif ortam katı olarak Nd:YAG, Nd:CAM, Alexandrite, Ti:Safir, Üç değerlikli Nd^{+3} , Ho^{+3} , Gd^{+3} , Tm^{+3} , Er^{+3} , Pr^{+3} elementleri bulunan camlardan oluşmaktadır. Gaz olarak Krypton, Argon, Nitrojen, Helyum-Neon, CO_2 , KrF gibi gazlardan oluşmaktadırlar. Plazma olarak ise X-ışınından oluşmaktadır. Üçüncü temel bileşen ise ışığın geri beslemesini yapacak olan rezonatördür. Lazer ışığının üretilmesi ve şekillendirilmesinde önemli bir rol oynayan rezonatörler en basit olarak tam yansıtan ve kısmen yansıtan iki aynadan oluşmaktadır. Bu iki ayna arasında uyarılmış olan fotonlar ileri geri salınım yaparak fotonları çoğaltmaktadırlar. Belirli bir yoğunluğa ulaştığında yani belirli bir eşik değere ulaştığında fotonlar kısmi aynadan geçmektedirler. Sonuçta da lazer ışığını oluşturmaktadır (Wilson ve Hawkes, 1987). Rezonatörün doğru ve düzgün tasarlanması, lazerin gücü ve doğruluğu optimize edilmesiyle birçok çeşitte uygulamalar için ideal bir lazer oluşmaktadır.

1.1.3. Lazer Çalışma Modları

1.1.3.1. Sürekli Mod

Pompalama kaynağı tarafından aktif ortama sabit seviyede enerji uygulaması ile lazer sürekli modda çalışmaktadır. Şekil 4'de görüleceği üzere sürekli dalga rejiminde çalışan lazer ışığının gücü zaman içinde değişmeyecektir.

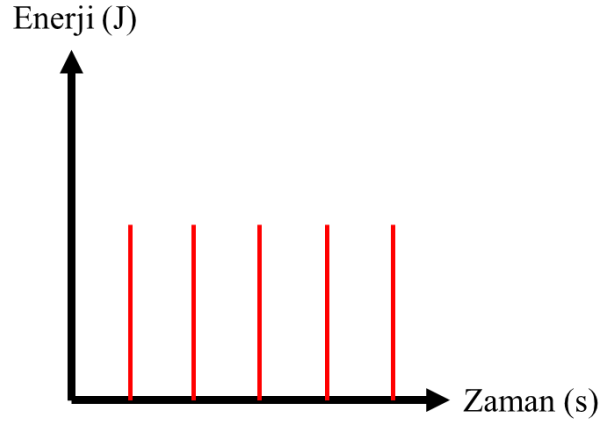


Şekil 4. Sürekli dalga rejiminde çalışan lazerin güç-zaman grafiği

Sürekli dalga rejiminde çalışan lazerler sabit ve sürekli bir enerji dağılım uygulamaları için idealdir. Kesintisiz çalışması, hassas uygulamalar için uygun olması, gücünün sabit ve kararlı olması gibi özellikleri ile bu dalga rejimi birçok alanda önemli bir rol oynamaktadır. Sürekli dalga rejiminde çalışan lazerlerin avantajları olduğu kadar dezavantajları da mevcuttur. Sürekli ışık üretimi ısı problemi yaratacaktır yani lazer aşırı ısınacaktır bunun sonucunda lazerin ömür süresini ve dayanıklılığını olumsuz yönde etkileyecektir. Bunun önüne geçmek için iyi bir soğutma sistemi gerekmektedir.

1.1.3.2. Darbeli Mod

Pompa kaynağından gönderilen enerji ile aktif ortamda depolanmış olan enerjinin aniden salınması sonucunda darbeler oluşmaktadır. Şekil 5’de görüleceği üzere darbeli modda çalışan lazerler periyodiktir zamanın belirli kısmında darbe üretip diğer kısımlarda üretmeyip sıfır olmaktadır.



Şekil 5. Darbeli modda çalışan lazerin enerji-zaman grafiği

Darbeli modda çalışan lazerler kip-kilitleme (mod kilitleme) ve Q-anahtarlama lazerleri olarak ikiye ayrılmaktadır. Kip kilitleme ile çok kısa zamanda şiddetli bir ışık ve aralıklı darbeler elde edilmektedir. Ek olarak kip kilitleme lazerleri MHz tekrarlama frekansına ve ps-fs genişliğine sahiptirler. Diğer darbeli lazer olan Q-anahtarlama ise kısa süreli ve yüksek enerjili darbeler üretmektedir. Hz-kHz tekrarlama frekansına ve ns-µs-ms genişliğine sahip olan lazerlerdir. Q-anahtarlama darbeleri kendi içerisinde aktif ve pasif Q-anahtarlama olarak ikiye ayrılmaktadır. Aktif Q-anahtarlama lazerleri akustik-optik ya da elektro-optik olan harici bir modülatör kullanılmaktadır. Bu cihaz ile ilk başta ışığın yayılmasını engeller bu sırada depolanan enerji en üst seviyeye ulaştığında bu cihaz hızlıca açılarak ışığın yayılmasına izin vererek darbeler elde etmektedir. Pasif Q-anahtarlama lazerlerinde ise sistemin içerisine eklenen doyurulabilir soğurucu bir eleman eklenmektedir. Eklenen eleman üzerine enerji toplanır ve o sürede lazer çalışmamaktadır. Doyuma ulaştığı anda üzerindeki bütün enerjiyi birden göndermektedir. Burada doyuma ulaştığı zaman dilimi darbenin frekansını, genişliğini ne kadar enerji topladığını ve gücünü belirlemektedir. Pasif Q-anahtarlama darbe rejiminde MoS₂ doyurucu (Zha vd., 2022), SWCNT_SA (Feng vd., 2015), Bi₂Te₃ topolojik izolatörler (Qiao vd., 2018), SESAM (Hou vd., 2015) gibi elemanlar kullanılmaktadır.

Elde edilen Q-anahtarlama rejimindeki darbelerin darbe genişliği frekansı Şekil 6'da gösterilmektedir. Darbelerin tekrarlama frekansı denklem (1.2)'deki gibi iki

darbenin tekrarlama arasında geçen süreye periyot denir ve periyodun (T) zamanda tersi alınarak darbenin frekansı elde edilmektedir.

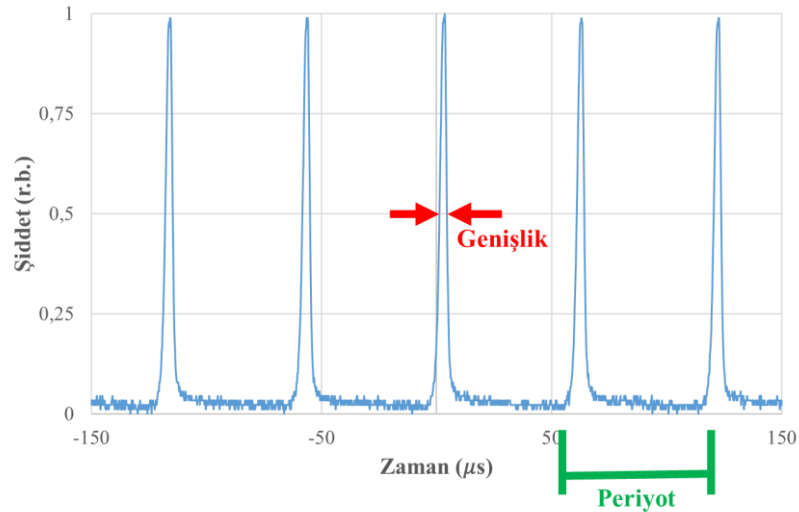
$$\text{Frekans} = \frac{1}{\text{Periyot}} \text{ (Hz)} \quad (1.2)$$

Darbelerin tepe gücü ise denklem (1.3)'te görüleceği üzere lazer ışının ortalama çıkış gücü ile periyodunun çarpılıp darbenin genişliği bulunması ile elde edilmektedir.

$$\text{Darbenin tepe gücü} = \frac{(\text{Ortalama Çıkış gücü}) \times (\text{Periyot})}{\text{Genişlik}} \text{ (W)} \quad (1.3)$$

Darbelerin enerjisi ise denklem (1.4)'te görüleceği üzere denklem (1.3)'te bulunan darbenin tepe gücü ile darbenin genişliğinin çarpılması sonucu elde edilmektedir.

$$\text{Darbenin enerjisi} = (\text{Tepe gücü} \times \text{Genişlik}) \text{ (J)} \quad (1.4)$$



Şekil 6. Q-Anahtarlamalı rejimde darbelerin genişlik ve periyodunun gösterimi

Darbeli modda çalışan lazerlerin tepe gücü yüksek, enerji yoğunlukları yüksek darbeler kısa süreli olduğundan ısı etkisi düşüktür. Kısa süreli darbelerin üretmesi avantajının yanında dezavantajı da vardır örneğin sürekli dalga rejimine göre düşük

ortalama güce sahip olmasıdır. Darbeli modda çalışan lazerlerin diğer bir olumsuz yönü de sistem karmaşıklığı ve maliyetli olmasıdır. Bu özellikleri ile darbeli lazerler genişçe birçok uygulama alanlarında kullanılmaktadırlar.

1.2. Katı-Hal Lazerleri

Lazer çeşitleri çalışma prensibine, kullanım alanlarına, dalga boyuna ve aktif ortamına göre kategorize edilmektedirler. Lazerin aktif ortamının fiziksel parametreleri katı, sıvı, gaz ve plazma gibi olabilmektedir. Bu ortamlar ile lazerin ürettiği enerji aralığını, lazer ışının dalga boyunu ve özelliklerini belirlemektedir. Eğer ki aktif ortamda sıvı solüsyonda rodamin benzeri sıvı boyalar kullanılırsa sıvı (boya) lazerler, Krypton, Argon Nitrojen vb. gibi gazlar kullanılırsa gaz lazerleri, X-ışını kullanılırsa plazma lazerleri şeklinde isimlendirilmektedir. Aktif ortamında iletim elementi iyonlar, kristaller ve bileşikler kullanılması durumunda katı-hal lazerleri elde edilmektedir. Katı-hal lazerlerinde iyon olarak nadir elementler olan Nd^{+3} , Tm^{+3} , Er^{+3} vb., geçiş metalleri olarak Cr^{+2} , Ti^{+2} , vb. elementler kullanılmaktadır. Kristal olarak Safir (Al_2O_3), YLF($YLiF_4$), YAG($Y_3Al_5O_{12}$) ve LiSAF($LiSrAlF_6$) kullanılmaktadır. Son olarak da bileşik olarak Silikat (SiO_2) ve fosfat (P_2O_5) kullanılmaktadır. Çok sayıda mevcut olan katı-hal lazerleri kullanılan maddeye göre de isimlendirilmektedirler. Genel olarak Katı-hal lazerleri kompakt, yüksek güç çıkışına sahip, verimli, uzun ömürlü ve sağlamdırlar (Fan ve Byer, 1988).

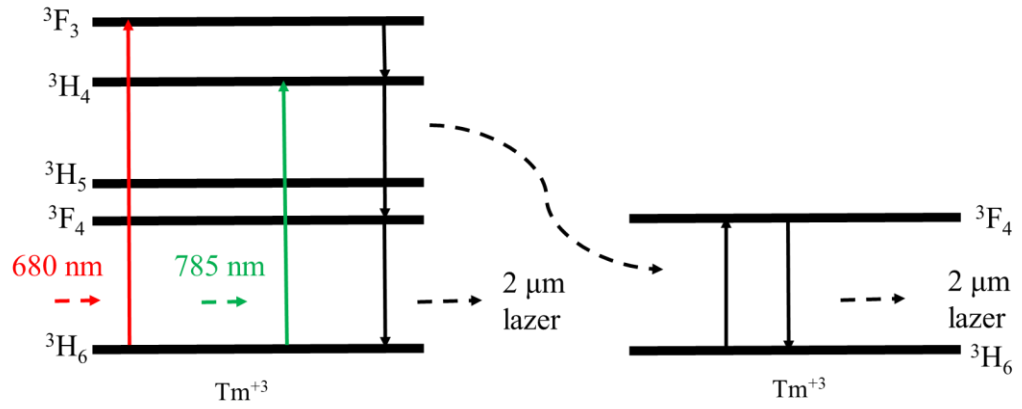
Yakut (Ruby) lazeri, Tm:YAG, Tm:LuAG, Nd:YAG lazerleri ve Ti:Safir lazerleri gibi pek çok sayıda katı-hal lazerleri bulunmaktadır. Tarihe bakıldığında ilk bulunan lazer kat-hal lazeri olan yakut lazerdir. Yakut lazeri 1960 yılında Theodore Harold Maiman tarafından bulunmuştur (Maiman, 1960). Yakut lazerinin iletim elementi olarak korundum (Al_2O_3) kristali kullanılmıştır ve bu kristal krom elementi ile de katkılandırılmıştır. Krom ile katkılandırma yapıldığı içinde kırmızı renklidir. Aktif ortamdaki yakut kristalin uyarılabilmesi içinde flaş lambaları kullanılmaktadır. Yakut lazerli 694 nm dalga boyunda ışınım yapmaktadırlar ve ürettikleri darbe süreleri de μs mertebesinde. Yakut lazerleri ciltteki iyi huylu pigmentli lezyonların tedavisinde (Goldberg, 1993), ciltte bulunan güneş lekelerinin tedavisinde (Sadighha vd., 2008) kullanılmaktadır. Diğer bir katı-hal lazeri olan Nd:YAG lazerleri aktif ortam olarak alüminyum garnet itriyum kristaline Neodyum katkılandırılmıştır. Aktif

ortamdaki Nd:YAG kristalinin uyarılabilmesi için flaş lambası veya diyot pompa kaynağı kullanılmaktadır. Bu lazer çeşidi 1.06 μm de yani kızılaltı bölgesinde ışıma yapmaktadır. Nd:YAG lazerleri W-MW mertebesinde çıkış güçleri ve ns- μs aralığında kısa sürelerde darbeler üretmektedirler. Bu özelliklerinin sonucunda güçlü olan bu lazer çeşidi endüstri uygulamalarında; malzeme işleme (kesme, delme ve kaynak yapmada) (Weber vd., 1986), (Tiffany, 1985), tıbbi cerrahide (White vd., 1991), diş hekimliğinde (Moshonov vd., 1995), baskı devre kartlarında (Nowak vd., 2013) gibi pek çok alanlarda kullanılmaktadırlar. Diğer bir katı-hal lazeri olan Ti-Safir lazerleri ise safir kristali (Al_2O_3) Titanyum iyonları ile katkılandırılmıştır. 700-1000 nm dalga boylarında ışıma yapmaktadırlar ve ps veya fs darbe süreleri vardır. Ti-Safir lazerleri, geniş bant genişliği, çıkış güçleri yüksek ve verimli lazerlerdir. Ancak boyutlarının büyük olması, yeşil ışık ile uyarılmasını gerektirmekte ama yeşil ışığın elde edilmesi içinde başka bir lazerin kullanılması gerektiğinden ve maliyetli olmalarından kaynaklı kullanımları sınırlıdır (Moulton, 1986). Biyomedikal görüntüleme (Lee vd., 2016), bilimsel araştırmalarda ve kısa darbe üretimlerinde (Zhou vd., 1994) kullanılmaktadırlar.

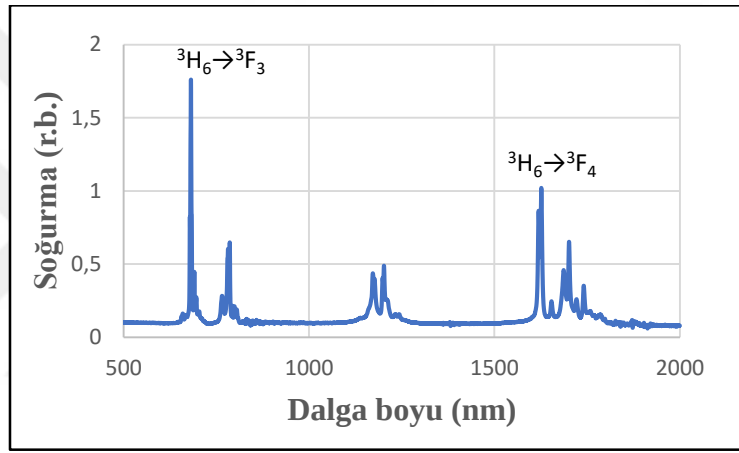
1.2.1. Tm^{+3} Lazerleri

Tm^{+3} lazerlerinde aktif ortam olarak nadir toprak elementlerinden biri olan Tm^{+3} iyonları kullanılmaktadır. Bu iyonlar genel olarak kristal veya cam malzemeleri ile katkılanmaktadırlar. Şekil 7 ve Şekil 8’de Tm^{+3} kristallerinin uyarma bantları incelendiğinde Şekil 7’de görüleceği üzere Tm^{+3} lazerleri genelde 785 nm ile 808 nm dalga boyundaki pompalama kaynağı ile pompalanıp $^3\text{F}_4$ enerji bandından $^3\text{H}_6$ enerji bandına inerken 1,9 μm ile 2,1 μm (yakın ve kızıl ötesi spektrum) aralığında lazer emisyonu yapmaktadırlar. Şekil 8’e bakıldığında ise 680 nm’de uyarılmada spektral bölgede emilim çizgileri çok daha güçlüdür yani 785 nm’den yaklaşık 3-kat yüksek soğurma katsayısının olduğu görülmektedir. Işıma yaptığı dalga boyu üzere su ve biyolojik dokular tarafından güçlü bir şekilde emilmektedir (soğurulmaktadır) (Kebes, 2008). Bu özelliğinden ötürü de tıbbi alandaki uygulamalarda kullanmak için oldukça ideal lazerlerdir (Bilici vd., 2011). Ek olarak bu dalga boyundaki radyasyon göze zarar vermemesinden ötürü malzeme işlemede (delme veya kaynak yapma), mesafe ölçümü gibi uygulamalarda oldukça kullanılmaktadır (Scholle vd., 2010).

Şekil 7'deki Tm^{+3} iyonunun bant diyagramı incelendiğinde Tm^{+3} iyonlarının $^3H_6$ 'dan $^3H_4$ 'e geçişinde genellikle lazer diyotlar ve Ti:Safir lazerleri tarafından yaklaşık 785 nm bölgesinde uyarılmaktadırlar (Stoneman ve Esterowitz, 1990). Tm^{+3} iyonlarının karakteristik özelliği çapraz sönmülemenin (çoklu enerji transfer süreci) olmasıdır. Bu karakteristik özelliği dolayısıyla lazer sistemlerinden yüksek verimler elde edilmektedir. Şöyle ki bir uyarma foton ile iki iyonun aynı anda enerji seviyelerini uyarması sayesinde sistemin verimi yaklaşık olarak iki kat daha fazla artmaktadır. 785 nm bölgesinde uyarılan lazer sistemlerinin verim eğrilerine bakıldığında yani stokes limiti değeri %39'dur. $^3H_6$ - $^3F_3$ 'e bant aralığında Tm^{+3} katkılı lazerler çapraz sönmüleme etkisi ile stokes limitini aşmaktadır hatta teorik olarak bilinen değerin yaklaşık olarak iki kat değerine denk gelmektedir. Çapraz sönmüleme etkisine örnek olarak literatür araştırması yapıldığında yapılan bir çalışmada 2 μm bölgesinde çalışan Tm:YAG seramik lazerlerinin 6,05 W'lık maksimum çıkış gücü ve verimi (stokes limit değeri) %65 olarak elde edildiği görülmektedir (Gao vd., 2012). Bu verim sonucu da çapraz sönmüleme etkisinin var olduğu ve 1,67 olduğu görülmektedir. Bu verim sonucu ile sistemde 1,5 değerinde bir çapraz sönmüleme etkisinin olduğunu göstermektedir. Çapraz sönmülemesine başka bir çalışma olarak 3 W gücünde lazer diyotlar ile pompalanan %5,2 katkılı Tm:YAG lazerlerinin 2,01 μm bölgesinde eğim verimliliği %44 olarak bulunmuştur (Li vd., 1999). Çapraz sönmüleme etkisine bir örnek de %12 Tm katkılı Tm:YAG lazerleri Ti:Safir lazerleri ile uyarılarak sürekli dalga rejiminde %59 verim elde edildiği görülmüştür (Stoneman ve Esterowitz, 1990). Ancak yapılan bazı çalışmalarda lazer sistemlerini 785 nm dalga boyunda uyarmak yerine $^3H_6$ 'dan $^3F_3$ enerji bantları arasındaki emilim çizgilerinin yüksek olması nedeniyle Tm^{3+} lazerlerinin 680 nm spektrumunda uyarılması belirtilmektedir (Stoneman vd., 1992). $^3H_6$ 'dan $^3H_4$ 'e geçişe göre $^3H_6$ 'dan $^3F_3$ 'deki geçişin uyarılma aralığı kısa dalga boyları tarafından yapıldığı için kazanç ortamındaki Tm^{+3} kristalleri için oldukça kısa boylarda kristaller daha kolay ve verimli şekilde kullanılmaktadır. Çünkü kısa dalga boyları kullanılması ile kendiliğinden soğurulma kayıpları azalmaktadır.



Şekil 7. Tm^{+3} iyonlarının bant diyagramı ve çapraz sönmleme etkisi



Şekil 8. Tm^{+3} iyonlarının soğurma grafiği

1.2.1.1. Tm:YAG Lazerleri

Tm:YAG lazerleri Tm^{+3} iyonu İtiryum Alüminyum Garnet'e katkılanması ile aktif ortamındaki kristal elde edilmektedir. Nadir bulunan toprak iyonu olan Tm^{+3} 'ün enerji seviyeleri ve optik özelliklerinden ötürü 2 μm bölgesinde ışıma sağlayan lazerlerdir. Tm:YAG lazerleri 785 nm'de ışıma yapan lazer diyotlar tarafından etkili bir şekilde pompalanmaktadır. Çünkü 785 nm dalga boyu Tm^{+3} iyonlarının enerji seviyelerine uygun absorpsiyon bantları ile çakışması sonucu enerji transferi verimli bir şekilde gerçekleşmektedir. Tm^{+3} iyonlarının kuantum verimliliği yani enerji seviyelerindeki çoklu fotonun geri dönüşümü sayesinde enerji verimliliği iki katına çıkmaktadır. YAG kristali mekanik dayanımı ile termal iletkenliği ve yüksek kırılma indisi, düşük optik kayıp gibi optiksel özellikleri ile öne çıkan bir malzeme olması ile

Tm⁺³ iyonları için aktif bir ortam sunmaktadır. Diş hekimliği (Sievers vd., 1993), endüstriyel (Scholle vd., 2010) ve askeri teknolojilerde (Suni ve Henderson, 1991) yaygın bir kullanıma sahiptirler. 2 µm dalga boyu bandı su ve biyolojik dokular tarafından emilimi yüksek olması dolayısı ile tıp ve cerrahide oldukça tercih edilmektedirler (Fan vd., 1988).

Tm:YAG lazerlerinin spektroskopik özellikleri incelendiğinde floreseans ömrü 11 ms 'dir (Basiev vd., 1996). %2, %4 ve %8 katkılı Tm ile yapılan Tm:YAG lazer sistemlerinde 681 nm dalga boyunda emisyon kesiti $2,1 \times 10^{-21} \text{ cm}^2$ ve 781 nm dalga boyundaki emisyon kesiti $6,3 \times 10^{-21} \text{ cm}^2$ olarak hesaplanmıştır. Bu sonuçlardan 681 nm'deki emilim katsayısının yaklaşık 2,5 kat daha fazla olduğu görülmektedir (Song vd., 2004). Başka bir çalışmada 3 W gücünde lazer diyotlar ile %4 katkılı Tm:YAG lazeri uyarılmıştır. Bu lazer sisteminde $\sim 10 \text{ kW/cm}^2$ pompa yoğunluğunda ölçülen etkin ömür değeri $\sim 1,8 \text{ ms}$ olarak elde edilmiştir. Pompa yoğunluğunu 5 kat azaltıp ancak aynı güçte pompalama yapılması sonucunda etkin ömür süresi $\sim 3 \text{ ms}$ 'ye çıkartılmıştır. Bu süre ideal sayılmasa da yüksek enerjili darbeler için yeterli olacaktır. Çalışmada sürekli dalga rejiminde 0,53 W güç elde edilmiştir. Akustik-optik kurşun molibdat (PbMoO₄) kullanılarak elde edilen Q-anahtarlama darbelerinin enerjisi 1,05 mJ ve tekrarlama frekansı 100 Hz olarak elde edilmiştir (Suni ve Henderson, 1991).

1.2.1.2. Tm:LuAG Lazerleri

Tm:LuAG lazerleri Tm⁺³ iyonu Lutesyum Alüminyum Garnet'e katılanması ile aktif ortamındaki kristal elde edilmektedir. Tıpkı Tm:YAG lazerli gibi nadir bulunan toprak iyonu olan Tm⁺³'ün enerji seviyeleri ve optik özelliklerinden ötürü 2 µm bölgesinde ışıma sağlayan lazerlerdir (Kmetec vd., 1994). Tm:LuAG lazerleri de genellikle 785 nm'de ışıma yapan lazer diyotlar tarafından etkili bir şekilde pompalanmaktadır. Tm⁺³ iyonlarının kuantum verimliliği yani enerji seviyelerindeki çoklu fotonun geri dönüşümü sayesinde enerji verimliliği iki katına çıkmaktadır. Atmosferik iletişim (Kmetec vd., 1994) ve LİDAR (Scholle vd., 2004) gibi alanlarda kullanılmaktadırlar.

(Kalaycıoğlu, 2007) 2007 yılında yapılan bir çalışmada Tm:LuAG lazerlerinin spektroskopik analizi için %0,5 ve %5 oranlarında Tm⁺³ iyon katkılı Tm:LuAG (Lu₃Al₅O₁₂) lazerleri incelenmiştir. Bu çalışmada radyatif geçiş oranlarını belirlemek

için kullanılan Judd-Ofelt teorisi kullanılmıştır. Bu teori ile $^3H_4$ ve $^3F_4$ seviyelerinin ortalama radyatif ömürleri %0,5 Tm:LuAG lazerleri için $1041 \pm 143 \mu s$ ve %5 Tm:LuAG lazerleri için $17,7 \pm 3,4 ms$ olarak bulunmuştur. Ardından lüminesans kuantum verimlilikleri için floresan ölçümleri yapılmıştır. $^3H_4$ seviyesinin floresan ömrü %0,5 Tm:LuAG için $851 \mu s$ ve %5 Tm:LuAG için $42,3 \mu s$ olarak bulunmuştur. Bu sonuçlar ile çapraz gevşemenin gücünün konsantrasyonla arttığını göstermektedir. $^3F_4$ seviyesinde ölçülen floresan ömrü ise radyasyon dışı bozunma mekanizmalarının güçlendirilmesi nedeninden ötürü %0,5 Tm:LuAG için $11,2 ms$ ve %5 Tm:LuAG için $7,1 ms$ olarak $11,2 ms$ 'den $7,1 ms$ 'ye düşmüştür. Son olarak floresans verileri ve Judd-Ofelt teorisinin sonuçları kullanılarak emisyon kesit alanını $1,2 \pm 0,2 \times 10^{-21} cm^2$ olarak bulunmuştur. Kritik mesafe parametresi R_0 çapraz gevşeme için $10,2 \pm 0,8 \text{ \AA}$ olarak bulunmuştur. Başka bir çalışmada ise fiber bağlantılı diyot lazerler ile pompalanan Tm:LuAG lazerlerinin oda sıcaklığında $786 nm$ dalga boyunda absorpsiyon kesiti $4,37 \times 10^{-21} cm^2$ ve $2021 nm$ dalga boyunda uyarılmış emisyon kesiti ise $1,87 \times 10^{-21} cm^2$ olarak bulunmuştur. Ayrıca ölçülen floresans ömrü $11,9 ms$ olarak bulunmuştur (Xu vd., 2009).

1.2.2. Tm⁺³ Lazerlerini Pompalama Yöntemleri

1.2.2.1. Flaş Lambası ile Pompalama

Lazer sistemlerinde optik pompalama yöntemi olarak flaş lambası kullanılmaktadır. Flaş lambası ile Tm⁺³ lazerlerinin pompalanabilmesi için Tm⁺³ iyonlarının enerji seviyelerini kısa süreli ve yoğun olan bir ışık darbesi ile uyarmaktadır (Quarles vd., 1989). Flaş lambası ile pompalanan sistem düzeneğinin içerisinde gelen elektrik akımının depolanması için kondansatör bulunmaktadır. Krypton veya xenon gazlarından oluşan lambaya kondansatörde depolanmış olan enerji yönlendirilmektedir. Yüksek voltajlar yardımıyla bu gazın içerisinde bulunan elektronlar hızlandırılarak gazı iyonize olmuş olur. Düzenekte bulunan anahtarlama devresi ile iyonize halde bulunan gazı deşarj etmektedir. Gazın deşarj olması ile gaz içindeki iyonlar serbest kalmaktadır ve bu da ark oluşmasına neden olmaktadır. Arkın oluşması sonucu ile ortaya çıkan serbest enerji gazda yoğun bir plazma oluşturmaktadır. Oluşan plazma sayesinde çok kısa bir zamanda yoğun olan bir ışık

emisyonu gerçekleşmektedir (Hooker ve Webb, 2010). Oluşmuş olan bu ışık darbesi lazer sisteminde bulunan aktif bölgesine gönderilmesi ile Tm^{+3} lazerlerinin uyarılmasını sağlamaktadırlar.

Tm^{+3} lazerlerinin flaş lambası ile pompalanmasıyla yüksek güçte lazer ışını elde edilmesi ve lazer ışınının geniş bir spektrumda yayılması gibi avantajları vardır. Ancak bu pompalama yöntemi ile ısı üretimi çok fazladır bu da soğutma sistemlerinin düzeneği için daha karmaşık bir hal almaktadır. Tm^{+3} lazerlerinin flaş lambasıyla pompalanması ile lazer diyotlarıyla pompalanması karşılaştırıldığında flaş lambası ile pompalamada düzenek kurulumu daha basit ve daha ekonomiktir. Ancak flaş lambalarının ömürlerinin kısa olması ve kısa zamanda değiştirilmesi gerektiğinden dezavantajlı duruma düşmektedirler.

1.2.2.2. Ti:Safir Lazerlerinin Çıkışı ile Pompalama

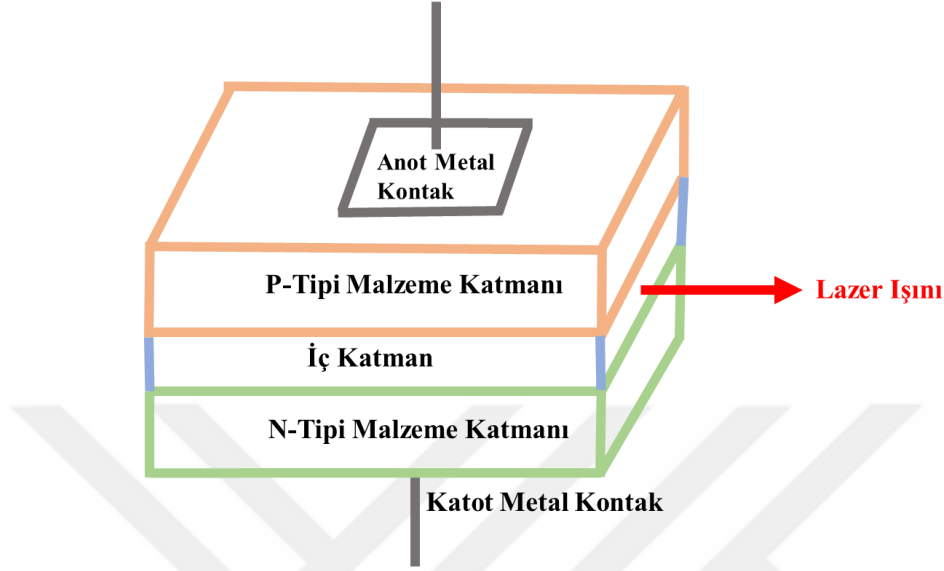
Ti:Safir lazerlerinin çıkışı ile pompalama yönteminde Tm lazerleri başka bir lazer sistemleri tarafından pompalandığı için hassas bir pompalama yöntemidir. Ti:Safir lazerlerinin 650 nm-1100 nm arasında emisyon spektrumları vardır. 800 nm civarında emilimleri güçlü olması ve çıkış güçlerinin yüksek olması sebebiyle Tm^{+3} lazerlerini pompalamak için iyi bir seçenek oluşturmaktadır (Trapani vd., 2014), (Stoneman ve Esterowitz, 1990). Ti:Safir lazerleri genel olarak diyot lazerler ile pompalanmaktadır. Diyot lazerler Ti^{+2} katkılı Safir kristalini uyararak yüksek enerjiye sahip kısa süreli ışık darbeleri elde edilmektedir. Elde edilen yüksek enerjili Ti:Safir lazerleri ile Tm^{+3} lazerlerinin uyarılması sağlanmaktadır.

Tm^{+3} lazerlerinin Ti:Safir lazerleri ile pompalanma yönteminin yüksek enerji ve kısa süreli ışık darbeleri ürettiği için avantajlı bir pompalama yöntemidir. Ancak lazer diyotlara göre pahalı, Ti:Safir lazerleri çok yüksek enerjili ışık darbeleri ürettiğinden Tm^{+3} kristalinde ısı üretmesinden kaynaklı verimi düşüreceğinden soğutma zorunluluğunun olması gerekir ve hantal olması gibi özelliklerinden dolayı dezavantajlı bulunmaktadır.

1.2.2.3. Lazer Diyotlar ile Pompalama

Lazer diyotlar yarıiletkenlerden oluşmaktadır. Lazer diyotlar Şekil 9'da görüleceği üzere pozitif yük taşıyıcıların yani boşlukların çoğunlukta olduğu p

katmanı, negatif yük taşıyıcıların yani elektronların çoğunlukta olduğu n katmanı ve bu iki malzeme arasında da iç katman bulunmaktadır. P tipi malzemeye anot metal kontağı ve n tipi malzemeye de katot metal kontağı bağlanmaktadır.

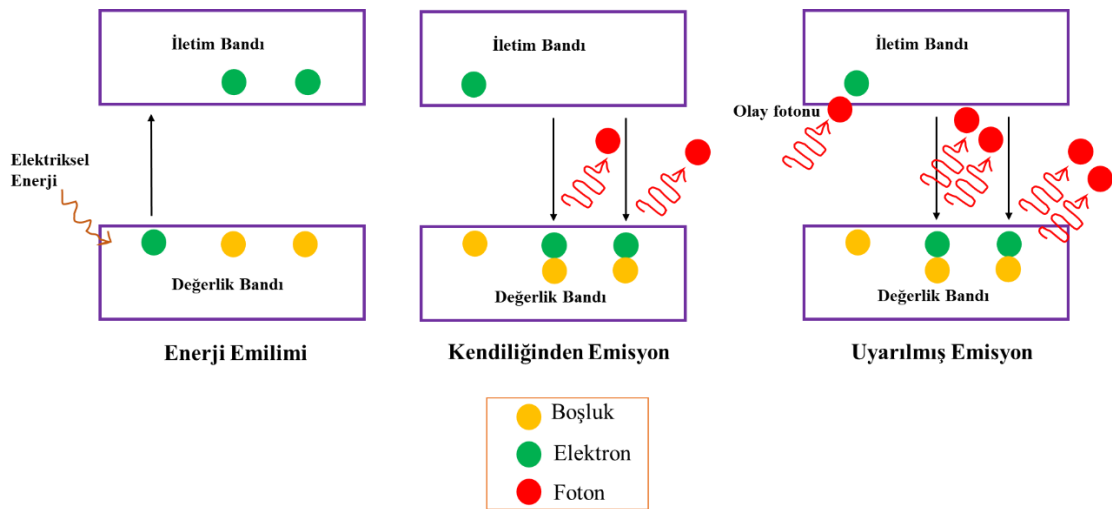


Şekil 9. Lazer diyotun şematik gösterimi

N tipi malzeme saf yarı iletkene arsenik (As), antimon (Sb) ve fosfor (P) gibi 5 değerliği bulunan bir element katkılanmasıyla oluşmaktadır. P tipi malzeme ise saf yarı iletkene Alüminyum (Al), Bor (B) ve Galyum (Ga) gibi 3 değerliği bulunan bir element katkılanmasıyla oluşmaktadır. Malzemenin optoelektronik özelliklerine göre kullanılacak olan yarı iletkenler belirlenmektedir. Örnek olarak lazer diyotlarda katkılanmayla oluşan yarı iletkenler AlGaAs, AlGaP ve GaAs şeklindedir.

Lazer diyotların çalışma prensibi Şekil 10'da görüleceği üzere emisyon, kendiliğinden emisyon ve uyarılmış emisyon olmak üzere aşamadan oluşmaktadır. İlk aşama olan enerji emilimde elektriksel enerji değerlik bantta bulunan kararlı elektronlara verilerek uyarılan elektronlar iletim bandına geçmektedirler. Elektronların iletim bandına geçmesiyle değerlik bandındaki yerleri boş kalmaktadır. İletim bandındaki elektronlar kararlı olmadığı için kararlı durumda bulunmak istediklerinden değerlik banta dönmek isteyeceklerdir. Sonuçta iletim bandındaki elektronlar değerlik banttaki boşluklara dönerek rekombinasyon yapmaktadırlar. Bu arada ikinci aşama olan kendiliğinden emisyonu gerçekleştirerek dışarıya rastgele yönlerde fotonlar

saçılmaktadır. Ancak yeterli yoğunluğa ulaşamamasından dolayı saçılan fotonların yakalanması için lazer diyotun optik rezonans oluşturması gerekmektedir. Bunun için bir ucuna tam yansıtıcı ayna diğer ucuna da kısmi yansıtıcı ayna yerleştirilmektedir. Bu aynalardan yansıyan fotonlar iletim bandında bulunan elektronları uyarması ile iki tane foton ışınması elde edilmektedir. Fotonlar uyarılan foton ile aynı faz, aynı frekans ve aynı polarizasyondadırlar. Böylece uyarılmış emisyon yapılmaktadır. Bu yöntemle elde edilen foton ışınları belirli bir yoğunluğa ulaştığında fotonlar kısmi yansıtıcı aynadan geçerek lazer diyotun lazer ışını oluşturur. İkinci aşama olan kendiliğinden emisyonda lazer ışının herhangi bir güç değeri yoktur. Ancak eşik değeri geçilip uyarılmış emisyon aşamasına geçildiğinde lazer gücünün değeri de hızlı bir şekilde artacaktır. Lazer diyotlar genelde gerilim için eşik değeri 1,5 V'dur (Schubert, 2018) bu değeri geçene kadar herhangi bir akım değeri yoktur. 1,5 V gerilim geçildikten sonra akım da hızlıca artmaktadır. Lazer diyotların çevresi bir metal ile kaplanarak ısınma ve dış etkilere korunması sağlanmaktadır. Ancak lazer ışının lazer diyottan dışarıya çıkabilmesi için belirli bir aralık bırakılmaktadır (Dutta, 2021). Doğrudan elektriksel enerji ile oluşturulan lazer ışını ile Tm^{+3} lazerlerinin uyarılmasını sağlamaktadır (Beyatlı vd., 2019a), (Wu vd., 2008). Genellikle lazer diyotlar 800 nm civarında ışık yaymaktadırlar. Lazer diyotlar ile oluşan lazer ışını çıkışı doğrudan Tm^{+3} lazerleri uyarmak ya da optik fiber (Xu vd., 2009) veya optik kılavuzlar (Mackenzie vd., 2001), (Jelinek, 2011) kullanılarak lazer diyotunun çıkışı Tm^{+3} lazerlerini uyarmak için kullanılabilir.



Şekil 10. Lazer diyotlarda lazer ışığının üretilmesinin şematik gösterimi

Lazer diyotların ekonomik olması, yüksek verimlikte ışık üretebilmesi, kompakt olması ve taşınabilir olması pompalama yöntemi olarak kullanılmasını ideal kılmaktadır (Sun, 2012). Ancak lazer diyotların çalışması sırasında oluşacak ısı dolayısıyla lazer sistemlerin verimini düşürecektir (Yi vd., 1995). Bunun önüne geçebilmek için de soğutma sistemleri kullanılmalıdır.

Tm^{+3} lazerlerinin pompalanabilmesi için yüksek güçlü lazer diyotlar kullanılmaktadır (Beach vd., 1996). Yüksek güç gerektiren uygulamalarda çıkış gücü yüzlerce Watt'a kadar çıkabilen yüksek güçlü lazer diyotlar kullanılmaktadır. Genellikle çok modlu olarak çalışmaktadırlar. Ancak özel tasarım ve yöntemlerle tek modlu olarak da çalışabilmektedirler. Lazer diyotlardan farklı olarak yüksek güçlü lazer diyotların rezonatör yapısı daha geniş ve aktif bölgesi daha büyük olarak tasarlanmaktadır. Yüksek güçlü lazer diyotlar yüksek verim, yüksek çıkış gücüne, uzun ömürlü olması gibi avantajları vardır. Ancak maliyetli, hantal ve özel tasarım gerekmesinden ötürü standart lazer diyotlar daha kullanışlı hale gelmektedir (Diehl, 2000), (Daiminger vd., 1998).

1.2.2.3.1. Lazer Diyotların Çalışma Modları

Lazer diyotlar tek modlu lazer diyotlar ve çok modlu lazer diyotlar olmak üzere iki mod da çalışabilmektedirler. Tek modlu lazer diyotların elde edilebilmesi için rezonatör uzunluğu ve aktif bölge boyutu sadece tek bir modun yayılmasını sağlayacak şekilde oluşturulmaktadır. Tek modlu lazer diyotlar tek bir boylamsal mod da ışık üretmektedirler yani lazer diyotun lazer çıkış ışığının tek bir frekans değeri bulunmaktadır. Yalnızca TEM_{00} olarak isimlendirilen temel modun yayılmasını sağlamaktadırlar. Dar ve paralel bir ışık demeti yaymaktadırlar (Lim vd., 2005), (Schetzen ve Yıldırım 2003). Tek modlu lazer diyotların lazer ışını dar, ışın kalitesi yüksektir (Sun, 2012). Bu özelliklerinden dolayı yüksek parlaklık gerektiren uygulamalarda daha çok tercih edilmektedirler. Çok modlu lazer diyotlar birden daha fazla boylamsal modda ışık üretmektedirler. Bunun için lazer diyotlarda rezonatör uzunluğu ve yapısı birden fazla modu aynı anda geçmesini sağlayacak şekilde yapılmaktadır. Çok modlu lazer diyotlar tek modlu lazer diyotların aksine lazer ışının birden çok frekans değerlerine sahiptirler (Sun, 2012). Dolayısıyla geniş bir dalga

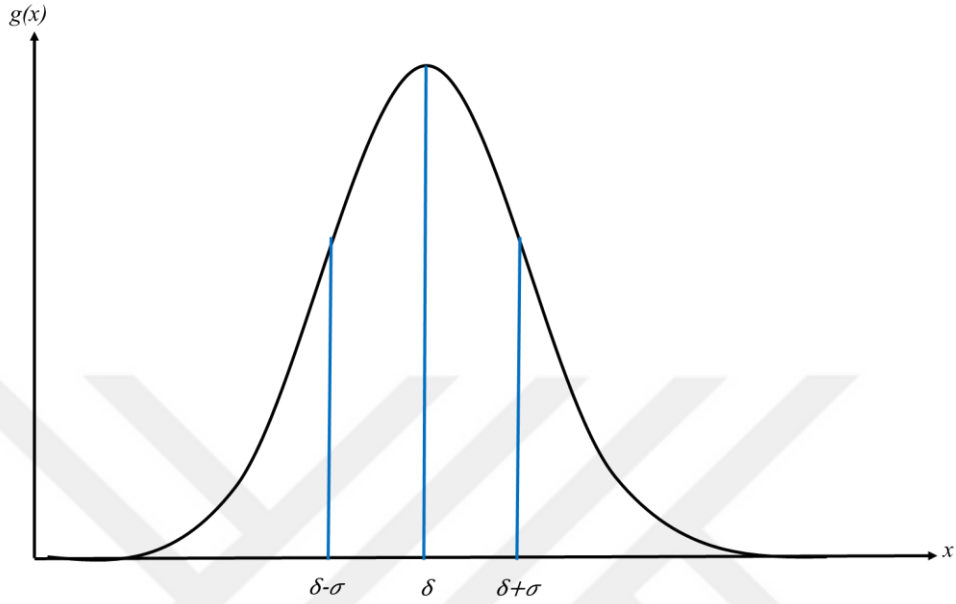
boyu spektrumuna sahiptirler. Çok modlu lazer diyotların çıkış gücü tek modlu lazer diyotlara göre daha yüksek olmasından dolayı yüksek güç gerektiren uygulamalarda tercih edilmektedirler. Ancak çok modlu lazer diyotlar tek modlu lazer diyotlardan koherans sürelerinin düşük olmasından kaynaklı dalga boyu kararlılığı azdır ve hassasiyetleri düşüktür (Strohmaier vd., 2010).

1.2.2.3.2. Lazer Diyotlarda Parlaklık

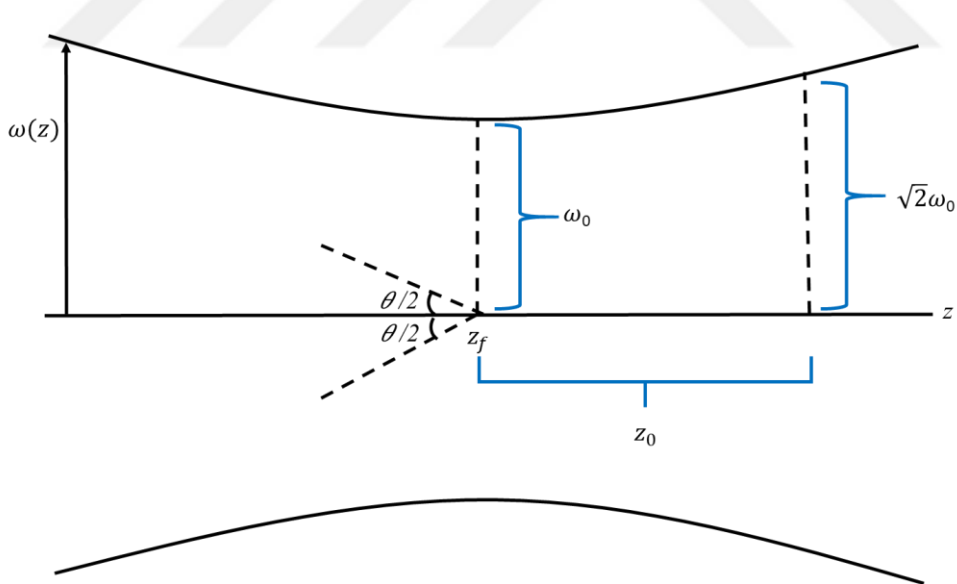
Lazer diyotların oluşturduğu lazer ışının enerji yoğunluğu ve odaklanması parlaklık kavramı ile açıklanmaktadır. Pompalama kaynağı olarak kullanılan lazer diyotların parlaklığı ışın kalite faktörü, çıkış gücüne, ışının alanına, ışının dalga boyuna, ışının saçılma açısına, lazer diyotların sıcaklığına, lazer diyotların akım ve voltaj değerlerine ve optik elemanların tasarımları şeklinde birçok etken faktöre bağlıdır (Wenzel vd., 2003). Bu faktörlerden çıkış gücü parametresi incelenirse çıkış gücü ne kadar yüksek olursa enerji yoğunluğu da yüksek olduğu anlamına geleceğinden parlaklık da yüksek olacaktır. Diğer bir faktör ise ışının açısal yayılımı yani diverjans açısı küçük olmalıdır ki ışın dar bir alanda kalarak enerji yoğunluğu artması ile yüksek parlaklığa sahip bir ışın oluşacaktır. Işının alanı parametre faktörünün küçük olması parlaklığı artırmaktadır. Lazer diyotların parlaklığı üzerinde etkili olan dalga boyu etken faktöründe kısa dalga boylu lazer diyotların seçilmesi lazer diyotların ışığını küçük bir noktaya odaklayabileceğinden lazer diyotların parlaklığını artırmaktadırlar. Lazer diyotların çok fazla ısınması istenmez çünkü parlaklık üzerinde olumsuz etkisi olduğu bilinmektedir (Zyoud vd., 2020). Şöyle ki sıcaklığın artması dalga boyunun kaydırılmasına ve sıçramalar yapmasına sebep olacaktır. Bu sonuçlardan ötürü lazer diyotlar için soğutucular kullanılmaktadır. Soğutucularda termistörler, platin dirençli sıcaklık cihazları, IC sensörlü sıcaklık sensörleri kullanılmaktadır. Lazer diyotlara uygulanan akım ve voltaj değerleri uygun değerde olmalı ve optik eleman tasarımları düzgün şekilde yapılarak lazer diyotların parlaklığı artırılmaktadır. Lazer diyotların parlaklığına etki eden son faktör olan ışın kalite faktörü (M^2) değerinin düşük olması ışını dar bir alanda odaklamasından dolayı lazer diyotlar yüksek parlaklığa sahip olmaktadır.

Işın kalite faktörü (M^2) kavramı biraz daha yakından incelenecek olursa; M^2 ışının Şekil 12'deki gerçek ışın profili ile Şekil 11'deki ideal ışın profili olan Gauss

ışınına olan odaklanma ve yakınlığını ölçmek için kullanılan bir kavramdır (Siegman, 1993).



Şekil 11. Gauss ışının şematik gösterimi



Şekil 12. Işın kalite faktörünün şematik gösterimi

Şekil 12'deki Gauss ışının sapma açısı denklem (1.5)'deki ile ifade edilmektedir.

$$\theta = \frac{2\lambda}{n_0\pi\omega_0} \quad (1.5)$$

(1.5)'deki denklemde ω_0 ışının odaklandığı yerdeki ışının yarı çapı, θ ışının sapma açısını, n_0 kırılma indisini ve λ ışının dalga boyunu ifade etmektedir.

M^2 ışın kalite faktörü denklem (1.6)'da ki gibi elde edilmektedir.

$$M^2 = \frac{n_0 \pi \omega_0 \theta}{2\lambda} \quad (1.6)$$

(1.5)'de ki denklem (1.6)'da ki denklemde yerine yazıldığında 1 değeri elde edilmektedir. M^2 değeri 1'e ne kadar yakın olursa lazer ışınında çok iyi bir Gauss ışınına sahip olduğunu göstermektedir. Bu sonuç bizlere ışın kalitesinin de çok iyi olduğu sonucunu vermektedir. Ancak M^2 değeri 1 değerinden uzaklaşırsa lazer ışını geniş olup daha çok yayılım göstereceğinden ışın çok uzak mesafelerde odaklanacaktır ki bu durum istenmemektedir.

Şekil 12'den görüleceği üzere uzak noktadaki bir ışının genişliği $\omega(z)$, (1.7) denkleminde elde edilmektedir.

$$\omega(z) = \omega_0 \sqrt{1 + \left(\frac{z - z_f}{z_0} \right)^2} \quad (1.7)$$

(1.7) denklemindeki z_0 Rayleigh aralığı, z_f ışının odak noktasındaki uzaklığı, ω_0 ışının odak noktasındaki yarıçapı, z lokasyonu ifade etmektedir.

z_0 değeri de denklem (1.8)'deki gibi elde edilmektedir.

$$z_0 = \frac{n_0 \pi \omega_0^2}{M^2 \lambda} \quad (1.8)$$

(1.8)'deki denklem (1.7)'de yerine yazıldığında artık lazer ışının M^2 değeri hesaplanmış olmaktadır.

$$\omega(z) = \omega_0 \sqrt{1 + \left(\frac{z - z_f}{\frac{n_0 \pi \omega_0^2}{M^2 \lambda}} \right)^2} \quad (1.9)$$

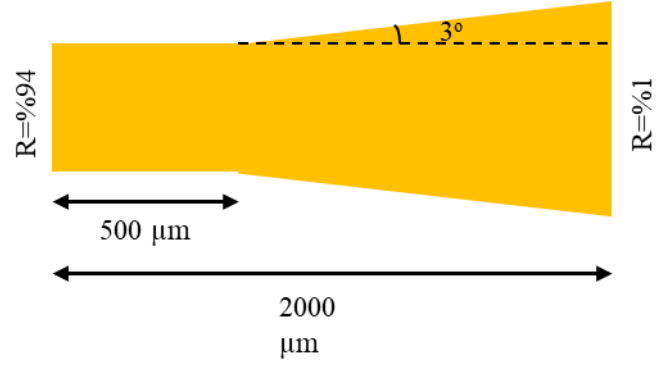
1.2.2.3.3. Yüksek parlaklığa sahip daralan kılavuz yapılı lazer diyotlar

Tez kapsamında Ferdinand Braun Enstitüsünün laboratuvarında geliştirilen 1 W'lık yüksek parlaklığa sahip daralan kılavuz yapılı diyotlar (TDL) iş birliği ile kullanılmış olup bu tezde de yapılan deneylerde kullanılmıştır. AlGaInP yarı iletkeni kullanılarak elde edilen TDL diyotların görüntüsü Şekil 13'de gösterilmektedir.



Şekil 13. Daralan kılavuz yapılı lazer diyotların görüntüsü

Şekil 13'deki daralan kılavuz yapılı lazer diyotları diğer lazer diyotlardan ayıran en büyük özellik Şekil 14'den de görüleceği üzere daralan yapıda gelip 3°'lik genişleme açısıyla açılmaktadır. Lazer ışını 2000 μm 'ye kadar saçılmakta ve sırt dalga kılavuzları 500 μm düz bir kesit uzunluğuna sahiptir. Konik yükseltgeç uzunluğuna sahip olup 1,5 mm uzunluğundadır. En yüksek 25 °C sıcaklıkta 2 A değerinde 1 W'lık çıkış gücü üretmektedirler. Işın kalite faktörü hızlı eksen $M^2 < 1,05$ ve yavaş eksen $M^2 < 2,5$ olarak ölçülmüştür. Kullanılan bu konik diyotların oluşturduğu lazer ışının parlaklığı ise 220 MW/cm² olarak hesaplanmıştır (Sumpf vd., 2011). Kullanılan bu lazer diyotlar bu özellikleri ile birlikte elde edilen sonuçlara göre şu anda kullanılan çok-kipli diyotlara göre yaklaşık 4 kat daha yüksek parlaklığa sahiptirler. Literatüre bakıldığında yarı iletkeni AlGaInP olan 15 °C de 2 A'ın altında 1 W çıkış gücüne sahip 650 nm'de ışımaya yapan konik diyotlar kullanılmıştır. Kullanılan diyotların sırt dalga kılavuzu 750 μm ve 2°, 3° ve 4° derece genişleme açılarında ölçümler alınmıştır (Sumpf vd., 2010). Başka bir çalışmada ise yüksek parlaklığa sahip 15 °C'de ve 2,1 A değerlerinde 1 W gücündeki lazer diyotlar 670 nm'de ışımaya yapmaktadır. Bu lazer diyotlar 7,5 μm sırt dalga kılavuzuna ve 4° genişleme açısına sahip olup ışın kalite faktörü 1,7 olarak bulunmuştur (Sumpf vd., 2007).

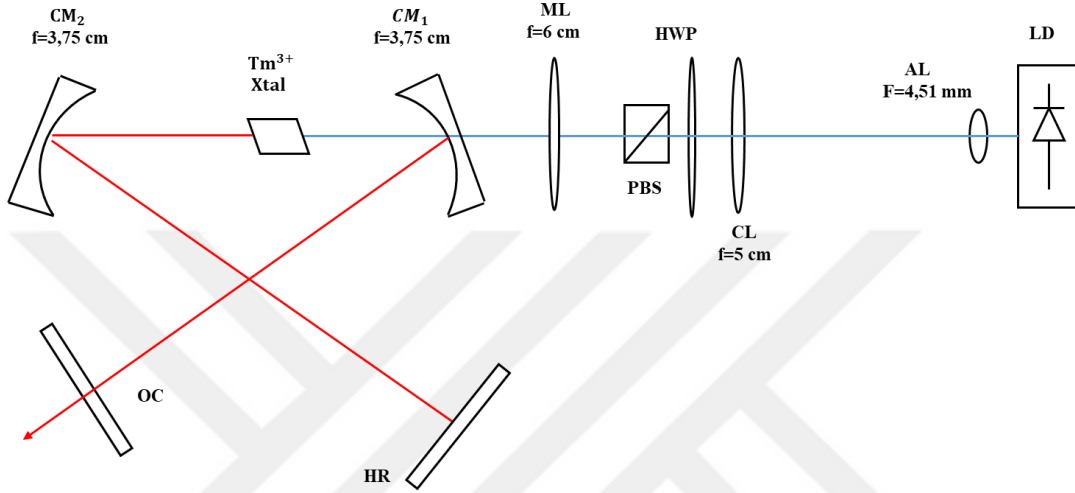


Şekil 14. Daralan kılavuz yapılı lazer diyotların yaydığı lazer ışın özelliklerinin şematik gösterimi

Daralan kılavuz yapılı diyotlar 680 nm’de ışıma verebilmektedir hem de sıcaklık 15 °C ile 30 °C arasında değişim yapıldığında dalga boyu 672 nm’den 682 nm’ye kadar kaydırılabilmektedir (Beyatlı vd., 2019a).

2. MATERİYAL ve DENEYSEL KURULUM YÖNTEMİ

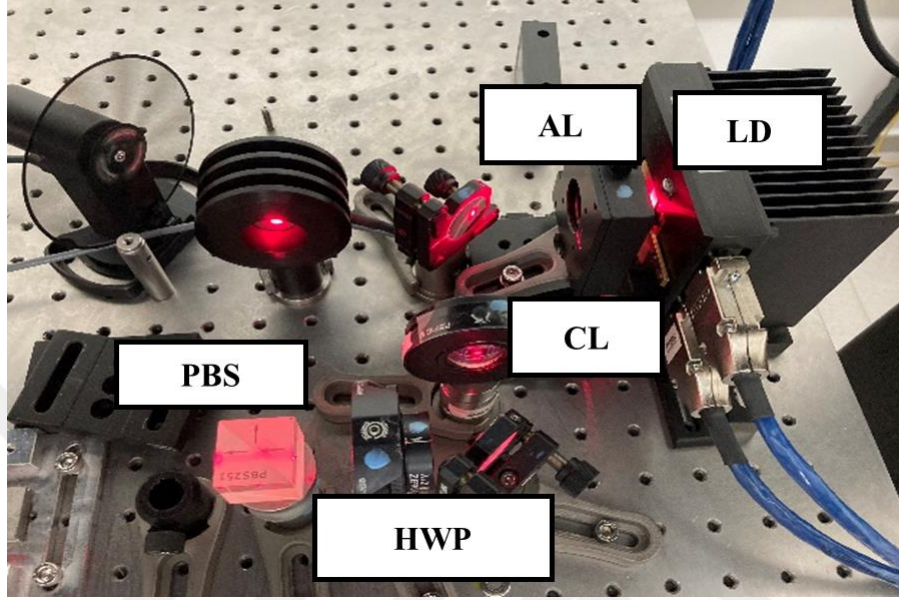
680 nm’de ışıma yapabilen 1 W’lık güce sahip daralan kılavuz yapıları lazer diyotlar tarafından pompalanan Tm^{+3} lazer sistemleri için oluşturulacak olan kurulumun şeması Şekil 15’de gösterilmektedir.



Şekil 15. Tm^{+3} katkılı lazer sistemlerinin teoriksel düzeneği

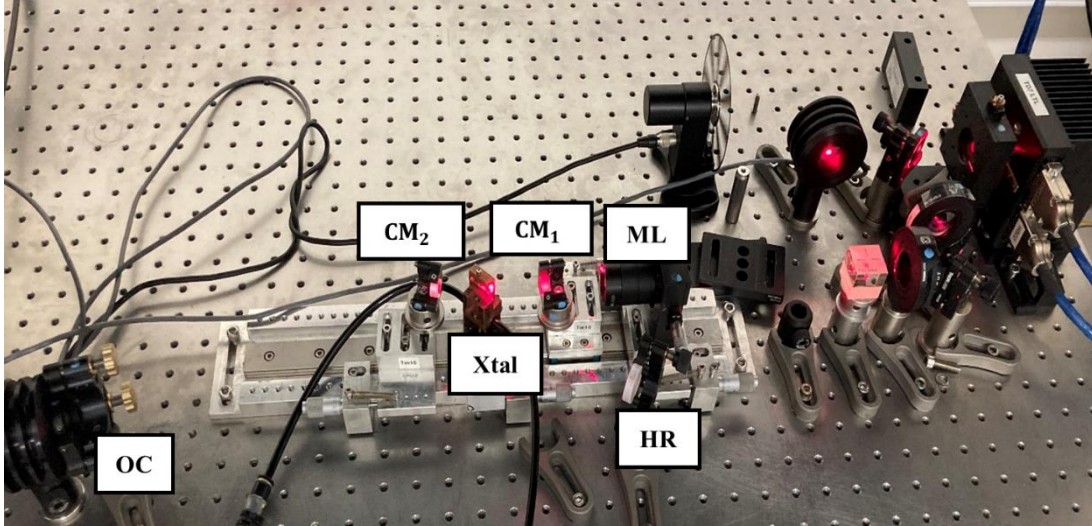
Şekil 15’deki düzeneğin oluşturulabilmesi için ilk olarak lazer diyotların hizalanması yapılmıştır. Ardından diyotlar C-yapılı diyot tutucularına (LD) yerleştirilmiş ve diyotların verimli ve güvenli bir şekilde çalışmasını sağlamak amacıyla sıcaklık kontrol sürücüsü ve akım kaynağından oluşan diyot sürücüleri ile bağlantısı yapılmıştır. Diyottan pompalanan ışın $f=4,51$ mm’lik asferik lens (AL) sayesinde toplanmıştır. Kullanılan diyotun yatay ve dikey eksen yayılım açıları birbirinden farklı olmasından dolayı sisteme 5 cm odak uzaklığına sahip silindirik lens (CL) ile ışının hızlı ve yavaş eksen yayılımlarının eksen bazında eşlenmesi sağlanmıştır. Diyotun polarizasyonun dikey hale getirebilmesi için pompa ışının yoluna yarı dalga dönüştürücü (HWP) kullanılmıştır. Ardından sisteme eklenen polarize ışın ayırıcısı (PBS) ile birlikte gelen ışın paralel (P-polarize) ve dik (S-polarize) şeklinde iki ayrı ışına ayırarak paralel polarize ışını geçirip dik polarize ışını yansıtacaktır. Yansıyan dik polarize ışınlar yarı dalga dönüştürücü vasıtasıyla paralel polarize ışınlar elde ederek tekrardan polarize ışın ayırıcısından geçirilecektir. Bu şekilde eklenen

elemanlardan sonra Tm^{+3} katkılı lazerlerinin pompalanabilmesi için laboratuvarda yapılmış olan pompalama sisteminin düzeneği Şekil 16’da gösterilmektedir.



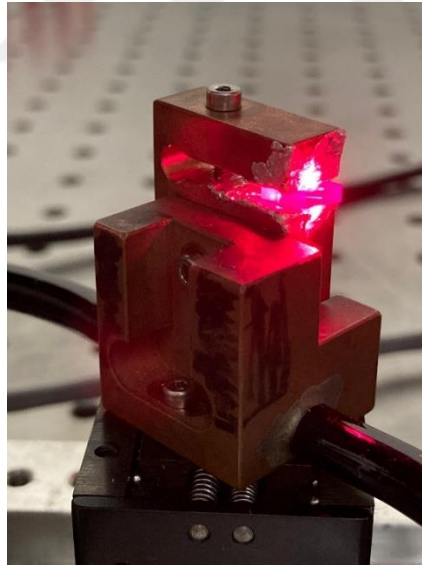
Şekil 16. Tm^{+3} katkılı lazer sistemlerinin pompalanma deneysel düzeneği

Pompalama düzeneği oluşturulduktan sonra gelen ışının kazanç ortamına yani kristalin içine odaklanması için 6 cm’lik mercek (ML) kullanılmıştır. Lazer ışığının yönlendirilmesi, değişmesi, güçlendirilmesi ve istenilen alana sahip hale getirilmesi için standart 4 aynalı x-katlamalı lazer geometrisi kullanılmıştır. Görsellerden de görüleceği üzere bu rezonatör iki tane $f=3,75$ cm’lik çukur ayna (CM_1 ve CM_2), %1,3’lük çıkış aynası (OC) ve yüksek yansıtıcı (HR) aynalardan oluşmaktadır. İki çukur ayna arasına ışık kaybının azaltılması ve lazerin verimli çalışabilmesi için Brewster açısında kristal (Xtal) yerleştirilmiştir. Kristalin sıcaklığı su soğutma yöntemi ile $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ ’de çalıştırılmıştır. Ek olarak kristalin uyarılması için CM_1 çukur aynası kullanılmıştır. Tm^{+3} katkılı lazerleri için oluşturulan 4 aynalı x-katlamalı lazer geometrisinin laboratuvarda yapılmış olan görüntüsü Şekil 17’de gösterilmektedir.



Şekil 17. Tm^{+3} katkılı lazer sistemlerinin rezonatör deneysel şeması

Şekil 17'deki Tm^{+3} katkılı lazer sistemlerinin kazanç ortamı için kullanılan kristalin tutucusu ile birlikte görüntüsü Şekil 18'de gösterilmektedir.



Şekil 18. Tm^{+3} katkılı lazer sistemlerinin kazanç ortamı için kullanılan kristal

Şekil 15'deki teoriksel düzenek baz alınarak laboratuvarında yapılmış lazer sisteminin daralan kılavuz yapılı lazer diyot sürücüsü, kristali soğutmak için kullanılan soğutucu,

Şekil 16’da gösterilen pompalama düzeneği ve Şekil 17’deki lazer rezonatöründen oluşan sistemin genel görüntüsü Şekil 19’da gösterilmektedir.



Şekil 19. Tm^{+3} katkılı lazer sistemlerinin deneysel düzeneği

2.1. 680 nm’de daralan kılavuz yapılı lazer diyotların karakterizasyonu

Şekil 19’deki düzeneğin oluşturulabilmesi için ilk olarak elimizde birden fazla 680 nm’de ışıma yapacak lazer diyotların bulunmasından ötürü diyotların karakterizasyonu yapılmıştır. Ardından diode driver-LDX-3565B-220 V sürücüsü ve temperature controller-LDT-5525B-220 V sıcaklık denetimi yapılacak olan cihaz diyot tutucusuna bağlantısı yapılmıştır. Ardından ışının gücü için FieldMate Power Meter-PM10 Top ASSY ölçüm cihazını (100 W’a kadar %1 hata payı ile ölçüm yapmaktadır.), dalga boyu ölçümü içinde OceanOptics firmasının üretmiş olduğu 0,5 nm çizgi genişliğine kadar ölçüm yapabilen NIR-Quest 200-1100 nm spektrometre cihazı kullanılmıştır. Lazer diyotların akıma göre gücünün değişimi gözlenebilmesi için sabit sıcaklıkta tutularak akım değiştirilmiştir. Sonrasında diyotun olabilecek en yüksek akımında sıcaklığı değiştirilerek çıkış dalga boyu değişimi incelenmiştir. Bu işlemlerin ardından sistemin ve diyotun en verimli sıcaklık ve akım değerleri elde edilmiştir. Uygun değerlerin bulunmasının ardından lazer sistemi kurulup aynalar en

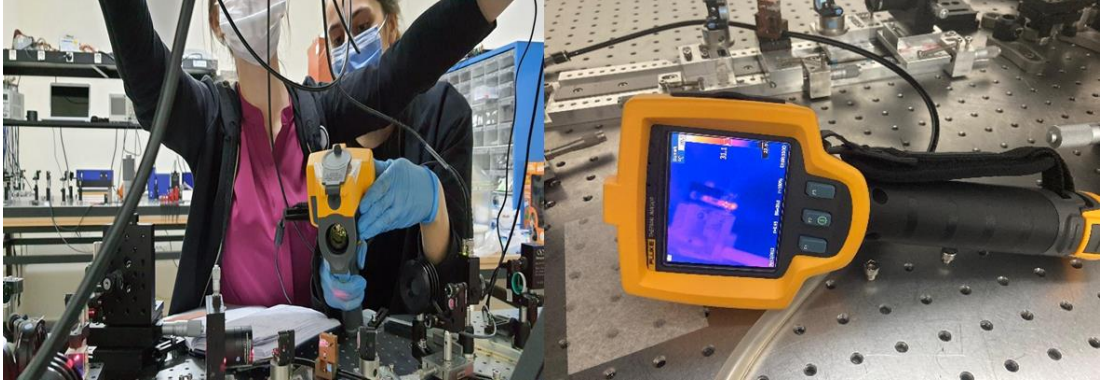
uygun açı ve konumda yerleştirildikten sonrada sistemin 2 µm bölgesinde çalışması için A.P.E-Berlin firmasının ürettiği ve 1000-2600 nm aralığına çalışan WaveScan spektrometre ile çıkış dalga boyu gözlemlenmiştir

2.2. Verim Eğimi Performanslarının İncelenmesi

Şekil 19'daki gibi Tm^{+3} katkılı lazer sistemleri için oluşturulan düzeneğin kurulumu tamamlandıktan sonra sistemin verim eğim performansı için giriş gücü değiştirilerek farklı giriş güçlerinde sistemin çıkışındaki oluşacak güç değeri değişimleri gözlemlenerek ölçümler alınmıştır. Böylece verim eğim performansı için güç ölçer ile güç verimliliği ölçülerek kristalin kendiliğinden soğurulma etkisi ve çapraz sönümleme etkileri gözlemlenmiştir. Buradaki güç verimliliği FieldMate Power Meter-PM10 Top ASSY güç ölçer vasıtası ile alınmıştır. Ölçümler kristal su sıcaklığı 10 °C - 15 °C - 20 °C ve 25 °C'ye getirilerek sistemlerin verim eğimleri belirlenmiştir. 10 tane Tm:YAG ve 10 tane TmLuAG lazerleri olmak üzere 20 farklı lazer sistemi için 4 farklı kristal su sıcaklığında ölçümler alınarak sistemlerin verim eğim performansları gözlemlenmiştir.

2.3.Kristal Su Sıcaklığına ve Kristal Sıcaklığına Bağlı Lazer Çıkış Gücü Değişiminin İncelenmesi

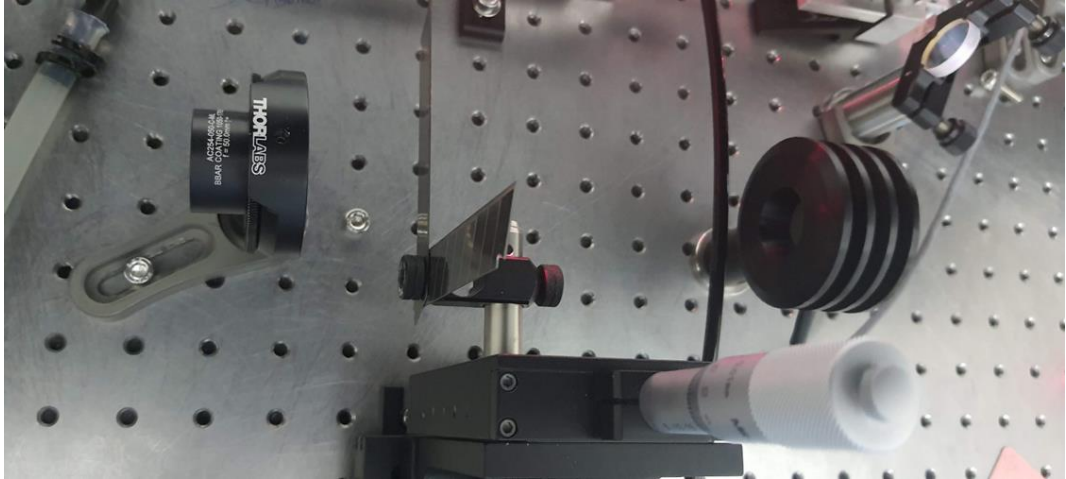
Şekil 19'daki sistemin verim eğim performansının gözlenilmesinin ardından kristal sıcaklığındaki değişimlerden dolayı lazer çıkış gücünün değişiminin gözlenmesi için soğutucu suyun sıcaklığı 10 °C ile 40 °C arasında 2,5 °C aralıklarla değiştirilmiştir ve bu sıcaklıklarda maksimum güçler elde edilmiştir. Ek olarak değiştirilmiş olan sıcaklığın kristal üzerindeki etkisinin kristal üzerinden gözlenebilmesi için Şekil 20'de gösterilen portatif termal kamera kullanılmıştır. 10 tane Tm:YAG ve 10 tane Tm:LuAG lazerleri olmak üzere 20 farklı lazer sistemi için 13 farklı kristal su sıcaklığında ölçümler alınarak sistemlerin kristal sıcaklığındaki değişimlerinden kaynaklı lazer gücünün değişimi elde edilmiştir.



Şekil 20. Tm:YAG ve Tm:LuAG lazer sistemlerinde kullanılan portatif termal kamera

2.4. Lazer Çıkışının Kip İdeallığının İncelenmesi (M^2 Ölçümü)

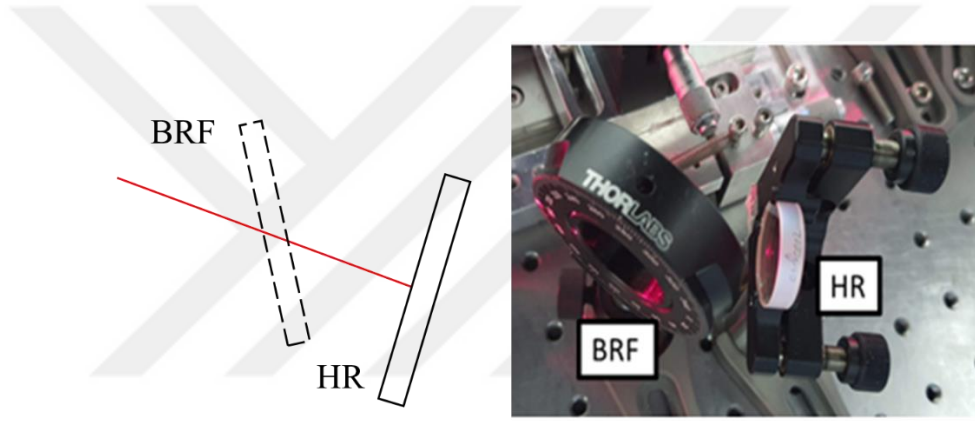
Şekil 19'daki lazer sistemi için çıkış aynasından (OC) çıkan ışının kalitesini belirleyebilmek için bıçak kenar yöntemiyle M^2 ölçümü yapılmıştır. Kurulan bıçak kenar düzeneğinin görüntüsü Şekil 21'de gösterilmektedir. Çıkan lazer ışığının karakteristiğinin ölçümü 10 tane Tm:YAG ve 10 tane TmLuAG lazerleri olmak üzere 20 farklı lazer sistemi için yapılmıştır. 15 °C kristal su sıcaklığında ölçümler alınmıştır ve ışının hem yatay hem de dikey için M^2 ölçümleri alınmıştır.



Şekil 21. Tm:YAG ve Tm:LuAG lazer sistemlerinde M^2 ölçümleri için bıçak kenar yöntem düzeneği

2.5. Dalga Boyu Değişim Aralıklarının ve Çift Dalga Boyu Işımlarının İncelenmesi

Dalga boyu değişimi ve çift dalga boyu ışıma işlemleri için Şekil 19'daki lazer sistemindeki lazer rezonatörüne yüksek yansıtıcı ayna (HR) koluna Brewster açısında olacak şekilde 8 mm kalınlığında boşluk için kristal quartz tabanlı çift kırınımlı prizma (BRF) Şekil 22'deki gibi eklenmiştir. Çift kırınımlı prizmanın eklenmesinin ardından dalga boyunun incelenmesi için A.P.E Berlin firmasının ürettiği 1000-2600 nm aralığında çalışabilen WaveScan spektrometresi ekipmanından incelenmiştir. 10 tane Tm:YAG ve 10 tane Tm:LuAG lazerleri olmak üzere 20 farklı lazer sistemi için yapılmıştır. Ek olarak 15 °C kristal su sıcaklığında ölçümler alınmıştır.

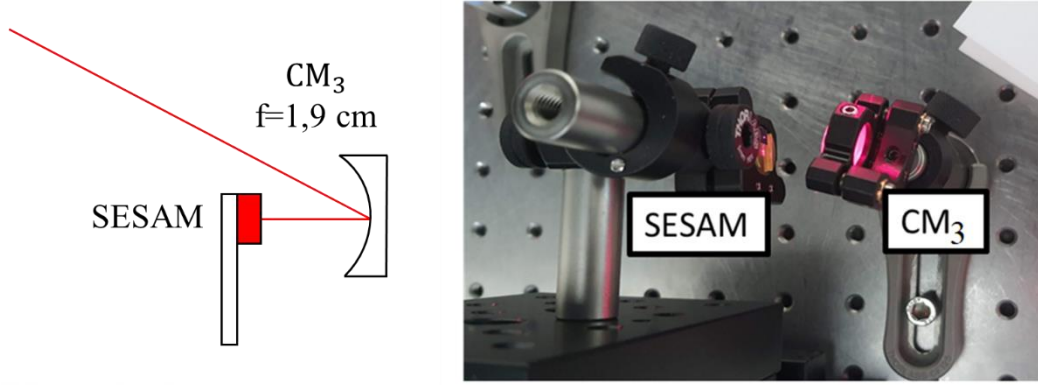


Şekil 22. Tm:YAG ve Tm:LuAG lazer sistemlerine eklenen çift kırınımlı prizmanın şeması ve görüntüsü

2.6. SESAM Tabanlı Darbeli Rejimdeki Performanslarının İncelenmesi

Şekil 19'daki lazer sisteminin ölçümlerinin son aşaması olan Q-anahtarlama işlemine geçilmiştir. Burada lazer sisteminin rezonatöründe bulunan yüksek yansıtıcı ayna (HR) sistemden çıkartılıp yerine $f=1,9$ cm odak uzaklığına sahip bir çukur ayna (CM₃) yerleştirilmiştir. Ardından bu çukur aynanın odağına emilimi %9, dinlenme süre sabiti 10 ps ve dalga boyu 2900 nm ye sahip doyabilen soğurucular (SESAM) Şekil 23'deki gibi eklenmiştir. SESAM'ın konumunun değiştirilmesi ile darbeli rejimler elde edilmiştir. Elde edilen darbeler Rohde-Schwarz FSV4 spektrum analizörü ve TDS2024C200 MHz 2 GS/s örnekleme oranı 4 kanallı sinyal osiloskobu üzerinden incelenmiştir. Q-anahtarlama ölçümleri 10 tane Tm:YAG ve 10 tane Tm:LuAG

lazerleri olmak üzere 20 farklı lazer sistemi yapılmıştır. Ek olarak 15 °C kristal su sıcaklığında ölçümler alınmıştır.



Şekil 23. Tm:YAG ve Tm:LuAG lazer sistemlerinde Q-anahtarlama darbeli rejimler için kurulan çukur ayna (CM₃) ve SESAM düzeneğinin şeması ve görüntüsü

Bu tez çalışması için yapılan 10 °C, 15 °C, 20 °C ve 25 °C'deki lazer sistemlerin verim eğri performansları, lazer çıkışının sıcaklığa bağlı değişim grafiği, lazer sistemlerinin dalga boyu değişim aralığı, çift dalga boyu ışıma spektrumu, lazer ışın yarı çapının M^2 ölçüm sonucu ve Q-anahtarlama darbe rejimi işlemleri sırasıyla %1,5 katkılı 9 mm uzunluğunda Tm:YAG, %1,5 katkılı 7 mm uzunluğunda Tm:YAG, %1,5 katkılı 5 mm uzunluğunda Tm:YAG, %1,5 katkılı 3 mm uzunluğunda Tm:YAG, %3 katkılı 7 mm uzunluğunda Tm:YAG, %3 katkılı 5 mm uzunluğunda Tm:YAG, %3 katkılı 3 mm uzunluğunda Tm:YAG, %6 katkılı 7 mm uzunluğunda Tm:YAG, %6 katkılı 5 mm uzunluğunda Tm:YAG, %6 katkılı 3 mm uzunluğunda Tm:YAG, %2 katkılı 9 mm uzunluğunda Tm:LuAG, %2 katkılı 7 mm uzunluğunda Tm:LuAG, %2 katkılı 5 mm uzunluğunda Tm:LuAG, %2 katkılı 3 mm uzunluğunda Tm:LuAG, %4 katkılı 7 mm uzunluğunda Tm:LuAG, %4 katkılı 5 mm uzunluğunda Tm:LuAG, %4 katkılı 3 mm uzunluğunda Tm:LuAG, %6 katkılı 7 mm uzunluğunda Tm:LuAG, %6 katkılı 5 mm uzunluğunda Tm:LuAG ve %4 katkılı 3 mm uzunluğunda Tm:LuAG lazer sistemleri için yapılmıştır.

3. DENEYSEL BULGULAR

3.1. Tm:YAG ve Tm:LuAG lazerlerinin Sürekli Dalga Rejimi Performansları

680 nm’de daralan kılavuz yapılı lazer diyotlar ile pompalanan farklı katkı oranları ve farklı kristal uzunluklarına sahip Tm:YAG ve Tm:LuAG lazer sistemlerinin sürekli dalga rejiminde çalışması sonucunda elde edilen 20 farklı lazer sistemlerinin sonuçları Tablo 1 ve Tablo 2’de listelenmiştir. Tablolarda farklı katkı oranları ve farklı uzunluklardaki kristallerin kristal su sıcaklığına (10 °C, 15 °C, 20 °C ve 25°C) bağlı giriş gücüne göre çıkış gücünün değişimi (maksimum güç) ve sistemlerin verimleri elde edilmiştir.

Tablo 1 ve Tablo 2 incelendiğinde görüldü ki sıcaklık değerlerinin artması ile birlikte sisteminlerin çıkış gücü ve verim değerlerinin düştüğü gözlemlenmiştir. Sistemlerde çapraz sönümleme etkisinin olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca kristal boyunun uzun olan sistemlerde kristal boyu kısa olan sistemlere nazaran daha yüksek çıkış gücü ve verim değerleri gözlemlenmiştir.

Bu tez çalışmasında kullanılan 680 nm’de 1 W’lık daralan kılavuz yapılı lazer diyotlar ile sadece 2019 yılında bir çalışma (Beyatlı vd., 2019a) (Beyatlı vd., 2019b) yapılmıştır. Ancak bu çalışmada sadece %6 katkılı 7 mm Tm:YAG, %6 katkılı 5 mm Tm:YAG ve %6 katkılı 7 mm Tm:YAG lazer sistemlerinde sırası ile 336 mW çıkış gücünde %52 verim eğrisi, 340 mW çıkış gücünde %55 verim eğrisi ve 295 mW çıkış gücünde %51 verim eğrisi elde edilmiştir. Bu tez çalışmasında aynı kristaller kullanıldığında sırasıyla 321 mW çıkış gücünde %45 verim eğrisi, 311 mW çıkış gücünde %42 verim eğrisi ve 262 mW çıkış gücünde %41 verim eğrisi elde edilmiştir. Bu tez çalışmasında daha düşük değerlerin elde edilmesinin sebebi aynı lazer diyotların 2019 yılında kullanılmasından dolayı ömürlerinin azalması dolayısıyla yeterince verimli çalışamamasından kaynaklı olabilmektedir.

Tablo 1. Tm:YAG lazerlerinin sürekli dalga rejiminde çalışması sonucunda elde edilen sonuçlar

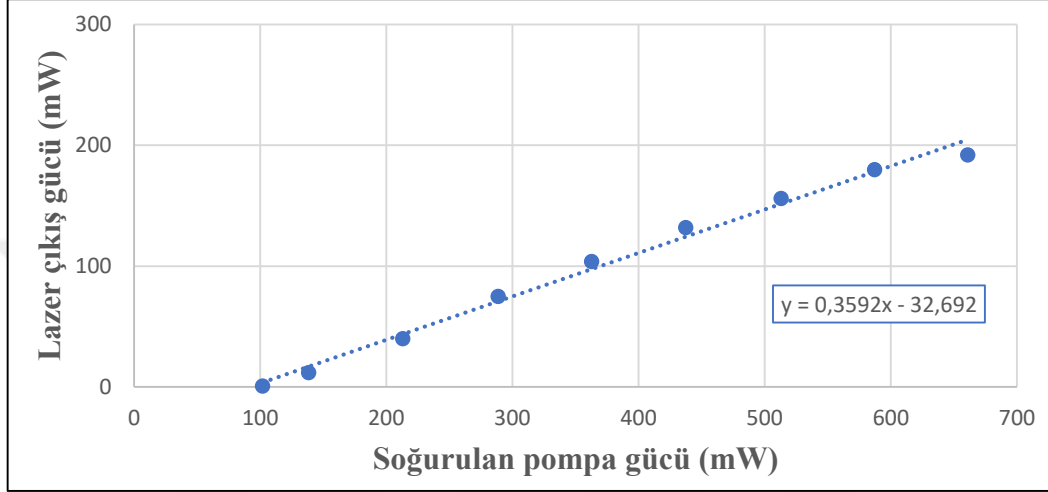
Katkı Oranı (%)	Uzunluk (mm)	Sıcaklık (°C)	Verim (%)	Maksimum Çıkış Gücü (mW)
1,5	9	10	38	203
		15	36	192
		20	35	187
		25	33	179
	7	10	36	208
		15	36	203
		20	35	194
		25	34	182
	5	10	34	155
		15	33	146
		20	32	137
		25	31	132
	3	10	24	92
		15	23	85
		20	23	82
		25	23	80
3	7	10	40	270
		15	40	264
		20	39	256
		25	38	249
	5	10	45	263
		15	45	256
		20	45	247
		25	43	236
	3	10	40	222
		15	41	221
		20	41	220
		25	41	218
6	7	10	45	332
		15	45	321
		20	44	319
		25	43	308
	5	10	42	320
		15	42	311
		20	41	300
		25	42	295
	3	10	43	274
		15	41	270
		20	41	269
		25	40	264

Tablo 2. Tm:LuAG lazerlerinin sürekli dalga rejiminde çalışması sonucunda elde edilen sonuçlar

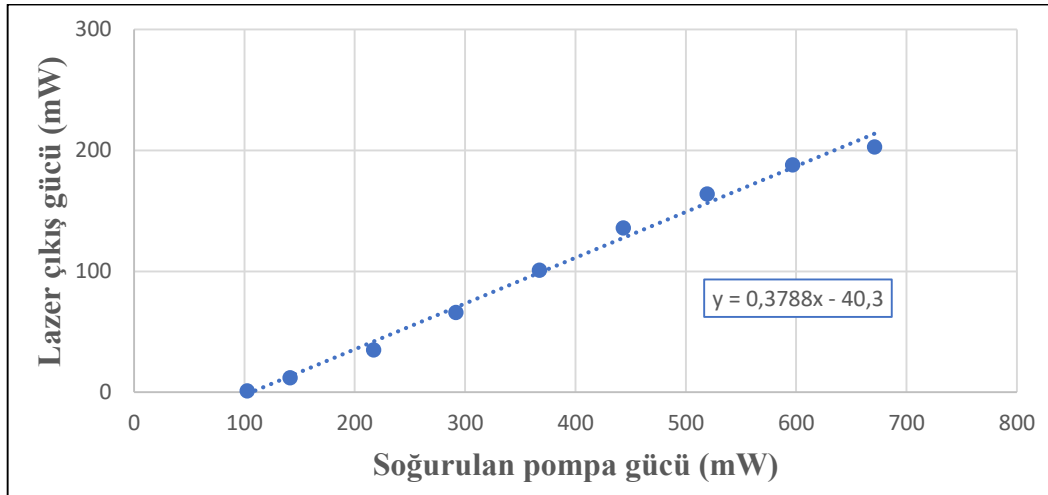
Katkı Oranı (%)	Uzunluk (mm)	Sıcaklık (°C)	Verim (%)	Maksimum Çıkış Gücü (mW)
2	9	10	35	172
		15	35	162
		20	34	160
		25	33	156
	7	10	40	168
		15	40	160
		20	40	153
		25	40	147
	5	10	35	149
		15	34	144
		20	34	140
		25	31	120
	3	10	33	133
		15	32	130
		20	31	125
		25	32	124
4	7	10	44	221
		15	44	213
		20	44	207
		25	43	202
	5	10	37	210
		15	36	208
		20	36	205
		25	36	198
	3	10	44	200
		15	44	192
		20	45	185
		25	44	175
6	7	10	41	268
		15	41	262
		20	39	253
		25	40	242
	5	10	45	259
		15	42	250
		20	42	242
		25	40	213
	3	10	39	228
		15	39	223
		20	37	218
		25	36	208

3.1.1. %1,5 Katkılı 9-mm Tm:YAG Kristali Verim Eğrileri

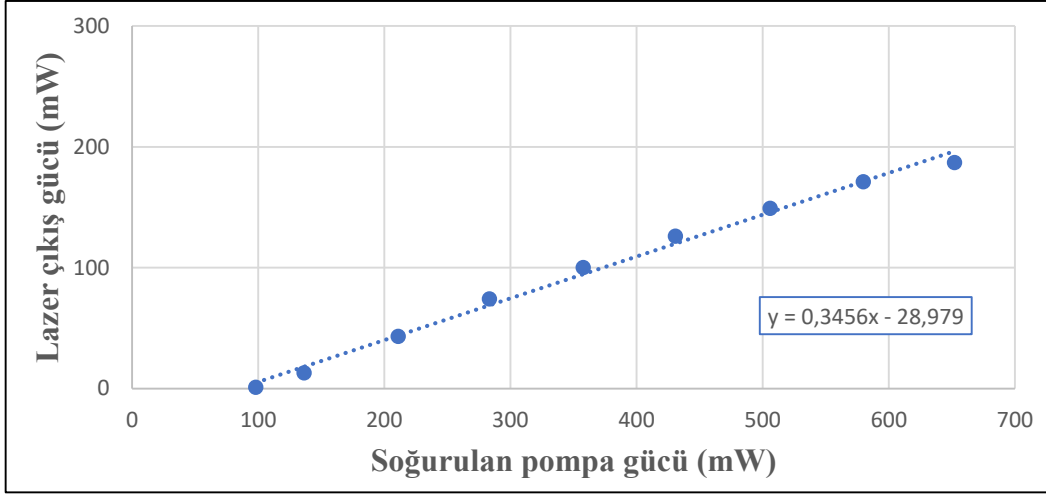
%1.5'lük 9-mm Tm:YAG kristali ile yapılan çalışmalarda 15 °C'de 192 mW çıkış gücü ve yaklaşık %36 verimi ile Şekil 24'deki gibi gözlemlenmiştir. Ardından kristal sıcaklığı değiştirilerek 10 °C, 20 °C ve 25 °C'lerde verim eğrisi ölçümleri alınarak Şekil 25, Şekil 26 ve Şekil 27'de gösterilmiştir.



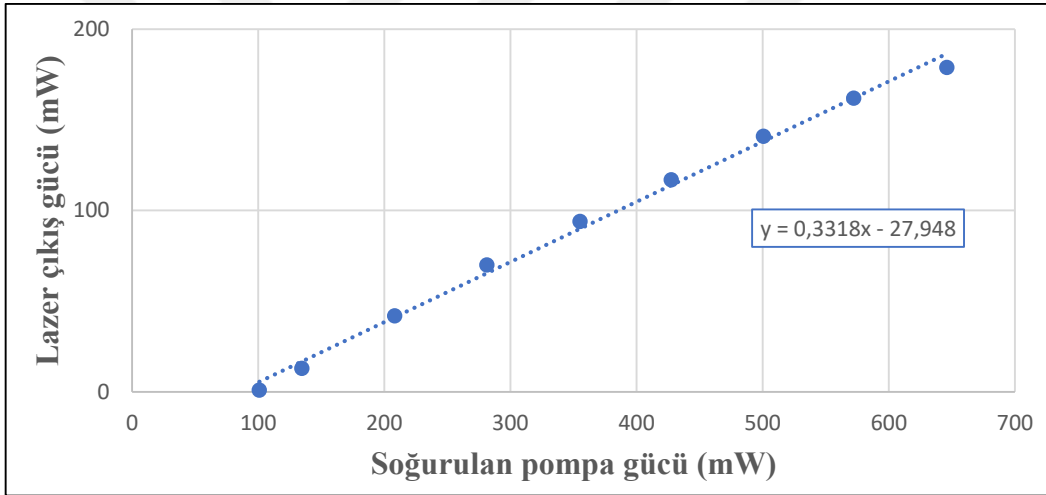
Şekil 24. %1,5 Katkılı 9-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminin 15 °C'deki verim eğrisi



Şekil 25. %1,5 Katkılı 9-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminin 10 °C'deki verim eğrisi



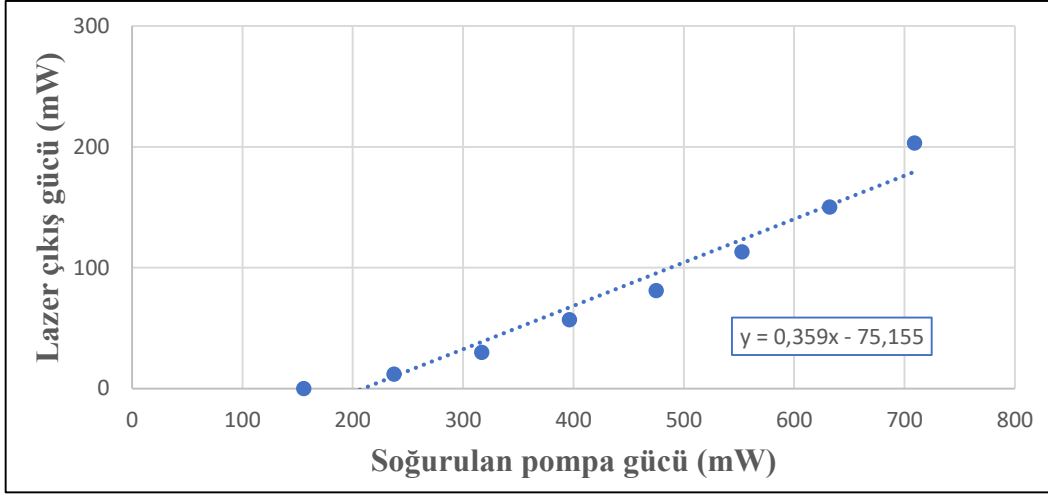
Şekil 26. %1,5 Katkılı 9-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminin 20 °C'deki verim eğrisi



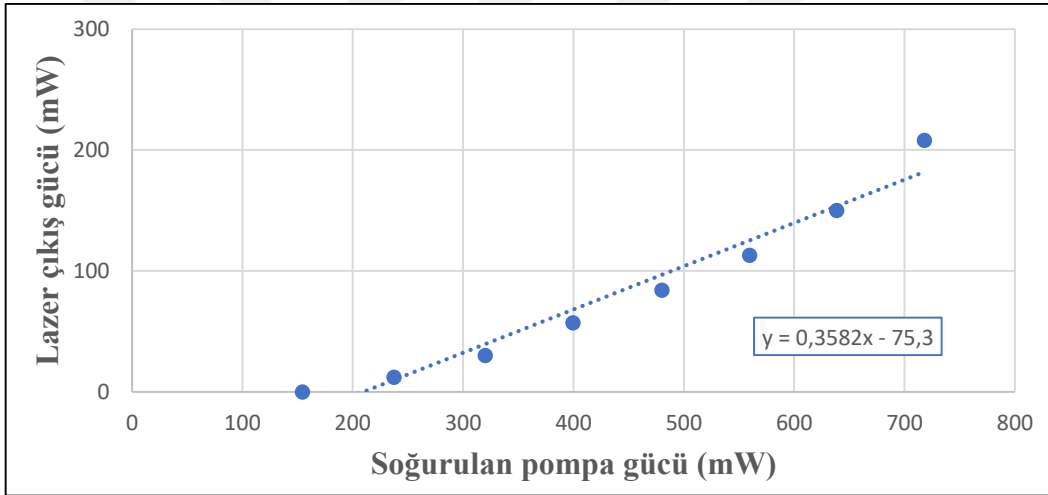
Şekil 27. %1,5 Katkılı 9-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminin 25 °C'deki verim eğrisi

3.1.2. %1,5 Katkılı 7-mm Tm:YAG Kristali Verim Eğrileri

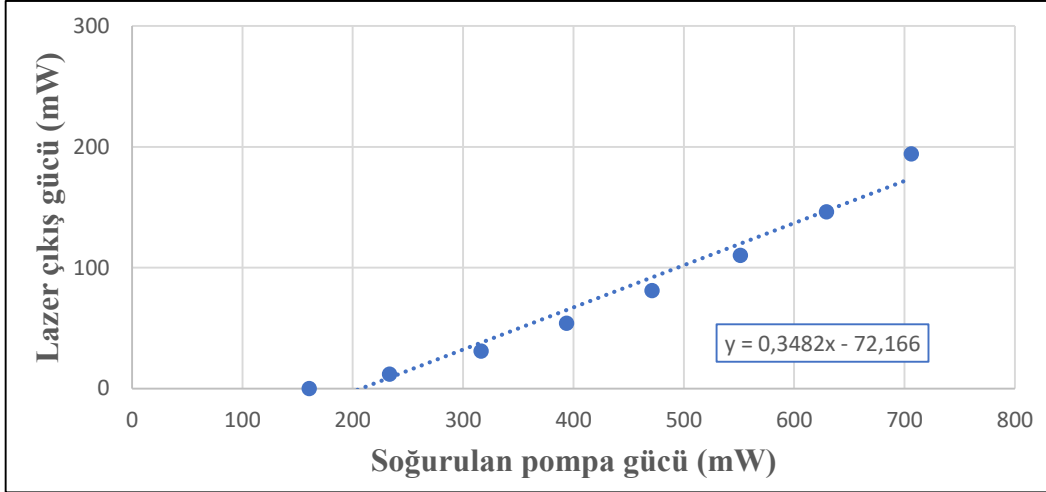
%1,5'lük 7-mm Tm:YAG kristali ile yapılan çalışmalarda 15 °C'de 203 mW çıkış gücü %36 verimi ile Şekil 28'deki gibi gözlemlenmiştir. Ardından kristal sıcaklığı değiştirilerek 10 °C, 20 °C ve 25 °C'lerde verim eğrisi ölçümleri alınarak Şekil 29, Şekil 30 ve Şekil 31'de gösterilmiştir.



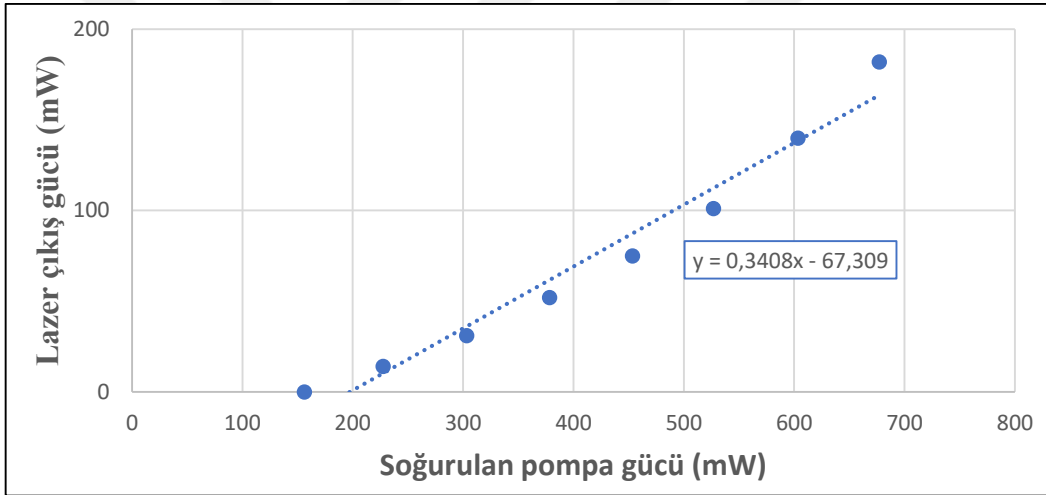
Şekil 28. %1,5 Katkılı 7-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminin 15 °C’deki verim eğrisi



Şekil 29. %1,5 Katkılı 7-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminin 10 °C’deki verim eğrisi



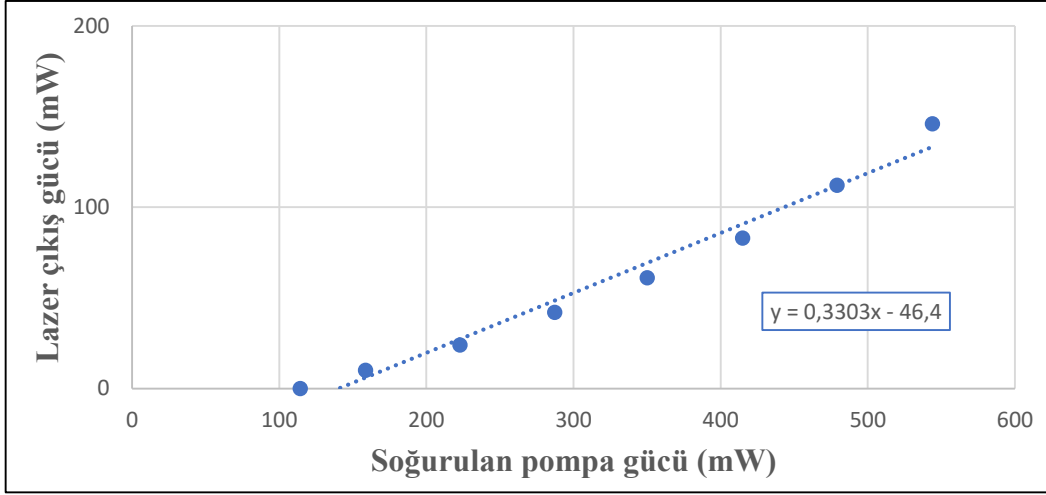
Şekil 30. %1,5 Katkılı 7-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminin 20 °C’deki verim eğrisi



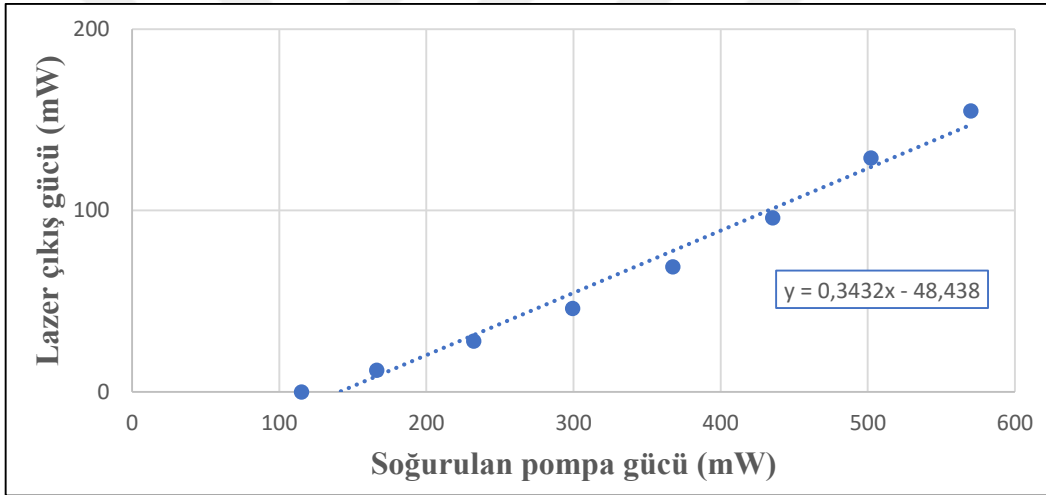
Şekil 31. %1,5 Katkılı 7-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminin 25 °C’deki verim eğrisi

3.1.3. %1,5 Katkılı 5-mm Tm:YAG Kristali Verim Eğrileri

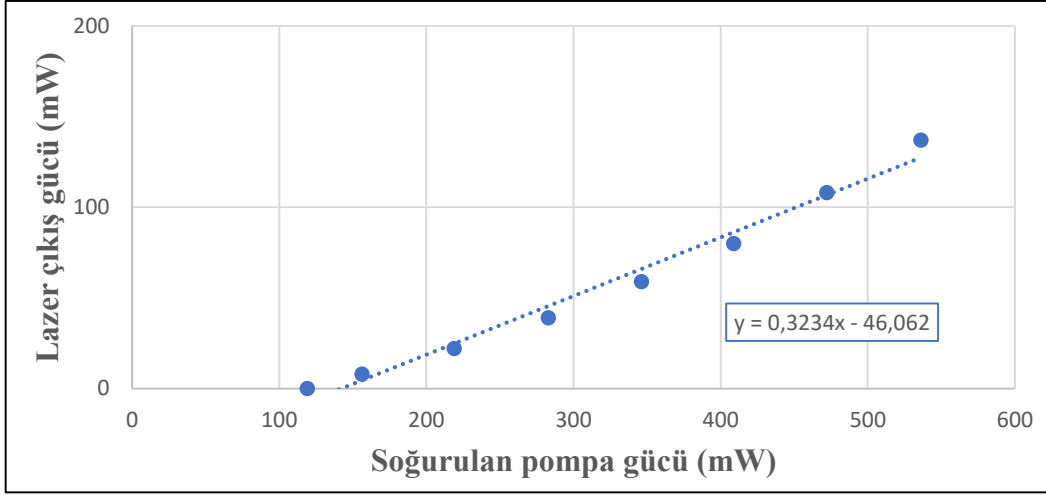
%1,5’lük 5-mm Tm:YAG kristali ile yapılan çalışmalarda 15 °C’de 146 mW çıkış gücü %34 verimi ile Şekil 32’deki gibi gözlemlenmiştir. Ardından kristal sıcaklığı değiştirilerek 10 °C, 20 °C ve 25 °C’lerde verim eğrisi ölçümleri alınarak Şekil 33, Şekil 34 ve Şekil 35’de gösterilmiştir.



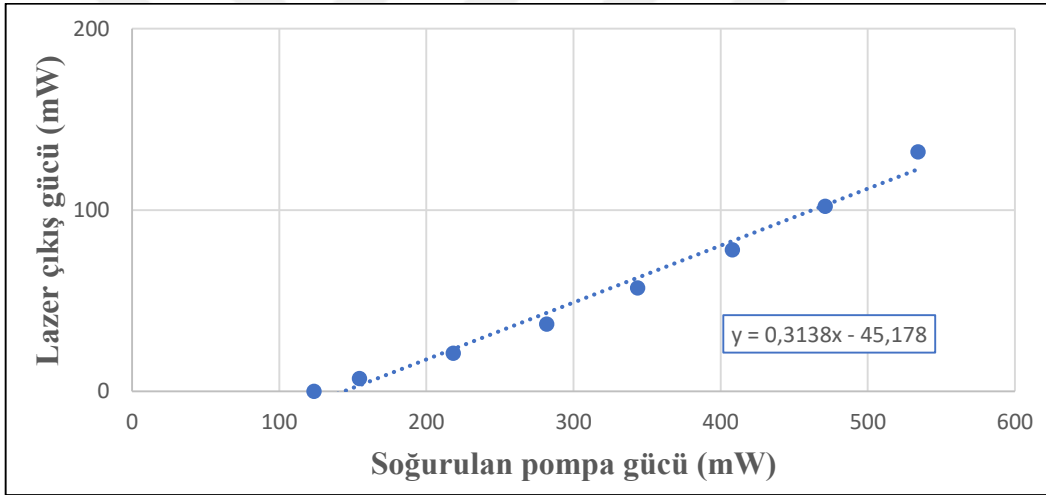
Şekil 32. %1,5 Katkılı 5-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminin 15 °C’deki verim eğrisi



Şekil 33. %1,5 Katkılı 5-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminin 10 °C’deki verim eğrisi



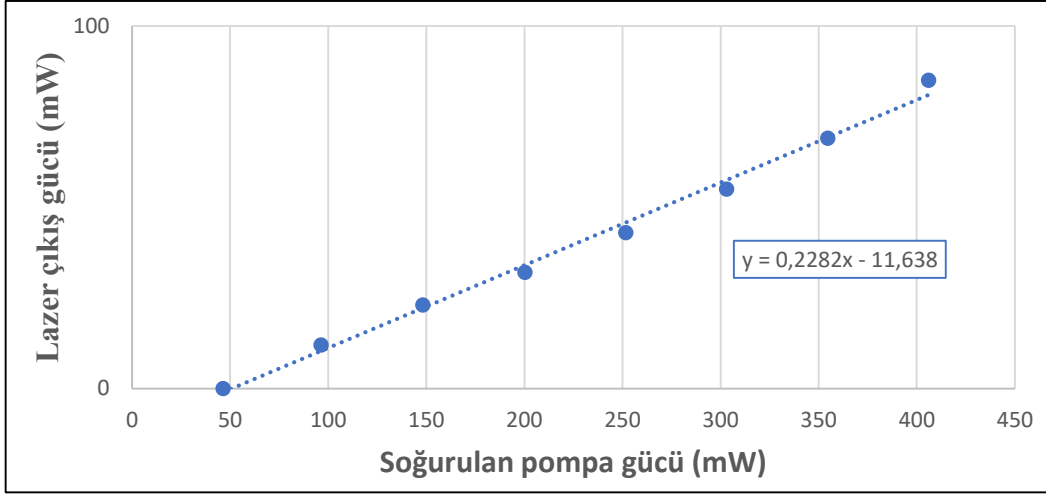
Şekil 34. %1,5 Katkılı 5-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminin 20 °C’deki verim eğrisi



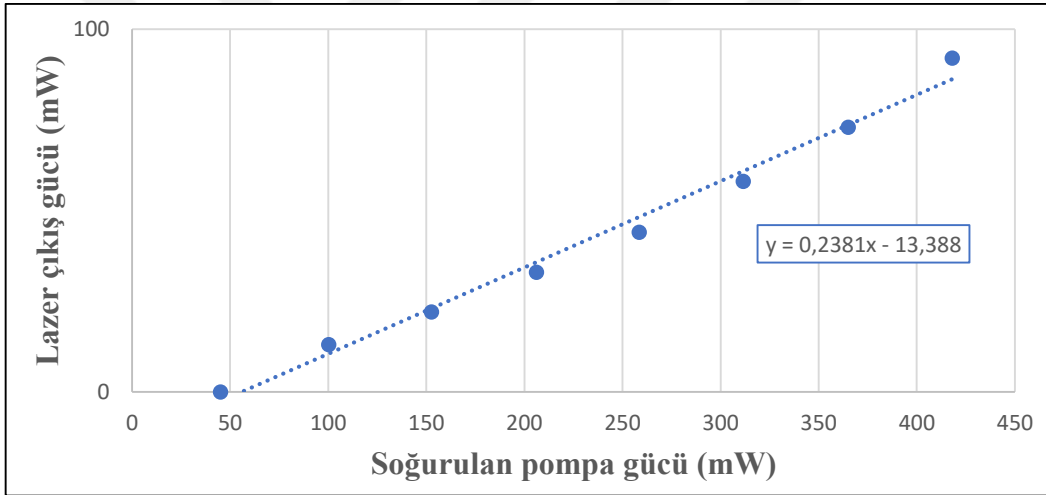
Şekil 35. %1,5 Katkılı 5-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminin 25 °C’deki verim eğrisi

3.1.4. %1,5 Katkılı 3-mm Tm:YAG Kristali Verim Eğrileri

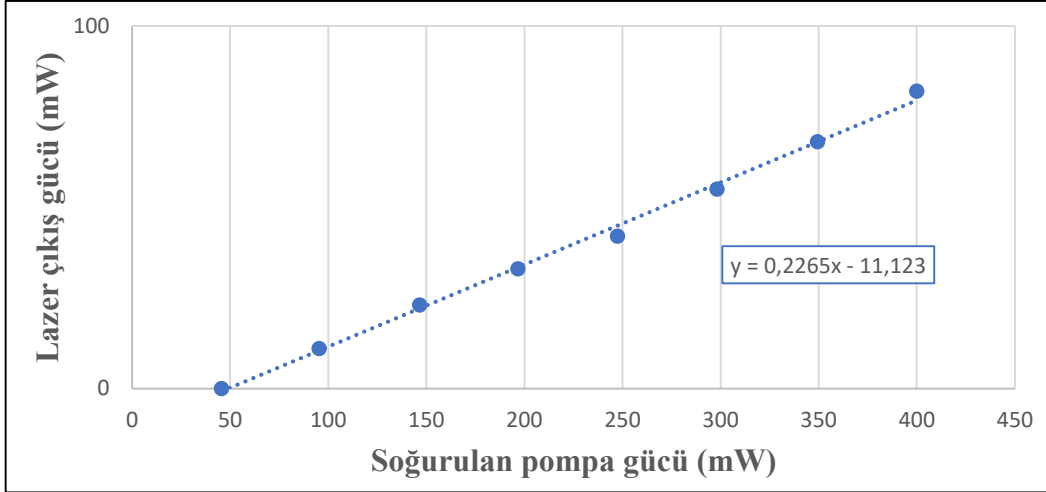
%1,5’lük 3-mm Tm:YAG kristali ile yapılan çalışmalarda 15 °C’de 85 mW çıkış gücü %23 verimi ile Şekil 36’daki gibi gözlemlenmiştir. Ardından kristal sıcaklığı değiştirilerek 10 °C, 20 °C ve 25 °C’lerde verim eğrisi ölçümleri alınarak Şekil 37, Şekil 38 ve Şekil 39’da gösterilmiştir.



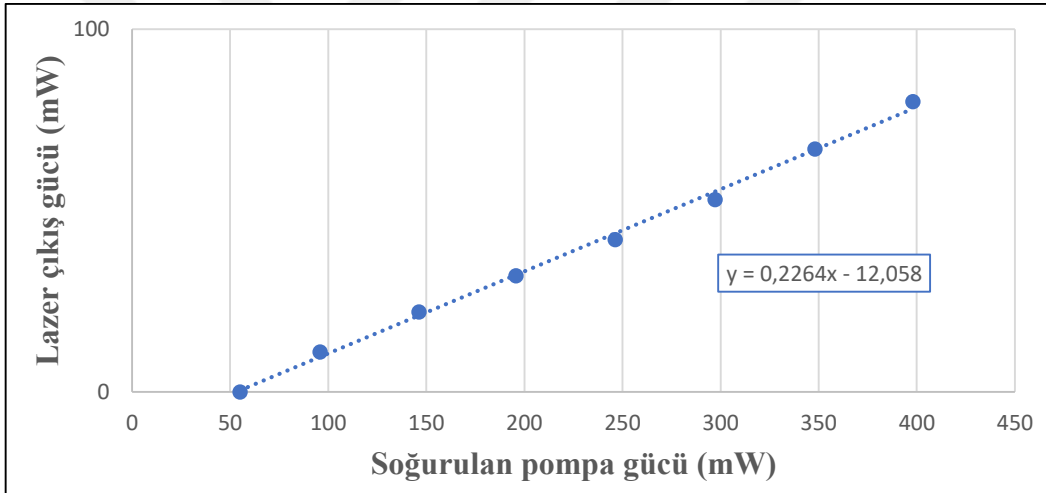
Şekil 36. %1,5 Katkılı 3-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminin 15 °C’deki verim eğrisi



Şekil 37. %1,5 Katkılı 3-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminin 10 °C’deki verim eğrisi



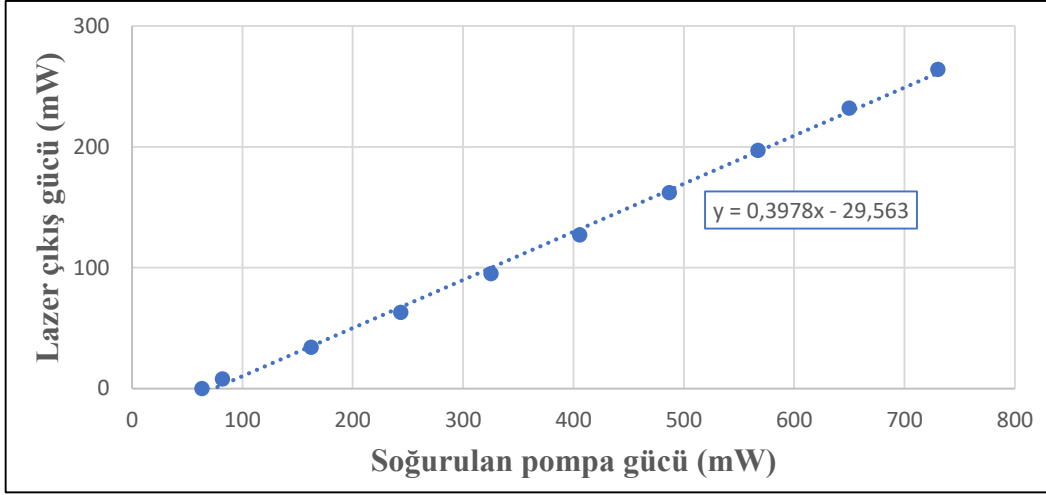
Şekil 38. %1,5 Katkılı 3-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminin 20 °C'deki verim eğrisi



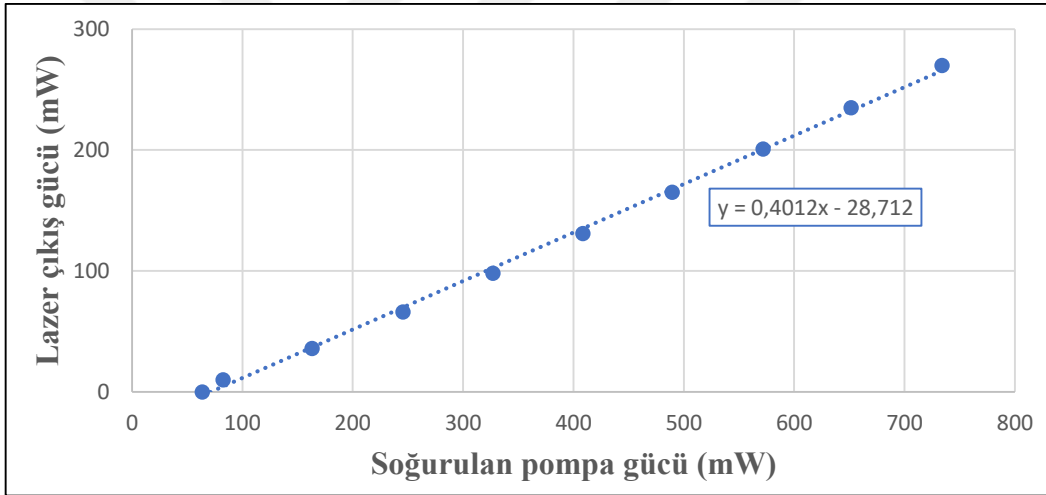
Şekil 39. %1,5 Katkılı 3-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminin 25 °C'deki verim eğrisi

3.1.5. %3 Katkılı 7-mm Tm:YAG Kristali Verim Eğrileri

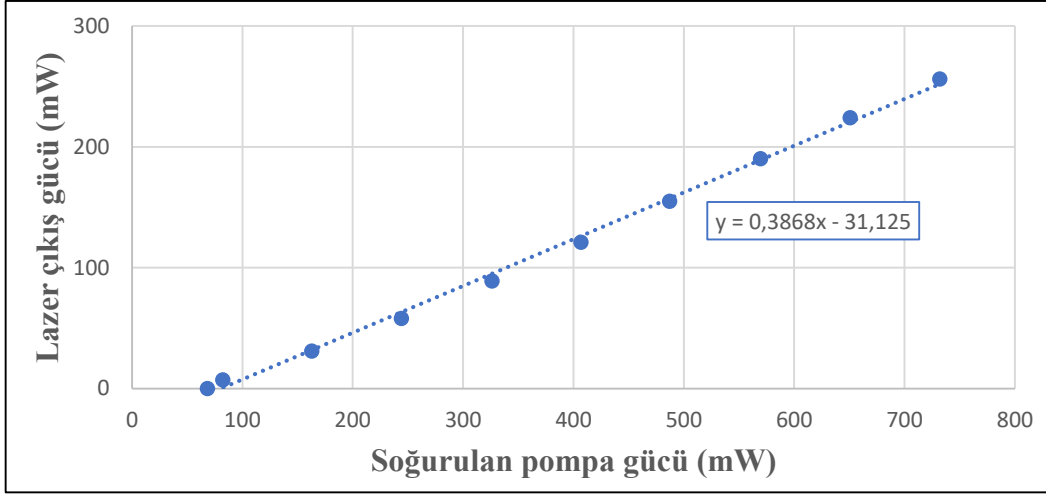
%3'lük 7-mm Tm:YAG kristali ile yapılan çalışmalarda 15 °C'de 264 mW çıkış gücü %40 verimi ile Şekil 40'daki gibi gözlemlenmiştir. Ardından kristal sıcaklığı değiştirilerek 10 °C, 20 °C ve 25 °C'lerde verim eğrisi ölçümleri alınarak Şekil 41, Şekil 42 ve Şekil 43'de gösterilmiştir.



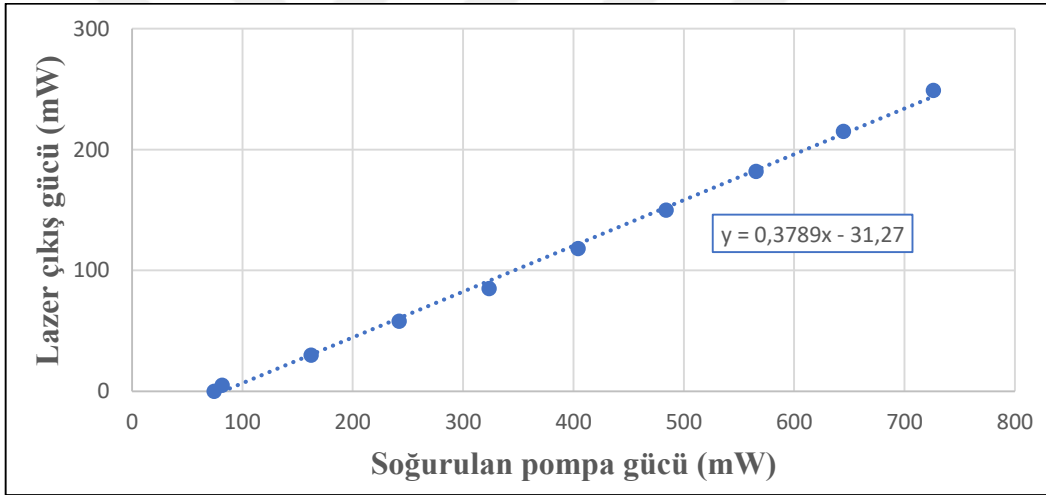
Şekil 40. %3 Katkılı 7-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminin 15 °C’deki verim eğrisi



Şekil 41. %3 Katkılı 7-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminin 10 °C’deki verim eğrisi



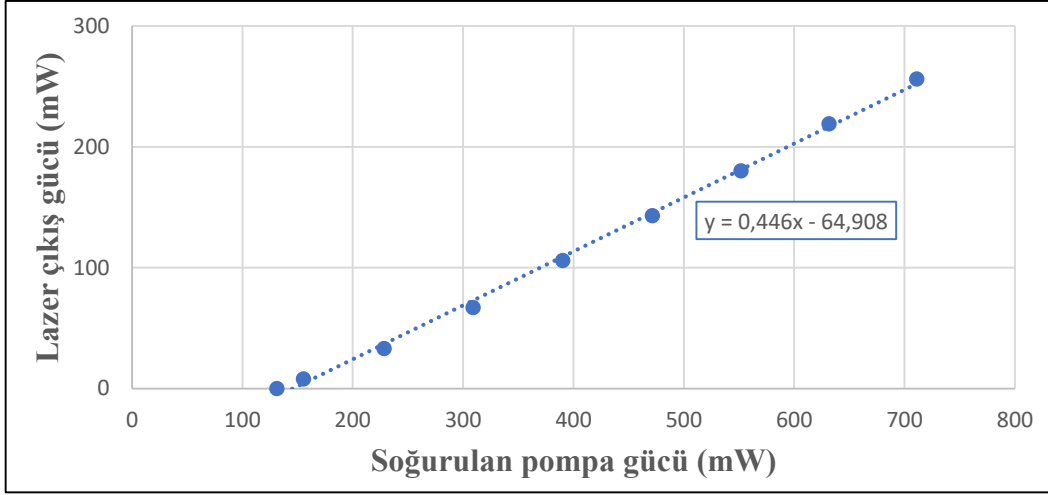
Şekil 42. %3 Katkılı 7-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminin 20 °C'deki verim eğrisi



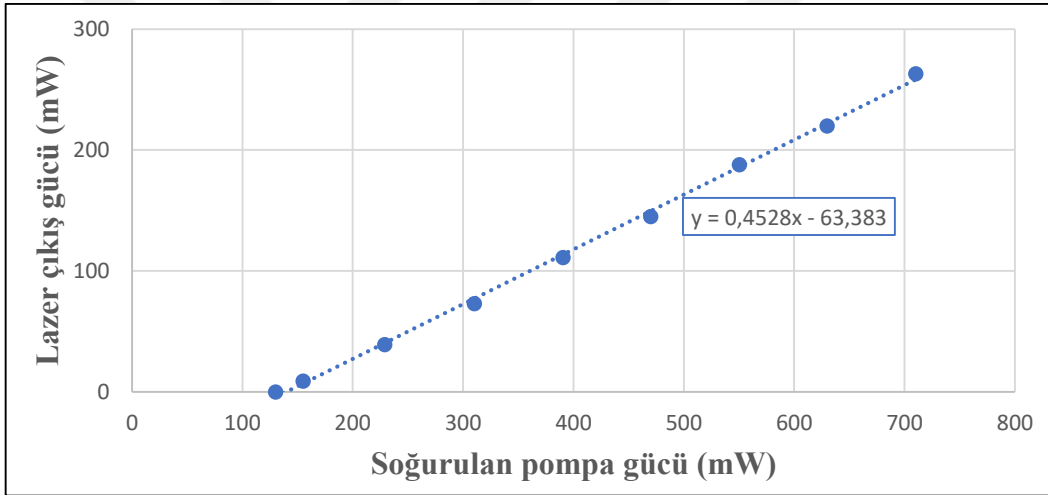
Şekil 43. %3 Katkılı 7-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminin 25 °C'deki verim eğrisi

3.1.6. %3 Katkılı 5-mm Tm:YAG Kristali Verim Eğrileri

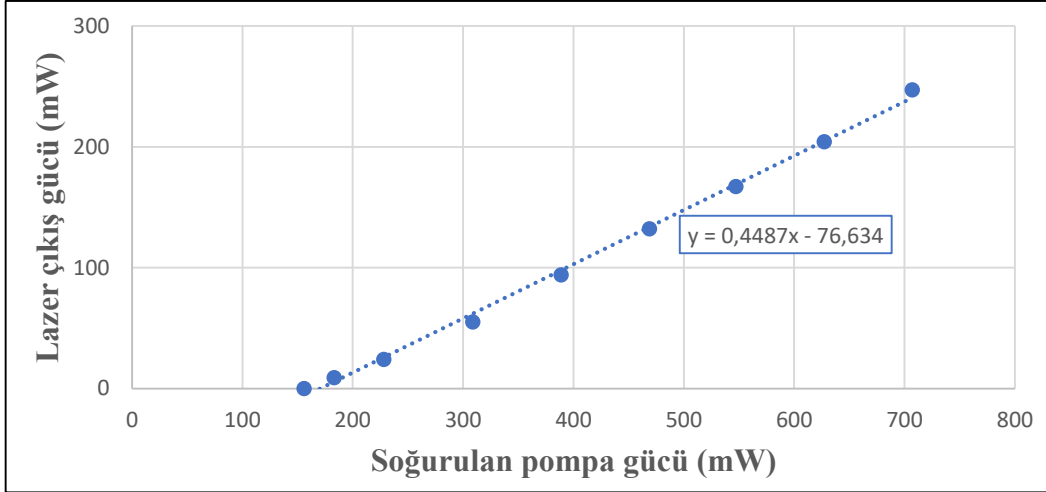
%3'lük 5-mm Tm:YAG kristali ile yapılan çalışmalarda 15 °C'de 256 mW çıkış gücü %45 verimi ile Şekil 44'deki gibi gözlemlenmiştir. Ardından kristal sıcaklığı değiştirilerek 10 °C, 20 °C ve 25 °C'lerde verim eğrisi ölçümleri alınarak Şekil 45, Şekil 46 ve Şekil 47'de gösterilmiştir.



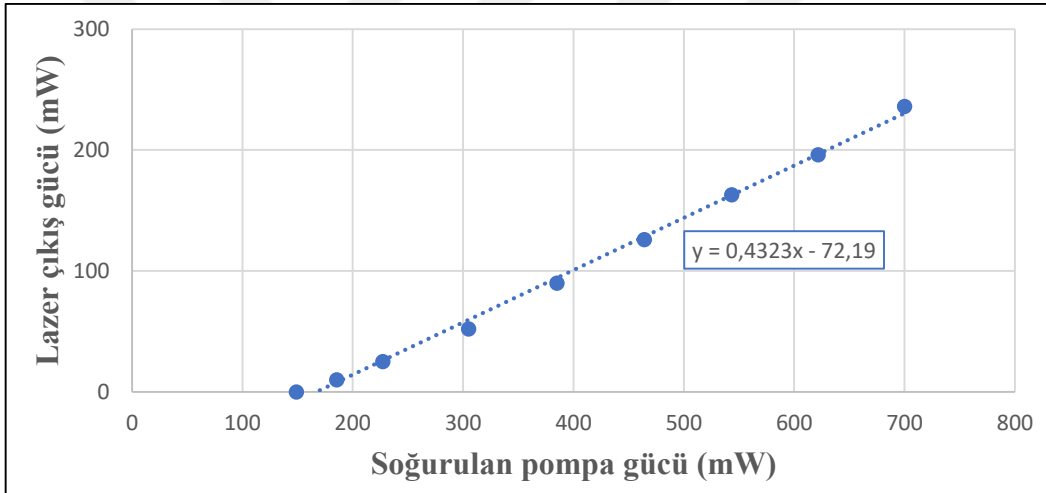
Şekil 44. %3 Katkılı 5-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminin 15 °C’deki verim eğrisi



Şekil 45. %3 Katkılı 5-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminin 10 °C’deki verim eğrisi



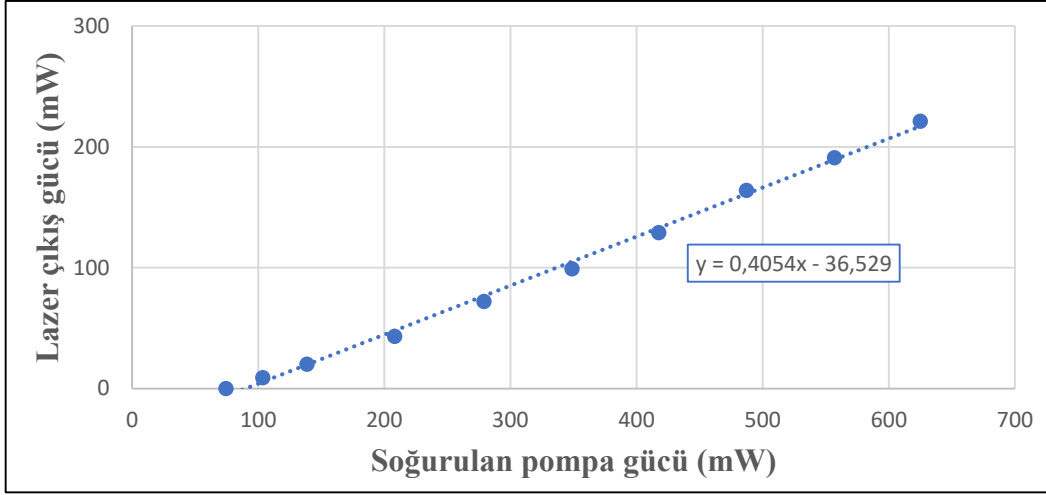
Şekil 46. %3 Katkılı 5-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminin 20 °C’deki verim eğrisi



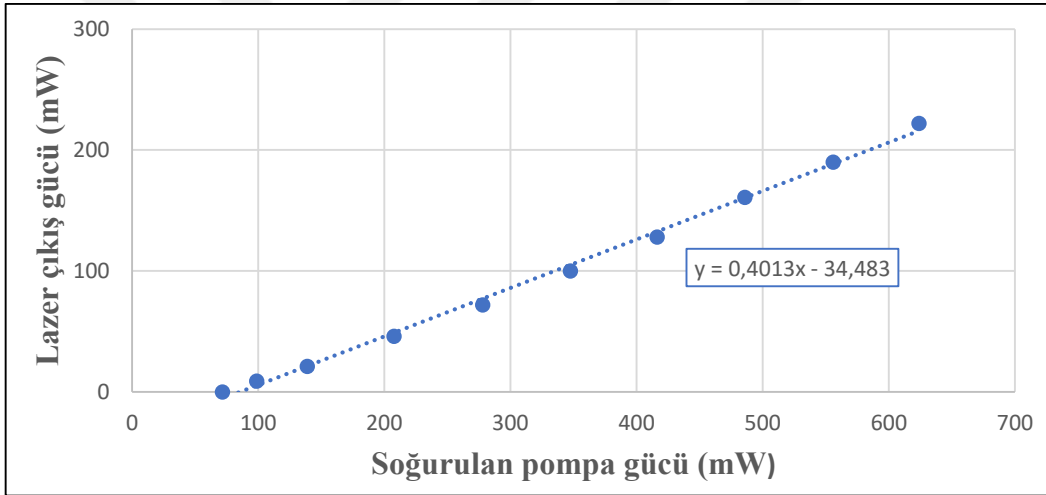
Şekil 47. %3 Katkılı 5-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminin 25 °C’deki verim eğrisi

3.1.7. %3 Katkılı 3-mm Tm:YAG Kristali Verim Eğrileri

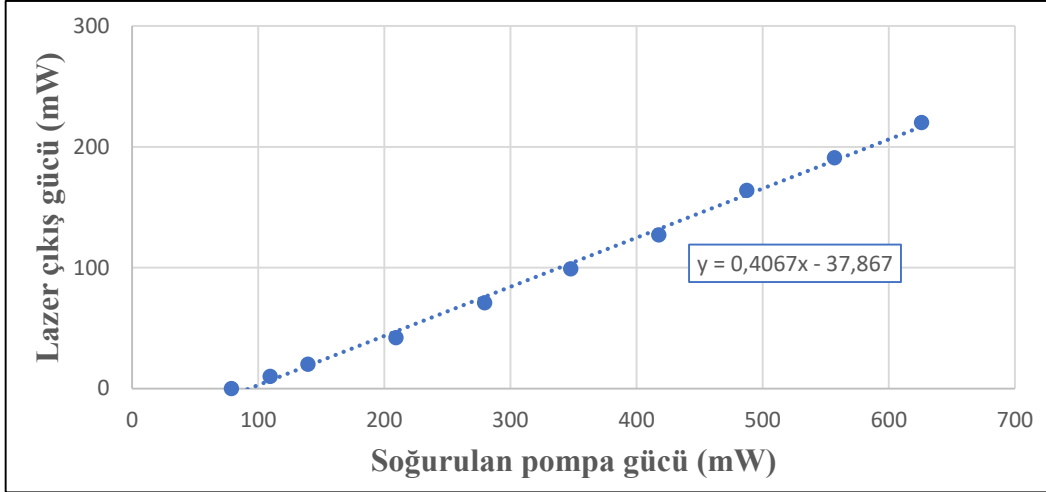
%3’lük 3-mm Tm:YAG kristali ile yapılan çalışmalarda 15 °C’de 221 mW çıkış gücü %41 verimi ile Şekil 48’deki gibi gözlemlenmiştir. Ardından kristal sıcaklığı değiştirilerek 10 °C, 20 °C ve 25 °C’lerde verim eğrisi ölçümleri alınarak Şekil 49, Şekil 50 ve Şekil 51’de gösterilmiştir.



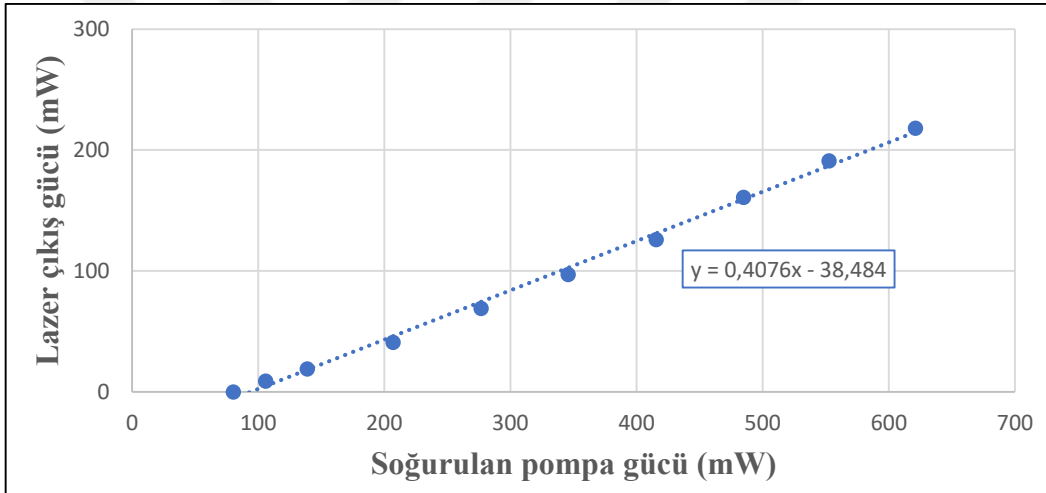
Şekil 48. %3 Katkılı 3-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminin 15 °C'deki verim eğrisi



Şekil 49. %3 Katkılı 3-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminin 10 °C'deki verim eğrisi



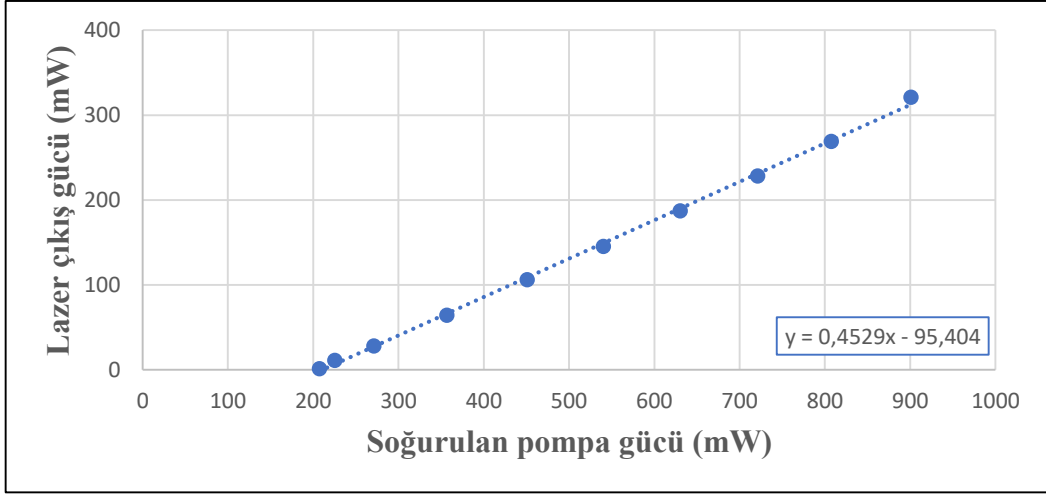
Şekil 50. %3 Katkılı 3-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminin 20 °C’deki verim eğrisi



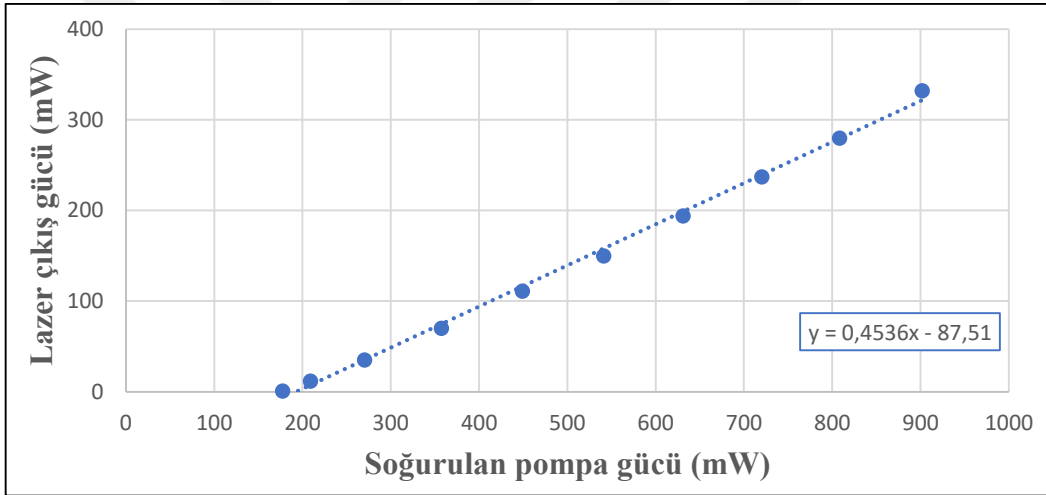
Şekil 51. %3 Katkılı 3-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminin 25 °C’deki verim eğrisi

3.1.8. %6 Katkılı 7-mm Tm:YAG Kristali Verim Eğrileri

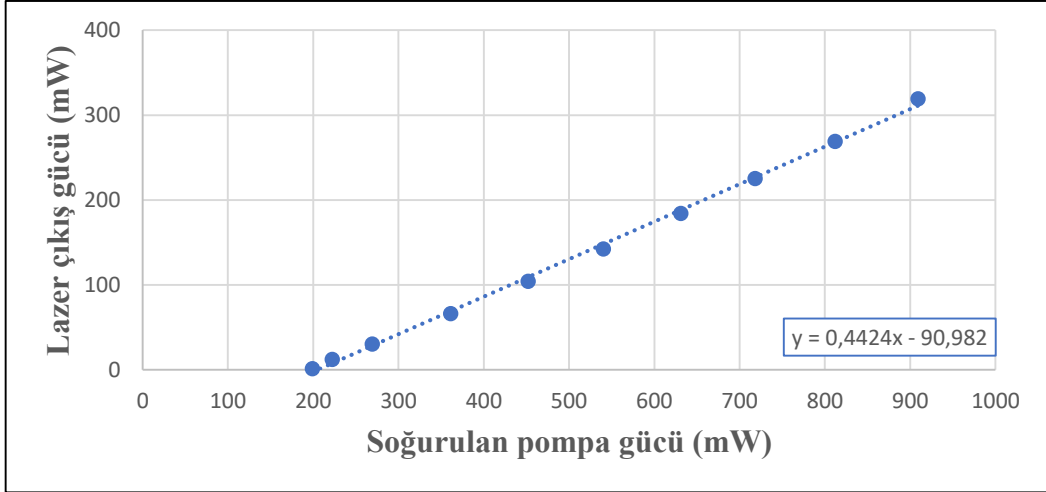
%6’lık 7-mm Tm:YAG kristali ile yapılan çalışmalarda 15 °C’de 321 mW çıkış gücü %45 verimi ile Şekil 52’deki gibi gözlemlenmiştir. Ardından kristal sıcaklığı değiştirilerek 10 °C, 20 °C ve 25 °C’lerde verim eğrisi ölçümleri alınarak Şekil 53, Şekil 54 ve Şekil 55’de gösterilmiştir.



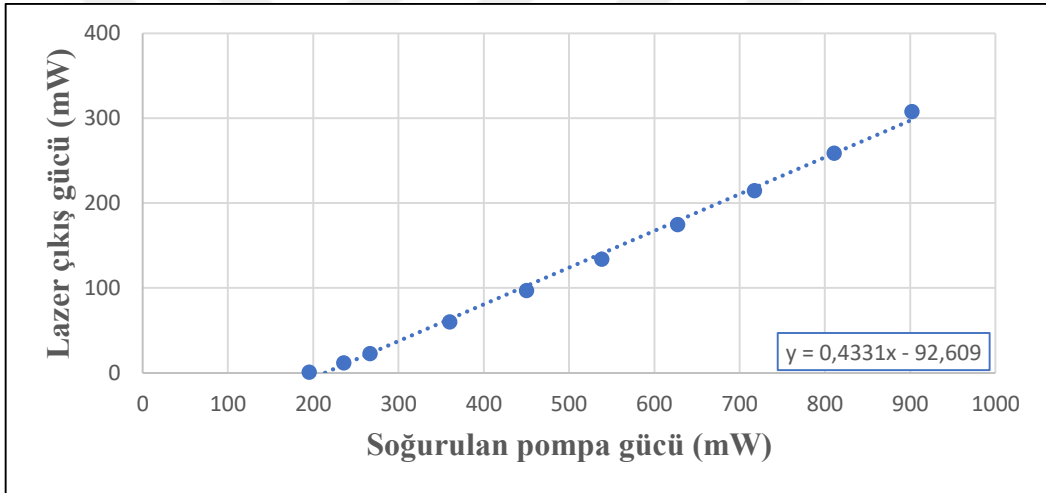
Şekil 52. %6 Katkılı 7-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminin 15 °C'deki verim eğrisi



Şekil 53. %6 Katkılı 7-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminin 10 °C'deki verim eğrisi



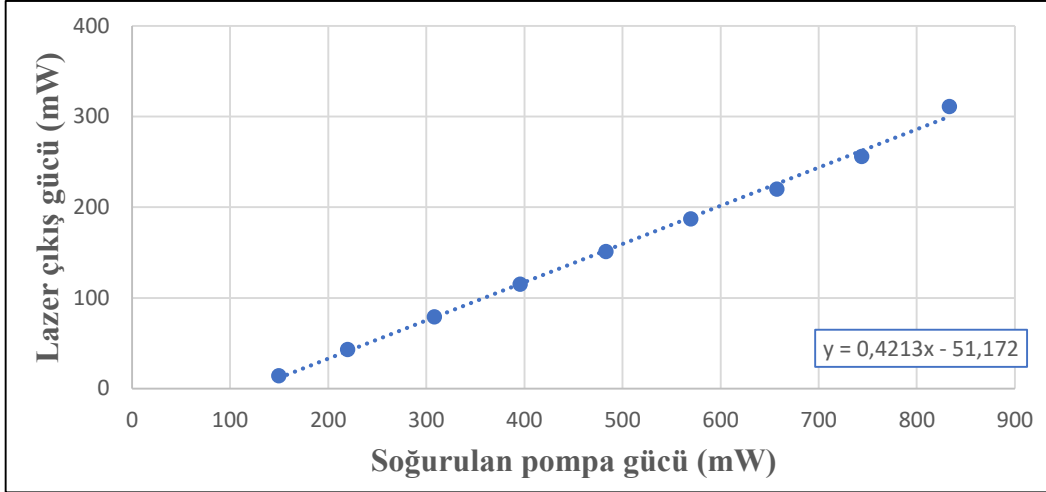
Şekil 54. %6 Katkılı 7-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminin 20 °C’deki verim eğrisi



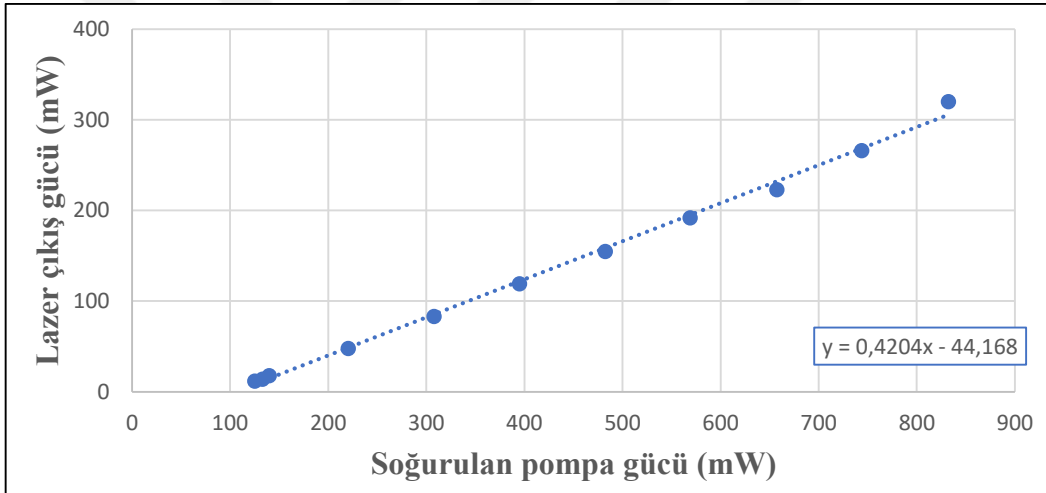
Şekil 55. %6 Katkılı 7-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminin 25 °C’deki verim eğrisi

3.1.9. %6 Katkılı 5-mm Tm:YAG Kristali Verim Eğrileri

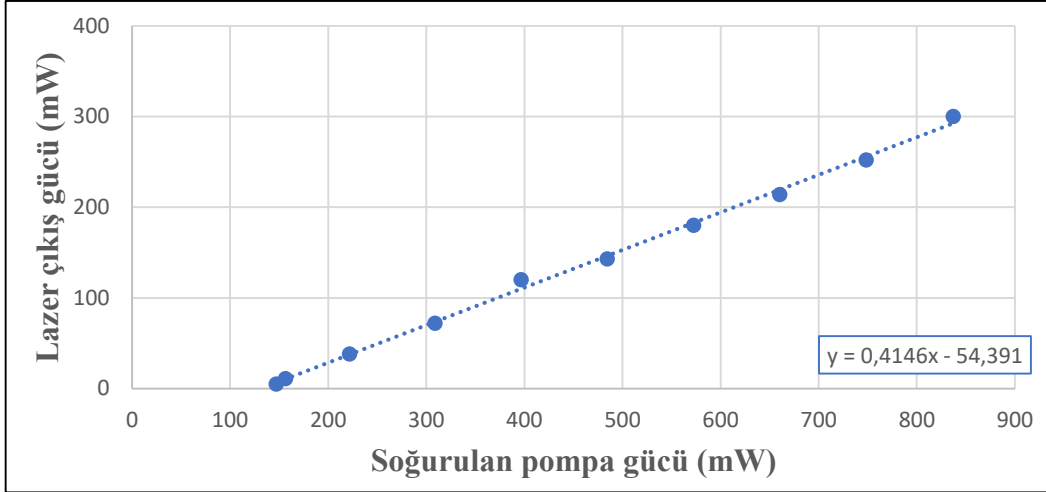
%6’lık 5-mm Tm:YAG kristali ile yapılan çalışmalarda 15 °C’de 311 mW çıkış gücü %42 verimi ile Şekil 56’daki gibi gözlemlenmiştir. Ardından kristal sıcaklığı değiştirilerek 10 °C, 20 °C ve 25 °C’lerde verim eğrisi ölçümleri alınarak Şekil 57, Şekil 58 ve Şekil 59’da gösterilmiştir.



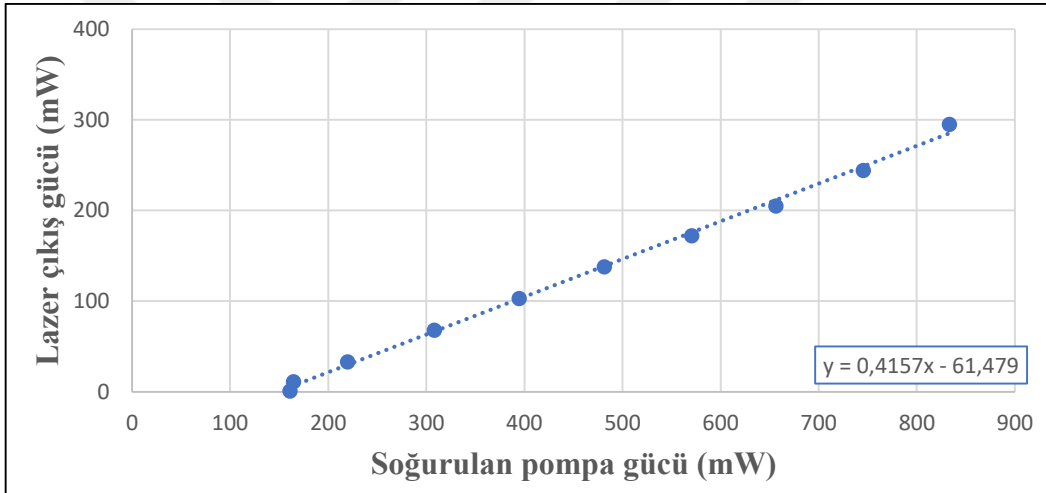
Şekil 56. %6 Katkılı 5-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminin 15 °C’deki verim eğrisi



Şekil 57. %6 Katkılı 5-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminin 10 °C’deki verim eğrisi



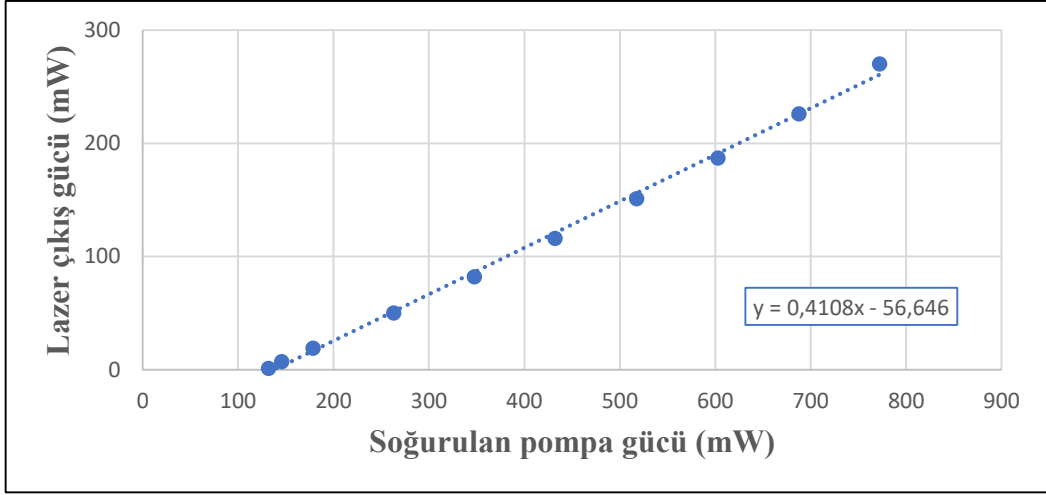
Şekil 58. %6 Katkılı 5-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminin 20 °C'deki verim eğrisi



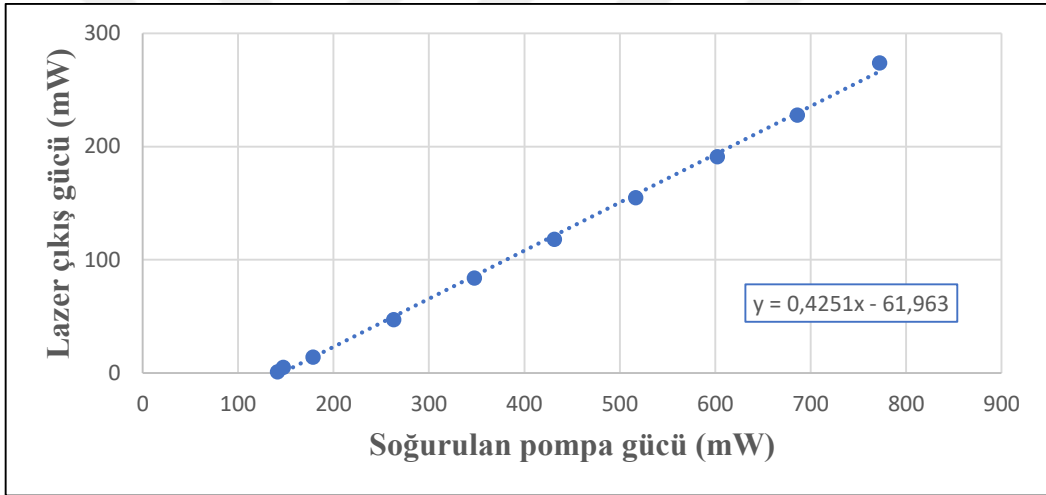
Şekil 59. %6 Katkılı 5-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminin 25 °C'deki verim eğrisi

3.1.10. %6 Katkılı 3-mm Tm:YAG Kristali Verim Eğrileri

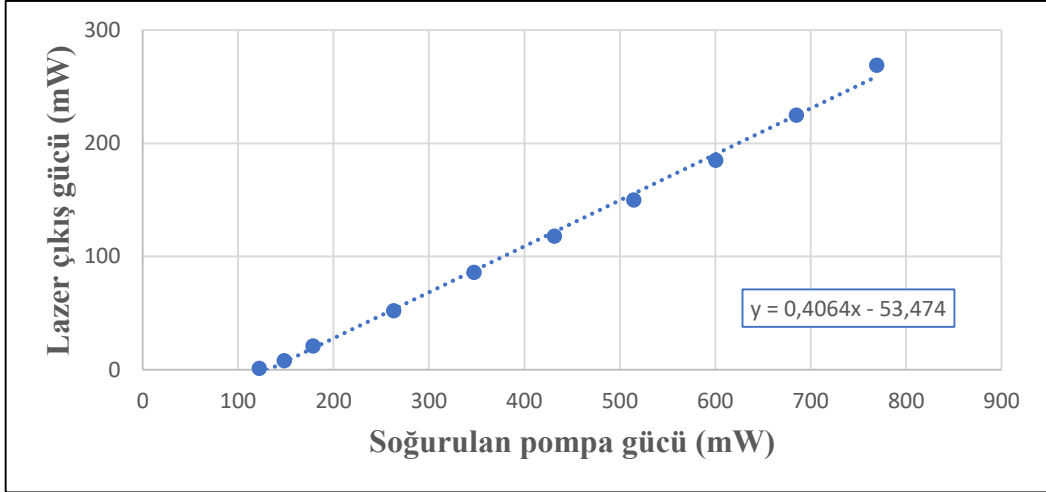
%6'lık 3-mm Tm:YAG kristali ile yapılan çalışmalarda 15 °C'de 270 mW çıkış gücü %41 verimi ile Şekil 60'daki gibi gözlemlenmiştir. Ardından kristal sıcaklığı değiştirilerek 10 °C, 20 °C ve 25 °C'lerde verim eğrisi ölçümleri alınarak Şekil 61, Şekil 62 ve Şekil 63'te gösterilmiştir.



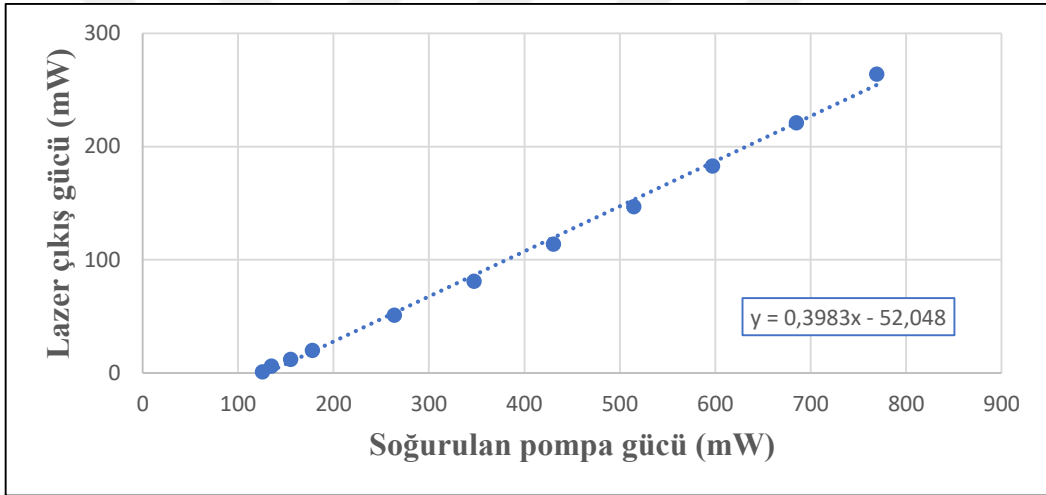
Şekil 60. %6 Katkılı 3-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminin 15 °C'deki verim eğrisi



Şekil 61. %6 Katkılı 3-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminin 10 °C'deki verim eğrisi



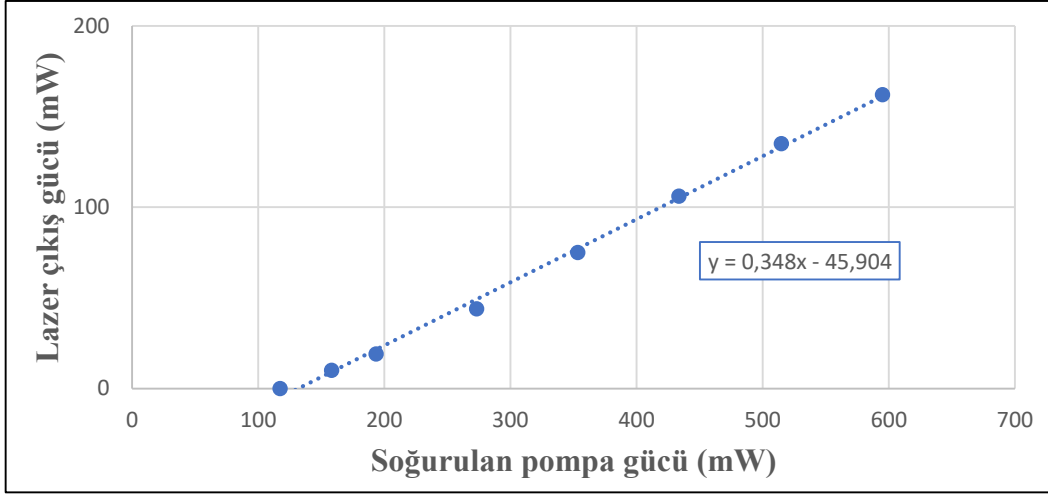
Şekil 62. %6 Katkılı 3-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminin 20 °C’deki verim eğrisi



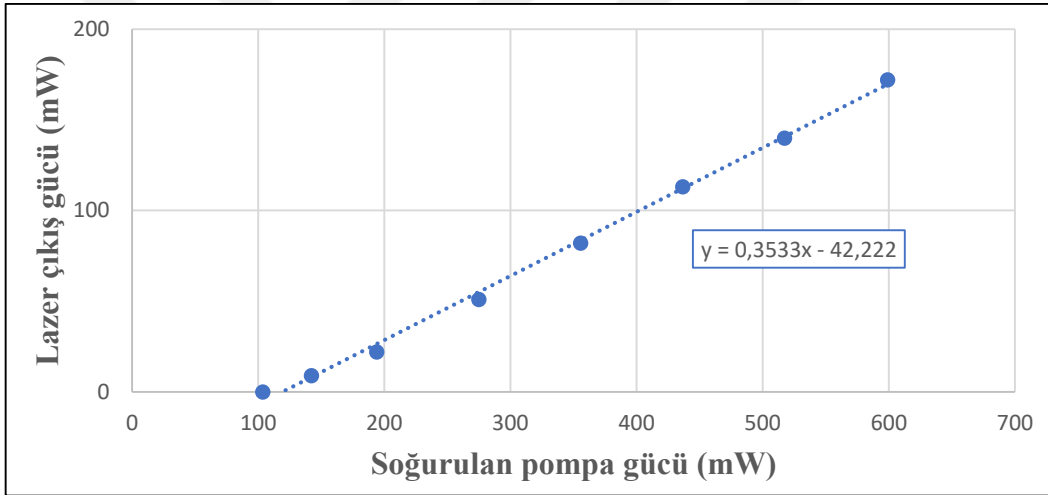
Şekil 63. %6 Katkılı 3-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminin 25 °C’deki verim eğrisi

3.1.11. %2 Katkılı 9-mm Tm:LuAG Kristali Verim Eğrileri

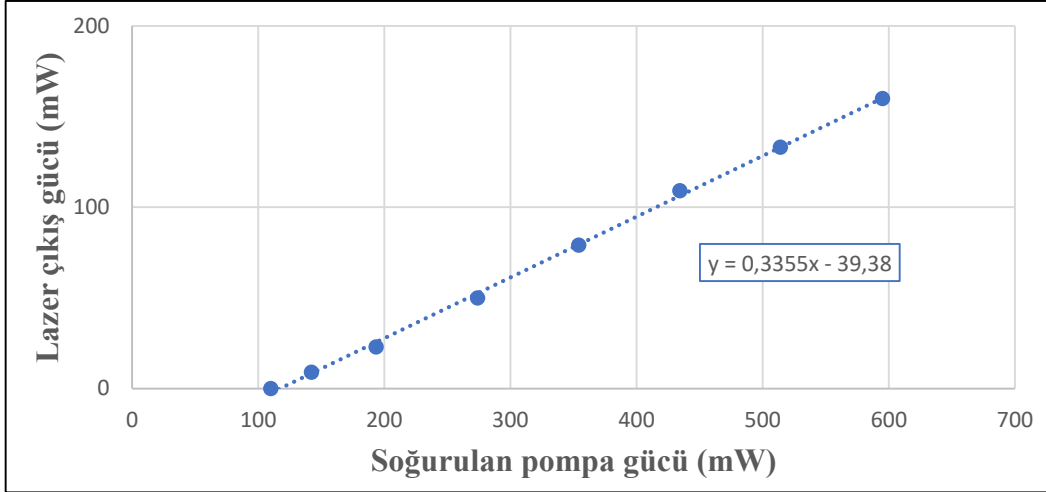
%2’lik 9-mm Tm:LuAG kristali ile yapılan çalışmalarda 15 °C’de 162 mW çıkış gücü %35 verimi ile Şekil 64’teki gibi gözlemlenmiştir. Ardından kristal sıcaklığı değiştirilerek 10 °C, 20 °C ve 25 °C’lerde verim eğrisi ölçümleri alınarak Şekil 65, Şekil 66 ve Şekil 67’de gösterilmiştir.



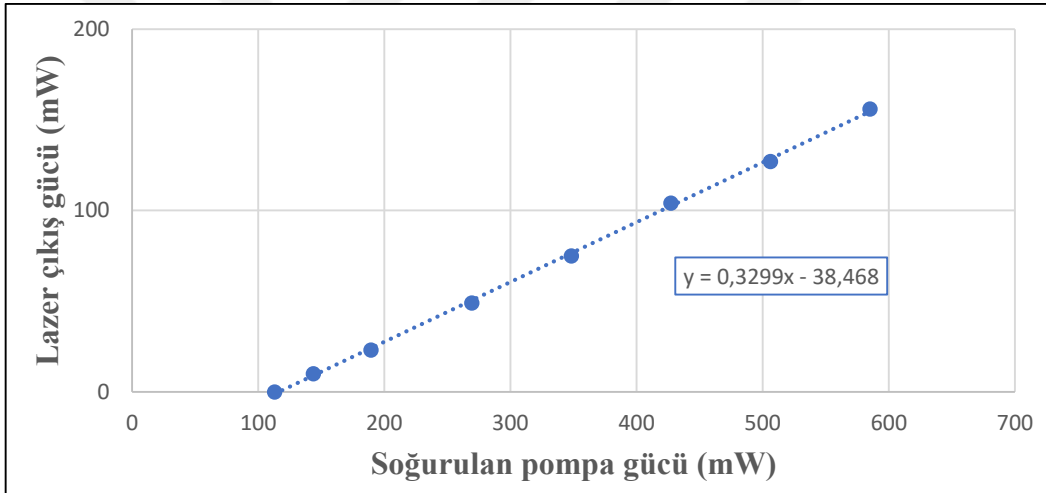
Şekil 64. %2 Katkılı 9-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminin 15 °C'deki verim eğrisi



Şekil 65. %2 Katkılı 9-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminin 10 °C'deki verim eğrisi



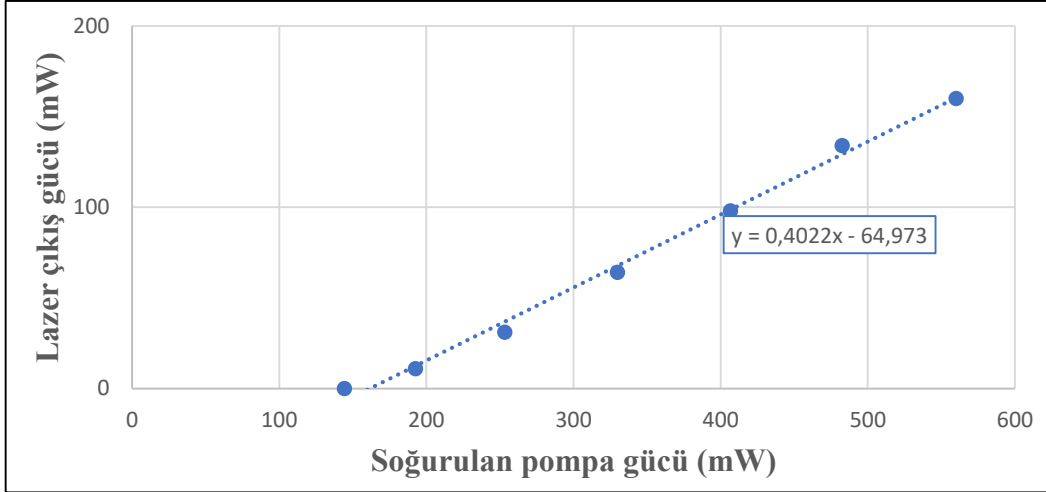
Şekil 66. %2 Katkılı 9-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminin 20 °C'deki verim eğrisi



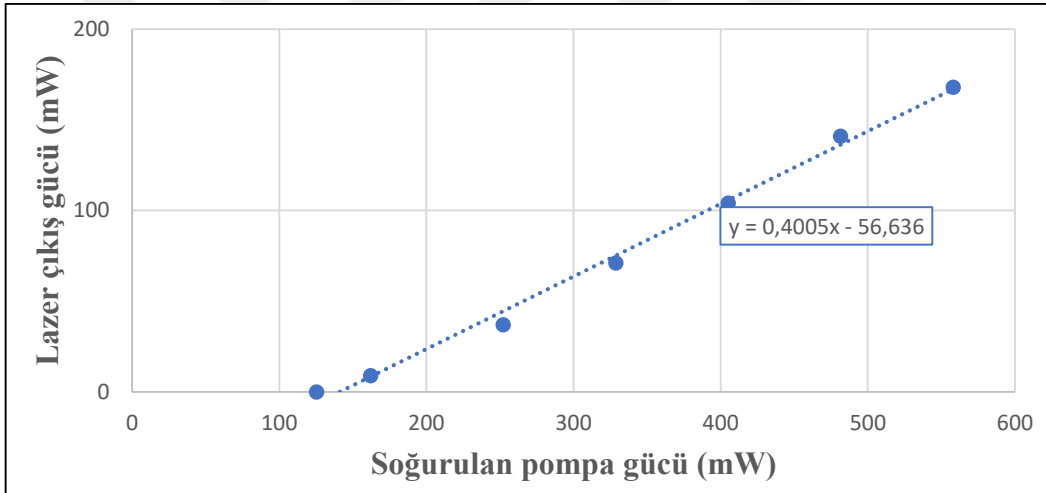
Şekil 67. %2 Katkılı 9-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminin 25 °C'deki verim eğrisi

3.1.12. %2 Katkılı 7-mm Tm:LuAG Kristali Verim Eğrileri

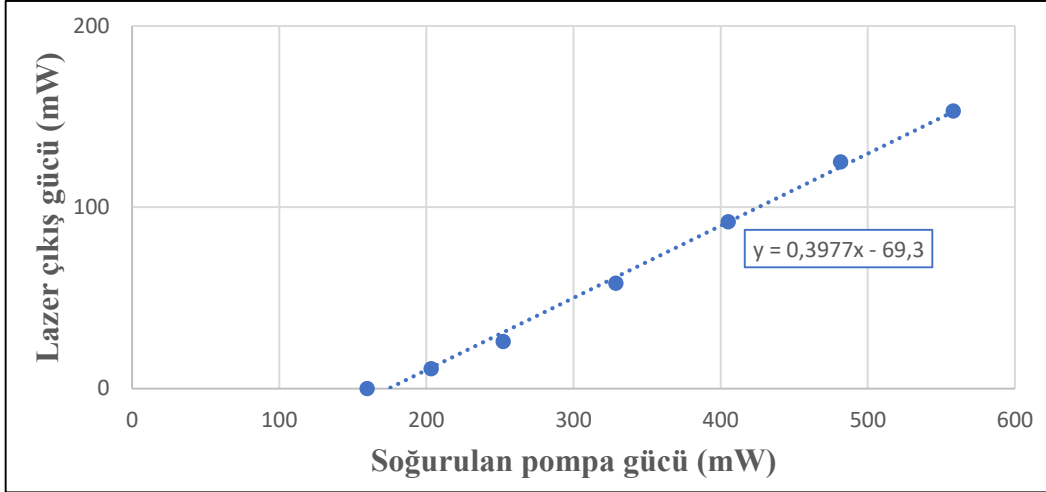
%2'lik Tm:LuAG kristali ile yapılan çalışmalarda 15 °C'de 160 mW çıkış gücü %40 verimi ile Şekil 68'deki gibi gözlemlenmiştir. Ardından kristal sıcaklığı değiştirilerek 10 °C, 20 °C ve 25 °C'lerde verim eğrisi ölçümleri alınarak Şekil 69, Şekil 70 ve Şekil 71'de gösterilmiştir.



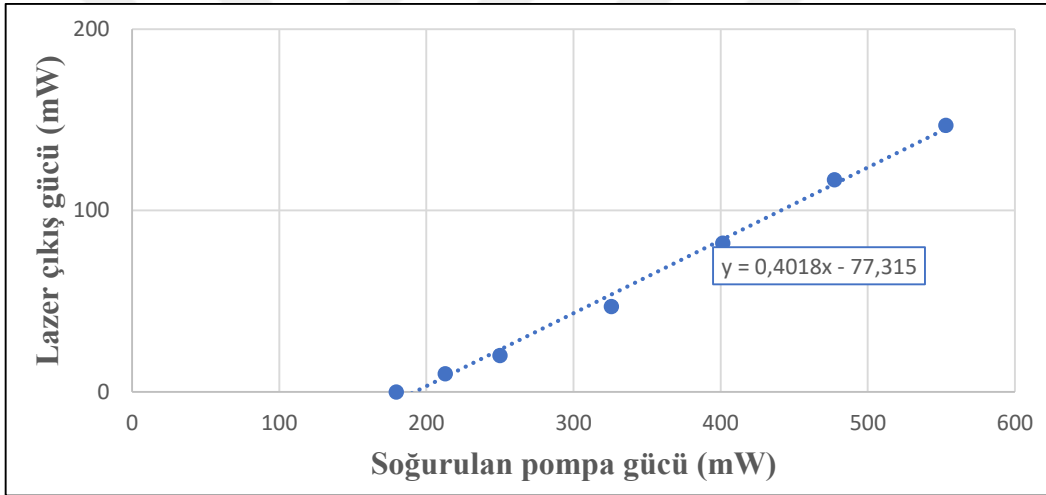
Şekil 68. %2 Katkılı 7-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminin 15 °C'deki verim eğrisi



Şekil 69. %2 Katkılı 7-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminin 10 °C'deki verim eğrisi



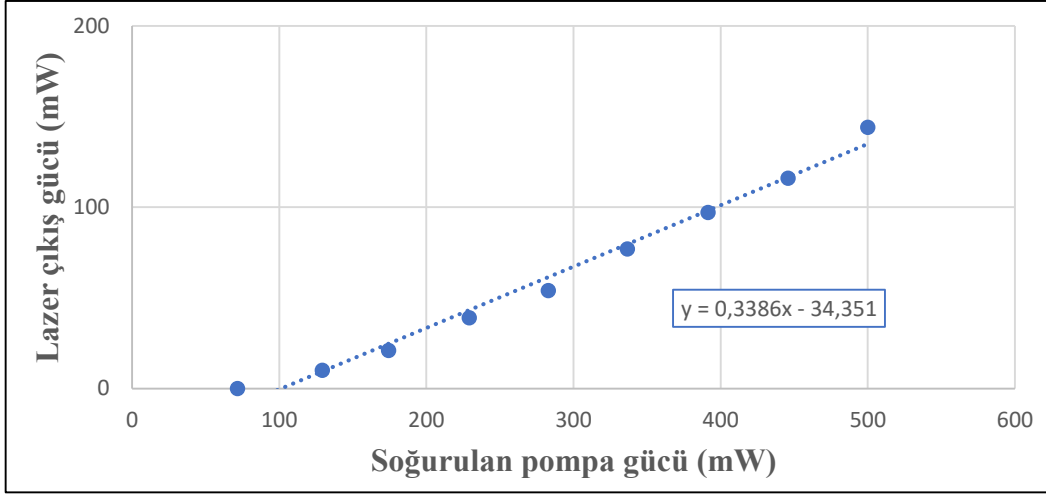
Şekil 70. %2 Katkılı 7-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminin 20 °C'deki verim eğrisi



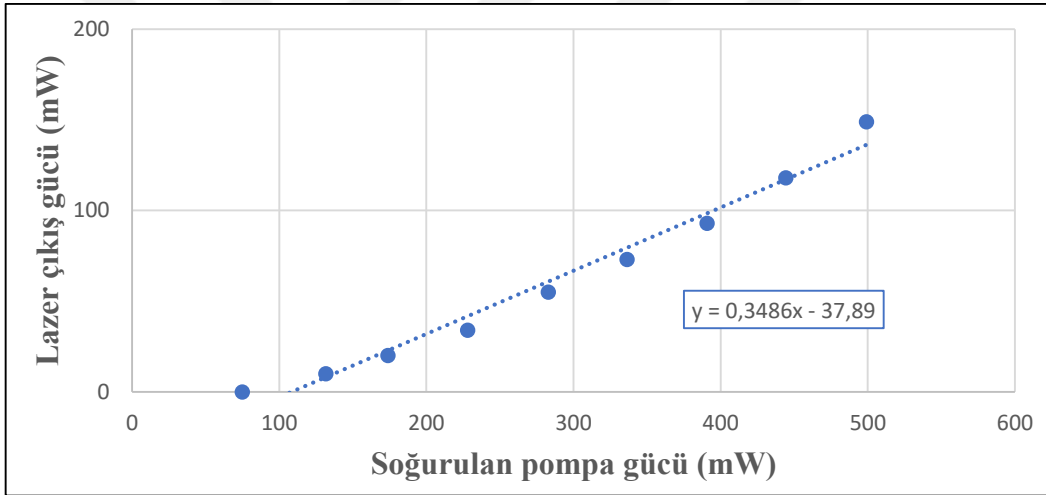
Şekil 71. %2 Katkılı 7-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminin 25 °C'deki verim eğrisi

3.1.13. %2 Katkılı 5-mm Tm:LuAG Kristali Verim Eğrileri

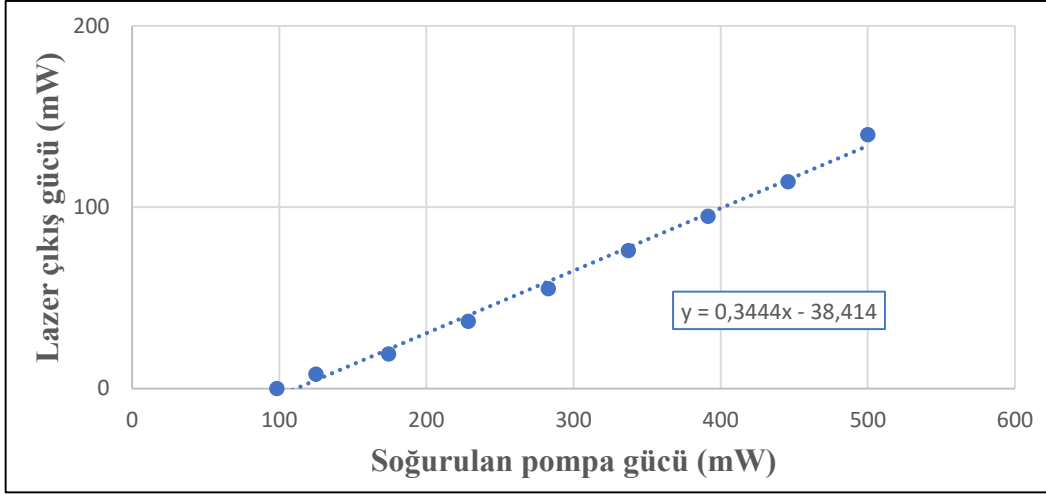
%2'lik 5-mm Tm:LuAG kristali ile yapılan çalışmalarda 15 °C'de 144 mW çıkış gücü %34 verimi ile Şekil 72'deki gibi gözlemlenmiştir. Ardından kristal sıcaklığı değiştirilerek 10 °C, 20 °C ve 25 °C'lerde verim eğrisi ölçümleri alınarak Şekil 73, Şekil 74 ve Şekil 75'de gösterilmiştir.



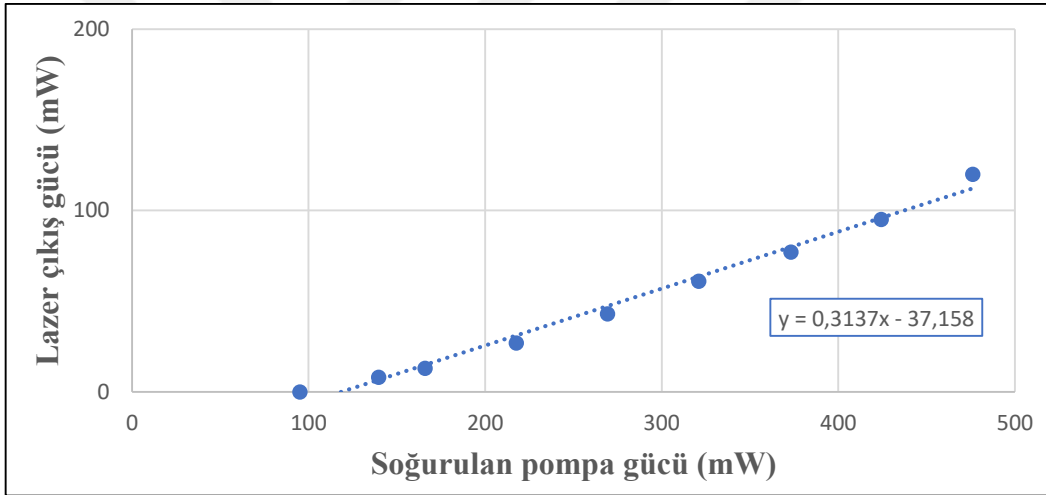
Şekil 72. %2 Katkılı 5-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminin 15 °C'deki verim eğrisi



Şekil 73. %2 Katkılı 5-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminin 10 °C'deki verim eğrisi



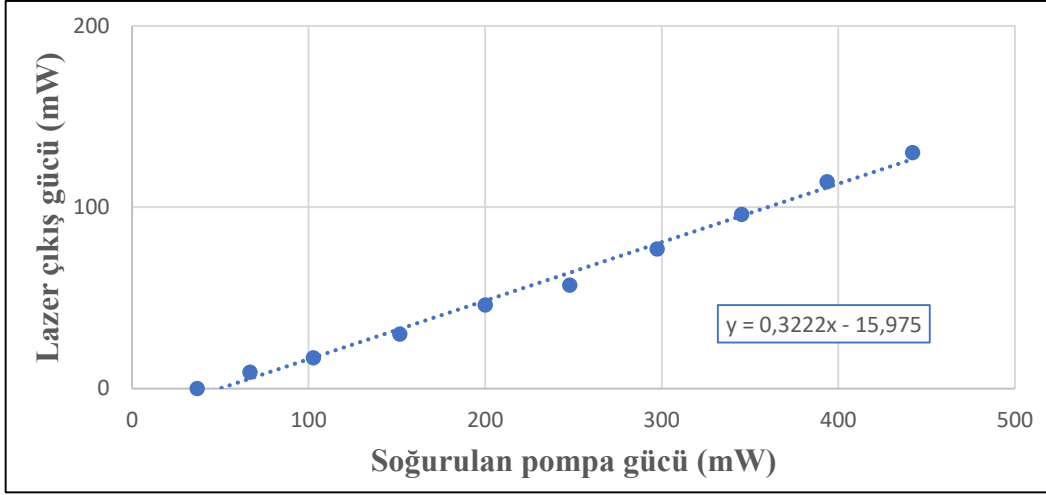
Şekil 74. %2 Katkılı 5-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminin 20 °C'deki verim eğrisi



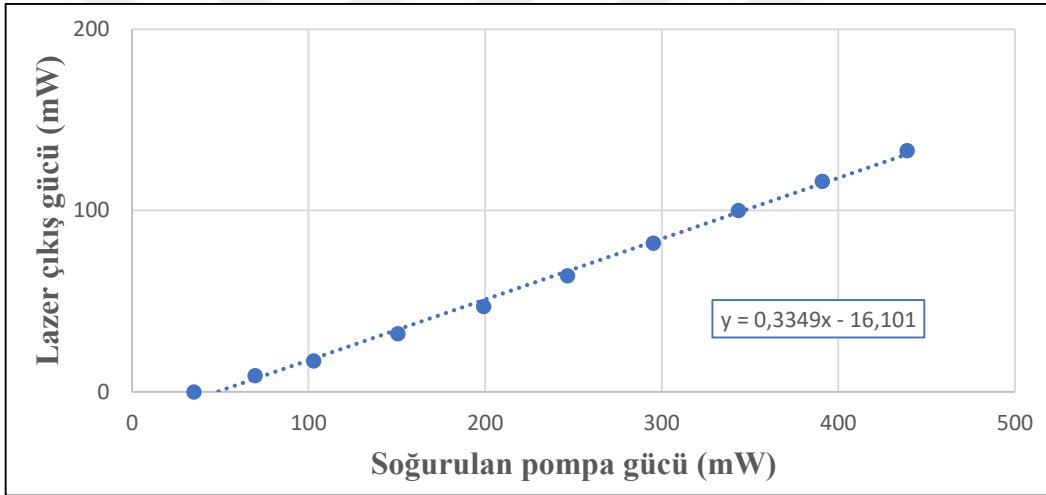
Şekil 75. %2 Katkılı 5-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminin 25 °C'deki verim eğrisi

3.1.14. %2 Katkılı 3-mm Tm:LuAG Kristali Verim Eğrileri

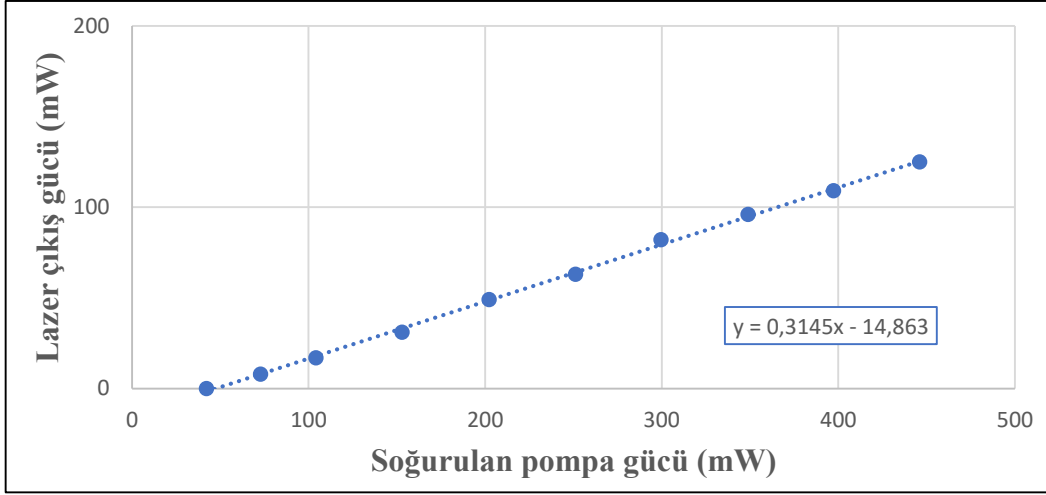
%2'lik 3-mm Tm:LuAG kristali ile yapılan çalışmalarda 15 °C'de 130 mW çıkış gücü %32 verimi ile Şekil 76'daki gibi gözlemlenmiştir. Ardından kristal sıcaklığı değiştirilerek 10 °C, 20 °C ve 25 °C'lerde verim eğrisi ölçümleri alınarak Şekil 77, Şekil 78 ve Şekil 79'da gösterilmiştir.



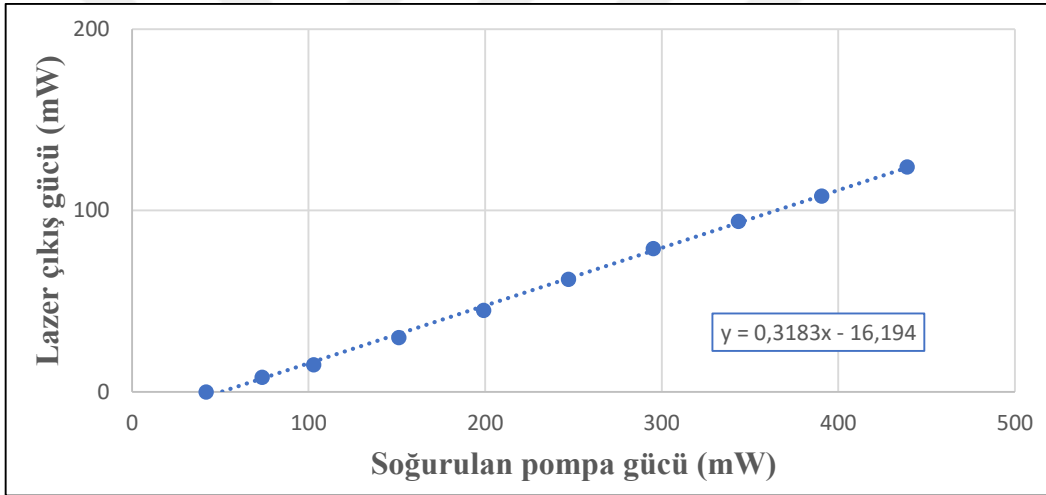
Şekil 76. %2 Katkılı 3-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminin 15 °C'deki verim eğrisi



Şekil 77. %2 Katkılı 3-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminin 10 °C'deki verim eğrisi



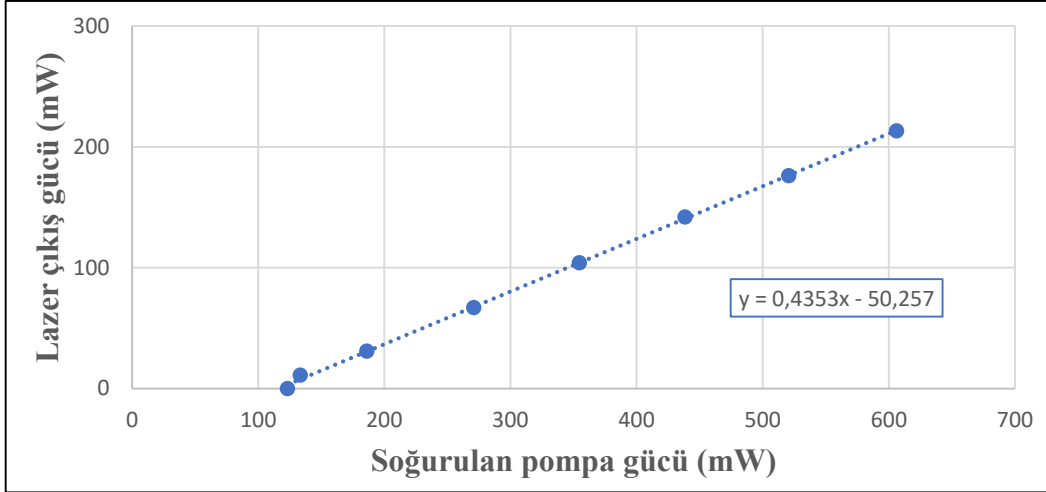
Şekil 78. %2 Katkılı 3-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminin 20 °C'deki verim eğrisi



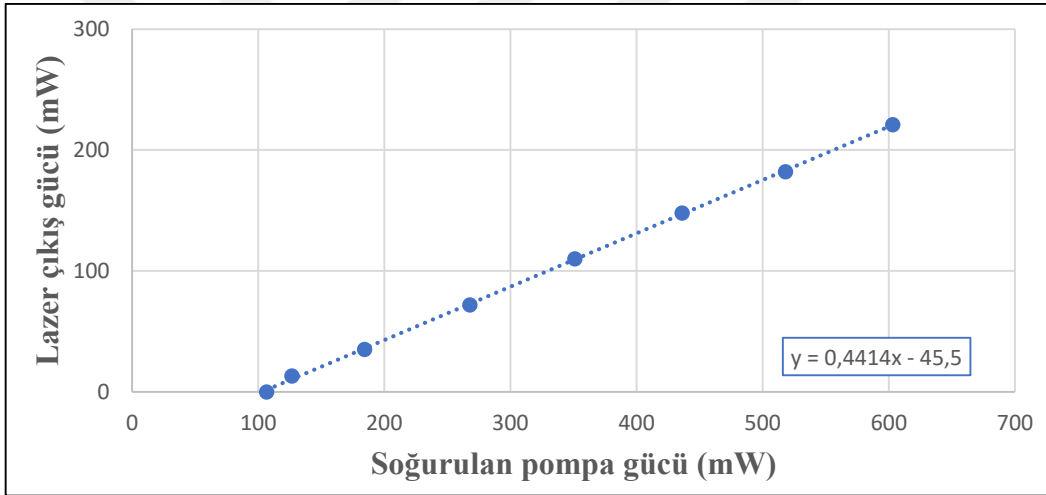
Şekil 79. %2 Katkılı 3-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminin 25 °C'deki verim eğrisi

3.1.15. %4 Katkılı 7-mm Tm:LuAG Kristali Verim Eğrileri

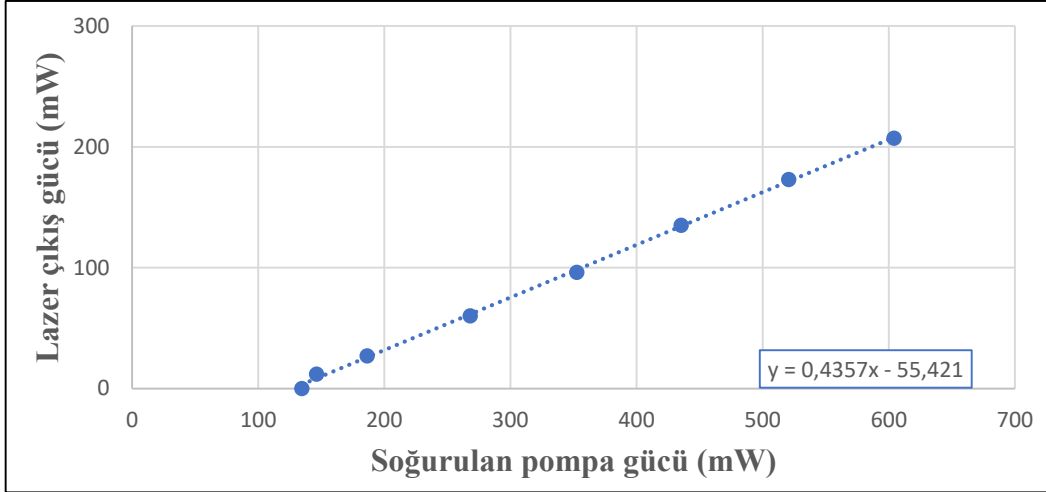
%4'lük 7-mm Tm:LuAG kristali ile yapılan çalışmalarda 15 °C'de 213 mW çıkış gücü %44 verimi ile Şekil 80'deki gibi gözlemlenmiştir. Ardından kristal sıcaklığı değiştirilerek 10 °C, 20 °C ve 25 °C'lerde verim eğrisi ölçümleri alınarak Şekil 81, Şekil 82 ve Şekil 83'de gösterilmiştir.



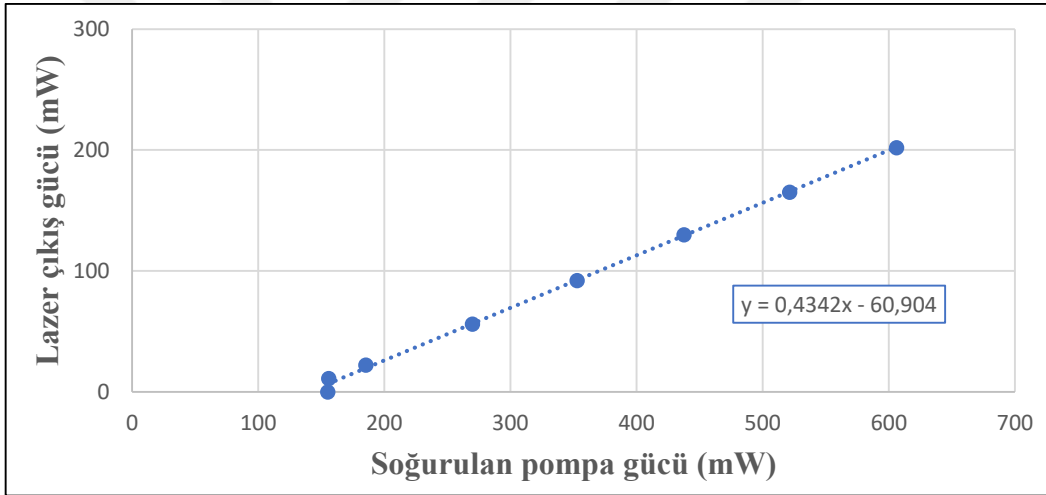
Şekil 80. %4 Katkılı 7-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminin 15 °C’deki verim eğrisi



Şekil 81. %4 Katkılı 7-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminin 10 °C’deki verim eğrisi



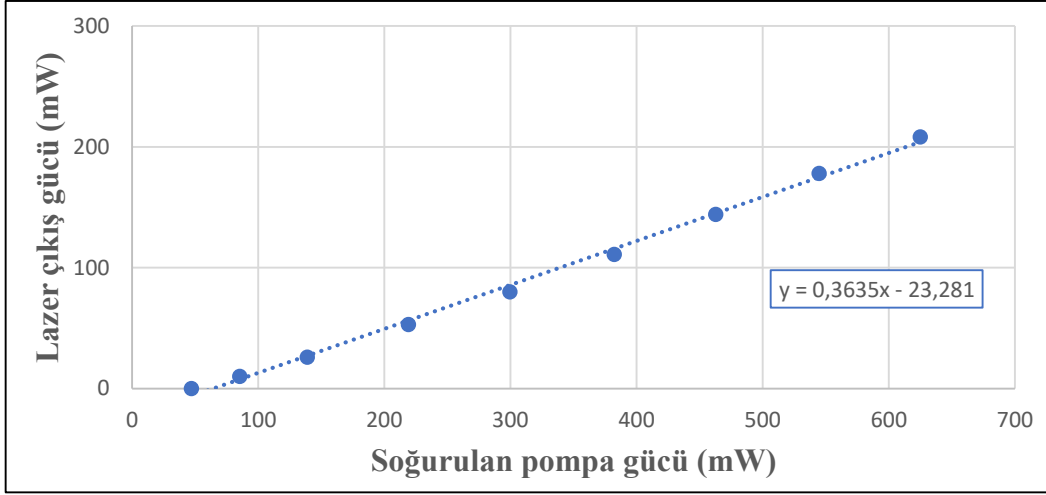
Şekil 82. %4 Katkılı 7-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminin 20 °C'deki verim eğrisi



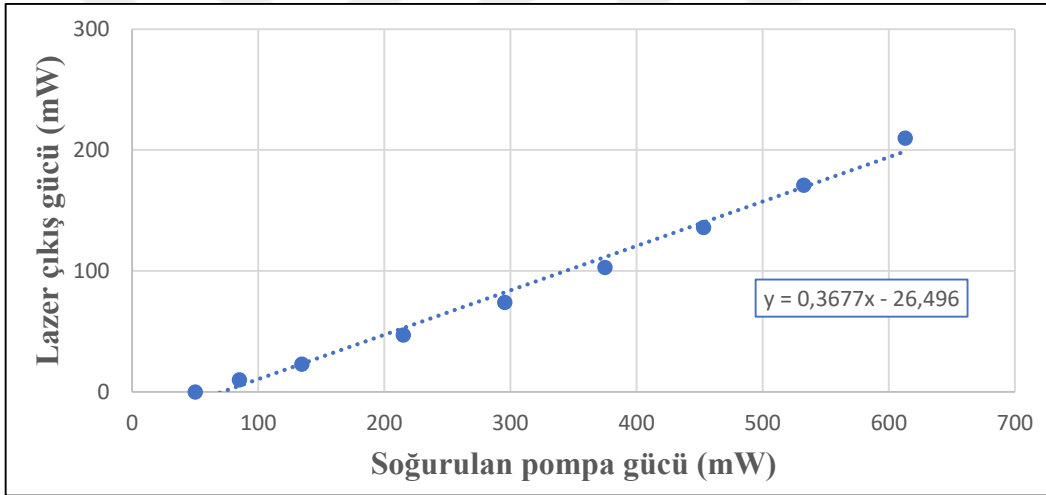
Şekil 83. %4 Katkılı 7-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminin 25 °C'deki verim eğrisi

3.1.16. %4 Katkılı 5-mm Tm:LuAG Kristali Verim Eğrileri

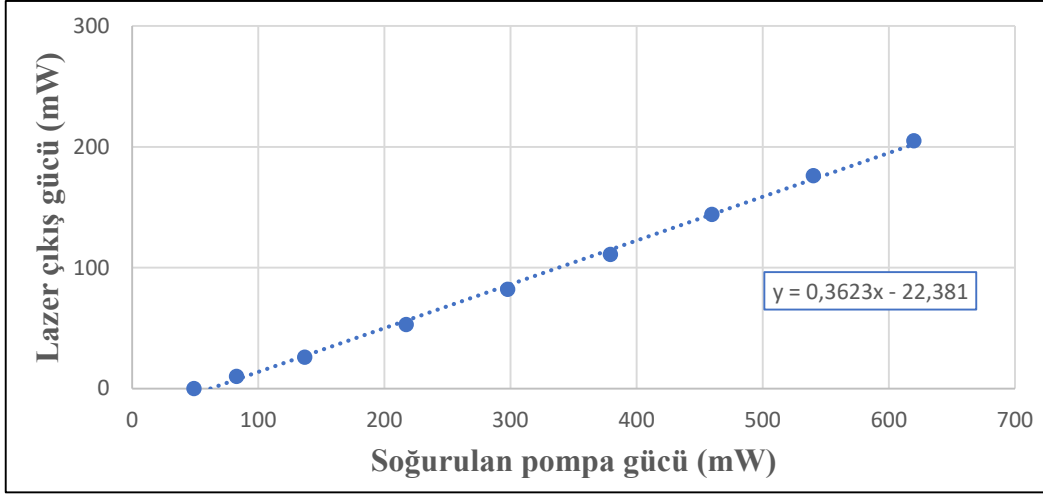
%4'lük 5-mm Tm:LuAG kristali ile yapılan çalışmalarda 15 °C'de 208 mW çıkış gücü %36 verimi ile Şekil 84'teki gibi gözlemlenmiştir. Ardından kristal sıcaklığı değiştirilerek 10 °C, 20 °C ve 25 °C'lerde verim eğrisi ölçümleri alınarak Şekil 85, Şekil 86 ve Şekil 87'de gösterilmiştir.



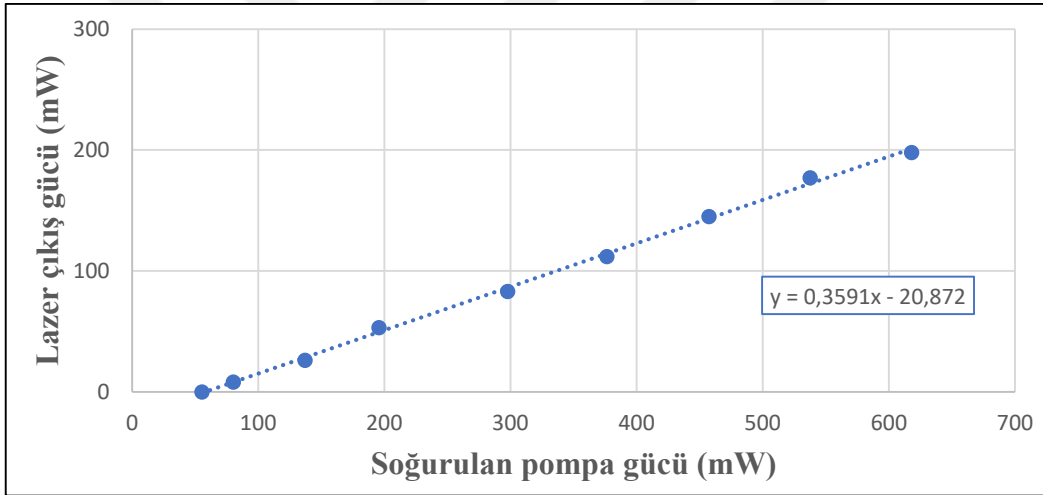
Şekil 84. %4 Katkılı 5-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminin 15 °C’deki verim eğrisi



Şekil 85. %4 Katkılı 5-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminin 10 °C’deki verim eğrisi



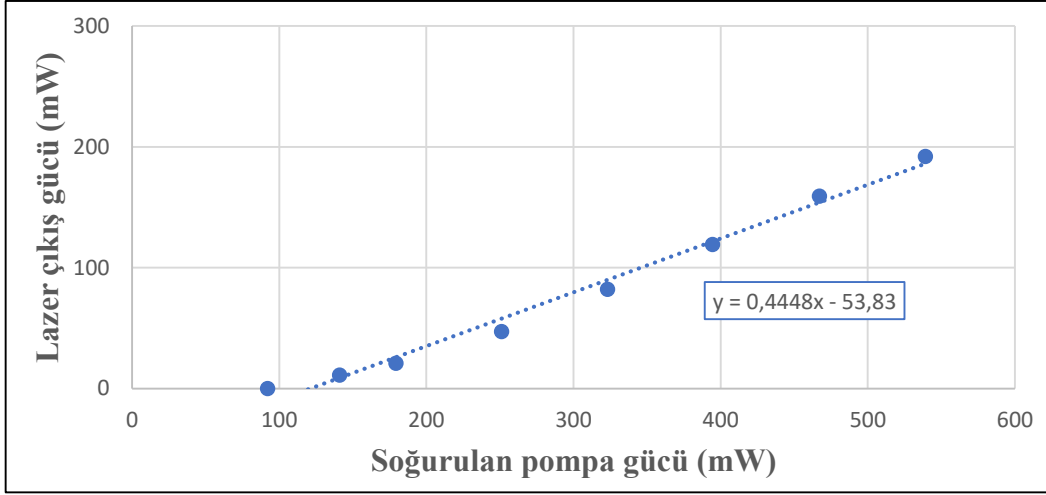
Şekil 86. %4 Katkılı 5-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminin 20 °C'deki verim eğrisi



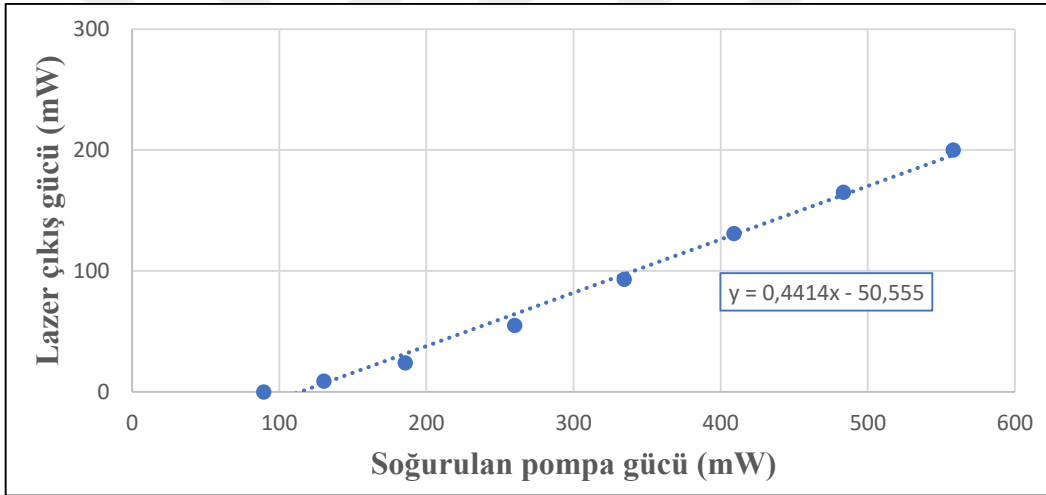
Şekil 87. %4 Katkılı 5-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminin 25 °C'deki verim eğrisi

3.1.17. %4 Katkılı 3-mm Tm:LuAG Kristali Verim Eğrileri

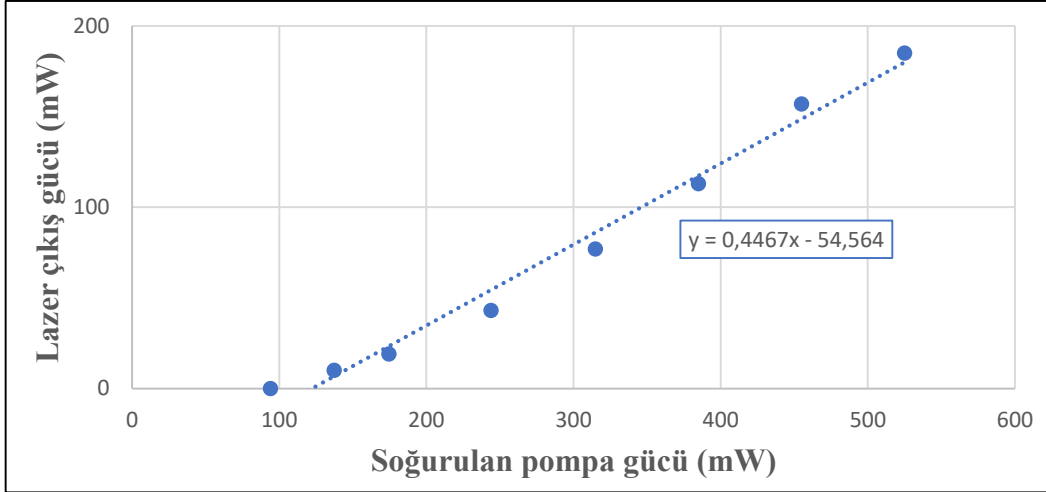
%4'lük 3-mm Tm:LuAG kristali ile yapılan çalışmalarda 15 °C'de 192 mW çıkış gücü %44 verimi ile Şekil 88'deki gibi gözlemlenmiştir. Ardından kristal sıcaklığı değiştirilerek 10 °C, 20 °C ve 25 °C'lerde verim eğrisi ölçümleri alınarak Şekil 89, Şekil 90 ve Şekil 91'de gösterilmiştir.



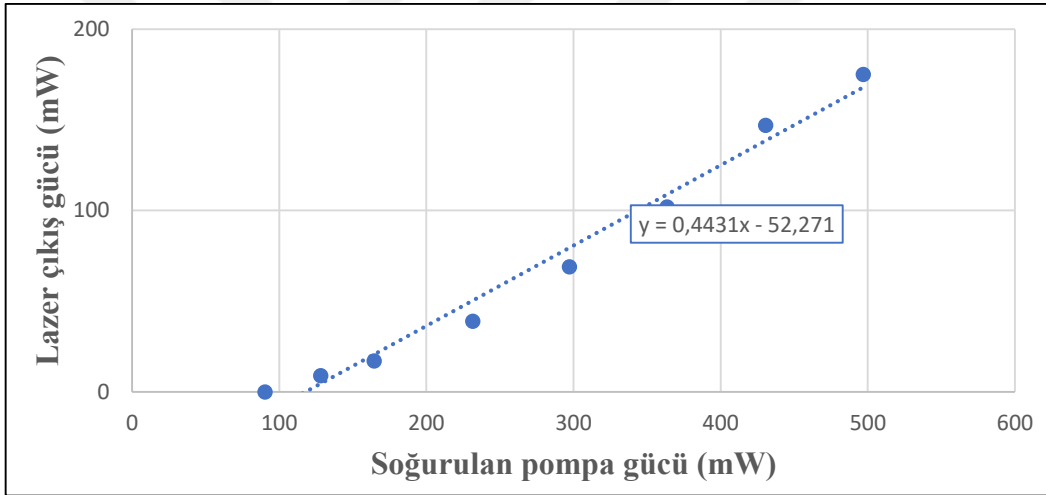
Şekil 88. %4 Katkılı 3-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminin 15 °C'deki verim eğrisi



Şekil 89. %4 Katkılı 3-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminin 10 °C'deki verim eğrisi



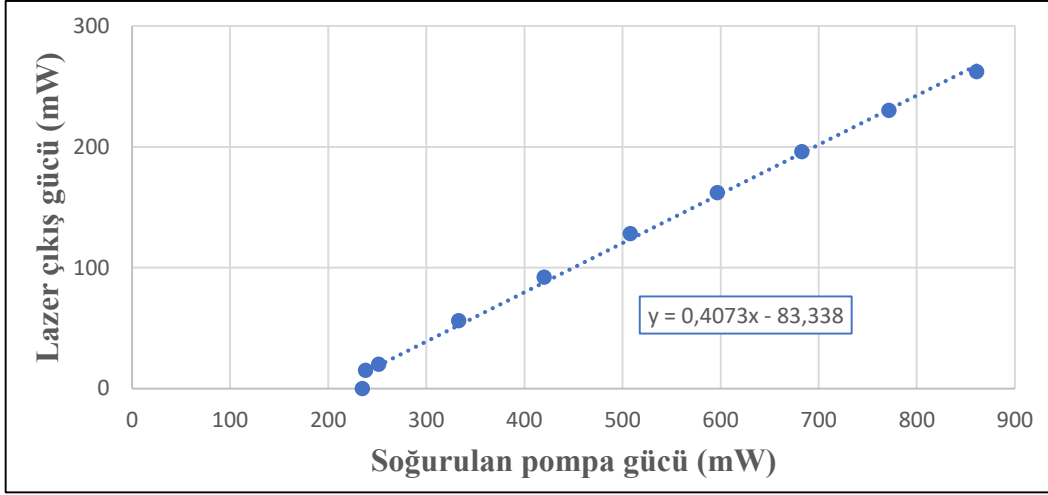
Şekil 90. %4 Katkılı 3-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminin 20 °C'deki verim eğrisi



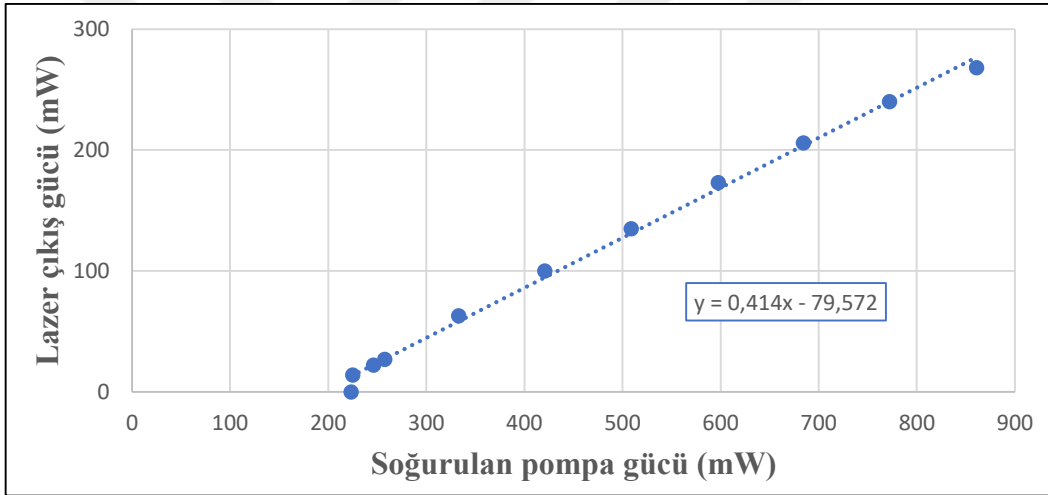
Şekil 91. %4 Katkılı 3-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminin 25 °C'deki verim eğrisi

3.1.18. %6 Katkılı 7-mm Tm:LuAG Kristali Verim Eğrileri

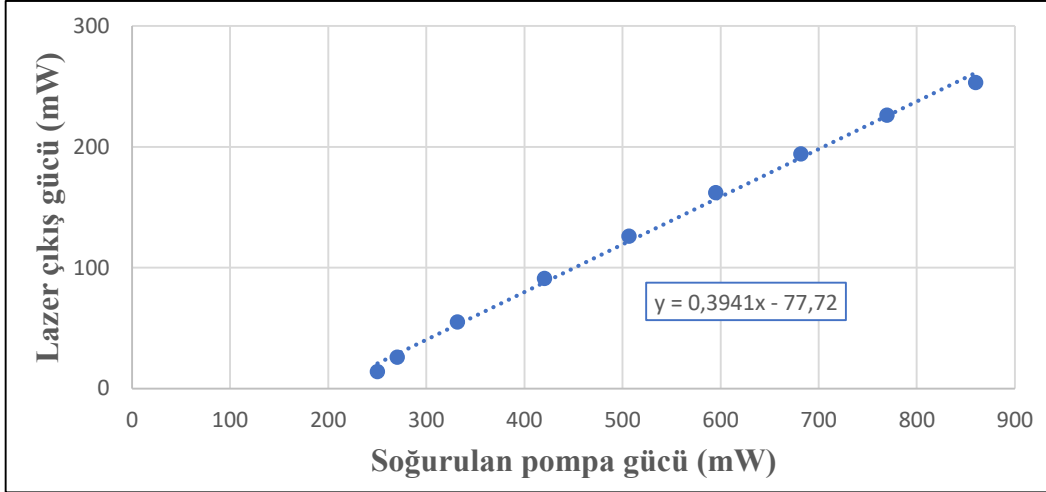
%6'lık 7-mm Tm:LuAG kristali ile yapılan çalışmalarda 15 °C'de 262 mW çıkış gücü %41 verimi ile Şekil 92'deki gibi gözlemlenmiştir. Ardından kristal sıcaklığı değiştirilerek 10 °C, 20 °C ve 25 °C'lerde verim eğrisi ölçümleri alınarak Şekil 93, Şekil 94 ve Şekil 95'de gösterilmiştir.



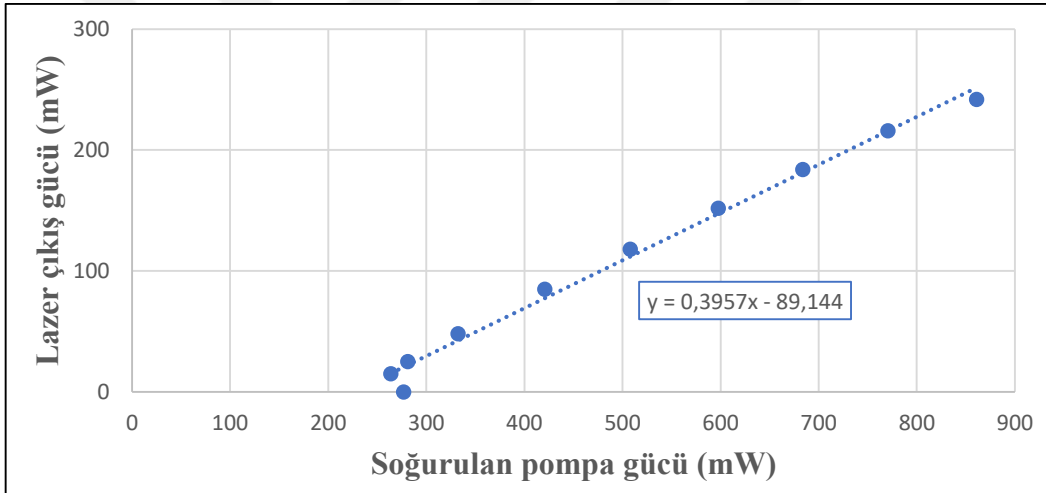
Şekil 92. %6 Katkılı 7-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminin 15 °C'deki verim eğrisi



Şekil 93. %6 Katkılı 7-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminin 10 °C'deki verim eğrisi



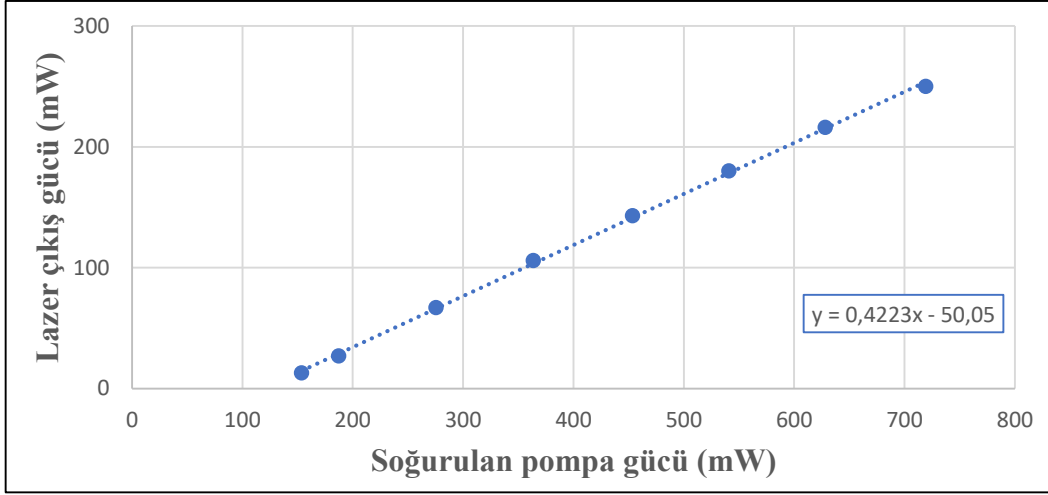
Şekil 94. %6 Katkılı 7-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminin 20 °C'deki verim eğrisi



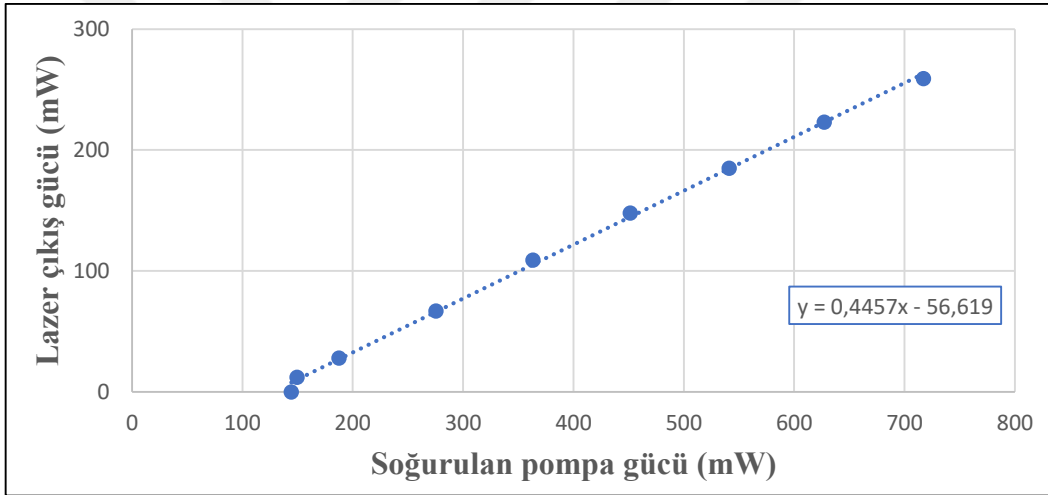
Şekil 95. %6 Katkılı 7-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminin 25 °C'deki verim eğrisi

3.1.19. %6 Katkılı 5-mm Tm:LuAG Kristali Verim Eğrileri

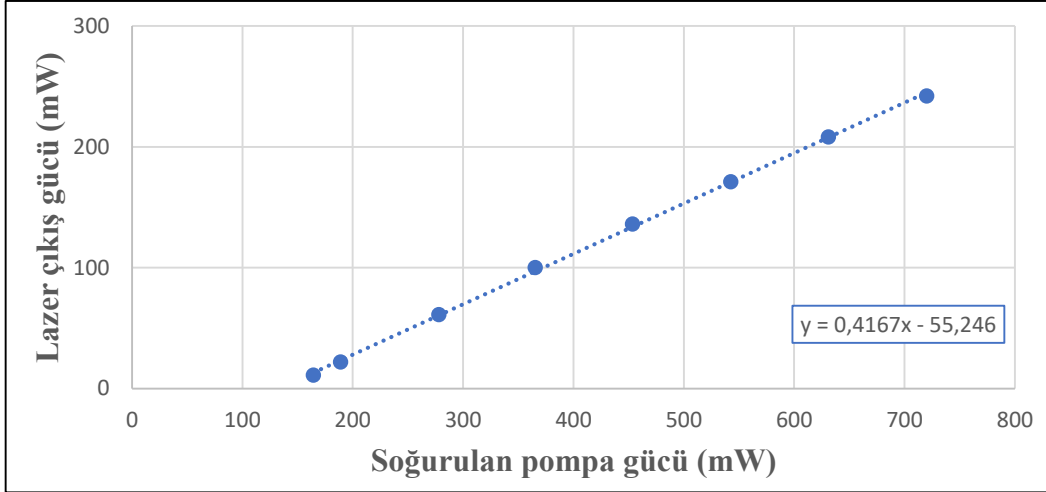
%6'lık 5-mm Tm:LuAG kristali ile yapılan çalışmalarda 15 °C'de 250 mW çıkış gücü %42 verimi ile Şekil 96'daki gibi gözlemlenmiştir. Ardından kristal sıcaklığı değiştirilerek 10 °C, 20 °C ve 25 °C'lerde verim eğrisi ölçümleri alınarak Şekil 97, Şekil 98 ve Şekil 99'da gösterilmiştir.



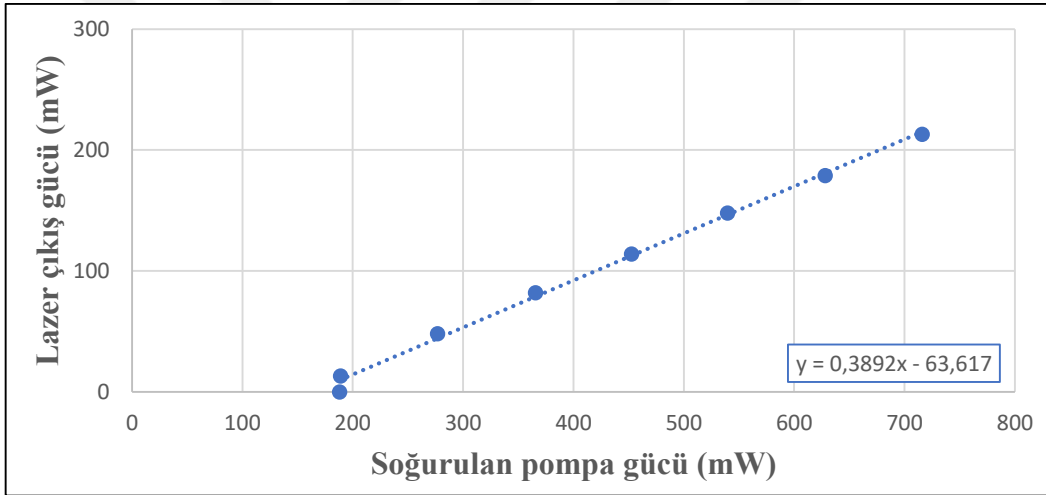
Şekil 96. %6 Katkılı 5-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminin 15 °C'deki verim eğrisi



Şekil 97. %6 Katkılı 5-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminin 10 °C'deki verim eğrisi



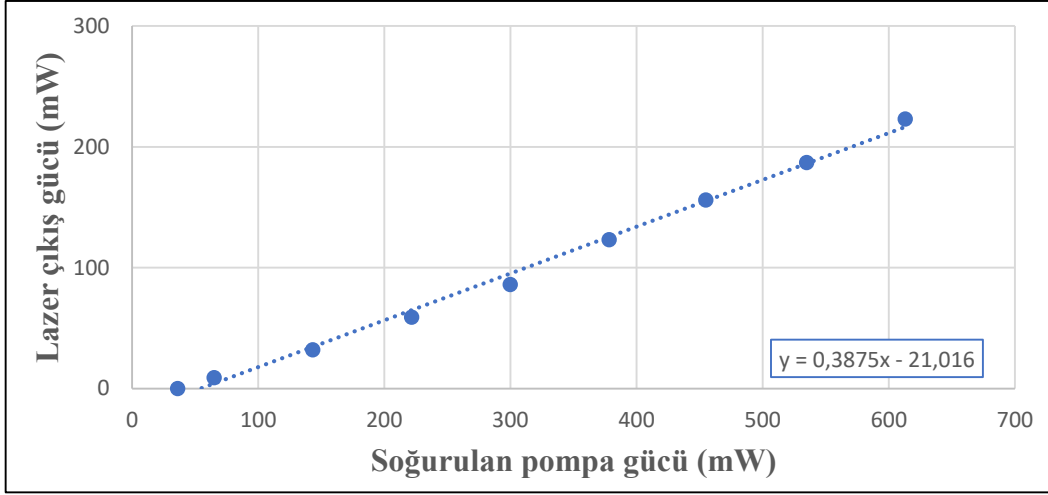
Şekil 98. %6 Katkılı 5-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminin 20 °C'deki verim eğrisi



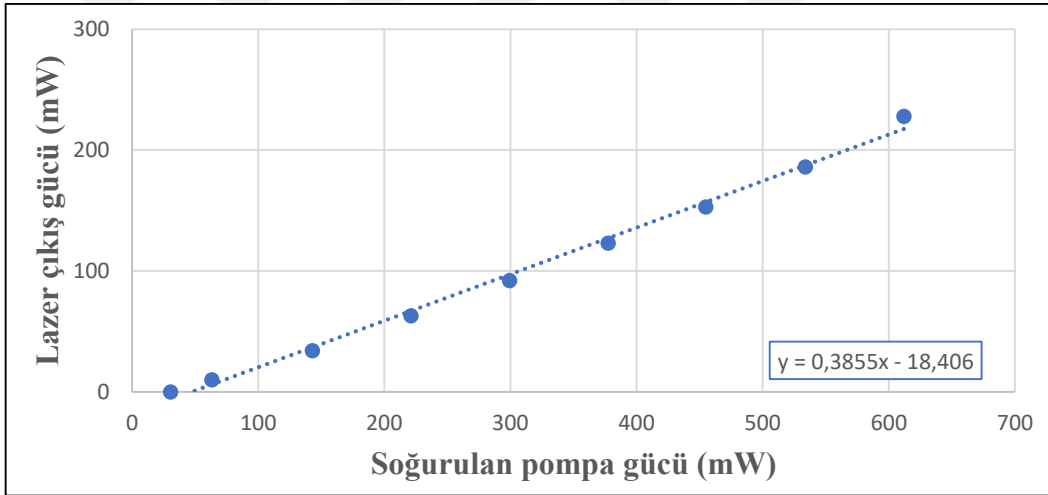
Şekil 99. %6 Katkılı 5-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminin 25 °C'deki verim eğrisi

3.1.20. %6 Katkılı 3-mm Tm:LuAG Kristali Verim Eğrileri

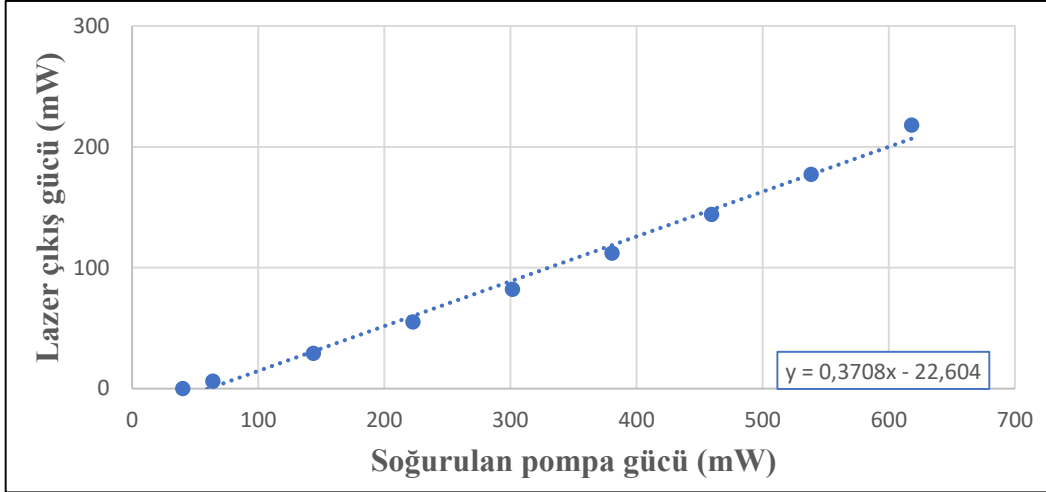
%6'lık 3-mm Tm:LuAG kristali ile yapılan çalışmalarda 15 °C'de 223 mW çıkış gücü %39 verimi ile Şekil 100'deki gibi gözlemlenmiştir. Ardından kristal sıcaklığı değiştirilerek 10 °C, 20 °C ve 25 °C'lerde verim eğrisi ölçümleri alınarak Şekil 101, Şekil 102 ve Şekil 103'de gösterilmiştir.



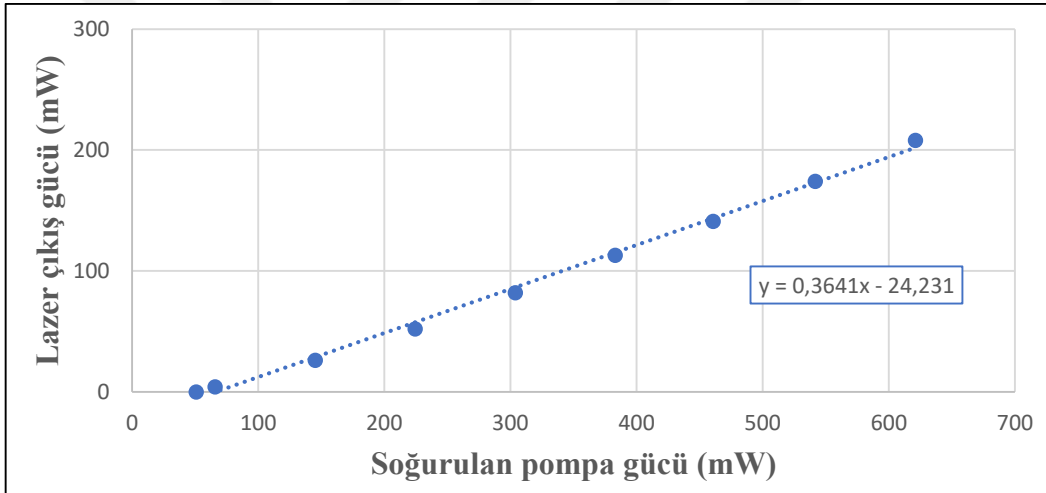
Şekil 100. %6 Katkılı 3-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminin 15 °C'deki verim eğrisi



Şekil 101. %6 Katkılı 3-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminin 10 °C'deki verim eğrisi



Şekil 102. %6 Katkılı 3-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminin 20 °C’deki verim eğrisi



Şekil 103. %6 Katkılı 3-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminin 25 °C’deki verim eğrisi

3.2. Tm:YAG ve Tm:LuAG Lazerlerinin Çıkış Gücünün Kristal Sıcaklığına ve Kristal Su Sıcaklığına Bağlı Değişim Grafikleri

680 nm’de daralan kılavuz yapıları ile pompalanan farklı katkı oranları ve farklı kristal uzunluklarına sahip Tm:YAG ve Tm:LuAG lazer sistemlerinin kristal su sıcaklığı 10 °C ile 40 °C arasında 2,5 °C aralıklarla sıcaklık değiştirilerek elde edilen sonuçlara bağlı olarak lazer çıkış gücünün değişimlerinin grafikleri Şekil 104 ve Şekil 123 arasında gösterilmektedir. Ayrıca Şekil 22’deki termal kamera ile Tm:YAG ve Tm:LuAG lazer sistemlerinin kristal su sıcaklığı 10 °C ile 40 °C arasında

2,5 °C aralıklarla sıcaklık değiştirilerek kristal üzerinden alınan esas sıcaklık değerleri ile lazer çıkış gücünün değişim grafikleri Şekil 124 ve Şekil 143 arasında görülmektedir. Son olarak portatif termal kamera ile alınan görüntülerin her bir sistem ve sıcaklık için alındığı için sayıları çok fazla olduğundan bu çalışmaya eklenemedi. Ancak örnek olarak %6 katkı 3 mm Tm:YAG, %1,5 katkı 3 mm Tm:YAG, %6 katkı 7 mm Tm:LuAG ve %2 katkı 7 mm Tm:LuAG kristallerine sırasıyla su sıcaklığı 37,5 °C, 37,5 °C, 30 °C, 30 °C'deki kristalin sıcaklığın termal kamera görüntüsü Şekil 144 ile Şekil 147 arasında gösterilmektedir.

Bu tez çalışmasında kullanılan 680 nm'de 1 W'lık daralan kılavuz yapı 1 lazer diyotlar ile sadece 2019 yılında bir çalışma (Beyatlı vd., 2019a) (Beyatlı vd., 2019b) yapılmıştır. Ancak bu çalışmada sadece %6 katkı 7 mm Tm:YAG, %6 katkı 5 mm Tm:YAG ve %6 katkı 7 mm Tm:YAG lazer sistemlerinde kristali soğutan suyun sıcaklığı 2,5 °C aralıklarla 10 °C ile 40 °C derece arasında değiştirilerek çıkış gücü grafikleri elde edilmiştir. Bu tezde yapılan çalışmalarda olduğu gibi söz konusu çalışmada da suyun sıcaklığı arttıkça verim eğrilerinde ve çıkış güçlerinde azalmalar gözlemlenmiştir.

Şekil 104 ile Şekil 123 ve Şekil 124 ile Şekil 143 arasındaki görseller incelendiğinde kristal su sıcaklığının artması ile birlikte lazer çıkış gücünün azaldığı gözlemlenmiştir. Sıcaklık değerinin yüksek olması lazer sistemleri üzerinde olumsuz etki yaratmaktadır. Çünkü kristaller sıcaklıktan etkilenmektedir dolayısıyla sıcaklığı uygun bir değerde tutulmalıdır. Sıcaklığın çok fazla artması ile sistem olumsuz etkilenmektedir. Görseller incelendiğinde lazer çıkış gücünün sıcaklıkta en çok etkilenen örnek %6 katkı 7 mm Tm:YAG lazer sisteminde sıcaklık 10 °C'de iken maksimum güç 325 mW iken sıcaklığın artırılması ile birlikte 40 °C maksimum güç 240 mW'a kadar düşmektedir 85 mW'lık bir güç düşmesi yaşanmıştır. Lazer çıkış gücünün sıcaklıkta en az etkilenen örnek ise %2 katkı 3 mm Tm:LuAG lazer sisteminde sıcaklık 10 °C'de iken maksimum güç 133 mW iken sıcaklığın artırılması ile birlikte 40 °C maksimum güç 116 mW'a kadar düşmektedir 17 mW'lık bir güç düşmesi yaşanmıştır.

Şekil 144 ile Şekil 147 görselleri incelendiğinde;

%6 katkı 3 mm Tm:YAG lazer sistemi için fark;

$$\text{Fark} = | \text{Kristal su sıcaklığı} - \text{Kristal sıcaklığı} | = | 37,5 \text{ °C} - 37,2 \text{ °C} | = 0,3 \text{ °C}$$

%1,5 katkılı 3 mm Tm:YAG lazer sistemi için fark;

$$\text{Fark} = | \text{Kristal su sıcaklığı} - \text{Kristal sıcaklığı} | = | 37,5 \text{ }^{\circ}\text{C} - 38,8 \text{ }^{\circ}\text{C} | = 1,3 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

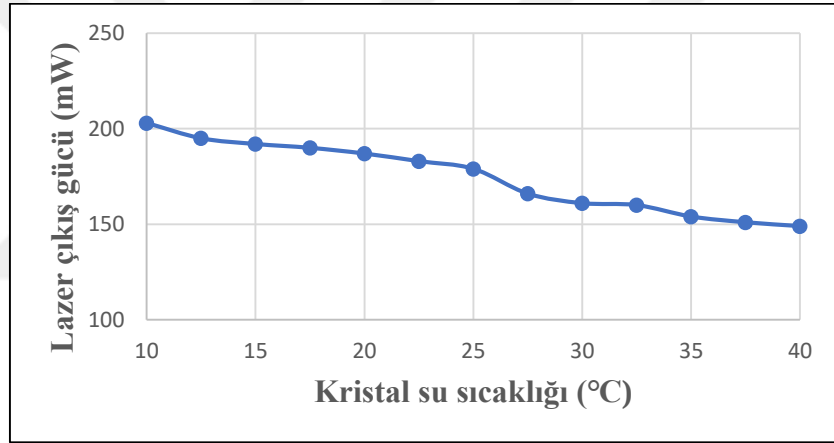
%6 katkılı 7 mm Tm:LuAG lazer sistemi için fark;

$$\text{Fark} = | \text{Kristal su sıcaklığı} - \text{Kristal sıcaklığı} | = | 30 \text{ }^{\circ}\text{C} - 30,4 \text{ }^{\circ}\text{C} | = 0,4 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

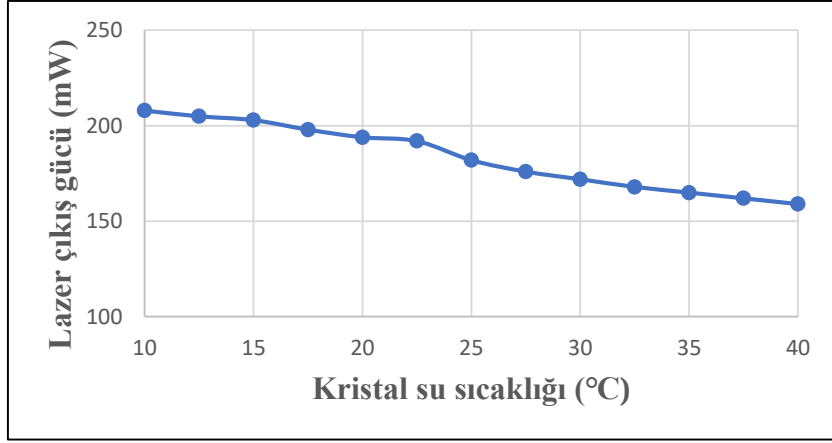
%2 katkılı 7 mm Tm:LuAG lazer sistemi için fark;

$$\text{Fark} = | \text{Kristal su sıcaklığı} - \text{Kristal sıcaklığı} | = | 30 \text{ }^{\circ}\text{C} - 33 \text{ }^{\circ}\text{C} | = 3 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

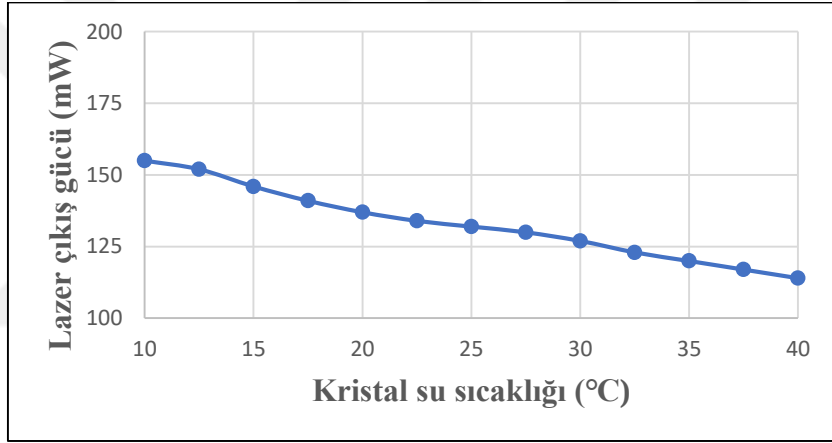
Fark oranlarına bakıldığında %6 katkılı 3 mm Tm:YAG lazer sistemi ve %6 katkılı 7 mm Tm:LuAG lazer sistemi için fark oranları çok küçük olduğundan lazer sistemlerinde çok büyük değişiklikler beklenmez. Ancak %1,5 katkılı 3 mm Tm:YAG ve %2 katkılı 7 mm Tm:LuAG lazer sistemindeki sırasıyla 1,3 $^{\circ}\text{C}$ ve 3 $^{\circ}\text{C}$ sıcaklık farkı göz ardı edilmez sistem üzerine etki edecektir (özellikle 3 $^{\circ}\text{C}$ 'lik farklar).



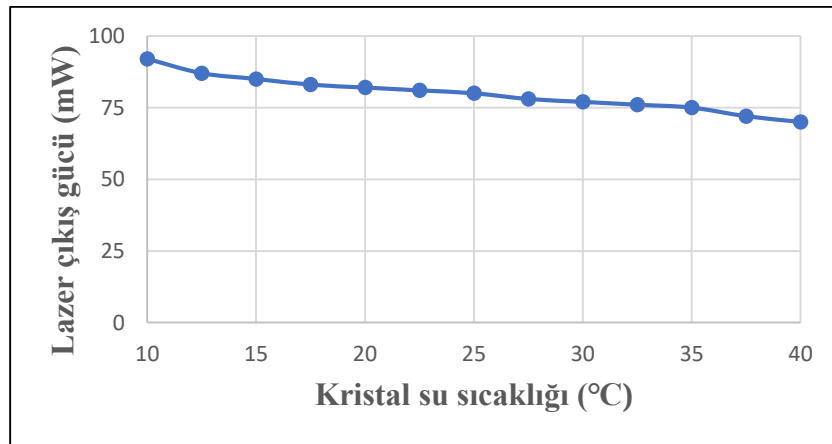
Şekil 104. %1,5 Katkılı 9-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer çıkış gücünün kristal su sıcaklığına bağlı değişim grafiği



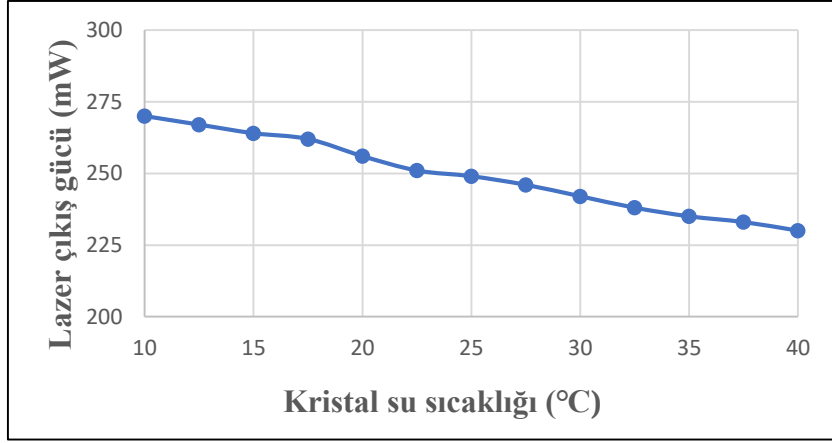
Şekil 105. %1,5 Katkılı 7-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer çıkış gücünün kristal su sıcaklığına bağlı değişim grafiği



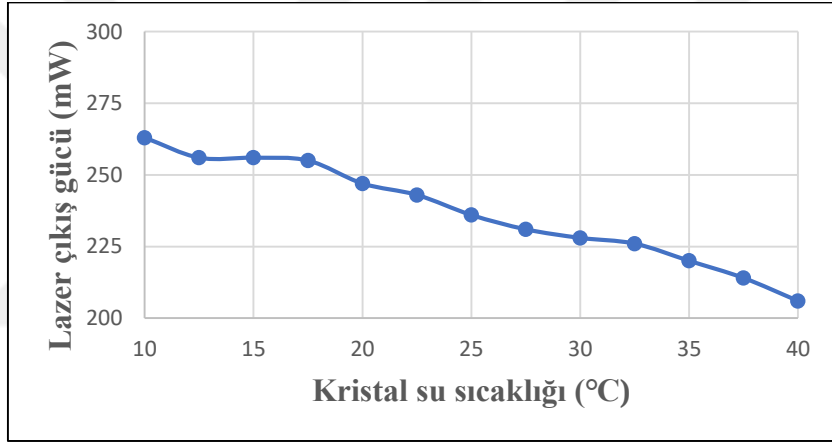
Şekil 106. %1,5 Katkılı 5-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer çıkış gücünün kristal su sıcaklığına bağlı değişim grafiği



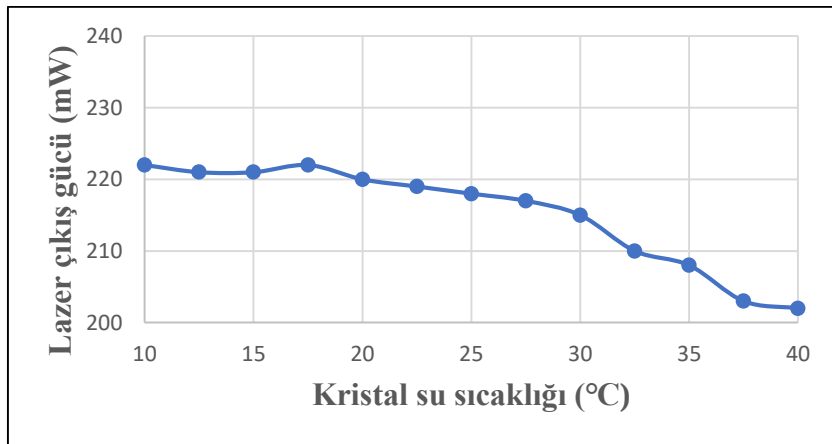
Şekil 107. %1,5 Katkılı 3-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer çıkış gücünün kristal su sıcaklığına bağlı değişim grafiği



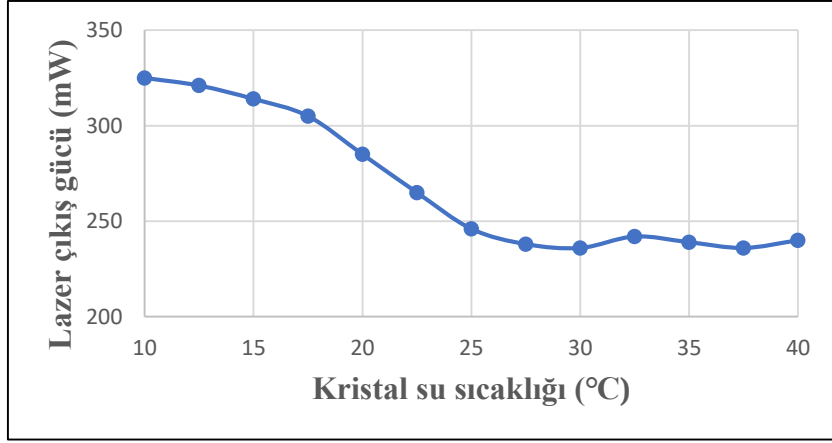
Şekil 108. %3 Katkılı 7-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer çıkış gücünün kristal su sıcaklığına bağlı değişim grafiği



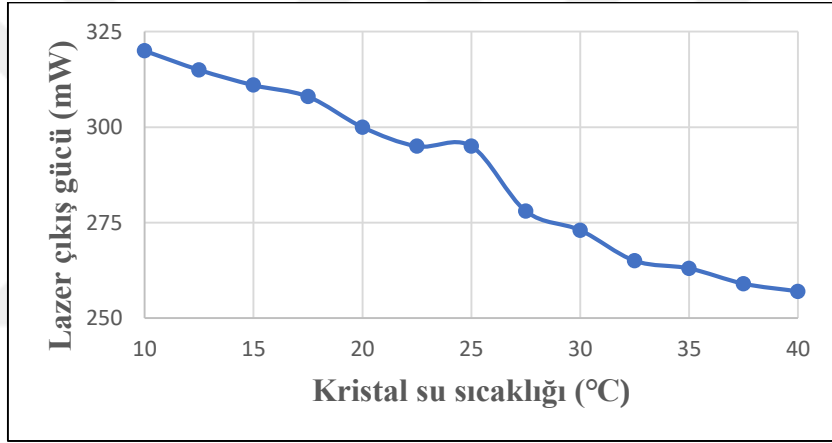
Şekil 109. %3 Katkılı 5-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer çıkış gücünün kristal su sıcaklığına bağlı değişim grafiği



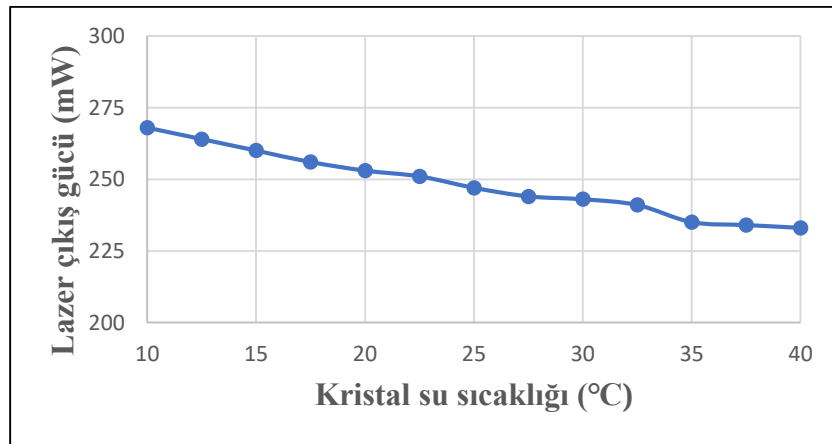
Şekil 110. %3 Katkılı 3-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer çıkış gücünün kristal su sıcaklığına bağlı değişim grafiği



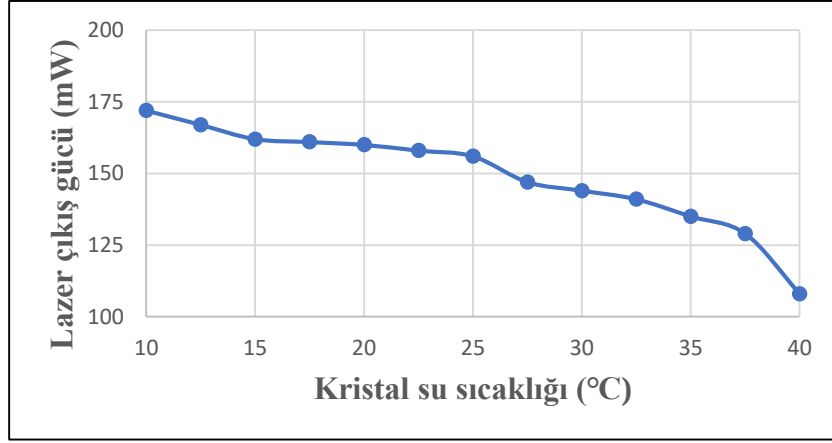
Şekil 111. %6 Katkılı 7-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer çıkış gücünün kristal su sıcaklığına bağlı değişim grafiği



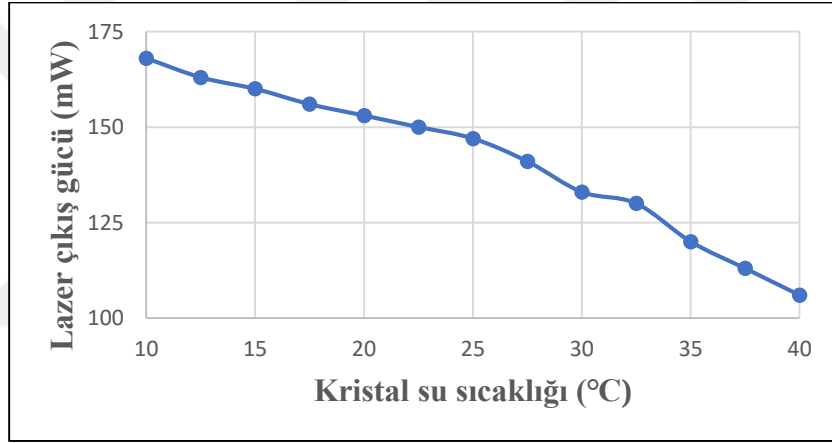
Şekil 112. %6 Katkılı 5-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer çıkış gücünün kristal su sıcaklığına bağlı değişim grafiği



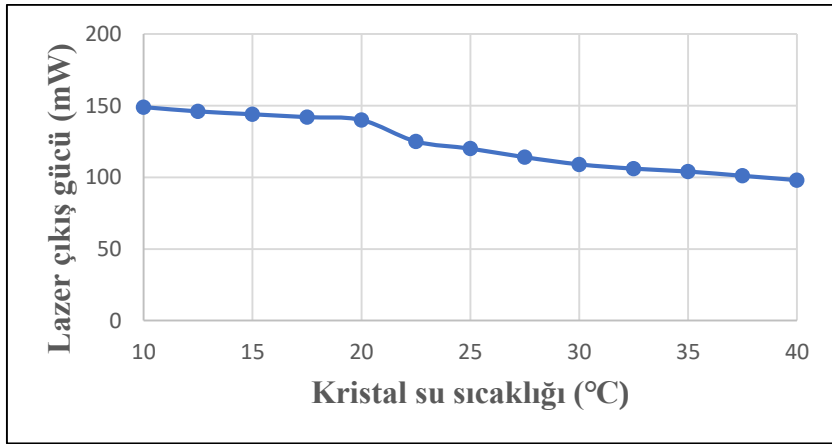
Şekil 113. %6 Katkılı 3-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer çıkış gücünün kristal su sıcaklığına bağlı değişim grafiği



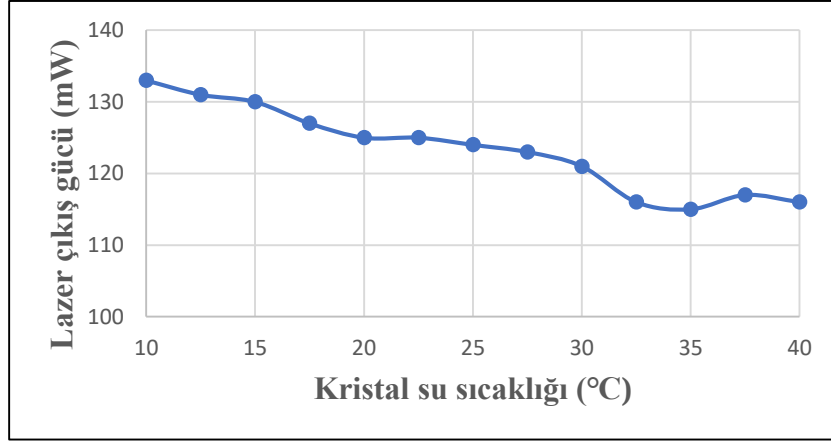
Şekil 114. %2 Katkılı 9-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer çıkış gücünün kristal su sıcaklığına bağlı değişim grafiği



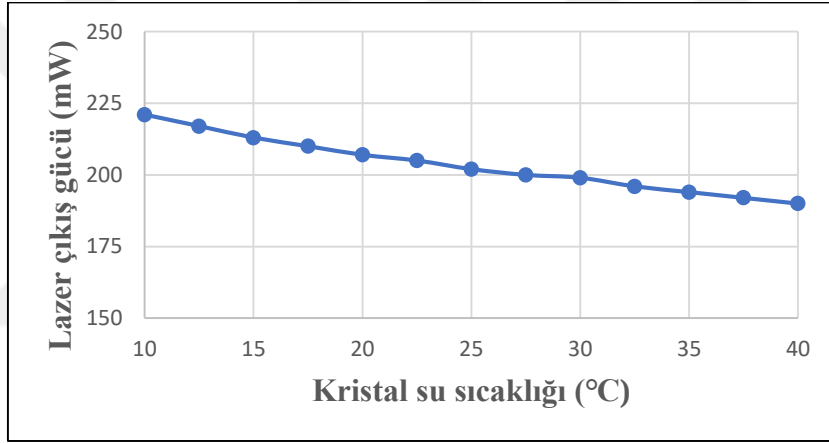
Şekil 115. %2 Katkılı 7-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer çıkış gücünün kristal su sıcaklığına bağlı değişim grafiği



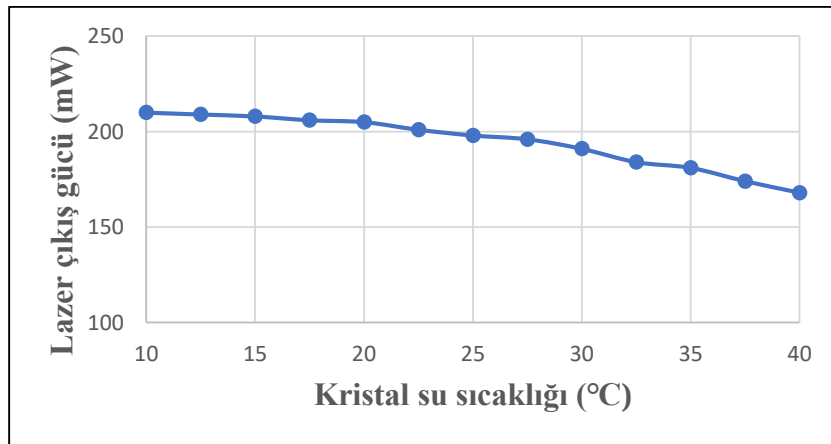
Şekil 116. %2 Katkılı 5-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer çıkış gücünün kristal su sıcaklığına bağlı değişim grafiği



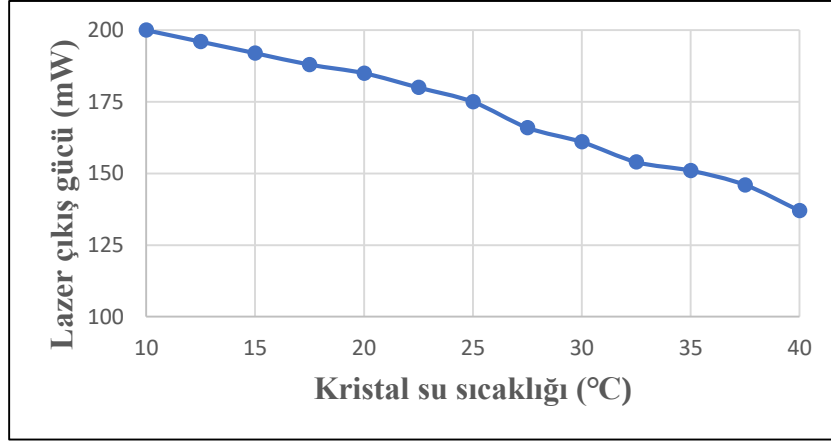
Şekil 117. %2 Katkılı 3-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer çıkış gücünün kristal su sıcaklığına bağlı değişim grafiği



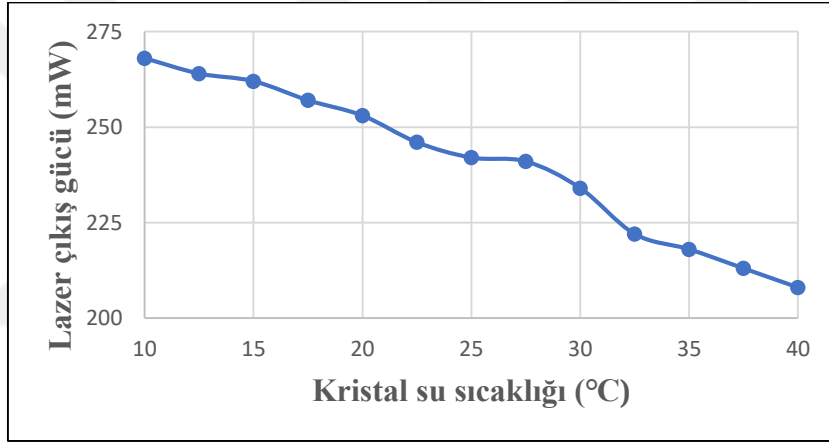
Şekil 118. %4 Katkılı 7-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer çıkış gücünün kristal su sıcaklığına bağlı değişim grafiği



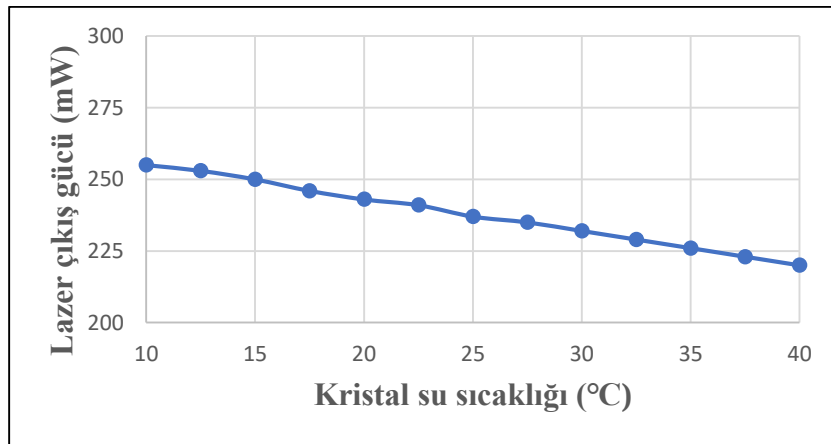
Şekil 119. %4 Katkılı 5-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer çıkış gücünün kristal su sıcaklığına bağlı değişim grafiği



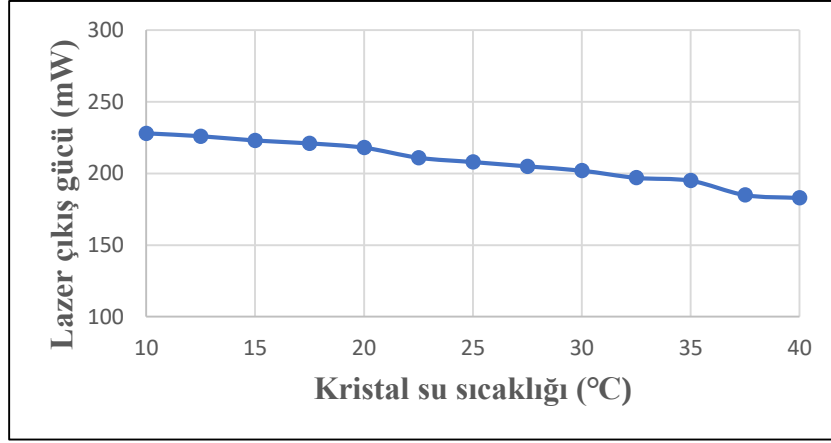
Şekil 120. %4 Katkılı 3-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer çıkış gücünün kristal su sıcaklığına bağlı değişim grafiği



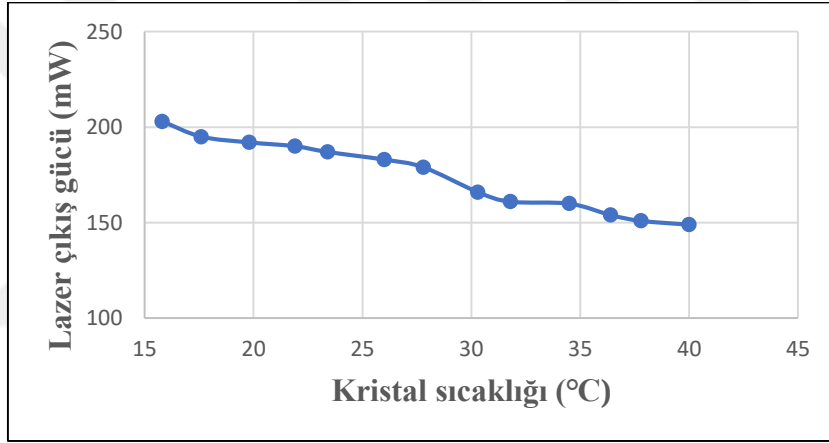
Şekil 121. %6 Katkılı 7-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer çıkış gücünün kristal su sıcaklığına bağlı değişim grafiği



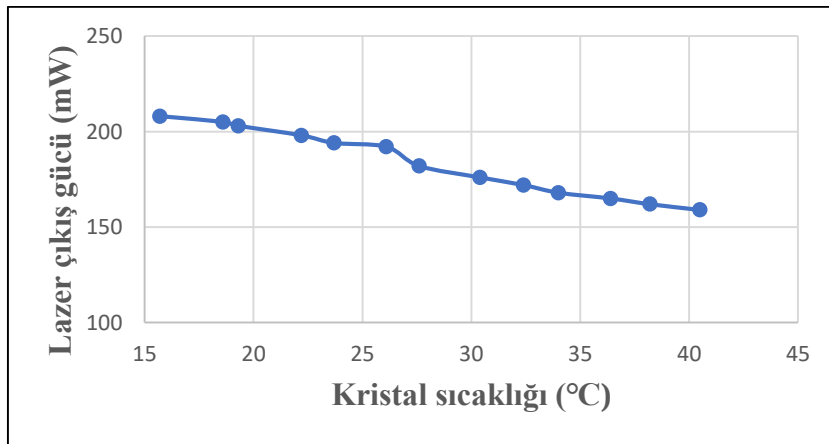
Şekil 122. %6 Katkılı 5-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer çıkış gücünün kristal su sıcaklığına bağlı değişim grafiği



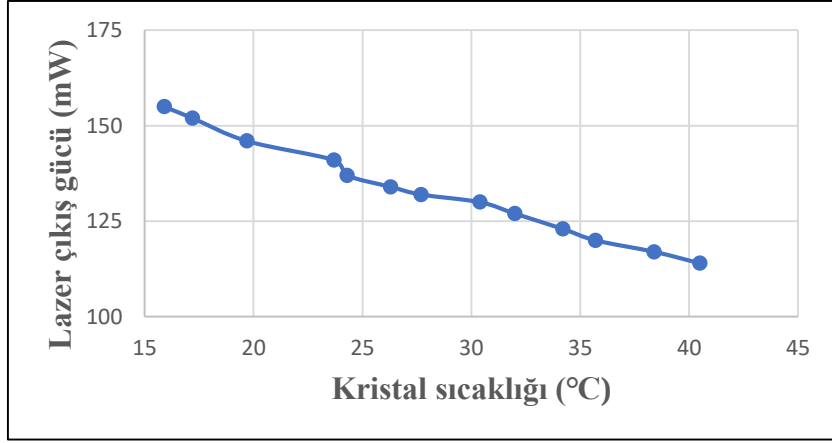
Şekil 123. %6 Katkılı 3-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer çıkış gücünün kristal su sıcaklığına bağlı değişim grafiği



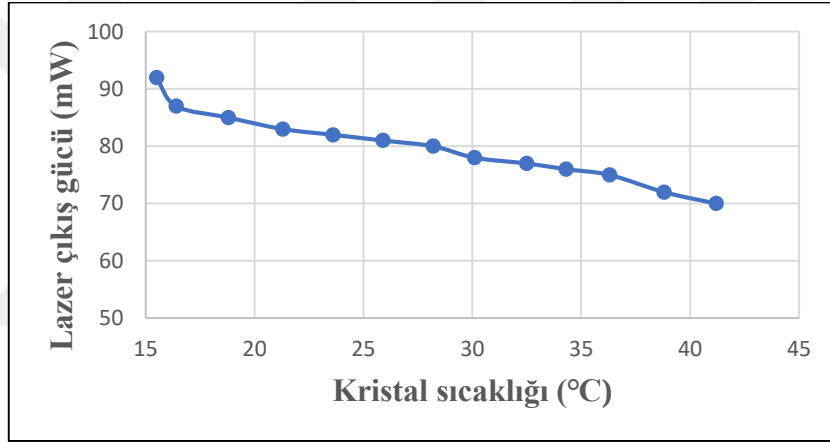
Şekil 124. %1,5 Katkılı 9-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer çıkış gücünün kristal sıcaklığına bağlı değişim grafiği



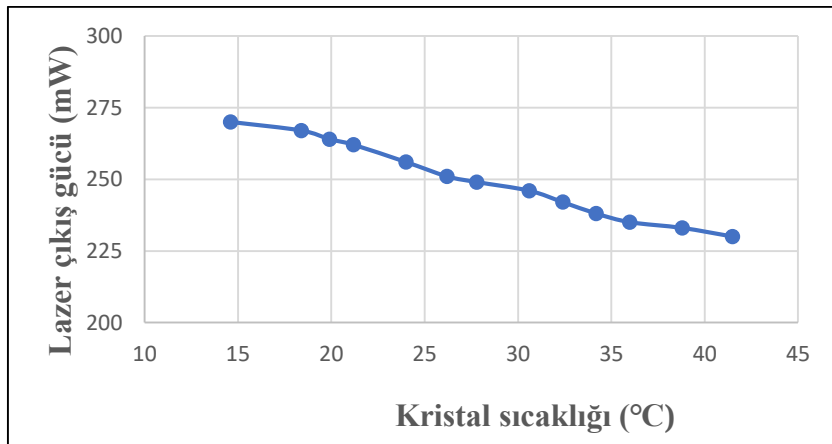
Şekil 125. %1,5 Katkılı 7-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer çıkış gücünün kristal sıcaklığına bağlı değişim grafiği



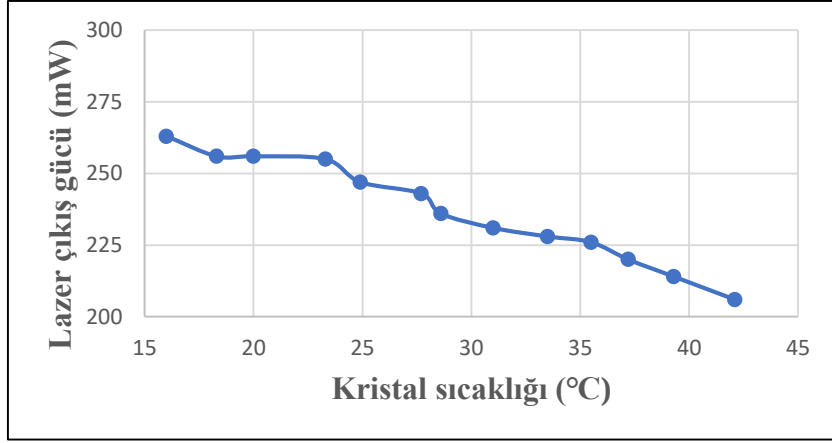
Şekil 126. %1,5 Katkılı 5-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer çıkış gücünün kristal sıcaklığına bağlı değişim grafiği



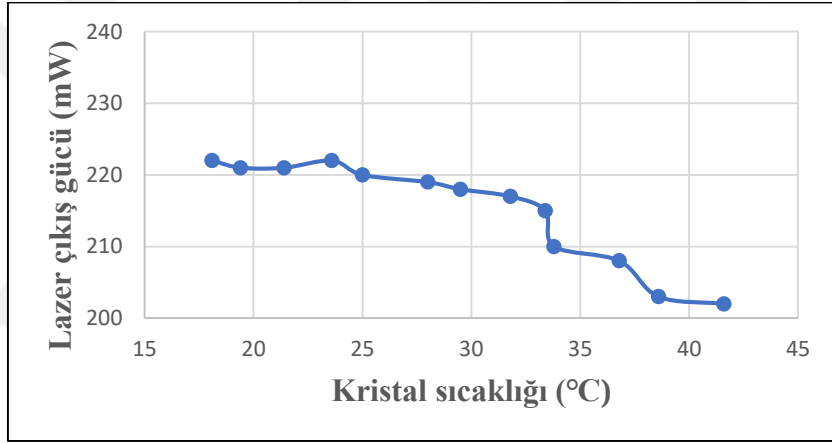
Şekil 127. %1,5 Katkılı 3-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer çıkış gücünün kristal sıcaklığına bağlı değişim grafiği



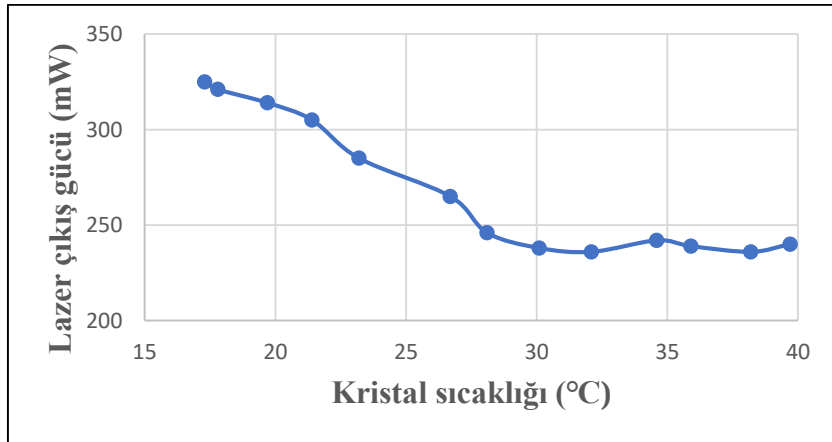
Şekil 128. %3 Katkılı 7-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer çıkış gücünün kristal sıcaklığına bağlı değişim grafiği



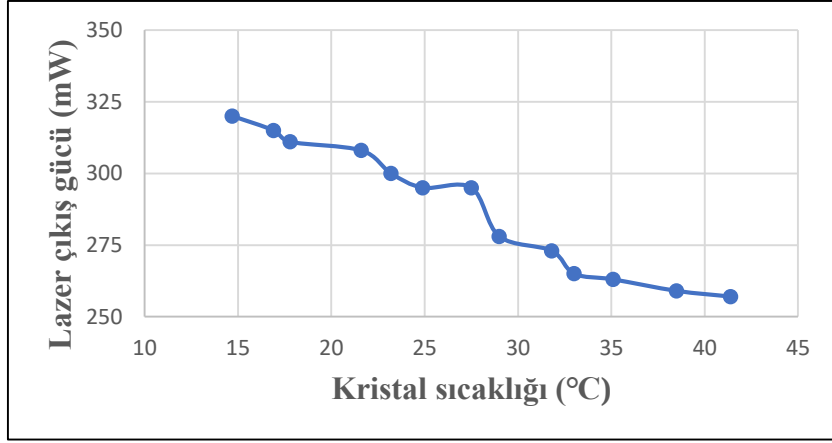
Şekil 129. %3 Katkılı 5-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer çıkış gücünün kristal sıcaklığına bağlı değişim grafiği



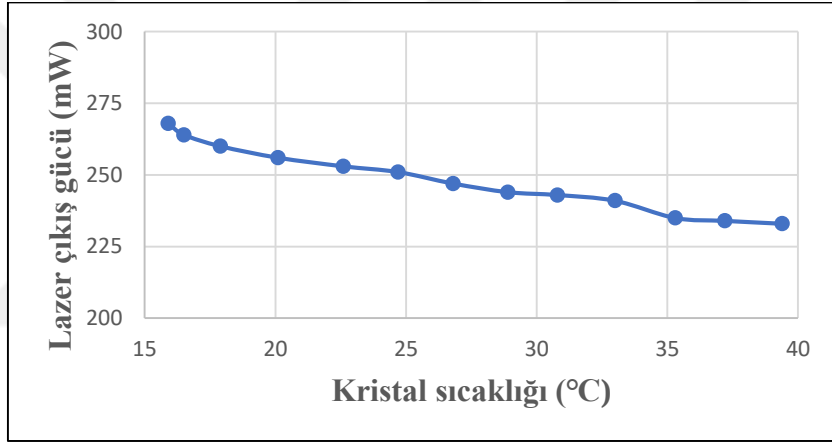
Şekil 130. %3 Katkılı 3-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer çıkış gücünün kristal sıcaklığına bağlı değişim grafiği



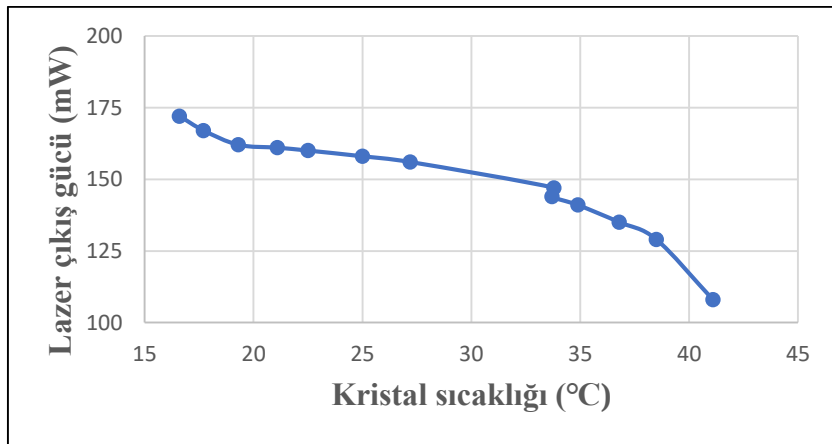
Şekil 131. %6 Katkılı 7-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer çıkış gücünün kristal sıcaklığına bağlı değişim grafiği



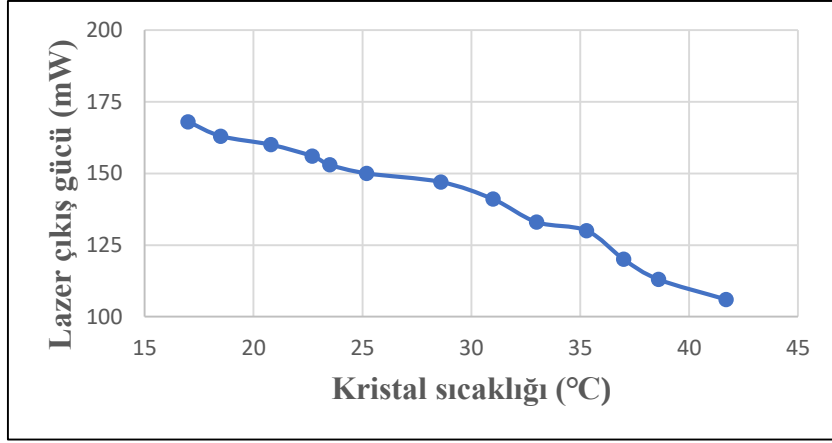
Şekil 132. %6 Katkılı 5-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer çıkış gücünün kristal sıcaklığına bağlı değişim grafiği



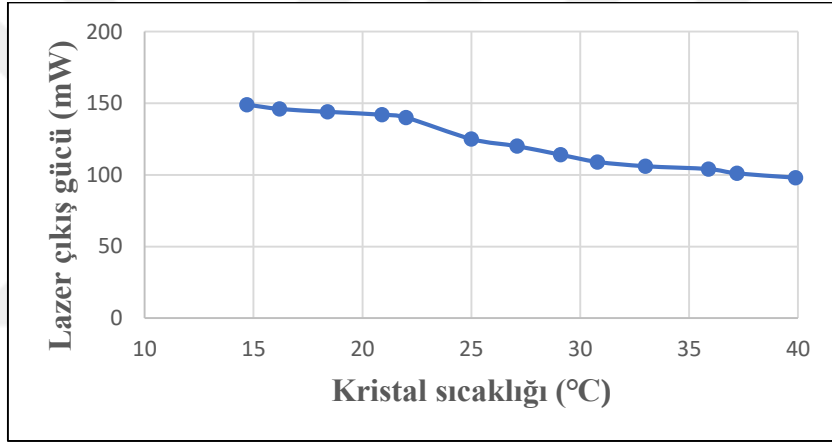
Şekil 133. %6 Katkılı 3-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer çıkış gücünün kristal sıcaklığına bağlı değişim grafiği



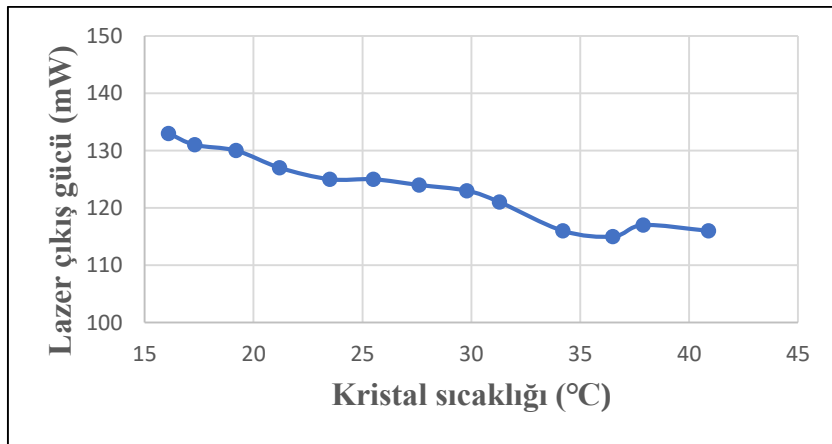
Şekil 134. %2 Katkılı 9-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer çıkış gücünün kristal sıcaklığına bağlı değişim grafiği



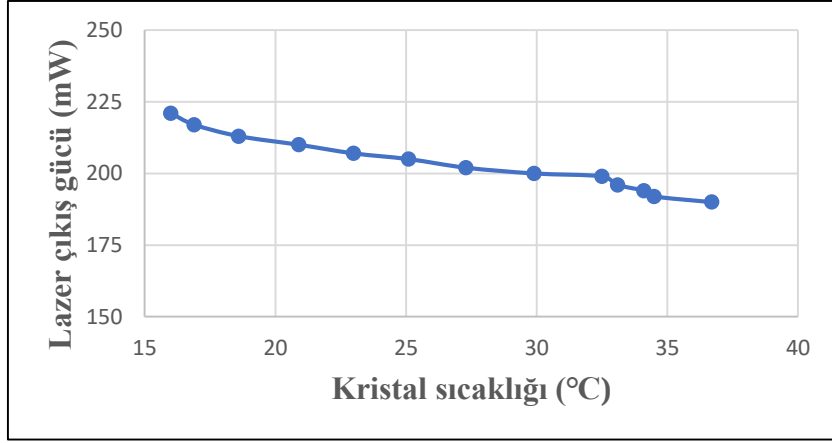
Şekil 135. %2 Katkılı 7-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer çıkış gücünün kristal sıcaklığına bağlı değişim grafiği



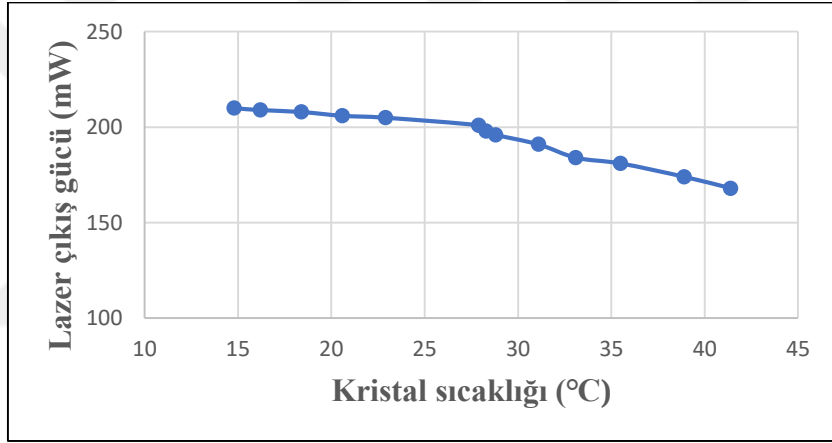
Şekil 136. %2 Katkılı 5-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer çıkış gücünün kristal sıcaklığına bağlı değişim grafiği



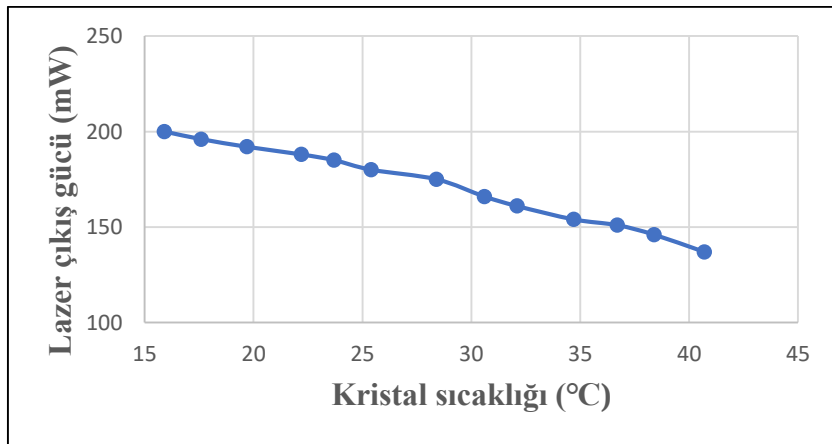
Şekil 137. %2 Katkılı 3-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer çıkış gücünün kristal sıcaklığına bağlı değişim grafiği



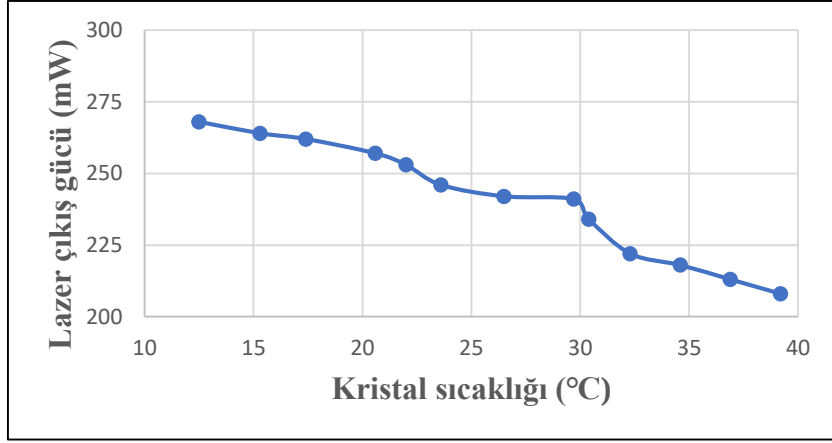
Şekil 138. %4 Katkılı 7-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer çıkış gücünün kristal sıcaklığına bağlı değişim grafiği



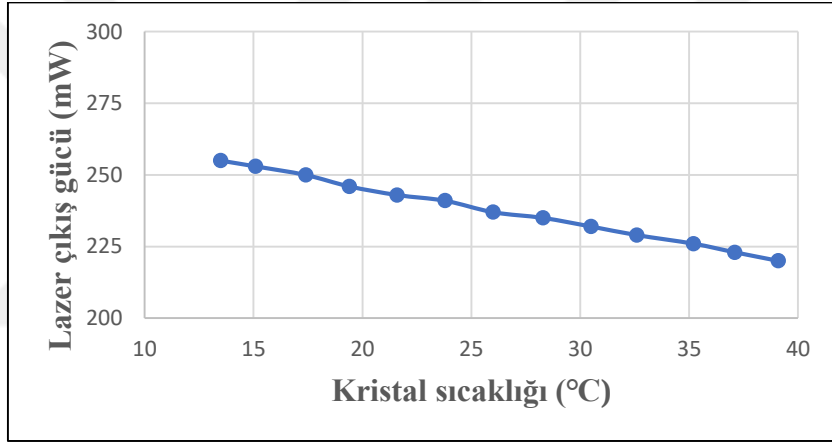
Şekil 139. %4 Katkılı 5-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer çıkış gücünün kristal sıcaklığına bağlı değişim grafiği



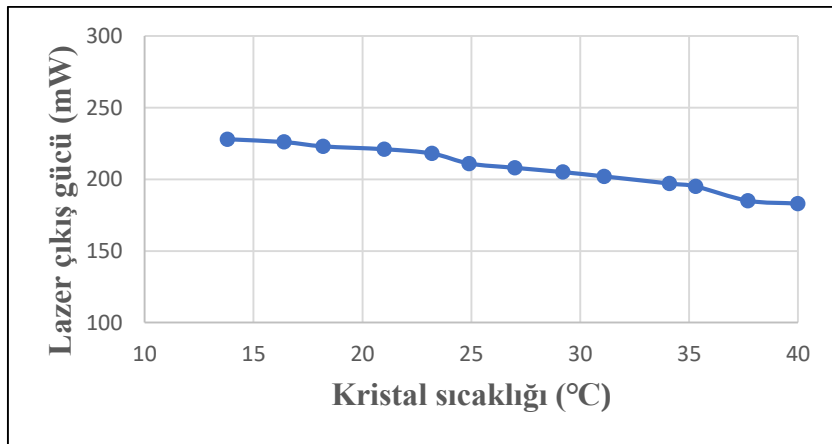
Şekil 140. %4 Katkılı 3-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer çıkış gücünün kristal sıcaklığına bağlı değişim grafiği



Şekil 141. %6 Katkılı 7-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer çıkış gücünün kristal sıcaklığına bağlı değişim grafiği



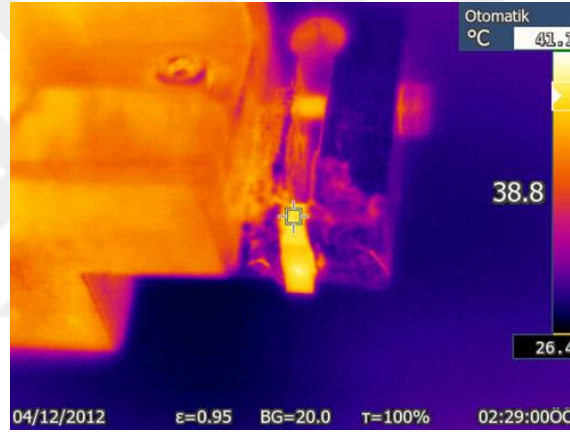
Şekil 142. %6 Katkılı 5-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer çıkış gücünün kristal sıcaklığına bağlı değişim grafiği



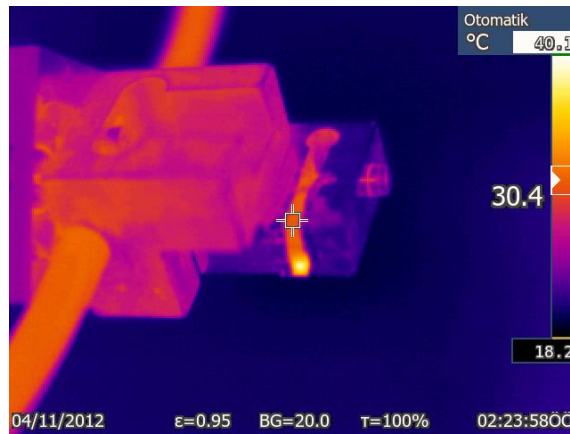
Şekil 143. %6 Katkılı 3-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer çıkış gücünün kristal sıcaklığına bağlı değişim grafiği



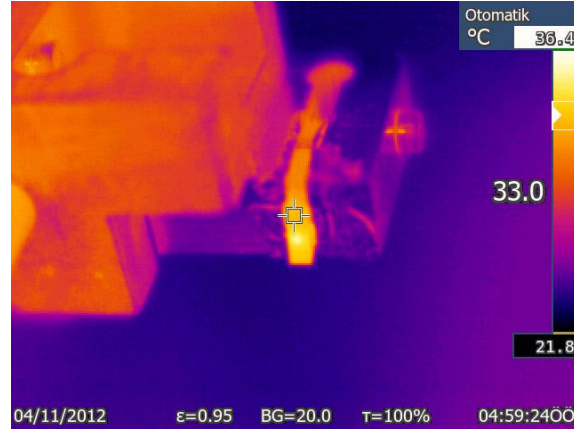
Şekil 144. %6 Katkılı 3-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sistemin kristal su sıcaklığı 37.5 °C iken krisral üzerindeki sıcaklığın portatif termal kamera ölçümü ile alınan görüntüsü (termal kamera ile ölçülen değer 37,2 °C)



Şekil 145. %1,5 Katkılı 3-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sistemin kristal su sıcaklığı 37.5 °C iken krisral üzerindeki sıcaklığın portatif termal kamera ölçümü ile alınan görüntüsü (termal kamera ile ölçülen değer 38,8 °C)



Şekil 146. %6 Katkılı 7-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sistemin kristal su sıcaklığı 30 °C iken krisral üzerindeki sıcaklığın portatif termal kamera ölçümü ile alınan görüntüsü (termal kamera ile ölçülen değer 30,4 °C)



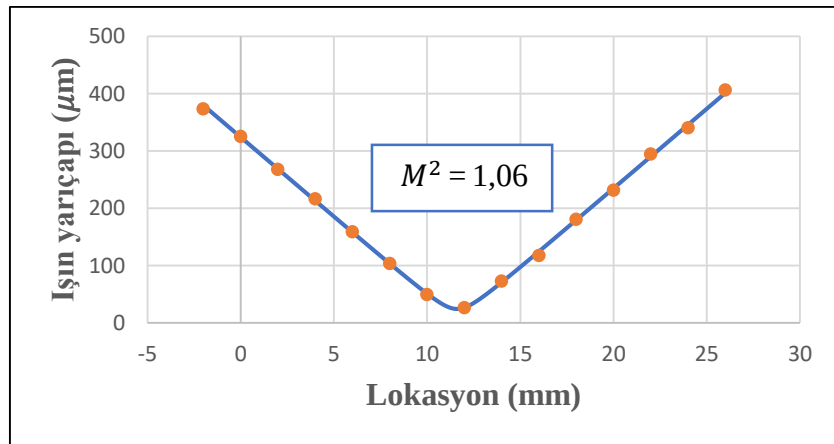
Şekil 147. %2 Katkılı 7-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sistemin kristal su sıcaklığı 30 °C iken krisral üzerindeki sıcaklığın portatif termal kamera ölçümü ile alınan görüntüsü (termal kamera ile ölçülen değer 33 °C)

680 nm’de daralan kılavuz yapıllı lazer diyotlar ile pompalanan farklı katkı oranları ve farklı kristal uzunluklarına sahip Tm:YAG ve Tm:LuAG lazer sistemlerinin ışının yatay ve dikey eksen olmak üzere alınan ışın karakteristiği ölçümlerinin sonucu Tablo 3’de ve elde edilen sonuçların görselleri Şekil 148 ile Şekil 187 arasında gösterilmektedir.

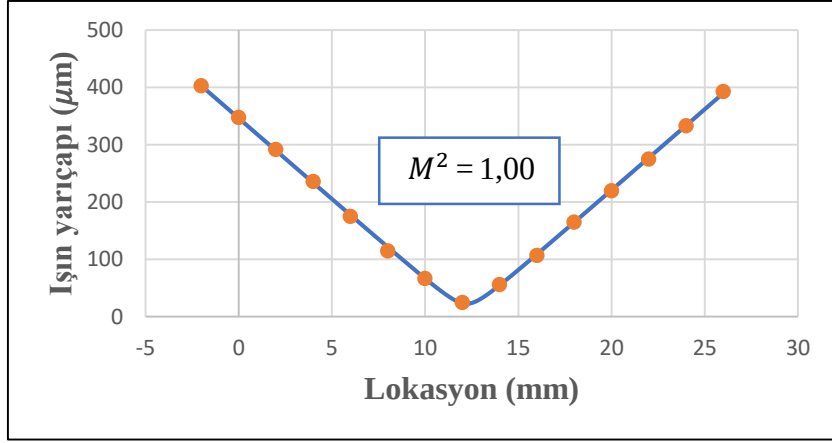
Şekil 148 ve Şekil 187’deki görseller incelendiğinde ışın karakteristiğinin yani $M^2 < 2$ olarak elde edilmesi sistemlerin ideal değerde olduğunu göstermektedir. Lazer sistemlerinin ışın karakteristiği sonuçlarına genel olarak bakılırsa %2 katkılı 9 mm Tm:LuAG lazer sisteminde yatay da 1,62 ve dikey de 1,76 değer bulunması ve %2 katkılı 7 mm Tm:LuAG lazer sisteminde yatay 1,65 değer bulunması; lazer ışının ideal Gauss ışınına göre daha az odaklanmış ve daha geniş bir yapıda olduğunu göstermektedir. Bu durumda ışının daha geniş ve odaklanması daha zayıf olabilmektedir. Işın, daha geniş bir alana yayılması daha az verimli bir odaklanmaya neden olacaktır.

Tablo 3. Tm:YAG ve Tm:LuAG lazerlerinin bıçak kenar yöntemi ile elde edilen M^2 ölçüm sonuçları

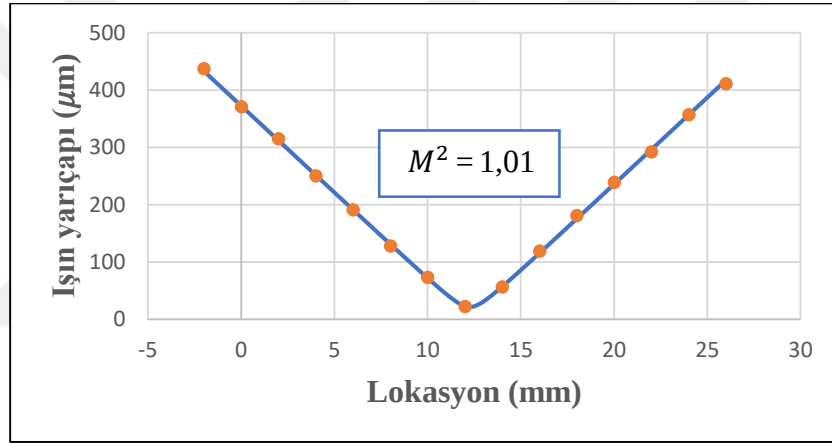
Kristal	Katkı Oranı (%)	Uzunluk (mm)	M^2 Yatay	M^2 Dikey
Tm:YAG	1,5	9	1,06	1,00
		7	1,01	1,12
		5	1,14	1,04
		3	1,03	1,00
	3	7	1,03	1,02
		5	1,06	1,47
		3	1,00	1,10
	6	7	1,00	1,06
		5	1,03	1,03
		3	1,04	1,78
Tm:LuAG	2	9	1,62	1,76
		7	1,65	1,07
		5	1,24	1,72
		3	1,02	1,01
	4	7	1,21	1,07
		5	1,00	1,03
		3	1,12	1,33
	6	7	1,01	1,03
		5	1,00	1,00
		3	1,07	1,11



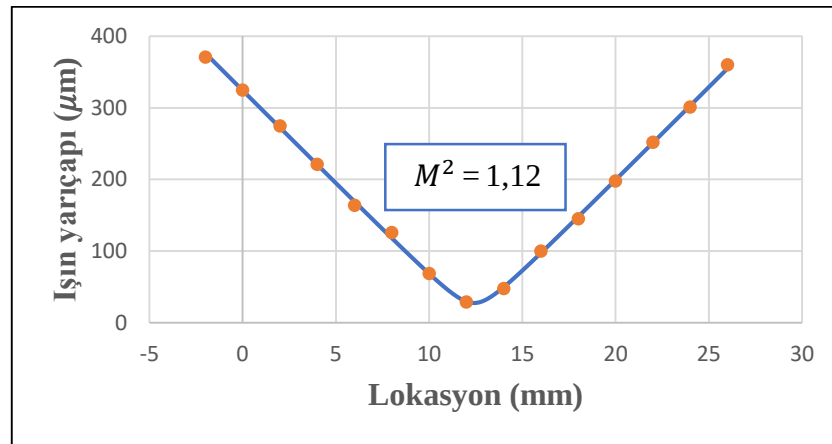
Şekil 148. %1,5 Katkılı 9-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazerinin yatay eksenindeki M^2 ölçümü



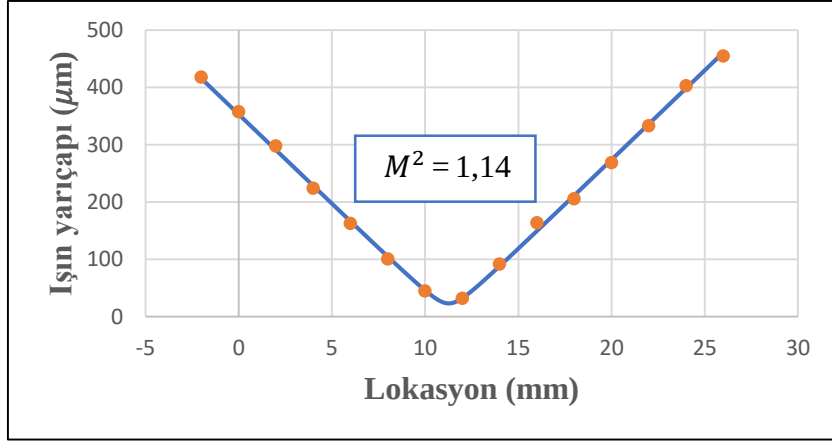
Şekil 149. %1,5 Katkılı 9-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazerinin dikey eksenindeki M^2 ölçümü



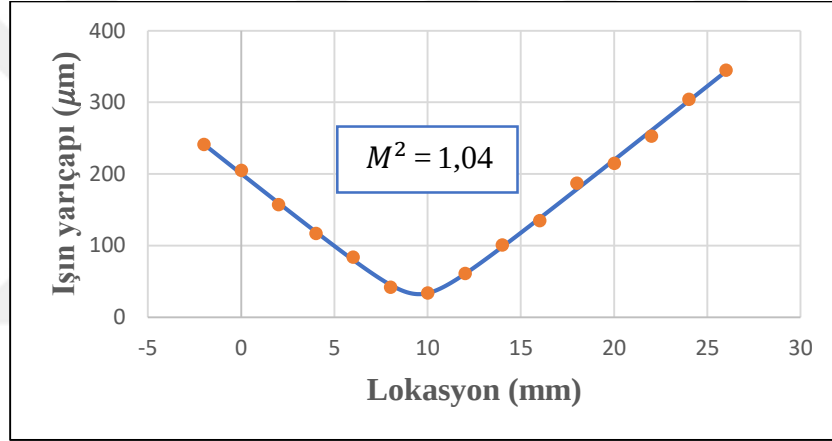
Şekil 150. %1,5 Katkılı 7-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazerinin yatay eksenindeki M^2 ölçümü.



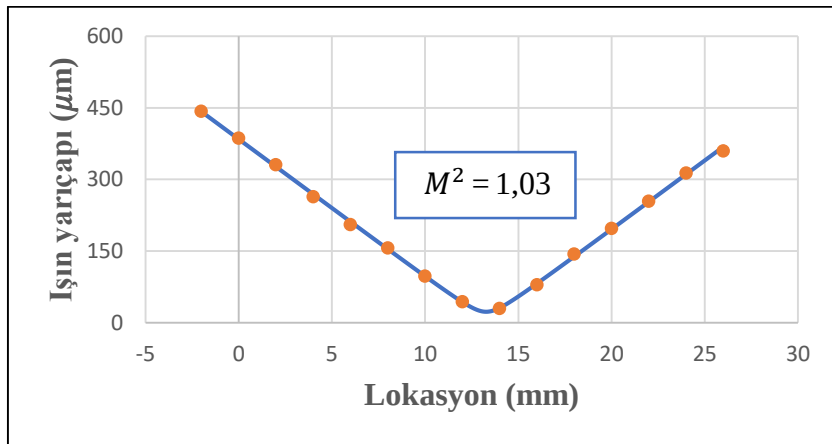
Şekil 151. %1,5 Katkılı 7-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazerinin dikey eksenindeki M^2 ölçümü



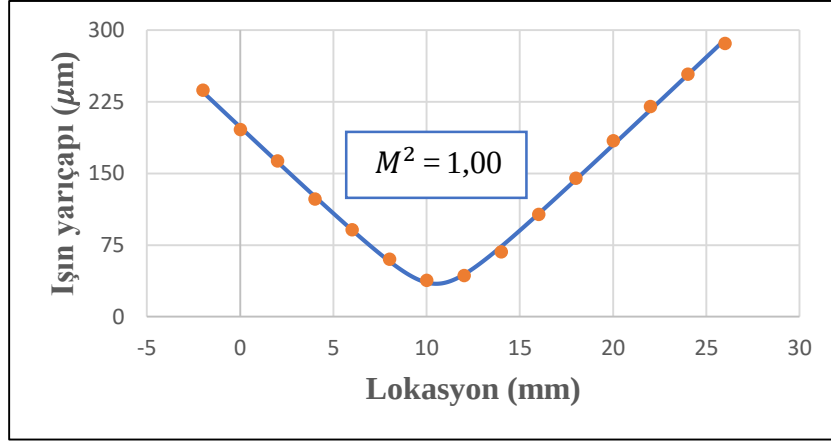
Şekil 152. %1,5 Katkılı 5-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazerinin yatay eksenindeki M^2 ölçümü



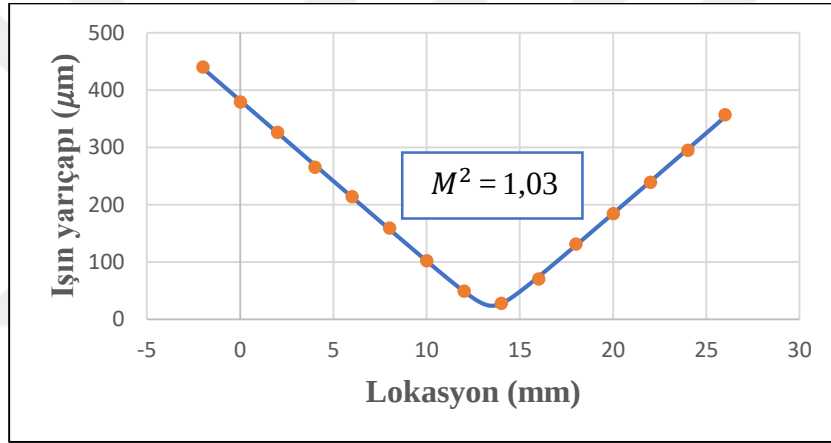
Şekil 153. %1,5 Katkılı 5-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazerinin dikey eksenindeki M^2 ölçümü



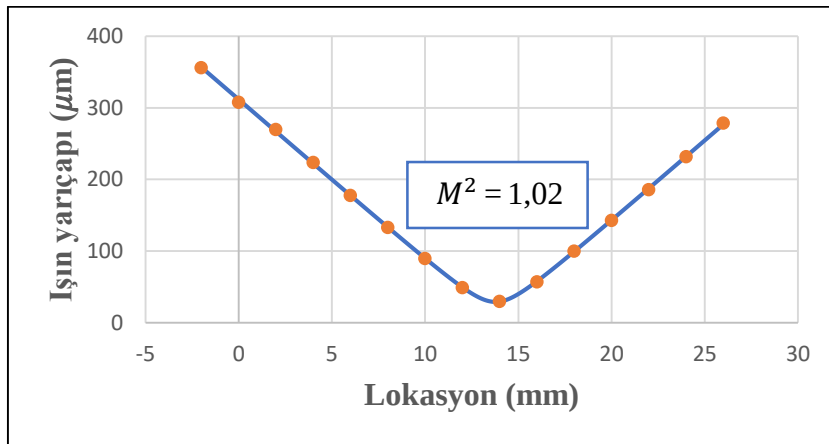
Şekil 154. %1,5 Katkılı 3-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazerinin yatay eksenindeki M^2 ölçümü



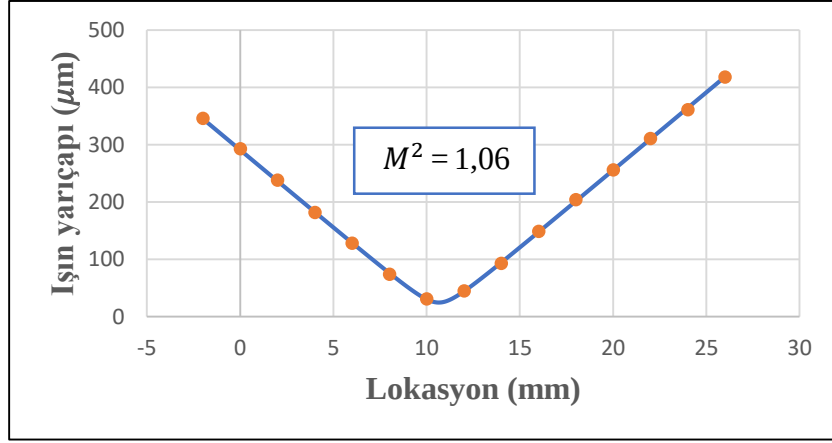
Şekil 155. %1,5 Katkılı 3-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazerinin dikey eksenindeki M^2 ölçümü



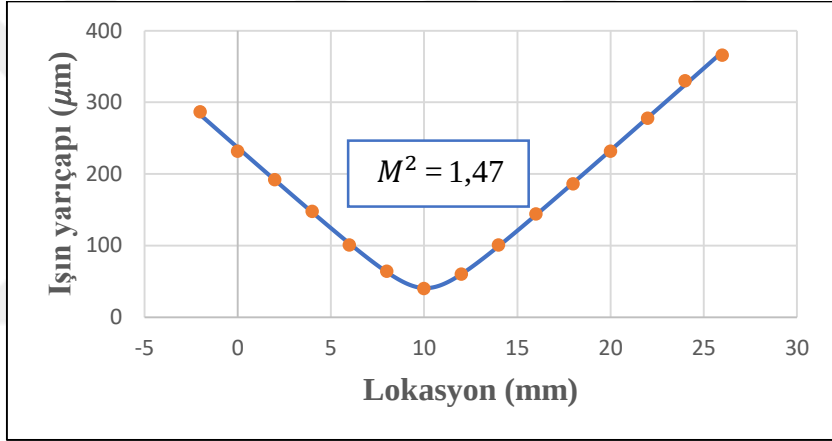
Şekil 156. %3 Katkılı 7-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazerinin yatay eksenindeki M^2 ölçümü



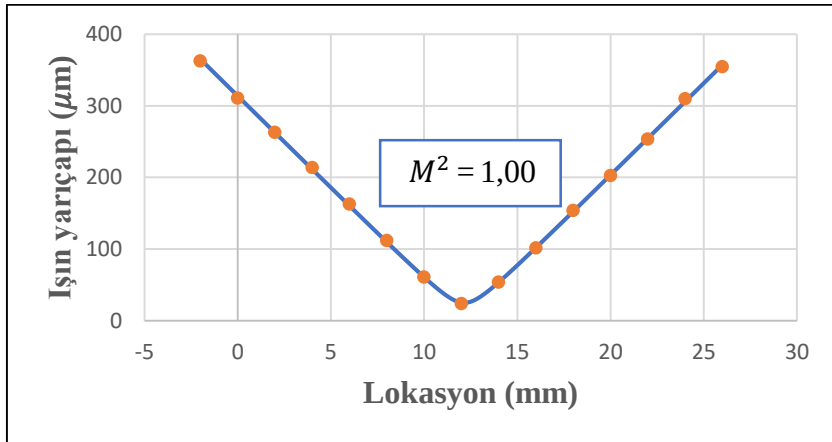
Şekil 157. %3 Katkılı 7-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazerinin dikey eksenindeki M^2 ölçümü



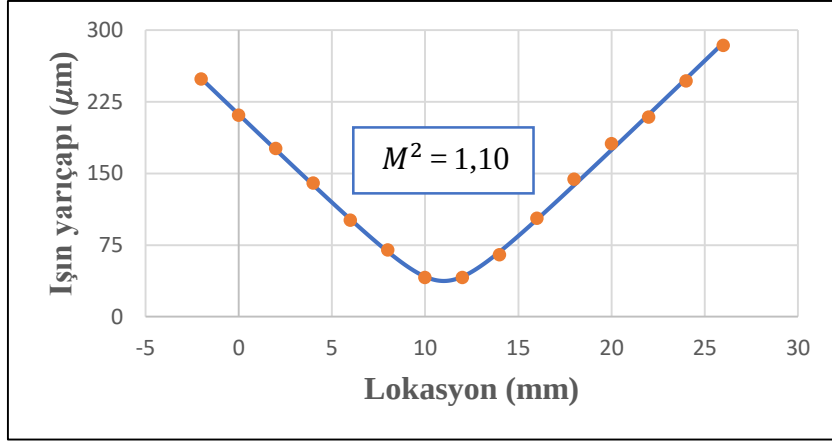
Şekil 158. %3 Katkılı 5-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazerinin yatay eksenindeki M^2 ölçümü



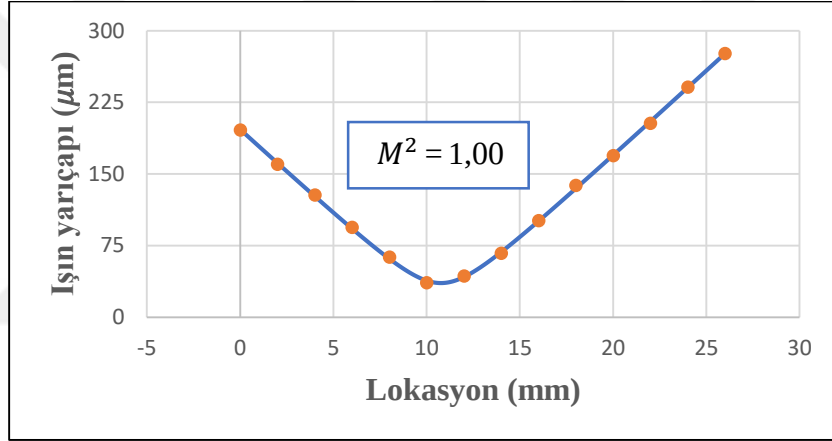
Şekil 159. %3 Katkılı 5-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazerinin dikey eksenindeki M^2 ölçümü



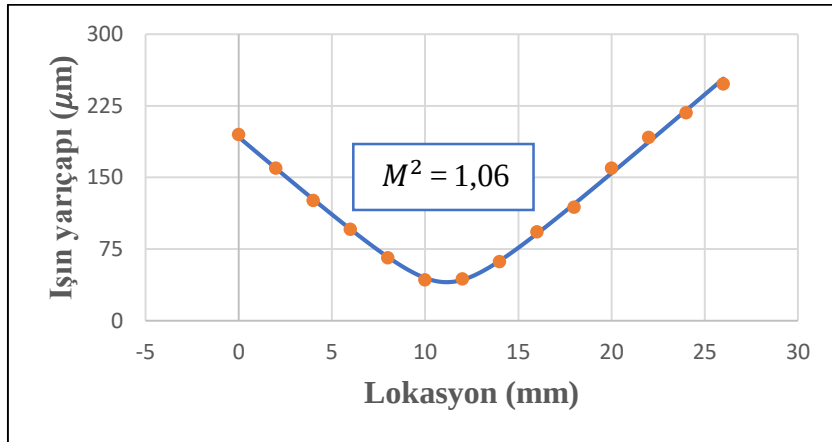
Şekil 160. %3 Katkılı 3-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazerinin yatay eksenindeki M^2 ölçümü



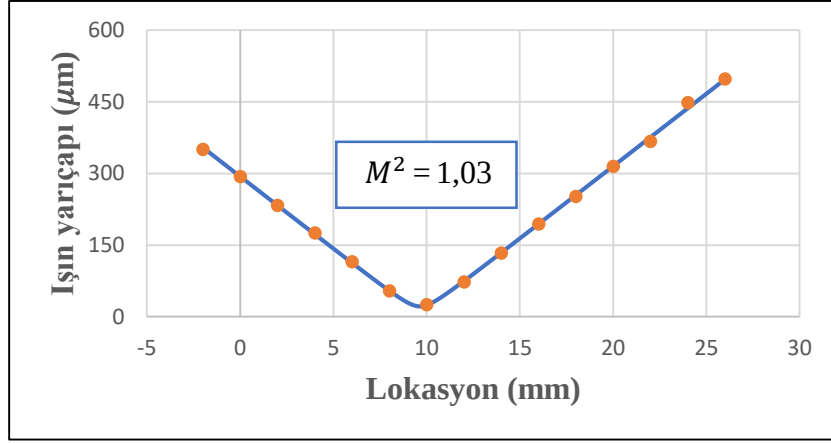
Şekil 161. %3 Katkılı 3-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazerinin dikey eksenindeki M^2 ölçümü



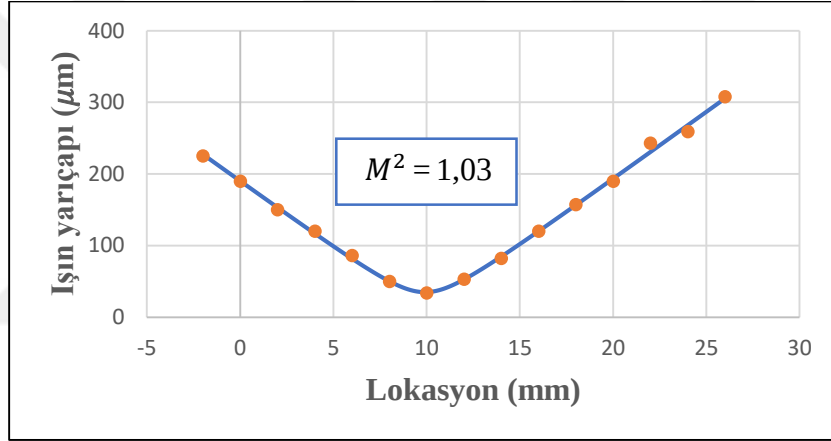
Şekil 162. %6 Katkılı 7-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazerinin yatay eksenindeki M^2 ölçümü



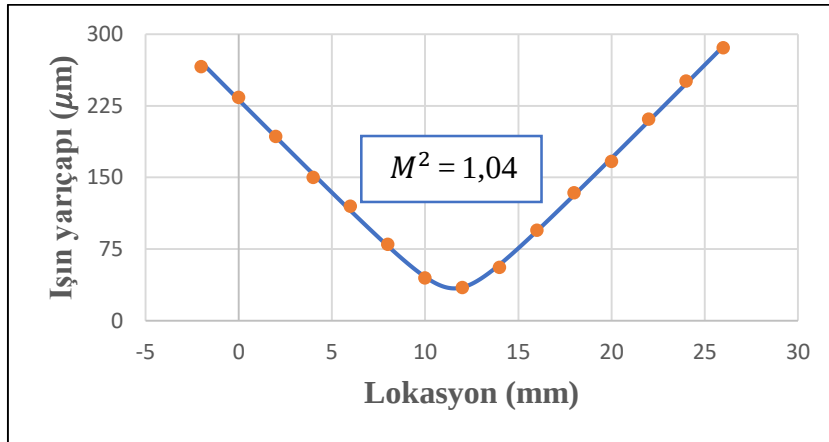
Şekil 163. %6 Katkılı 7-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazerinin dikey eksenindeki M^2 ölçümü



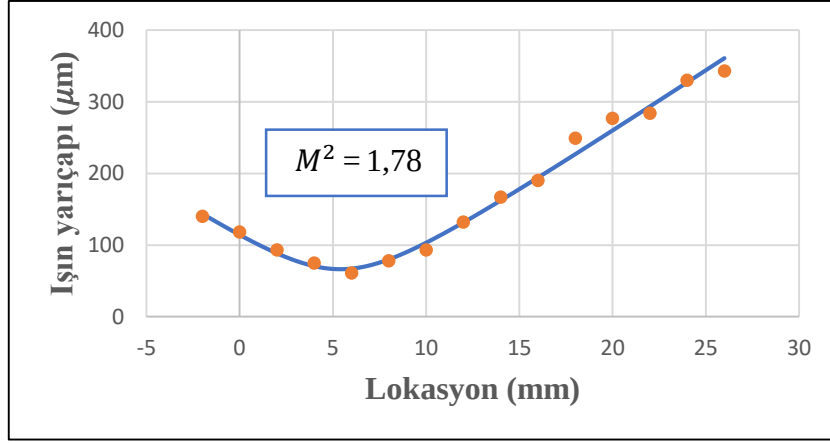
Şekil 164. %6 Katkılı 5-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazerinin yatay eksenindeki M^2 ölçümü



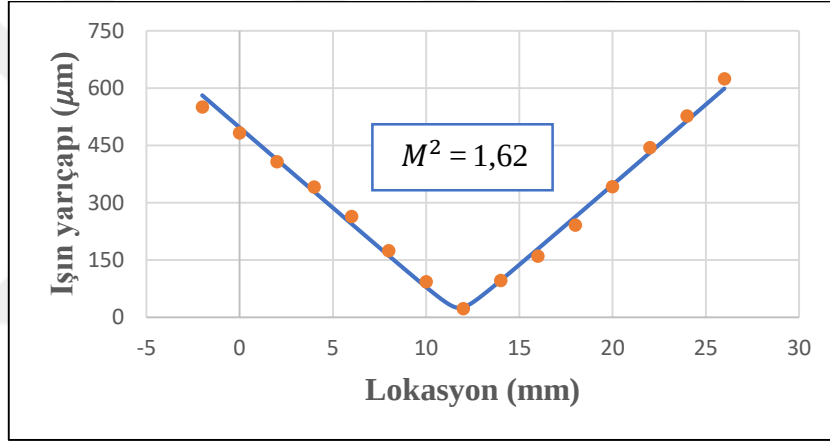
Şekil 165. %6 Katkılı 5-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazerinin dikey eksenindeki M^2 ölçümü



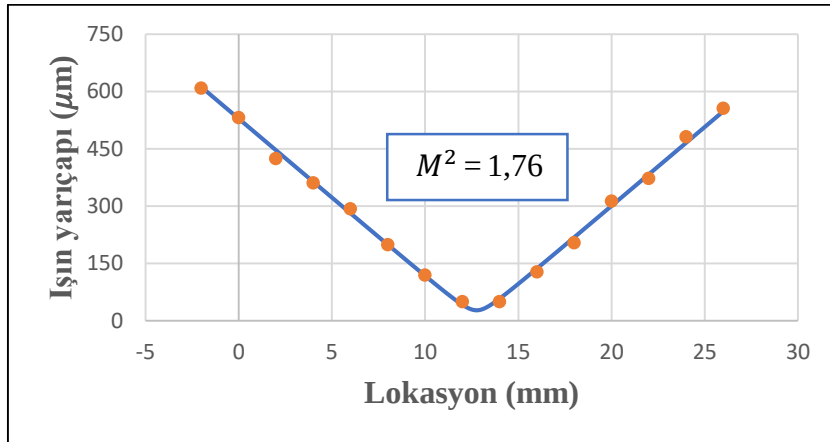
Şekil 166. %6 Katkılı 3-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazerinin yatay eksenindeki M^2 ölçümü



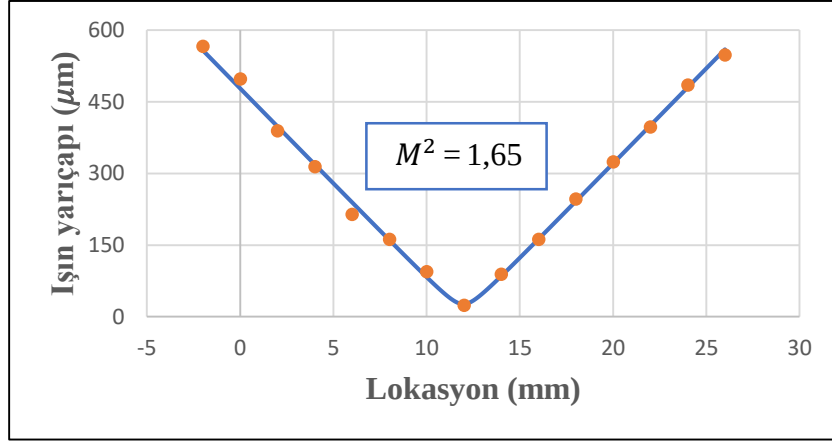
Şekil 167. %6 Katkılı 3-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazerinin dikey eksenindeki M^2 ölçümü



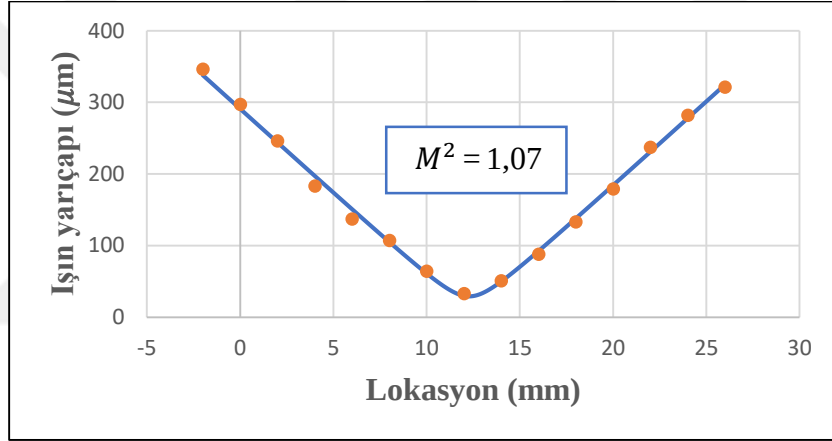
Şekil 168. %2 Katkılı 9-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazerinin yatay eksenindeki M^2 ölçümü



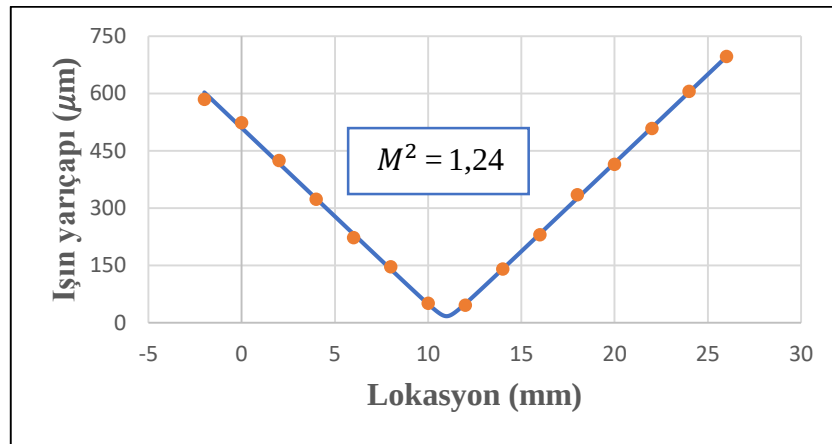
Şekil 169. %2 Katkılı 9-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazerinin dikey eksenindeki M^2 ölçümü



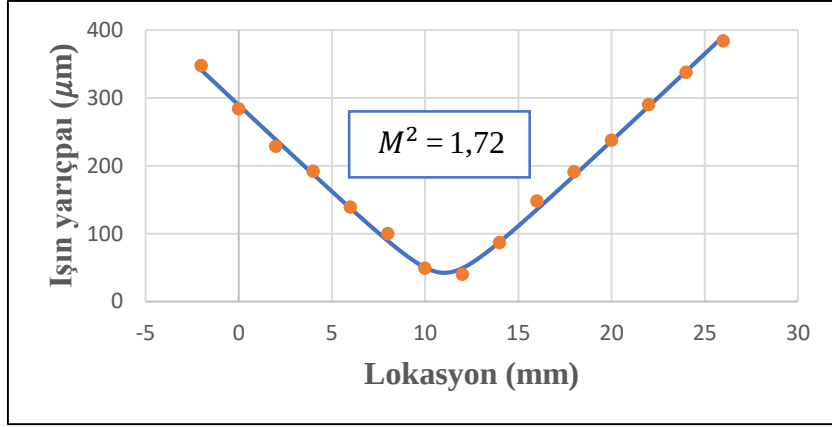
Şekil 170. %2 Katkılı 7-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazerinin yatay eksenindeki M^2 ölçümü



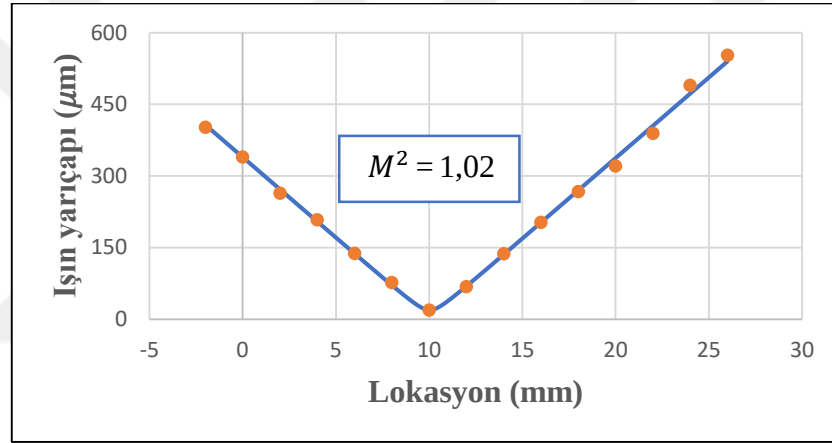
Şekil 171. %2 Katkılı 7-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazerinin dikey eksenindeki M^2 ölçümü



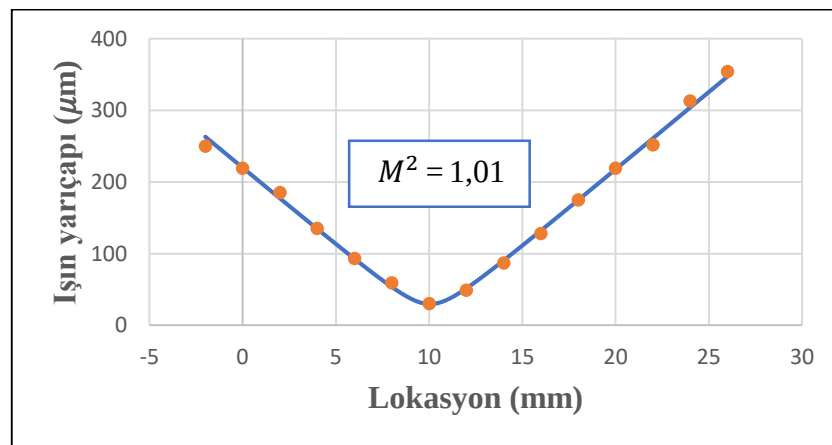
Şekil 172. %2 Katkılı 5-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazerinin yatay eksenindeki M^2 ölçümü



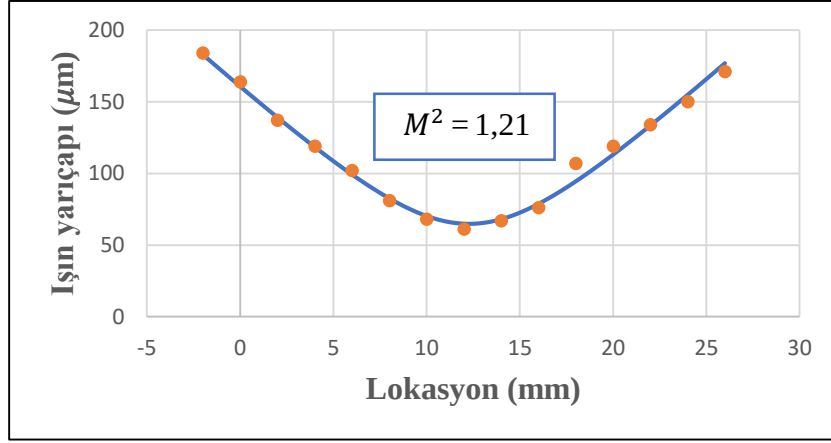
Şekil 173. %2 Katkılı 5-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazerinin dikey eksenindeki M^2 ölçümü



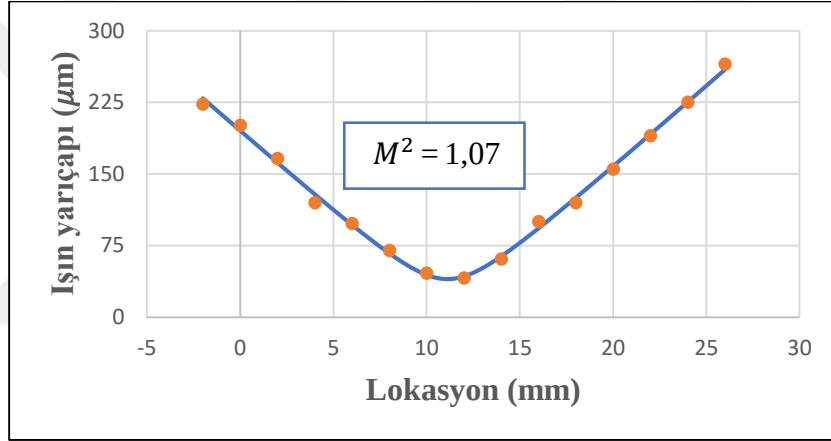
Şekil 174. %2 Katkılı 3-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazerinin yatay eksenindeki M^2 ölçümü



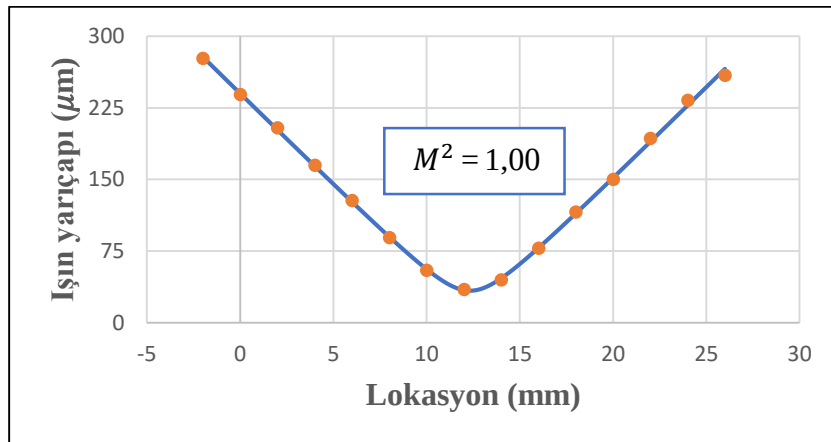
Şekil 175. %2 Katkılı 3-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazerinin dikey eksenindeki M^2 ölçümü



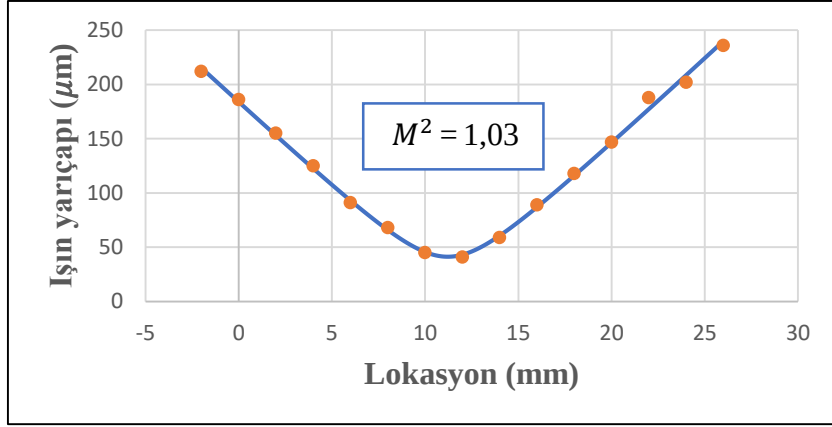
Şekil 176. %4 Katkılı 7-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazerinin yatay eksenindeki M^2 ölçümü



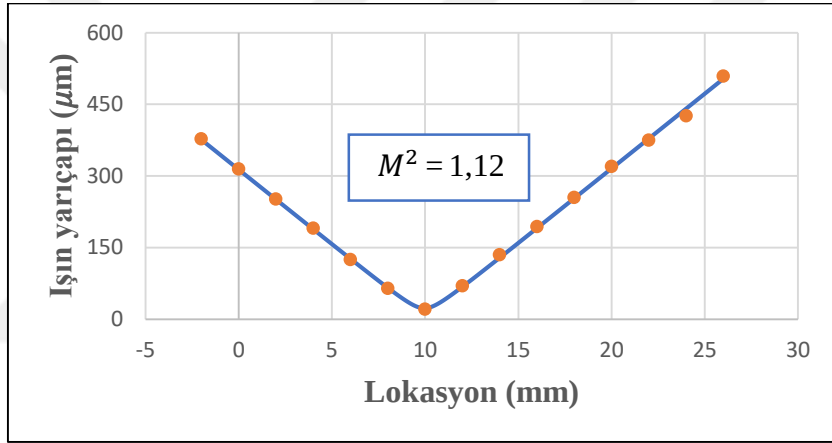
Şekil 177. %4 Katkılı 7-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazerinin dikey eksenindeki M^2 ölçümü



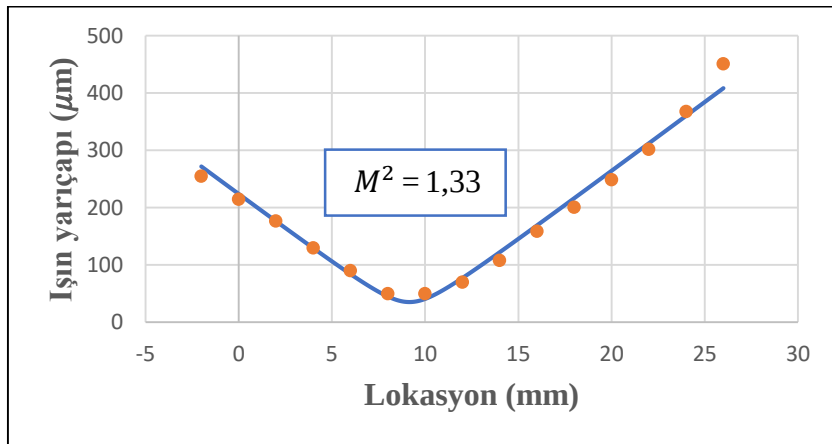
Şekil 178. %4 Katkılı 5-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazerinin yatay eksenindeki M^2 ölçümü



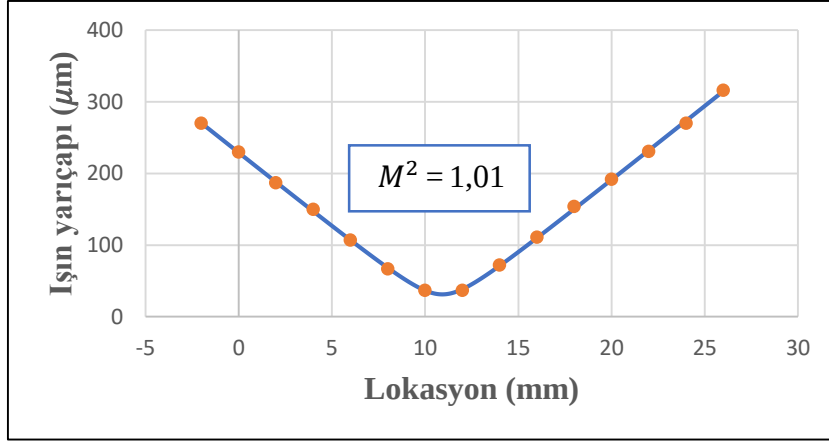
Şekil 179. %4 Katkılı 5-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazerinin dikey eksenindeki M^2 ölçümü



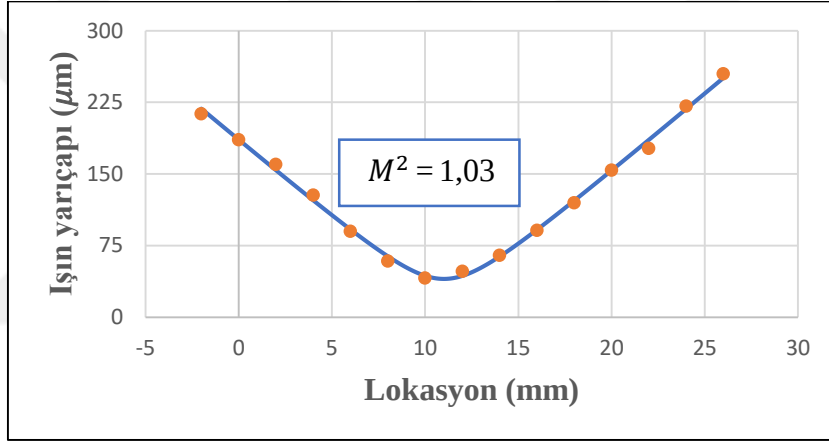
Şekil 180. %4 Katkılı 3-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazerinin yatay eksenindeki M^2 ölçümü



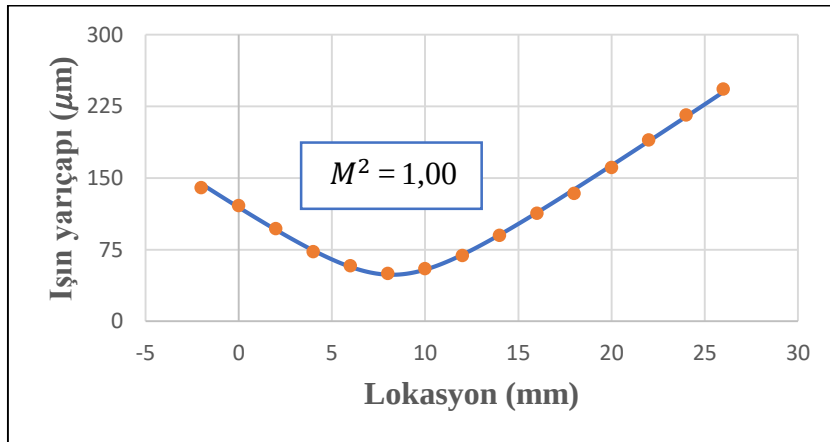
Şekil 181. %4 Katkılı 3-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazerinin dikey eksenindeki M^2 ölçümü



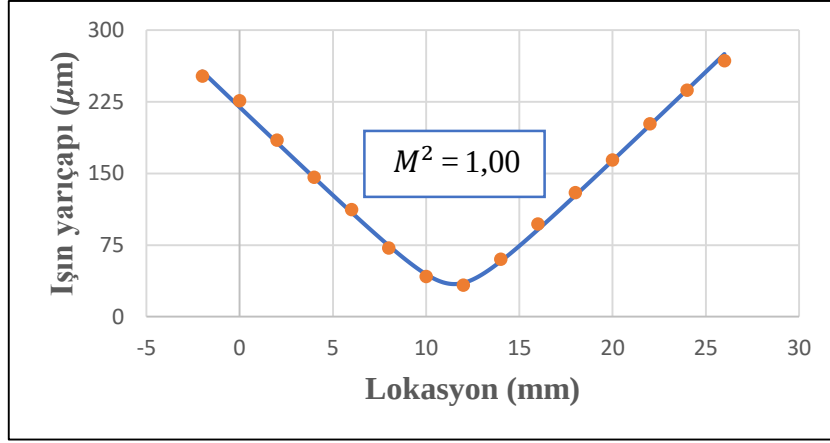
Şekil 182. %6 Katkılı 7-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazerinin yatay eksenindeki M^2 ölçümü



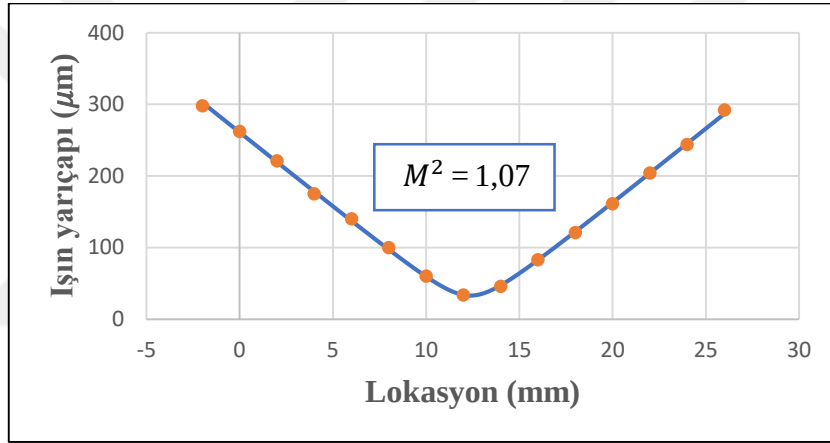
Şekil 183. %6 Katkılı 7-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazerinin dikey eksenindeki M^2 ölçümü



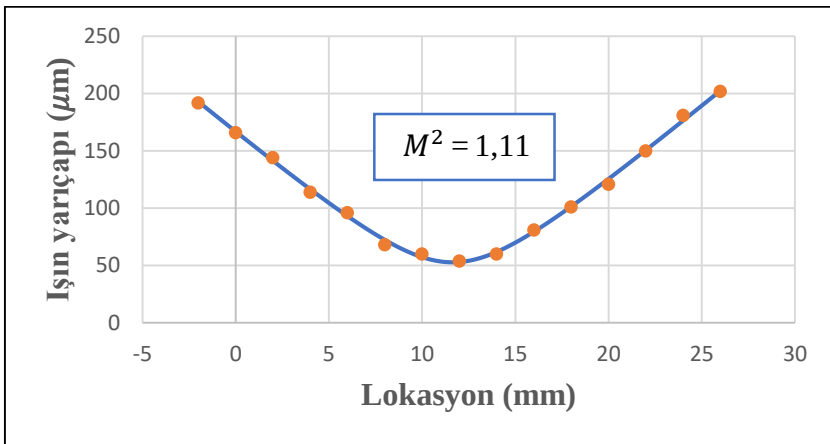
Şekil 184. %6 Katkılı 5-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazerinin yatay eksenindeki M^2 ölçümü



Şekil 185. %6 Katkılı 5-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazerinin dikey eksenindeki M^2 ölçümü



Şekil 186. %6 Katkılı 3-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazerinin yatay eksenindeki M^2 ölçümü



Şekil 187. %6 Katkılı 3-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazerinin dikey eksenindeki M^2 ölçümü

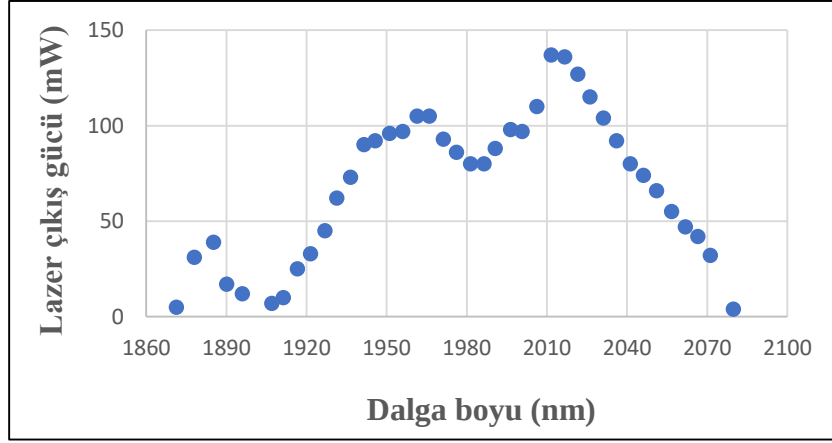
3.4. Tm:YAG ve Tm:LuAG Lazer Sistemlerinin Dalga Boyu Değişim Aralığı Grafikleri

680 nm’de daralan kılavuz yapılı lazer diyotlar ile pompalanan farklı katkı oranları ve farklı kristal uzunluklarına sahip Tm:YAG ve Tm:LuAG lazer sistemlerinde x-katlamalı 4 aynalı rezonatör içerisinde HR koluna eklenen çift kırınımlı prizma ile elde edilen dalga boyu değişim aralıklarının ölçümlerinin sonucu Tablo 4’de ve görselleri Şekil 188 ile Şekil 207 arasında gösterilmektedir.

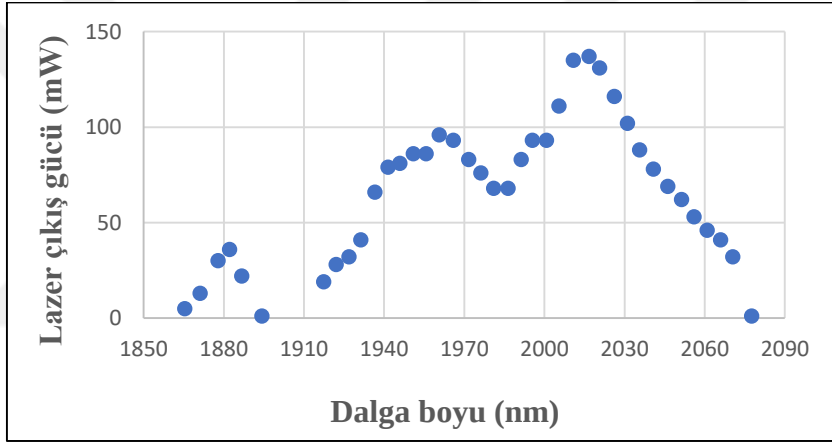
Şekil 188 ile Şekil 207 görselleri incelendiğinde dalga boyu değişim aralığının en geniş olduğu örnek %3 katkılı 7 mm Tm:YAG lazer sisteminde dalga boyu değişimi 1872 nm’de başlayıp 2088 nm’de bitmektedir. Bu aralıktaki dalga boyu farkı 216 nm’ye denk gelmektedir.

Tablo 4. Tm:YAG ve Tm:LuAG lazerler sistemlerine çift kırınımlı prizma eklenmesi ile elde edilen dalga boyu değişimi

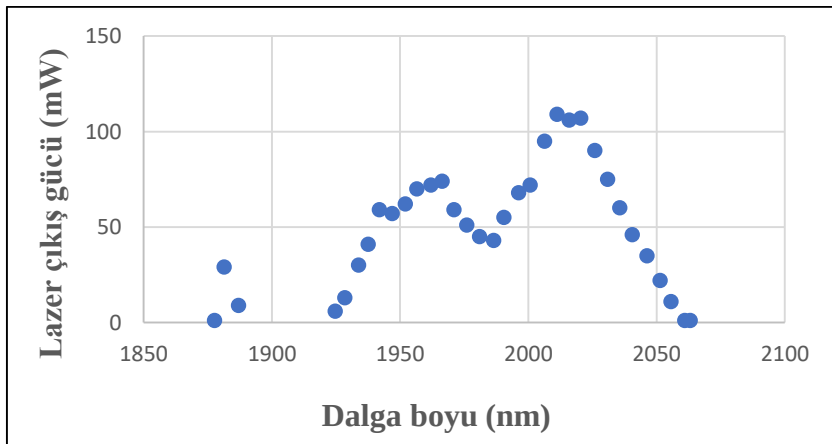
Kristal	Katkı Oranı (%)	Uzunluk (mm)	Dalga Boyu Değişim Aralığı (nm)	Dalga Boyu Değişim Miktarı (nm)
Tm:YAG	1,5	9	1871-2080	209
		7	1865-2078	213
		5	1878-2063	185
		3	1872-2051	179
	3	7	1872-2088	216
		5	1878-2080	202
		3	1871-2079	208
	6	7	1924-2097	173
		5	1946-2074	128
		3	1924-2077	153
Tm:LuAG	2	9	1921-2076	155
		7	1921-2074	153
		5	1871-2079	208
		3	1871-2075	204
	4	7	1921-2086	165
		5	1909-2092	183
		3	1874-2078	204
	6	7	1951-2076	125
		5	1951-2078	127
		3	1917-2082	165



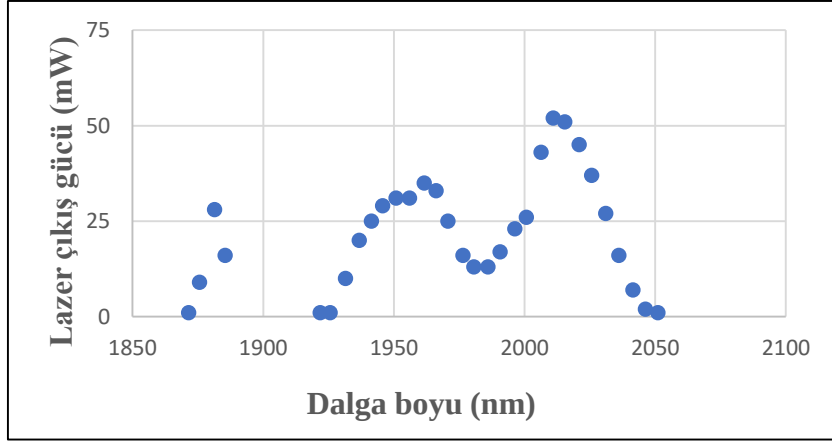
Şekil 188. %1,5 Katkılı 9-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminin dalga boyu değişim aralığı



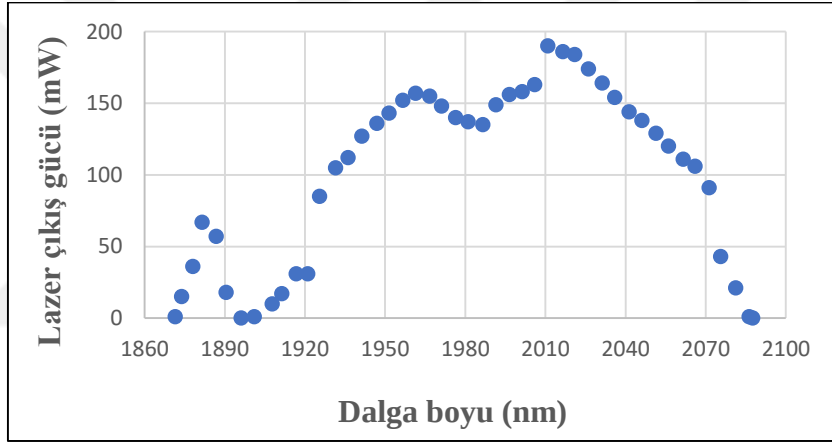
Şekil 189. %1,5 Katkılı 7-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminin dalga boyu değişim aralığı



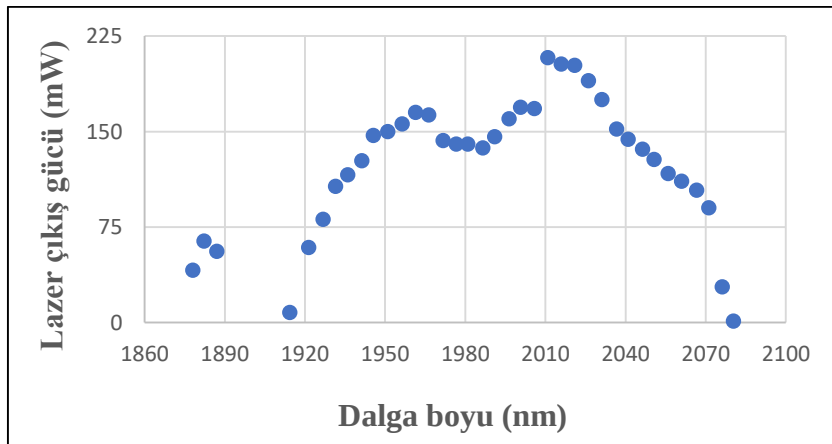
Şekil 190. %1,5 Katkılı 5-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminin dalga boyu değişim aralığı



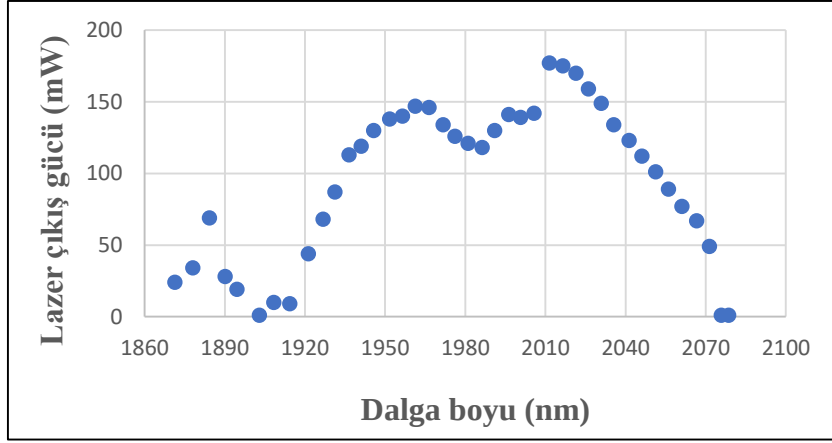
Şekil 191. %1,5 Katkılı 3-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminin dalga boyu değişim aralığı



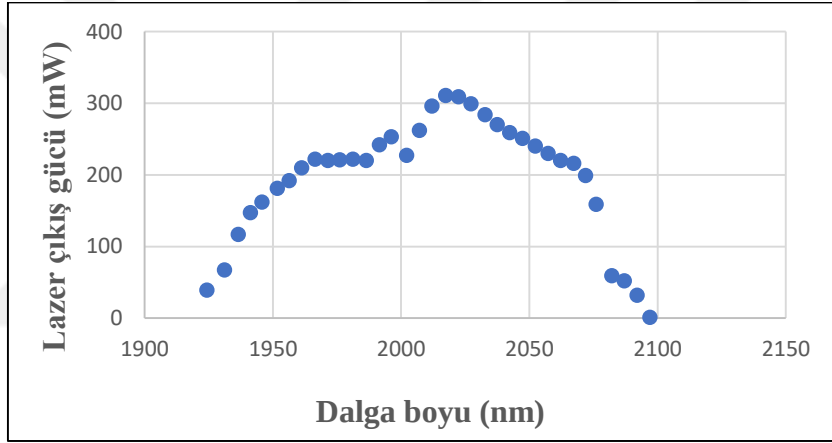
Şekil 192. %3 Katkılı 7-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminin dalga boyu değişim aralığı



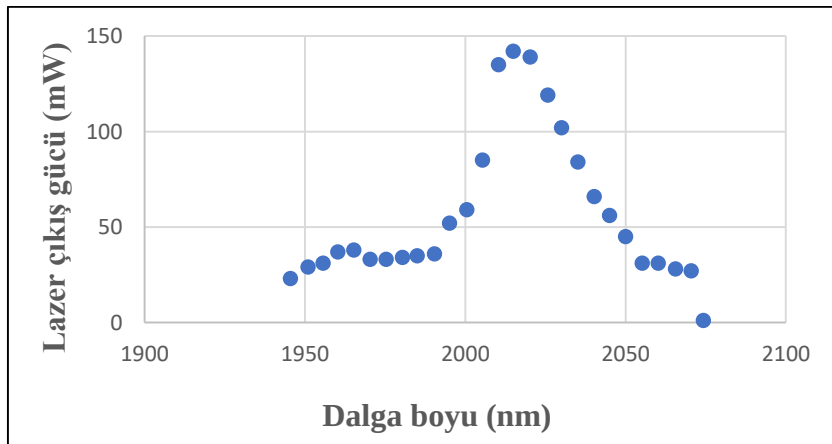
Şekil 193. %3 Katkılı 5-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminin dalga boyu değişim aralığı



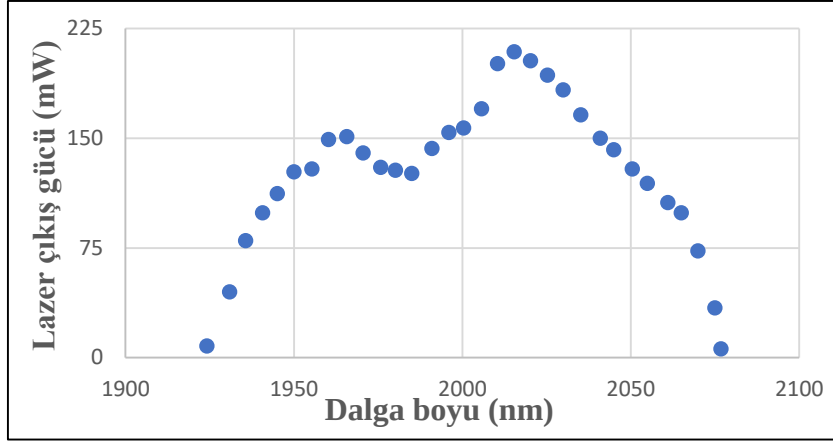
Şekil 194. %3 Katkılı 3-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminin dalga boyu değişim aralığı



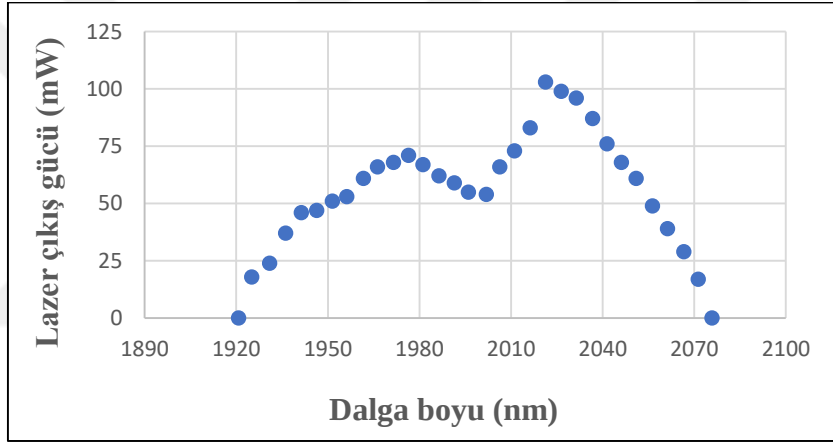
Şekil 195. %6 Katkılı 7-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminin dalga boyu değişim aralığı



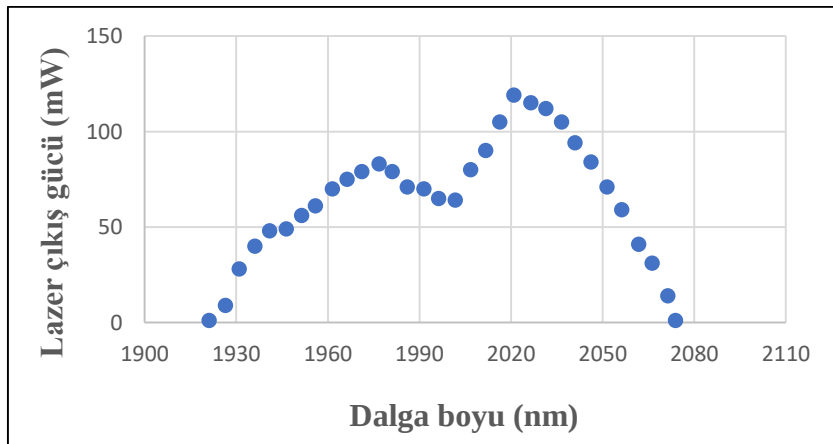
Şekil 196. %6 Katkılı 5-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminin dalga boyu değişim aralığı



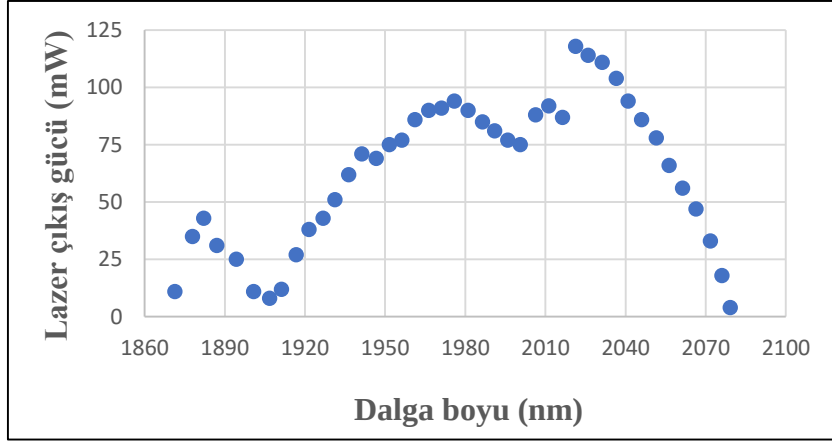
Şekil 197. %6 Katkılı 3-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminin dalga boyu değişim aralığı



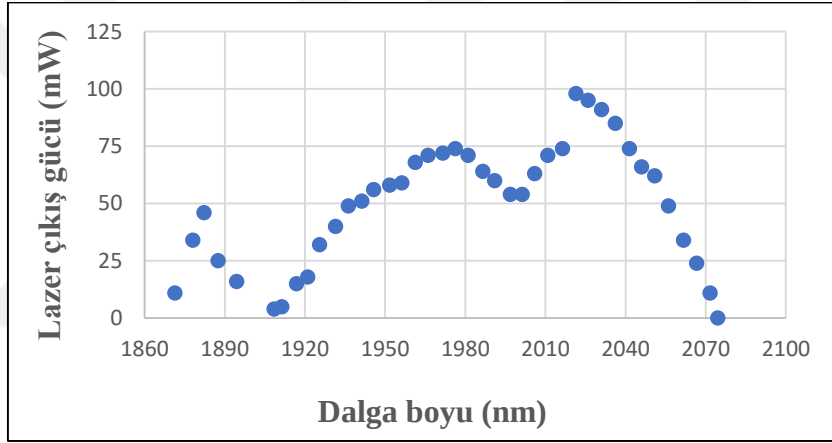
Şekil 198. %2 Katkılı 9-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminin dalga boyu değişim aralığı



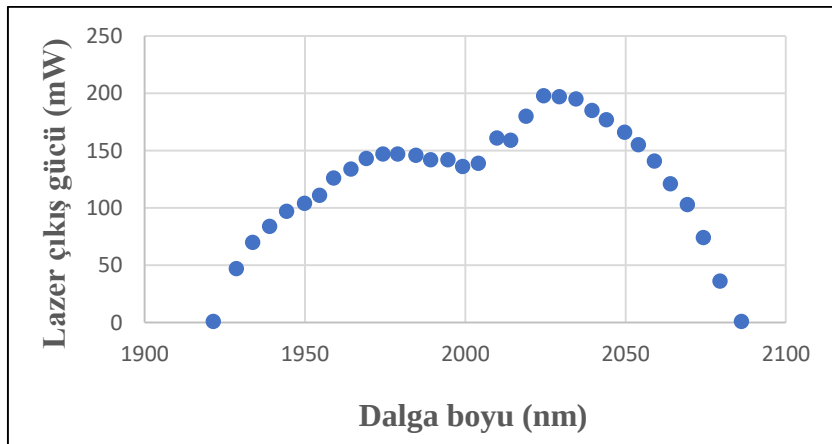
Şekil 199. %2 Katkılı 7-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminin dalga boyu değişim aralığı



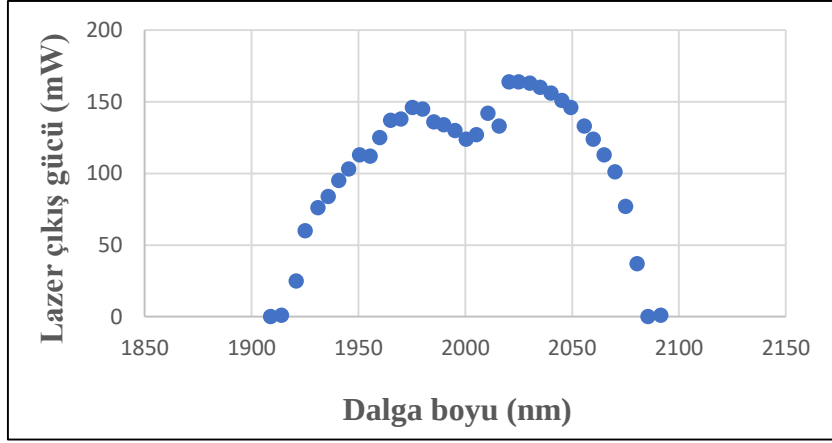
Şekil 200. %2 Katkılı 5-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminin dalga boyu değişim aralığı



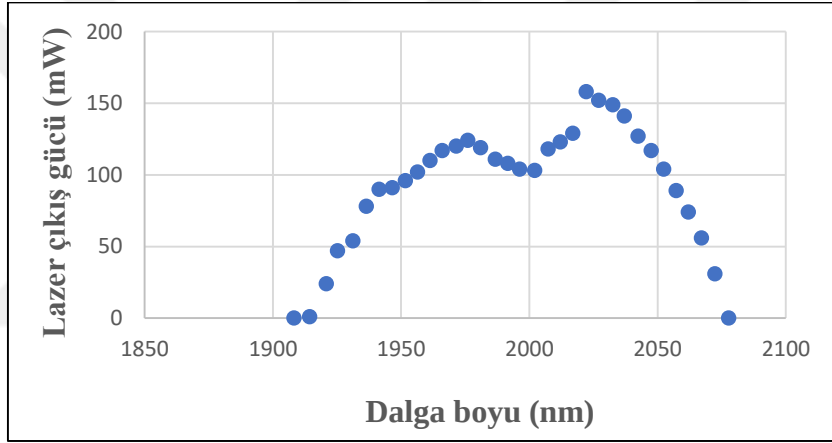
Şekil 201. %2 Katkılı 3-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminin dalga boyu değişim aralığı



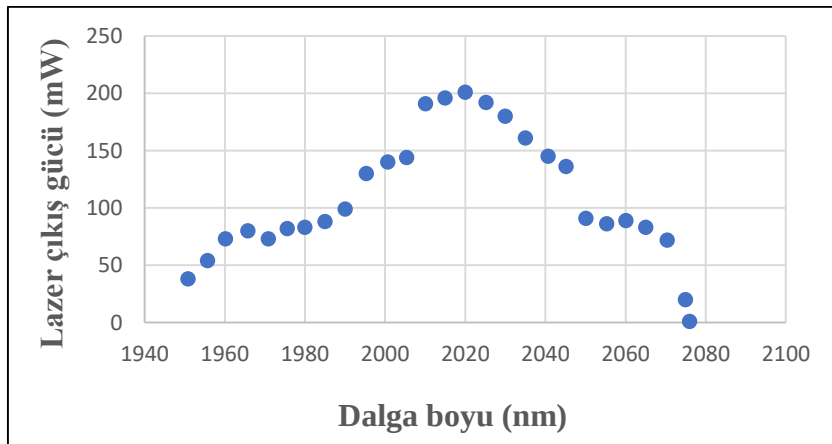
Şekil 202. %4 Katkılı 7-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminin dalga boyu değişim aralığı



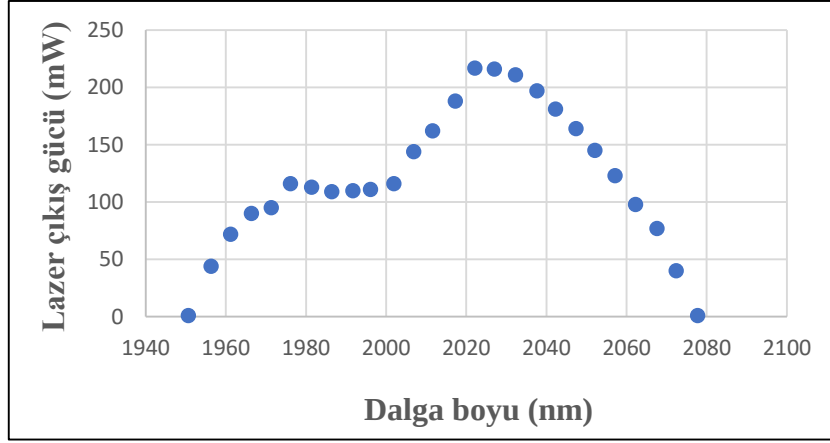
Şekil 203. %4 Katkılı 5-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminin dalga boyu değişim aralığı



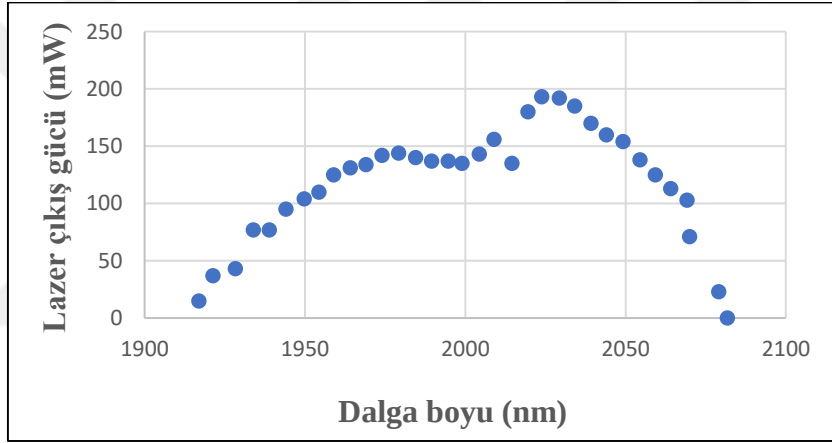
Şekil 204. %4 Katkılı 3-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminin dalga boyu değişim aralığı



Şekil 205. %6 Katkılı 7-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminin dalga boyu değişim aralığı



Şekil 206. %6 Katkılı 5-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminin dalga boyu değişim aralığı



Şekil 207. %6 Katkılı 3-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminin dalga boyu değişim aralığı

3.5. Tm:YAG ve Tm:LuAG Lazer Sistemlerinin Çift Dalga Boyu Işıma Spektrum Grafikleri

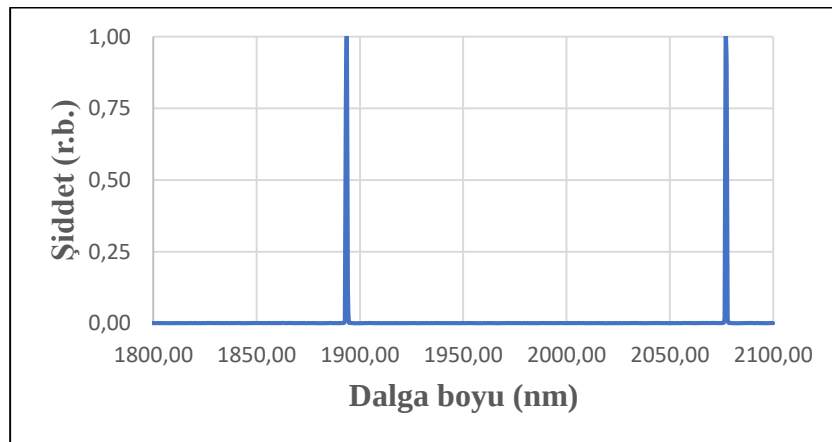
680 nm'de daralan kılavuz yapıları lazer diyotları ile pompalanan farklı katkı oranları ve farklı kristal uzunluklarına sahip Tm:YAG ve Tm:LuAG lazer sistemlerinde rezonatör içerisinde HR koluna eklenen çift kırınımlı prizmanın belirli açısında çift dalga boyunda ışınım gözlemlenmiş olup ölçümlerinin genel sonucu Tablo 5'de ve görselleri Şekil 208 ile Şekil 225 arasında gösterilmektedir.

Şekil 208 ile Şekil 225 görselleri incelendiğinde aynı anda ekranda duran birbirinden en uzak iki dalga boyunun örnek %3 katkılı 7 mm Tm:YAG lazer

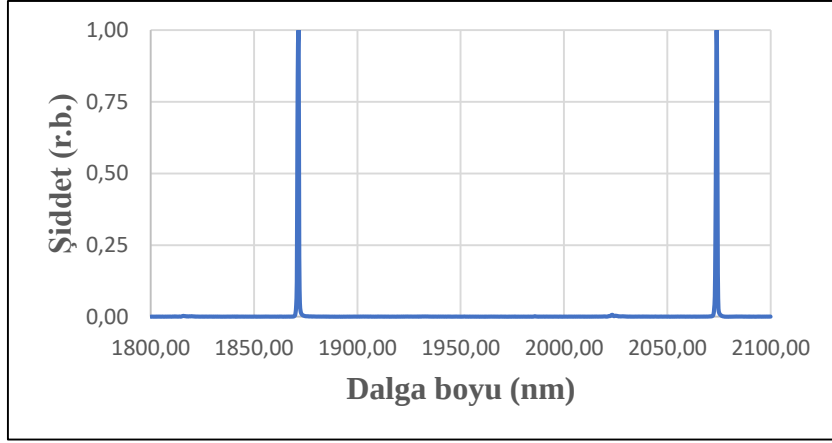
sisteminde çift dalga boyu ışıması 1878 nm’de ve 2082 nm’de görülmektedir ve gücü 48 mW’tır.

Tablo 5. Tm:YAG ve Tm:LuAG lazer sistemlerine çift kırınımlı prizma eklenmesi ile elde edilen çift dalga boyu ışıma spektrumu

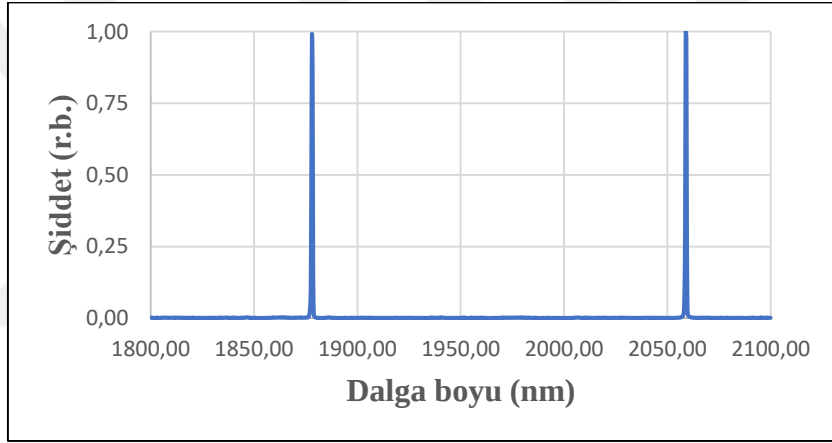
Kristal	Katkı Oranı (%)	Uzunluk (mm)	Çift Dalga Boyu (nm)	Güç (mW)
Tm:YAG	1,5	9	1894 ve 2077	13
		7	1871 ve 2074	6
		5	1878 ve 2059	10
		3	1882 ve 2031	23
	3	7	1878 ve 2082	48
		5	1927 ve 2080	153
		3	1888 ve 2072	38
	6	7	-	-
		5	2012 ve 2017	143
		3	1945 ve 2012	15
Tm:LuAG	2	9	1974 ve 2055	72
		7	1957 ve 2057	49
		5	1882 ve 2066	55
		3	1879 ve 2060	35
	4	7	1980 ve 2022	43
		5	1946 ve 2021	16
		3	1973 ve 2047	74
	6	7	-	-
		5	2008 ve 2018	64
		3	1978 ve 2021	23



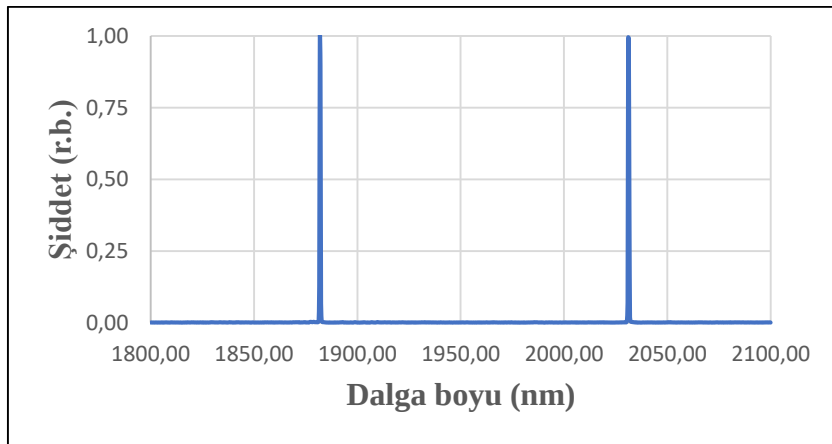
Şekil 208. %1,5 Katkılı 9-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminden elde edilen çift dalga boyu ışıma spektrumu



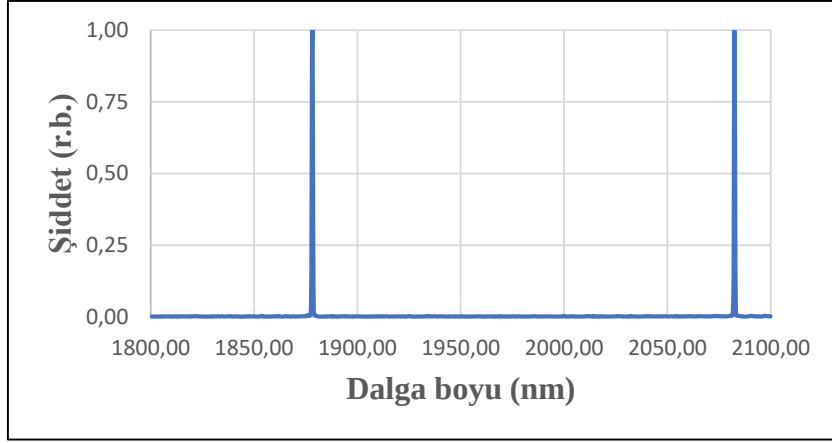
Şekil 209. %1,5 Katkılı 7-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminden elde edilen çift dalga boyu ışıma spektrumu



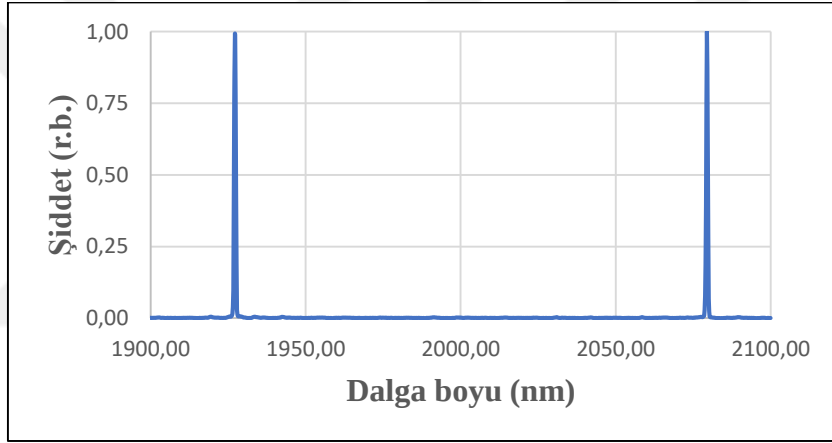
Şekil 210. %1,5 Katkılı 5-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminden elde edilen çift dalga boyu ışıma spektrumu



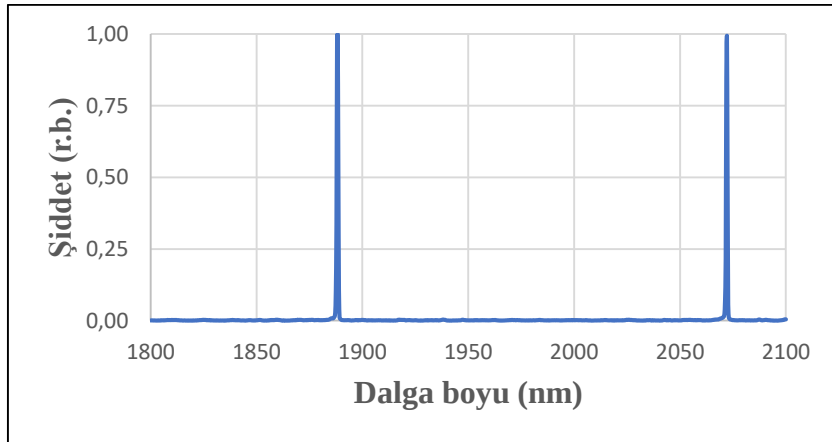
Şekil 211. %1,5 Katkılı 3-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminden elde edilen çift dalga boyu ışıma spektrumu



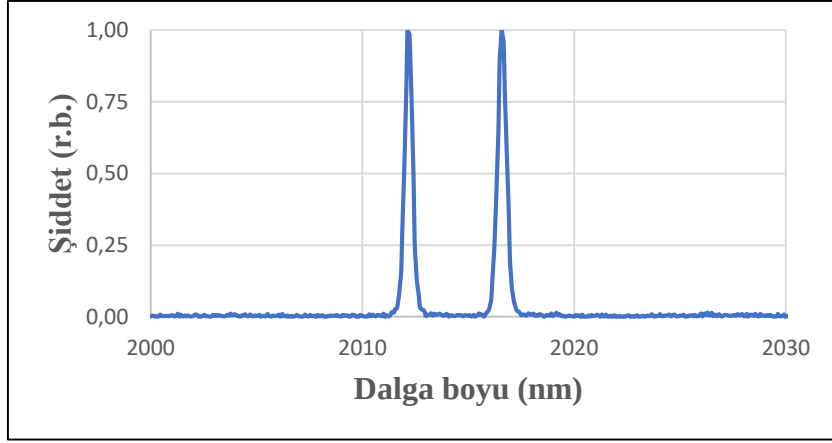
Şekil 212. %3 Katkılı 7-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminden elde edilen çift dalga boyu ışıma spektrumu



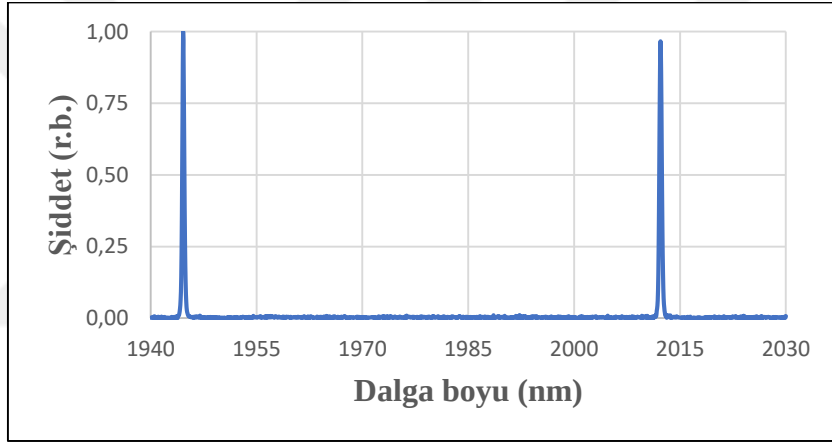
Şekil 213. %3 Katkılı 5-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminden elde edilen çift dalga boyu ışıma spektrumu



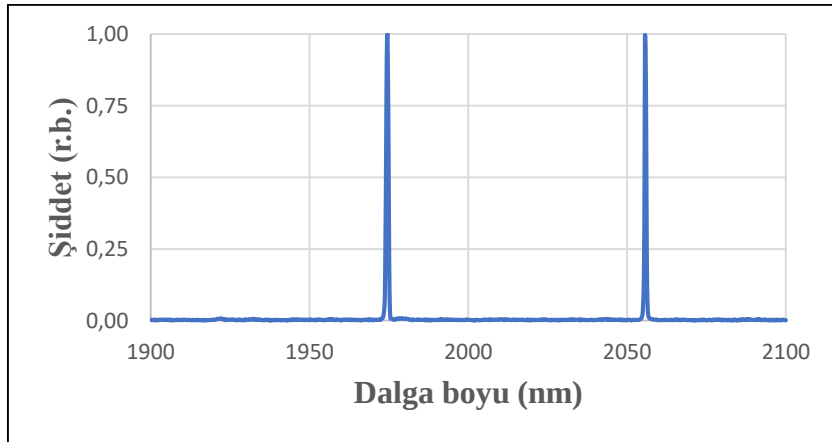
Şekil 214. %3 Katkılı 3-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminden elde edilen çift dalga boyu ışıma spektrumu



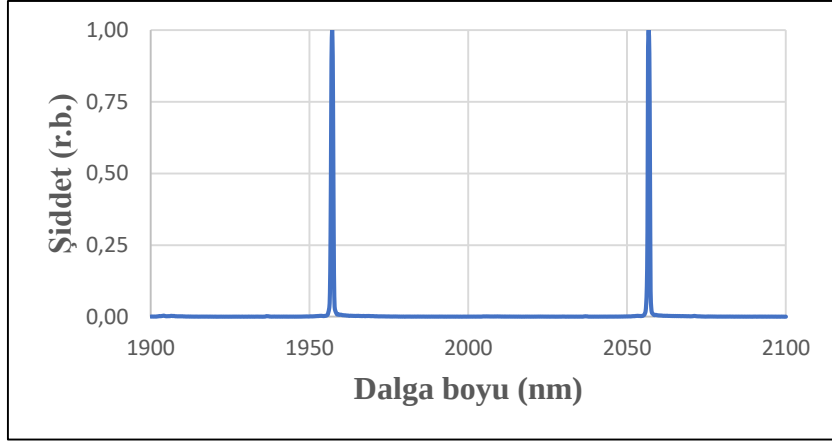
Şekil 215. %6 Katkılı 5-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminden elde edilen çift dalga boyu ışıma spektrumu



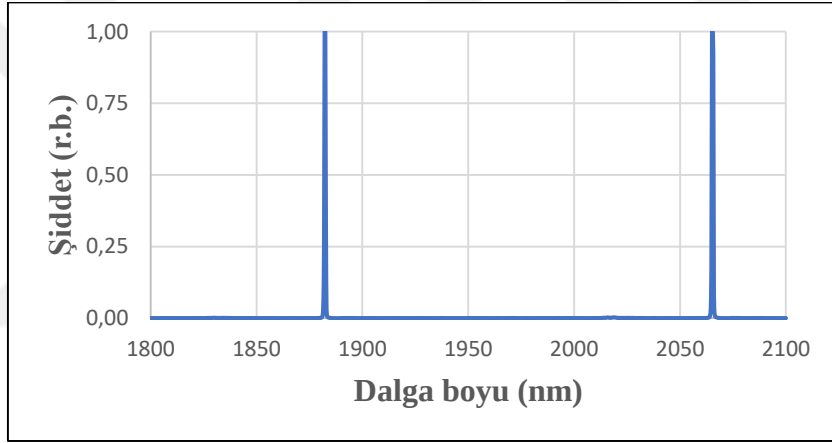
Şekil 216. %6 Katkılı 3-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminden elde edilen çift dalga boyu ışıma spektrumu



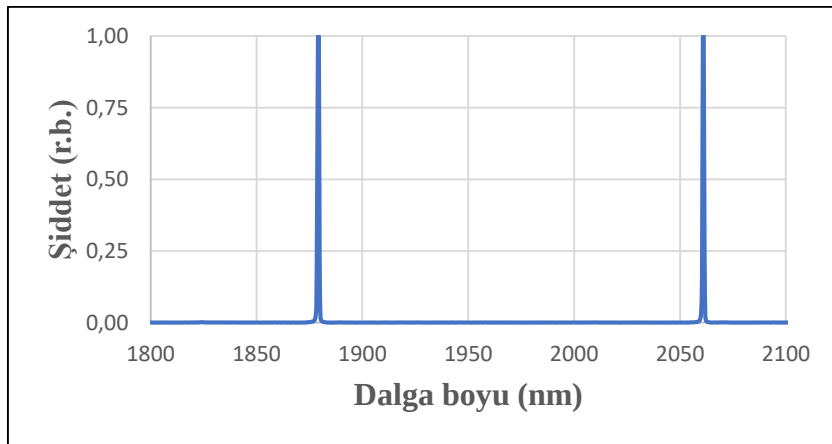
Şekil 217. %2 Katkılı 9-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminden elde edilen çift dalga boyu ışıma spektrumu



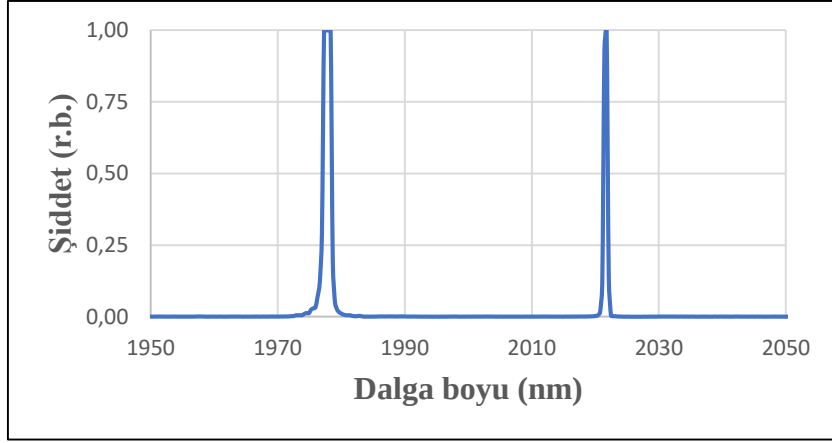
Şekil 218. %2 Katkılı 7-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminden elde edilen çift dalga boyu ışıma spektrumu



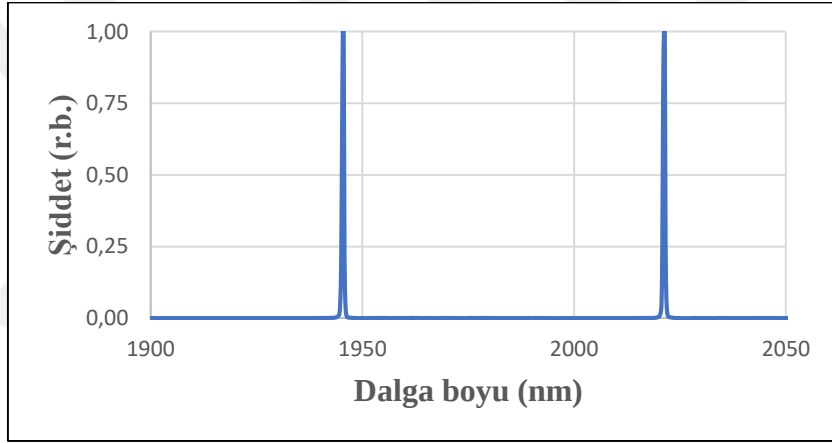
Şekil 219. %2 Katkılı 5-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminden elde edilen çift dalga boyu ışıma spektrumu



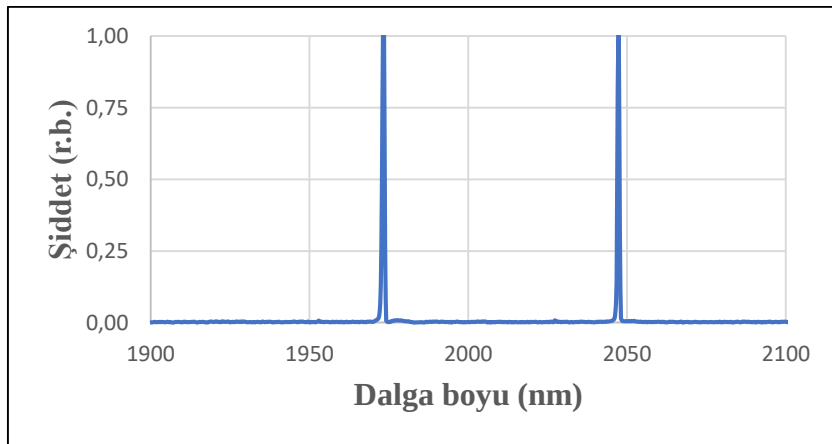
Şekil 220. %2 Katkılı 3-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminden elde edilen çift dalga boyu ışıma spektrumu



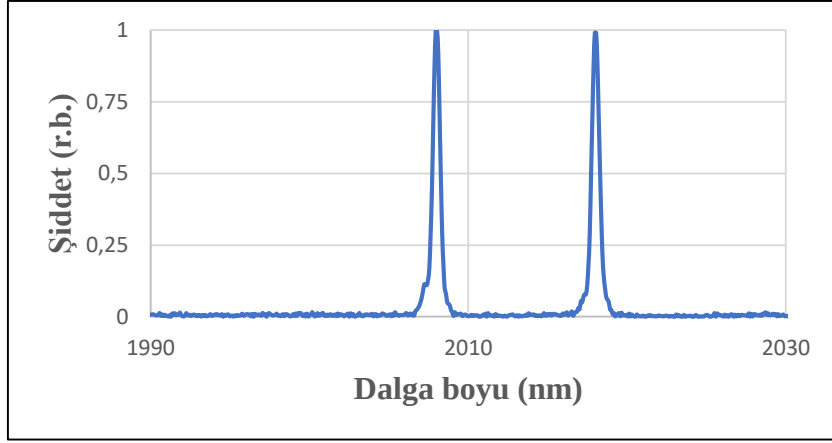
Şekil 221. %4 Katkılı 7-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminden elde edilen çift dalga boyu ışıma spektrumu



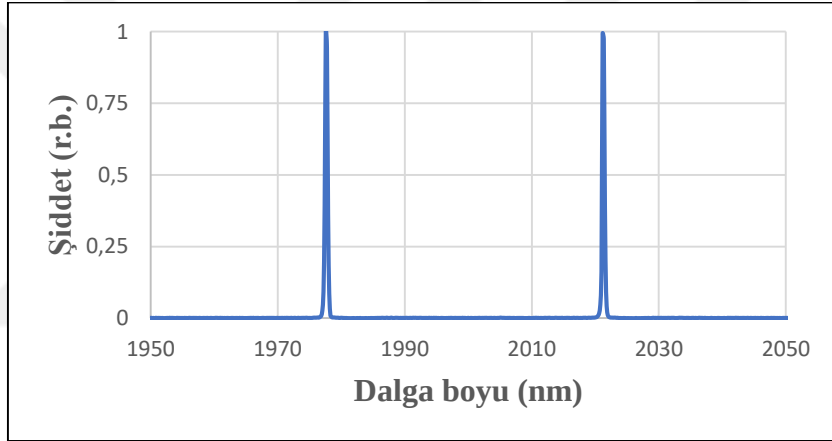
Şekil 222. %4 Katkılı 5-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminden elde edilen çift dalga boyu ışıma spektrumu



Şekil 223. %4 Katkılı 3-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminden elde edilen çift dalga boyu ışıma spektrumu



Şekil 224. %6 Katkılı 5-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminden elde edilen çift dalga boyu ışıma spektrumu



Şekil 225. %6 Katkılı 3-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminden elde edilen çift dalga boyu ışıma spektrumu

3.6. Tm:YAG ve Tm:LuAG Lazer Sistemlerinin Q-Anahtarlama Rejimi Grafikleri

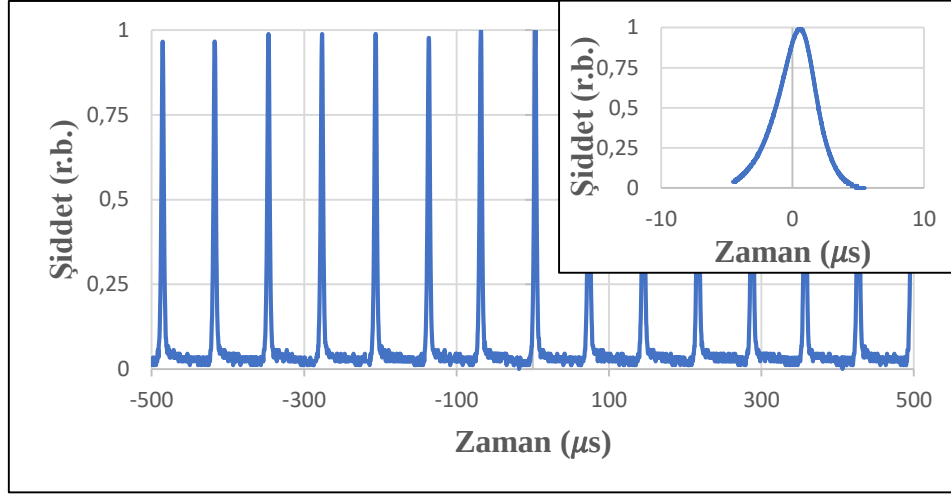
680 nm’de daralan kılavuz yapılı lazer diyotlar ile pompalanan farklı katkı oranları ve farklı kristal uzunluklarına sahip Tm:YAG ve Tm:LuAG lazer sistemlerinde rezonatör içerisine SESAM yerleştirilerek elde edilen darbeli rejim sonuçlarının sonucu Tablo 6’da ve görselleri Şekil 226 ile Şekil 245 arasında gösterilmektedir.

Şekil 226 ile Şekil 245 arasındaki görseller incelendiğinde çıkış gücünün en yüksek 64 mW ile %6 katkılı 7 mm Tm:LuAG sisteminde, genişliğin en düşük 0,872 μ s ile %3 katkılı 7 mm Tm:YAG sisteminde, frekansın en yüksek 37,88 kHz ile %3

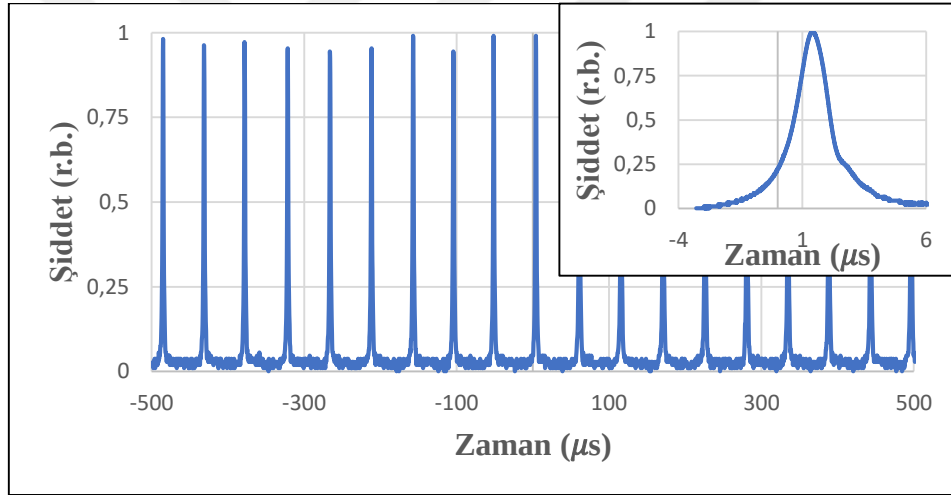
katkılı 7 mm Tm:YAG sisteminde, tepe gücünün en yüksek 1207 mW ile %2 katkı 7 mm Tm:LuAG sisteminde ve darbe enerjisinin en yüksek 2,87 μ J ile %6 katkı 5 mm Tm:LuAG sisteminde olduğu gözlemlenmiştir.

Tablo 6. Tm:YAG ve Tm:LuAG lazerlerinin Q-anahtarlama rejiminde çalışması sonucunda elde edilen sonuçlar

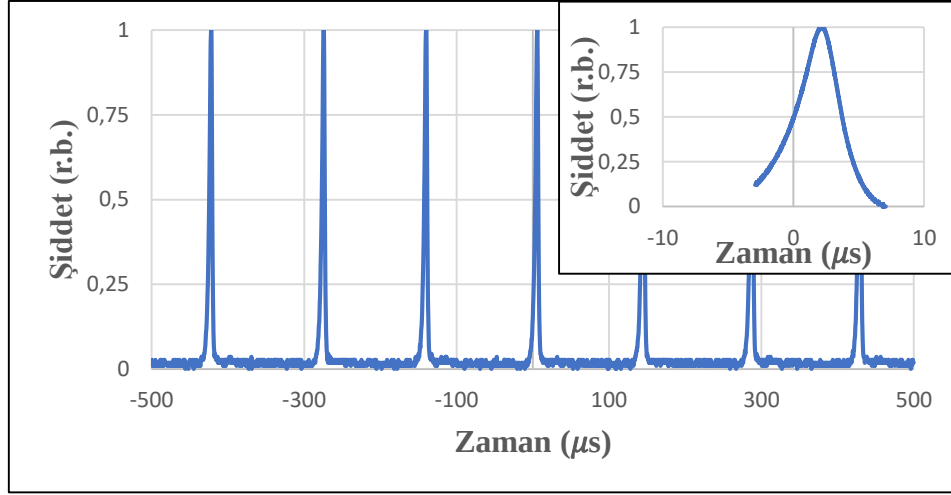
Kristal	Katkı Oranı (%)	Uzunluk (mm)	Çıkış gücü (mW)	Genişlik (μ s)	Frekans (kHz)	Tepe Gücü (mW)	Darbe Enerjisi (μ J)
Tm:YAG	1,5	9	24	3,23	14,24	521	1,69
		7	24	1,47	18,35	888	1,31
		5	16	3,7	7,05	611	2,27
		3	15	5,44	11,83	233	1,27
	3	7	39	0,872	37,88	1180	1,03
		5	38	1,28	29,24	1012	1,23
		3	41	1,93	22,64	939	1,81
	6	7	56	3,52	22,73	703	2,47
		5	59	3,2	21,28	859	2,75
		3	54	5,18	19,08	546	2,83
Tm:LuAG	2	9	29	4,02	17,57	410	1,65
		7	29	1,36	17,66	1207	1,64
		5	43	1,7	21,73	1164	1,98
		3	30	3,72	18,57	434	1,61
	4	7	33	1,88	25,25	695	1,30
		5	31	1,87	30,53	543	1,01
		3	41	2,62	20,26	772	2,02
	6	7	64	2,9	26,68	827	2,39
		5	62	3,94	21,55	730	2,87
		3	53	2,74	24,48	790	2,16



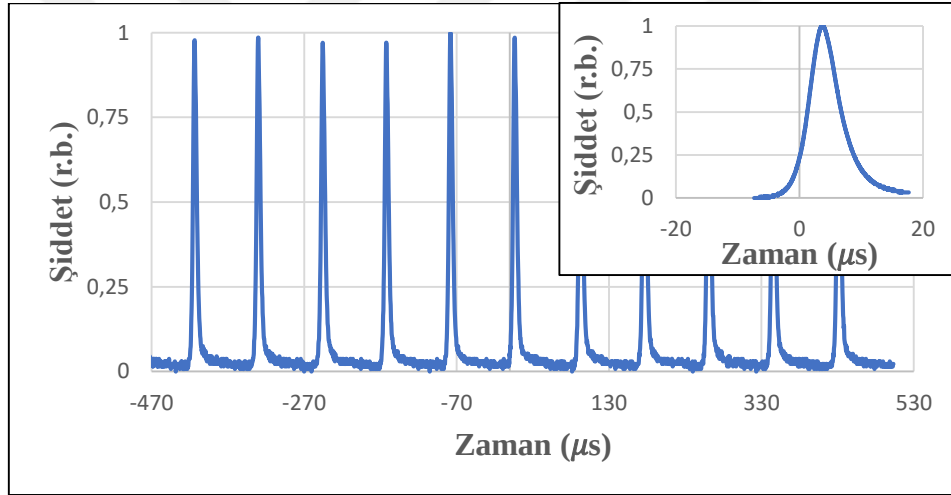
Şekil 226. %1,5 Katkılı 9-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminde elde edilen Q-anahtarlama darbelerinin periyodu ve (iç figür) darbe genişliği



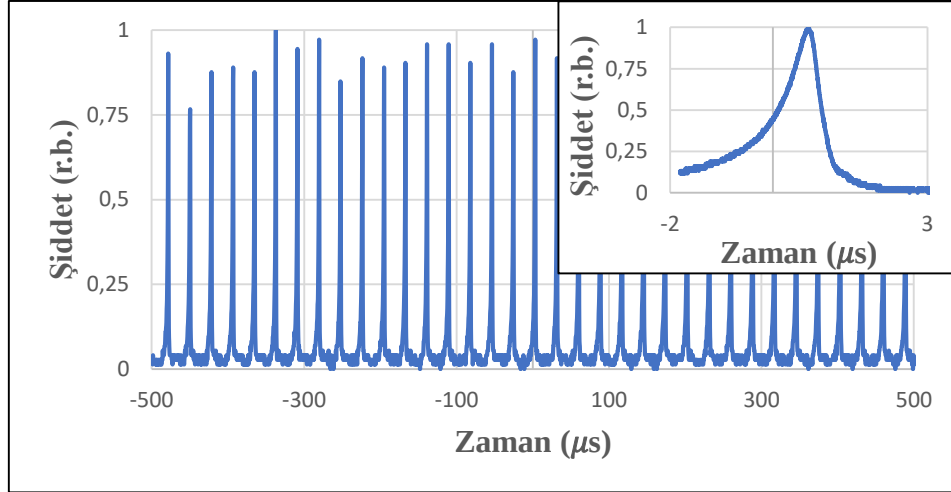
Şekil 227. %1,5 Katkılı 7-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminde elde edilen Q-anahtarlama darbelerinin periyodu ve (iç figür) darbe genişliği



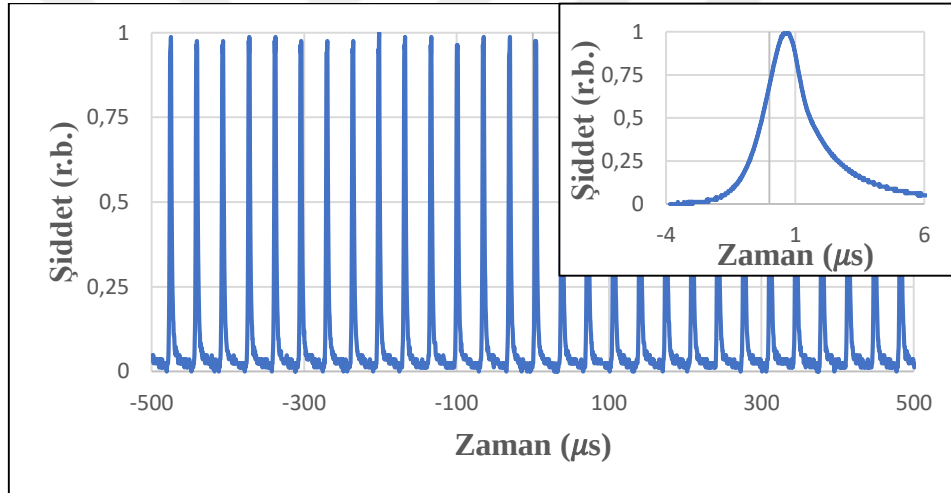
Şekil 228. %1,5 Katkılı 5-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminde elde edilen Q-anahtarlamalı darbelerin periyodu ve (iç figür) darbe genişliği



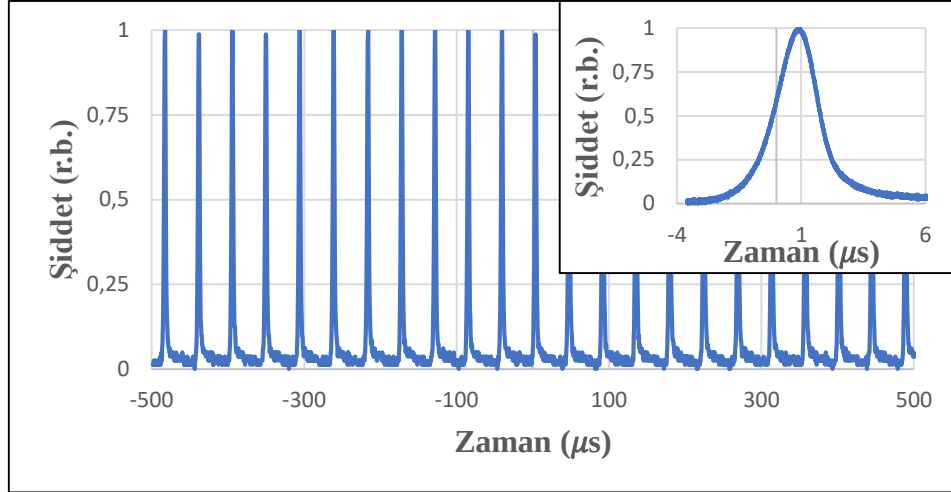
Şekil 229. %1,5 Katkılı 3-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminde elde edilen Q-anahtarlamalı darbelerin periyodu ve (iç figür) darbe genişliği



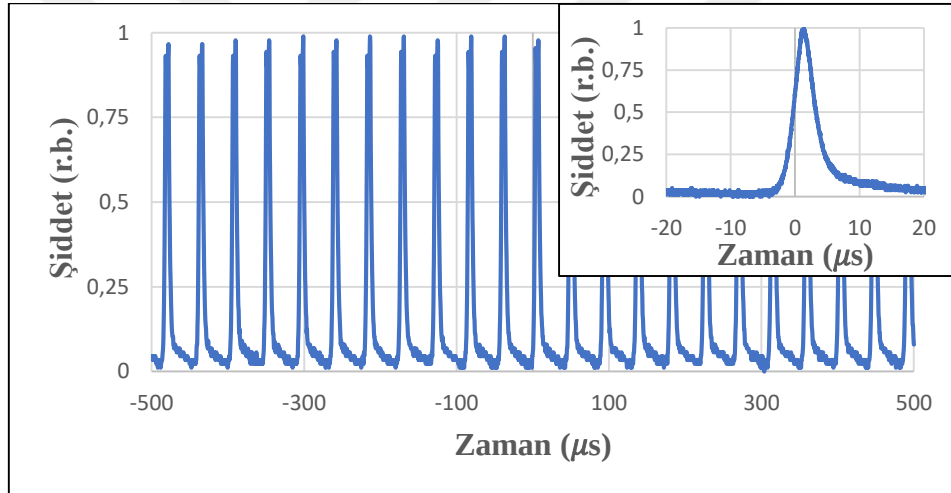
Şekil 230. %3 Katkılı 7-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminde elde edilen Q-anahtarlamalı darbelerin periyodu ve (iç figür) darbe genişliği



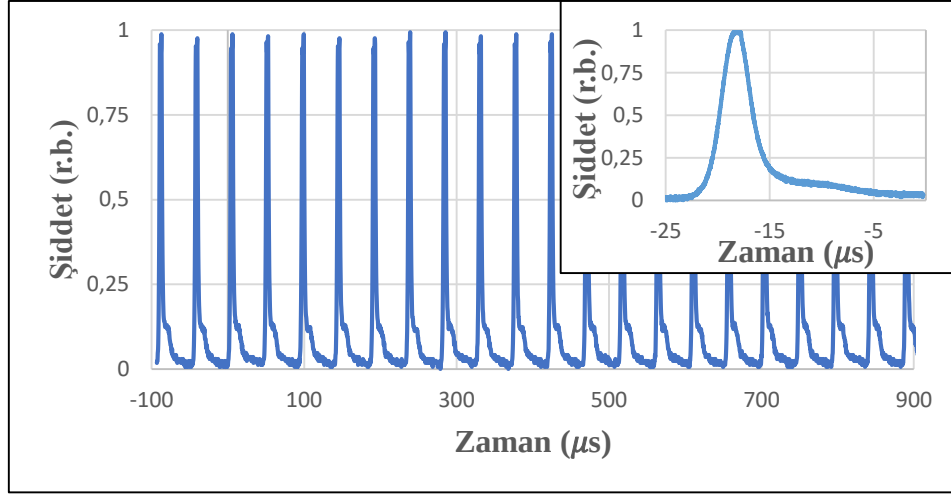
Şekil 231. %3 Katkılı 5-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminde elde edilen Q-anahtarlamalı darbelerin periyodu ve (iç figür) darbe genişliği



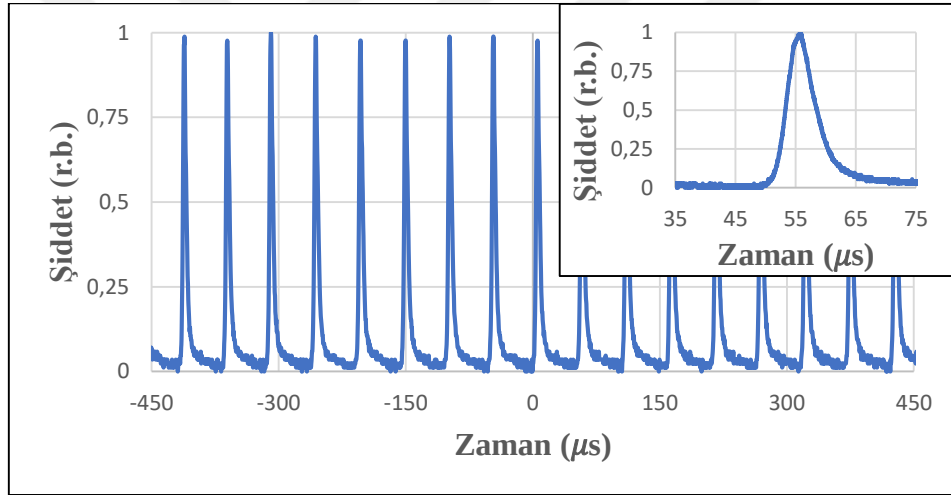
Şekil 232. %3 Katkılı 3-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminde elde edilen Q-anahtarlamalı darbelerin periyodu ve (iç figür) darbe genişliği



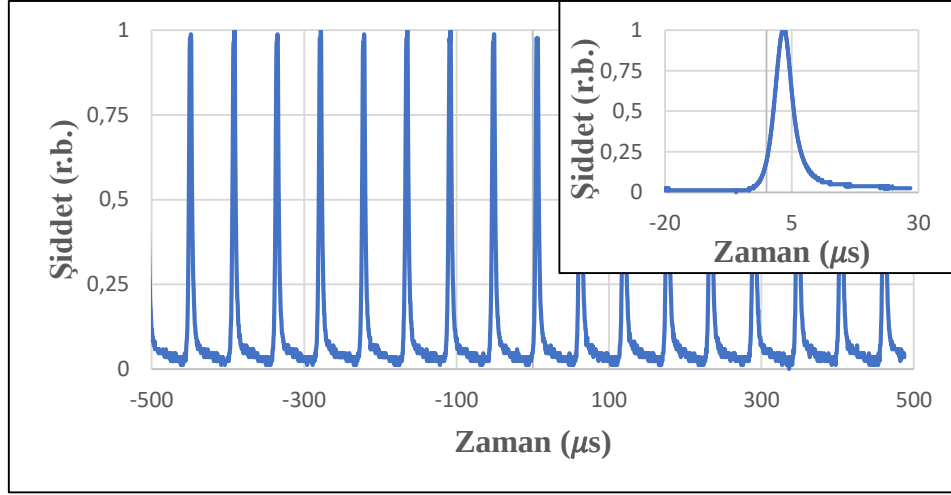
Şekil 233. %6 Katkılı 7-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminde elde edilen Q-anahtarlamalı darbelerin periyodu ve (iç figür) darbe genişliği



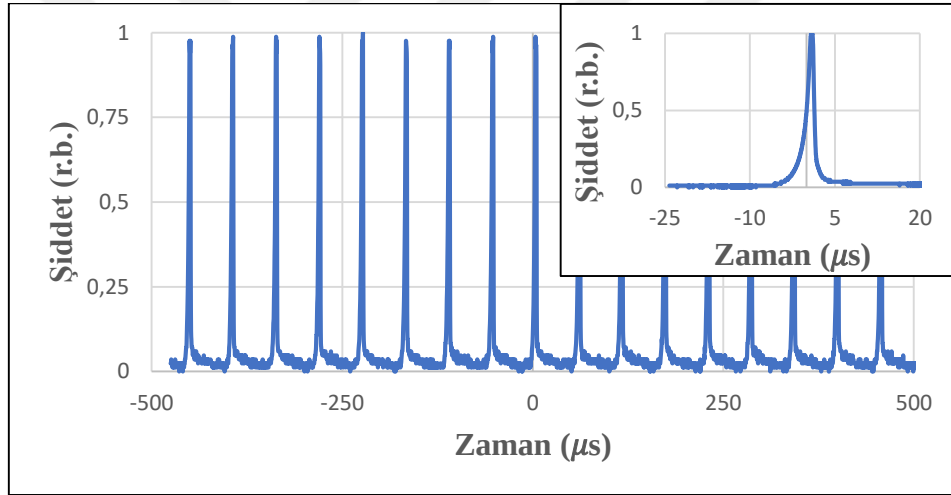
Şekil 234. %6 Katkılı 5-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminde elde edilen Q-anahtarlamalı darbelerin periyodu ve (iç figür) darbe genişliği



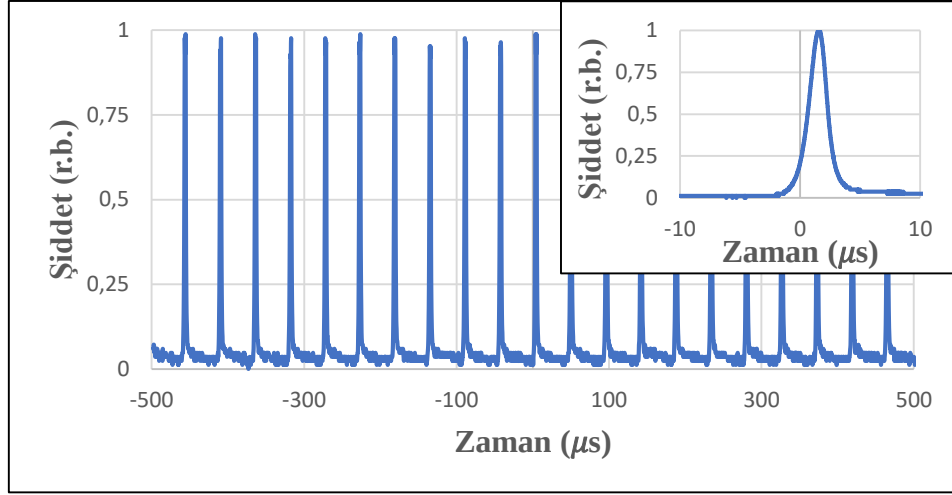
Şekil 235. %6 Katkılı 3-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminde elde edilen Q-anahtarlamalı darbelerin periyodu ve (iç figür) darbe genişliği



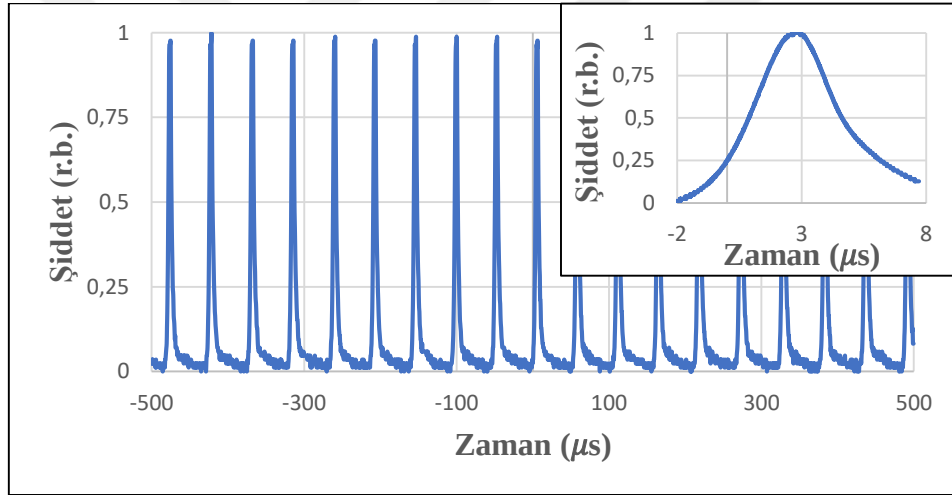
Şekil 236. %2 Katkılı 9-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminde elde edilen Q-anahtarlamalı darbelerin periyodu ve (iç figür) darbe genişliği



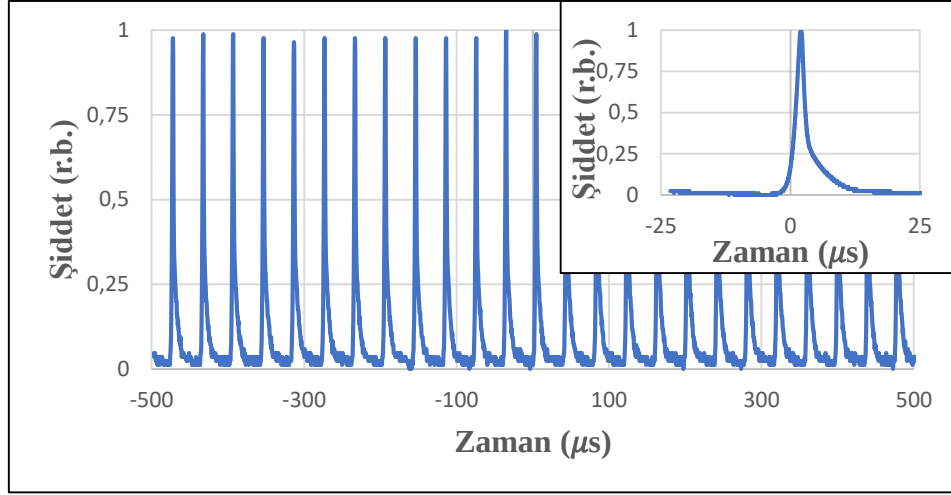
Şekil 237. %2 Katkılı 7-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminde elde edilen Q-anahtarlamalı darbelerin periyodu ve (iç figür) darbe genişliği



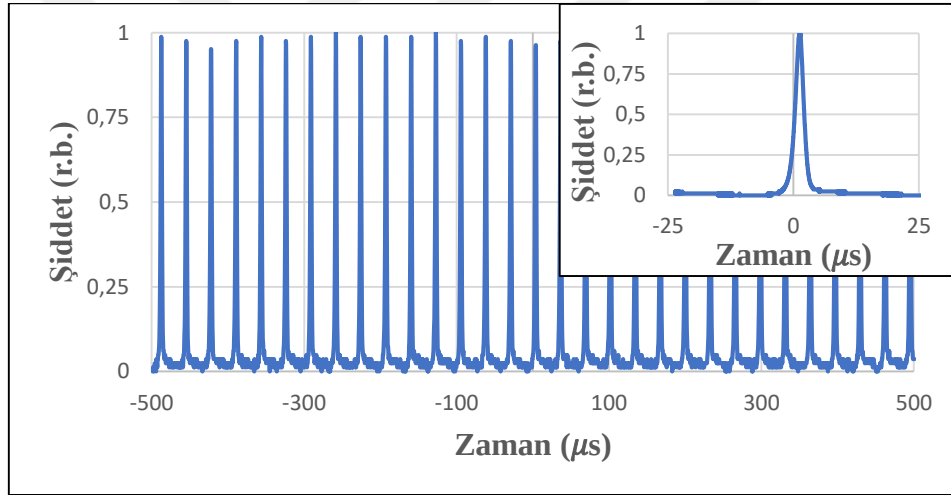
Şekil 238. %2 Katkılı 5-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminde elde edilen Q-anahtarlamalı darbelerin periyodu ve (iç figür) darbe genişliği



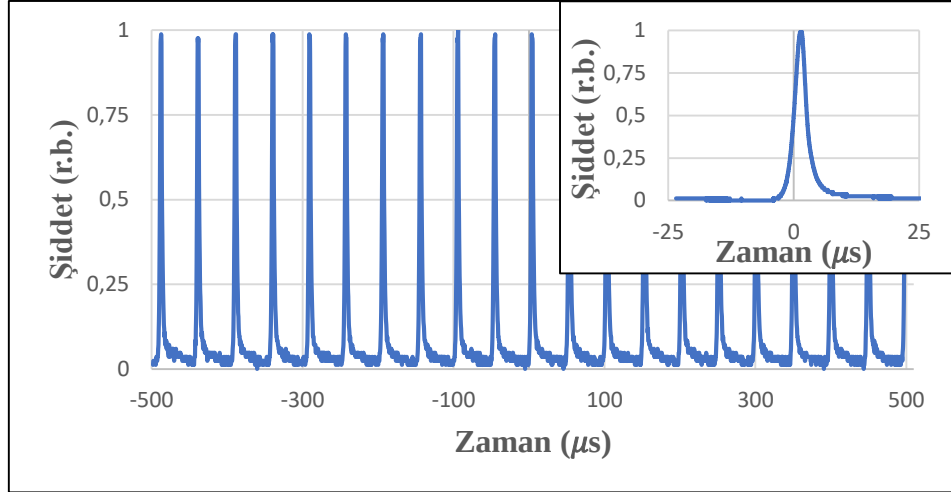
Şekil 239. %2 Katkılı 3-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminde elde edilen Q-anahtarlamalı darbelerin periyodu ve (iç figür) darbe genişliği



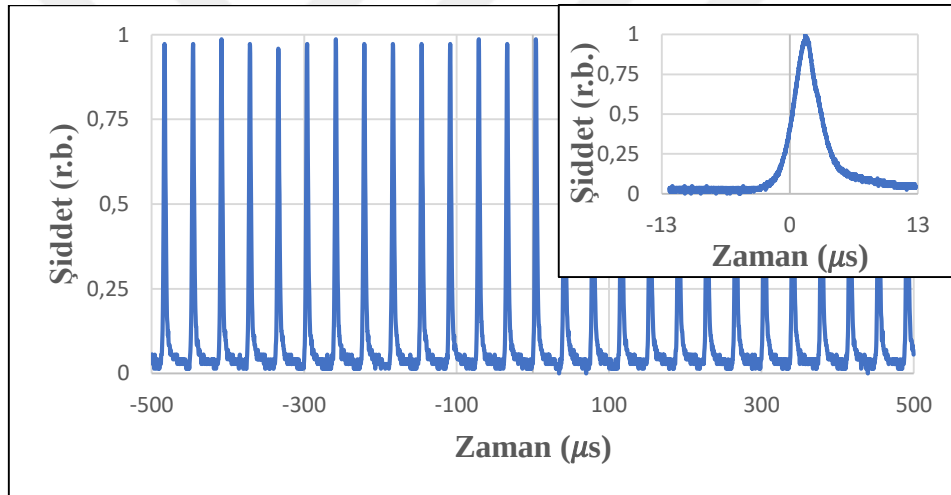
Şekil 240. %4 Katkılı 7-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminde elde edilen Q-anahtarlamalı darbelerin periyodu ve (iç figür) darbe genişliği



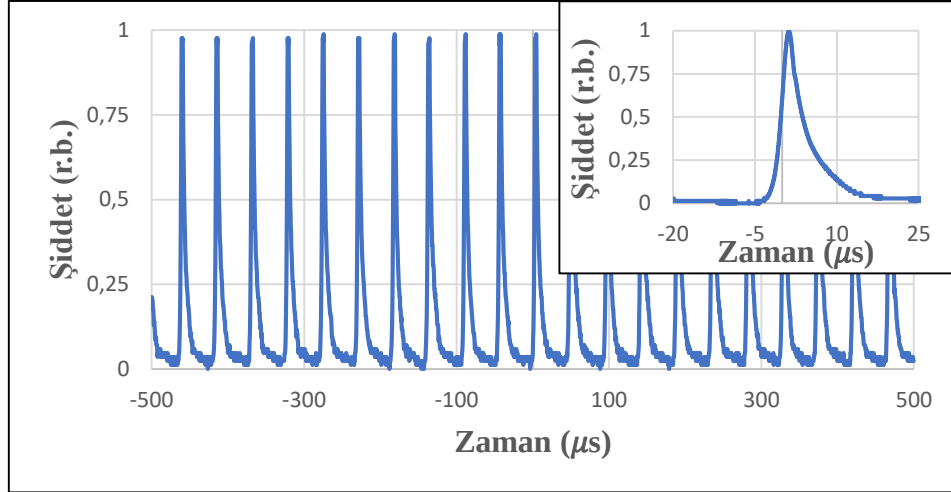
Şekil 241. %4 Katkılı 5-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminde elde edilen Q-anahtarlamalı darbelerin periyodu ve (iç figür) darbe genişliği



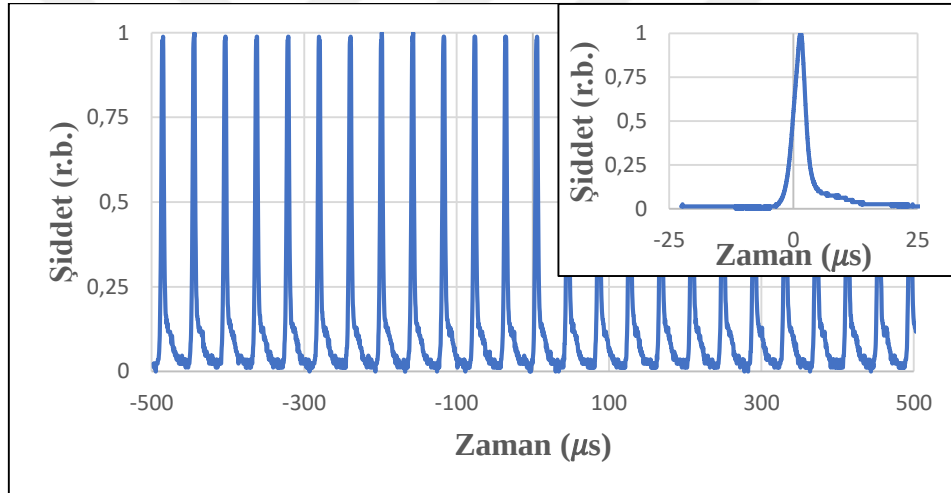
Şekil 242. %4 Katkılı 3-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminde elde edilen Q-anahtarlamalı darbelerin periyodu ve (iç figür) darbe genişliği



Şekil 243. %6 Katkılı 7-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminde elde edilen Q-anahtarlamalı darbelerin periyodu ve (iç figür) darbe genişliği



Şekil 244. %6 Katkılı 5-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminde elde edilen Q-anahtarlamalı darbelerin periyodu ve (iç figür) darbe genişliği



Şekil 245. %6 Katkılı 3-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminde elde edilen Q-anahtarlamalı darbelerin periyodu ve (iç figür) darbe genişliği

4. TARTIŞMA VE SONUÇ

Yapılan çalışmaların sonucunda 1 W'lık yüksek parlaklığa sahip daralan kılavuz yapılı 680 nm'de ışıma yapabilen lazer diyotları ile farklı katkı oranları ve uzunlukları ile 10 farklı Tm:YAG ve 10 farklı Tm:LuAG lazer sistemleri kurulmuştur.

1 W'lık 680 nm'de uyarılan Tm:YAG lazerlerinin sürekli dalga rejiminde verim eğrisi performanslarının sonuçları Tablo 1'den incelendiğinde en yüksek lazer çıkış gücünün 332 mW kadar, en yüksek verim eğrisinin %45 kadar olduğu %6 katkılı 7 mm Tm:YAG'da 10 °C'de görülmüştür. Verim eğimi değerine bakıldığında stokes limiti olan %34 değerinin çok üzerinde olduğu görülmektedir. Bu sonuçta bizlere %1,5 katkılı 9 mm Tm:YAG (25 °C hariç), %1,5 katkılı 7 mm Tm:YAG, %1,5 katkılı 5 mm Tm:YAG (15 °C, 20 °C ve 25 °C hariç), %3 katkılı 7 mm Tm:YAG, %3 katkılı 5 mm Tm:YAG, %3 katkılı 3 mm Tm:YAG, %6 katkılı 7 mm Tm:YAG, %6 katkılı 5 mm Tm:YAG ve %3 katkılı 3 mm Tm:YAG lazer sistemlerinde çapraz sönümleme etkisinin olduğunu göstermektedir. Ancak tabloya bakıldığında verimin %34'ün altında olduğu değerlerde gözükmemektedir. Bunun nedeni Tm⁺³ iyonun katkılama oranının (%1,5) düşük ve kristal uzunluğunun (5 ve 3 mm) kısa olmasından kaynaklı soğurulma miktarı artacaktır bu durumda verimliliği ve çıkış gücü değerlerini düşürmektedir. Ek olarak kristalin sıcaklığına bağlı lazer sistemlerinin çıkış güçleri incelendiğinde sıcaklık arttıkça değerlerin düştüğü gözlemlenmiştir. Aynı özelliklere sahip ancak daha uzun boyuna sahip olan kristallerin verim eğrisi ve çıkış gücünün yükseldiği görülmektedir.

1 W'lık 680 nm'de uyarılan Tm:YAG lazerler sistemlerinde çıkan lazer ışının karakteristiği için alınan M^2 sonuçları Tablo 3'den incelendiğinde değerlerin $M^2 < 2$ olması dolayısı ile ideal kipte oldukları gözlemlenmiştir. Çift kırınımlı prizma (BRF) kullanılarak yapılan dalga boyu değişim aralık değişimleri Tablo 4'den incelendiğinde 2 µm bölgesinde 216 nm'ye kadar dalga boyu değişim aralığı (1872'den 2088'e kadar) %3 katkılı 7 mm Tm:YAG lazer sisteminde gözlemlenmiştir. Yapılan çift dalga boyu ışıma sonuçları Tablo 5'den incelendiğinde 2 µm bölgesinde 9 sistem için görülmüştür. Çift dalga boyu ışıması birbirinden en uzak dalga boyları 1878-2082 nm'de 48 mW gücünde %3 katkılı 7 mm Tm:YAG lazer sisteminde gözlemlenmiştir. Son olarak sisteme eklenen SESAM ile birlikte Q-anahtarlama rejim sonuçları Tablo 6'dan

incelendiğinde en kısa %3 katkılı 7 mm Tm:YAG sisteminde 0,872 µs genişliğinde, tekrarlama oranı en sık %3 katkılı 7 mm Tm:YAG sisteminde 37,88 kHz frekansında darbeler elde edilmiştir. Elde edilen darbelerin en yüksek darbe enerjisi %6 katkılı 3 mm Tm:YAG sisteminde 2,83 µJ ve tepe gücü %3 katkılı 7 mm Tm:YAG sisteminde 1180 mW değerindedir.

1 W'lık 680 nm'de uyarılan 10 farklı Tm:YAG lazer sistemleri üzerinde katkı oranı, uzunluk ve sıcaklık parametrelerinin ne kadar etkili olduklarının gözleyebilmek için modelleme çalışması yapılmıştır. Yapılan modelleme çalışması doğrusal, logaritmik, 1-2-3 ve 4.dereceden polinomlar için regresyon analizinde modelleme çalışmaları yapılmıştır. Yapılan çalışmalar gösterdi ki 2.dereceden polinomların benzetmesi ile R^2 (verilerin anlamlandırılma oranı) değerinin %86 bulunması en etkin sonucun bu modellemeye olduğu kanısına varılmıştır. Modelin R^2 değerinin %86 olarak elde edilmesi kullanılan parametrelerin etkilerinin doğru bir şekilde gösterdiğinin göstergesidir. 2.derece polinomlar için elde edilen verim modelleme formülü aşağı da (4.1)'deki gibi elde edilmiştir.

$$\begin{aligned} \text{Verim} = & -2,6821 + 0,1474 * \text{Katkı Oranı} + 0,1496 * \text{Uzunluk} + 0,0177 * \\ & \text{Sıcaklık} - 0,0156 * \text{Katkı Oranı}^2 - 0,0043 * \text{Katkı Oranı} * \text{Uzunluk} + 0,00006 * \\ & \text{Katkı Oranı} * \text{Sıcaklık} - 0,0030 * \text{Uzunluk}^2 - 0,0003 * \text{Uzunluk} * \text{Sıcaklık} - \\ & 0,00003 * \text{Sıcaklık}^2 \end{aligned} \quad (4.1)$$

Elde edilen (4.1)'deki denklemde % katkı oranını, Kelvin (K) cinsinden sıcaklığı ve mm cinsinden uzunluk değerleri alınarak elde edilmiştir. Bulunan verim değerinin sonucu % olarak verim değerini temsil etmektedir.

(4.1)'deki denklem incelendiğinde katkı oranı, uzunluk ve sıcaklık parametreleri sıfır olduğunda yani modellemeye hiçbir etkileri bulunmadığında elde edilen başlangıç verim değeri -2,6821 ile sabit bir terimdir. Katkı oranı parametresine bakıldığında +0,1474 değeri ile verim üzerinde doğrusal etkisi pozitif yöndedir. Ancak ikinci dereceden ise -0,0156 değeri ile etkisi negatif yöndedir. Bu sonuçlar gösterir ki katkı oranının artması ile gösterdiği etki azalmaktadır yani verim değerinin azalmasına etki etmektedir. Diğer bir parametre olan sıcaklık değişkenine bakıldığında +0,0177 değeri ile verim üzerinde doğrusal etkisi pozitif yöndedir. Ancak ikinci dereceden ise

-0,00003 değeri ile negatif yönde bir etkisi vardır. Bu sonuçlar gösterir ki sıcaklık değeri çok yüksek olduğunda bu değer artışı sınırlanabilir. Son parametre olan uzunluk değişkenine bakıldığında +0,1496 değeri ile verim üzerinde doğrusal etkisi pozitif yöndedir. Ancak İkinci dereceden ise -0,0030 değeri ile etkisi negatif yöndedir. Bu sonuçlar gösterir ki uzunluk değer arttıkça verim de düşüşler yaşanabileceğini göstermektedir. İki parametre arasındaki ilişkiler incelenecek olursa ilk olarak katkı oranı ve sıcaklık parametreleri arasındaki ilişkiye bakılacak olursa bu ikisi arasında +0,00006 değeri ile pozitif yönde etkisi vardır. Ancak verim değerindeki bu pozitif etki oldukça az bir değerdedir. Katkı oranı ve uzunluk parametreleri arasındaki ilişkiye bakılacak olursa bu ikisi arasında -0,0043 değeri ile negatif yöndeki bu etki verimde az da olsa bir düşüş etkisi göstermektedir. Son olarak uzunluk ve sıcaklık parametreleri arasındaki ilişkiye bakılacak olursa bu ikisi arasında -0,0003 değeri ile negatif yönde bir etkisi vardır. Bu sonuç verimde düşüşe neden olmaktadır. Elde edilen bu polinom denklemi ile sistem optimizasyonunun ve sistemlerin verimlerinin daha da artırılması konusunda bizlere ciddi ölçüde rehber edebilir.

1 W'lık 680 nm'de uyarılan Tm:LuAG lazerlerinin sürekli dalga rejiminde verim eğrisi performanslarının sonuçları Tablo 2'den incelendiğinde en yüksek lazer çıkış gücünün 268 mW kadar, en yüksek verim eğrisinin %45 kadar olduğu görülmüştür. Verim eğimi değerine bakıldığında stokes limiti olan %34 değerinin çok üzerinde olduğu görülmektedir. Bu sonuçta bizlere %2 katkılı 9 mm Tm:LuAG (20 ve 25 °C hariç), %2 katkılı 7 mm Tm:LuAG, %2 katkılı 5 mm Tm:LuAG (15 °C, 20 °C ve 25 °C hariç), 4 katkılı 7 mm Tm:LuAG, %4 katkılı 5 mm Tm:LuAG, %4 katkılı 3 mm Tm:LuAG, %6 katkılı 7 mm Tm:LuAG, %6 katkılı 5 mm Tm:LuAG ve %3 katkılı 3 mm Tm:LuAG lazer sistemlerinde çapraz sönümlleme etkisinin olduğunu göstermektedir. Ancak tabloya bakıldığında verimin %34'ün altında olduğu değerlerde gözükmemektedir. Bunun nedeni Tm^{+3} iyonun katkılama oranının (%2) düşük ve kristal uzunluğunun (5 ve 3 mm) kısa olmasından kaynaklı soğurulma miktarı artacaktır bu durumda verimliliği ve çıkış gücü değerlerini düşürmektedir. Ek olarak kristalin sıcaklığına bağlı lazer sistemlerinin çıkış güçleri incelendiğinde sıcaklık arttıkça değerlerin düştüğü gözlemlenmiştir. Aynı özelliklere sahip ancak daha uzun boyuna sahip olan kristallerin verim eğrisi ve çıkış gücünün yükseldiği görülmektedir.

1 W'lık 680 nm'de uyarılan Tm:LuAG lazerler sistemlerinde çıkan lazer ışının karakteristiği için alınan M^2 sonuçları Tablo 3'den incelendiğinde değerlerin $M^2 < 2$ olması dolayısı ile ideal kipte oldukları gözlemlenmiştir. Çift kırınımlı prizma (BRF) kullanılarak yapılan dalga boyu değişim aralık değişimleri Tablo 4'den incelendiğinde 2 μ m bölgesinde 208 nm'ye kadar dalga boyu değişim aralığı (1871'den 2079'a kadar) %2 katkılı 5 mm Tm:LuAG laze sisteminde gözlemlenmiştir. Yapılan çift dalga boyu ışıma sonuçları Tablo 5'den incelendiğinde 2 μ m bölgesinde 9 sistem için görülmüştür. Çift dalga boyu ışıması birbirinden en uzak dalga boyları 1882-2066 nm'de 55 mW gücünde %2 katkılı 5 mm Tm:LuAG lazer sisteminde gözlemlenmiştir. Son olarak sisteme eklenen SESAM ile birlikte Q-anahtarlama rejim sonuçları Tablo 6'dan incelendiğinde en kısa %2 katkılı 7 mm Tm:LuAG sisteminde 1,36 μ s genişliğinde, tekrarlama oranı en sık %4 katkılı 5 mm Tm:LuAG sisteminde 30,53 kHz frekansında darbeler elde edilmiştir. Elde edilen darbelerin en yüksek darbe enerjisi %6 katkılı 5 mm Tm:LuAG sisteminde 2,87 μ J ve tepe gücü %2 katkılı 7 mm Tm:LuAG sisteminde 1207 mW değerindedir.

1 W'lık 680 nm'de uyarılan 10 farklı Tm:LuAG lazer sistemleri üzerinde katkı oranı, uzunluk ve sıcaklık parametrelerinin ne kadar etkili olduklarının gözleyebilmek için modelleme çalışması yapılmıştır. Yapılan modelleme çalışması doğrusal, logaritmik, 1-2-3 ve 4.dereceden polinomlar için regresyon analizinde modelleme çalışmaları yapılmıştır. Yapılan çalışmalar gösterdi ki 2.dereceden polinomların benzetmesi ile R^2 (verilerin anlamlandırılma oranı) değerinin %55 bulunması en etkin sonucun bu modellemede olduğu kanısına varılmıştır. Modelin R^2 değerinin %55 olarak elde edilmesi kullanılan parametrelerin etkilerinin doğru bir şekilde gösterdiğinin göstergesidir. 2.derece polinomlar için elde edilen verim modelleme formülü aşağı da (4.2)'deki gibi elde edilmiştir.

$$\begin{aligned} Verim = & -0,6069 + 0,1601 * Katkı Oranı + 0,02365 * Uzunluk + \\ & 0,005383 * Sıcaklık - 0,0102 * Katkı Oranı^2 - 0,001278 * Katkı Oranı * \\ & Uzunluk + 0,000201 * Katkı Oranı * Sıcaklık - 0,001364 * Uzunluk^2 + \\ & 0,00000190476 * Uzunluk * Sıcaklık - 0,00001 * Sıcaklık^2 \end{aligned} \quad (4.2)$$

Elde edile (4.2)'deki denklemde % katkı oranını, Kelvin (K) cinsinden sıcaklığı ve mm cinsinden uzunluk değerleri alınarak elde edilmiştir. Bulunan verim değerinin sonucu % olarak verim değerini temsil etmektedir.

(4.2)'deki denklem incelendiğinde katkı oranı, uzunluk ve sıcaklık parametreleri sıfır olduğunda yani modellemede hiçbir etkileri bulunmadığında elde edilen başlangıç verim değeri -0,6069 ile sabit bir terimdir. Katkı oranı parametresine bakıldığında +0,1601 değeri ile verim üzerinde doğrusal etkisi pozitif yöndedir. Ancak ikinci dereceden ise -0,0102 değeri ile etkisi negatif yöndedir. Bu sonuçlar gösterir ki katkı oranının artması ile gösterdiği etki azalmaktadır yani verim değerinin azalmasına etki etmektedir. Diğer bir parametre olan sıcaklık değişkenine bakıldığında +0,005383 değeri ile verim üzerinde doğrusal etkisi pozitif yöndedir. Ancak ikinci dereceden ise -0,00001 değeri ile negatif yönde bir etkisi vardır. Bu sonuçlar gösterir ki sıcaklık değeri çok yüksek olduğunda bu değer artışı sınırlanabilir. Son parametre olan uzunluk değişkenine bakıldığında +0,02365 değeri ile verim üzerinde doğrusal etkisi pozitif yöndedir. Ancak İkinci dereceden ise -0,001364 değeri ile etkisi negatif yöndedir. Bu sonuçlar gösterir ki uzunluk değer arttıkça verim de düşüşler yaşanabileceğini göstermektedir. İki parametre arasındaki ilişkiler incelenecek olursa ilk olarak katkı oranı ve sıcaklık parametreleri arasındaki ilişkiye bakılacak olursa bu ikisi arasında +0,000201 değeri ile pozitif yönde etkisi vardır. Ancak verim değerindeki bu pozitif etki oldukça az bir değerdedir. Katkı oranı ve uzunluk parametreleri arasındaki ilişkiye bakılacak olursa bu ikisi arasında -0,001278 değeri ile negatif yöndeki bu etki verimde az da olsa bir düşüş etkisi göstermektedir. Son olarak uzunluk ve sıcaklık parametreleri arasındaki ilişkiye bakılacak olursa bu ikisi arasında +0,00000190476 değeri ile pozitif yönde bir etkisi vardır. Bu sonuç verimde az oranda artışa neden olmaktadır. Elde edilen bu polinom denklemi ile sistem optimizasyonun ve sistemlerin verimlerinin daha da arttırılması konusunda bizlere ciddi ölçüde rehber edebilir.

(4.1) ve (4.2)'deki denklemler incelendiğinde Tm:YAG ve Tm:LuAG lazerlerinde katkı oranı, sıcaklık, uzunluk, katkı oranı-sıcaklık ve katkı oranı-uzunluk parametrelerine bakıldığında verim üzerlerindeki pozitif veya negatif etkileri aynıdır. Ancak uzunluk-sıcaklık parametrelerinin verim üzerindeki etkileri farklıdır. Şöyle ki Tm:YAG lazerlerinde verimde negatif yönde etkiye neden olurken Tm:LuAG lazerlerinde pozitif yönde etkiye neden olmaktadır. Bunun nedeni Tm:LuAG kristalleri

Tm:YAG lazer sistemlerinden hem daha iyi bir termal iletkenliğe sahiptirler hem de termal yönetimi çok daha iyi bir şekilde sağlamaktadırlar. LuAG kristalleri lazer ışının genişlemesine YAG kristalinden daha az duyarlıdır. Sonuç olarak Tm:LuAG ve Tm:YAG lazerlerinin kristal malzemelerinin fiziksel ve spektral özellikleri birbirinden farklı olduğundan verim üzerindeki etkileri de birbirinden farklı olacaktır.



KAYNAKÇA

- Barnes, N. P., Jani, M. G., & Hutcheson, R. L. (1995). Diode-pumped, room-temperature Tm:LuAG laser. *Applied Optics*, 34(21), 4290-4294. <https://doi.org/10.1364/AO.34.004290>.
- Basiev, T. T., Orlovskii, Y. V., Pukhov, K. K., Sigachev, V. B., Doroshenko, M. E., & Vorob'ev, I. N. (1996). Multiphonon relaxation rates measurements and theoretical calculations in the frame of non-linear and non-Coulomb model of a rare-earth ion-ligand interaction. *Journal of Luminescence*, 68(5), 241-253. doi:10.1016/0022-2313(96)00013-0.
- Beach, R. J., Sutton, S. B., Honea, E. C., Skidmore, J. A., & Emanuel, M. A. (1996). High-power 2- μm diode-pumped Tm:YAG laser. *Proceedings Volume 2698, Solid State Lasers V*. <https://doi.org/10.1117/12.236152>.
- Beyatlı, E., Sumpf, B., Erbert, G., & Demirbas, U. (2019a). Efficient Tm:YAG and Tm:LuAG lasers pumped by 681 nm tapered diodes. *Applied Optics*, 58(11), 2973-2980. <https://doi.org/10.1364/AO.58.002973>.
- Beyatlı, E., Sumpf, G., Erbert, G., & Demirbaş, U. (2019b). Efficient Tm:YAG and Tm:LuAG lasers pumped by red tapered diodes. In 2019 Conference on Lasers and Electro-Optics and European Quantum Electronics Conference, doi:10.1109/CLEOE-EQEC.2019.8871616.
- Bilici, T., Mutlu, S., Kalaycıoğlu, H., Kurt, A., Sennaroğlu, A., & Gulsoy, M. (2011). Development of a thulium (Tm:YAP) laser system for brain tissue ablation. *Lasers in Medical Science*, 26(5), 699-706. doi:10.1007/s10103-011-0915-0.
- Cho, C. Y., Chen, Y. F., Zhang, G., Chen, W. D., & Liang, H. C. (2017). Exploring the self-mode locking of the 2 μm Tm:YAG laser with suppression of the self-pulsing dynamic. *Optics letters*, 42(24), 5226-5229. doi:10.1364/OL.42.005226.
- Daiminger, F. X., Dorsch, F., & Lorenzen, D. (1998). High-power laser diodes, laser diode modules, and their applications. *Laser Optics'98: Solid State Lasers*, doi:10.1117/12.334785.
- De Matos, P. S. F., Wetter, N. U., Gomes, L., Ranieri, I. M., & Baldochi, S. L. (2008). A high power 2.3 μm Yb:Tm:YLF laser diode-pumped simultaneously at 685 and 960 nm. *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics*, 10(10), doi:10.1088/1464-4258/10/10/104009.
- Demirbas, U., Schmalz, M., Sumpf, B., Erbert, G., Petrich, G. S., Kolodziejski, L. A., Fujimoto, J. G., Kartner, F. X., & Leitenstorfer, A. (2011). Femtosecond Cr:LiSAF and Cr:LiCAF lasers pumped by tapered diode lasers. *Optics Express*, 19(21), 20444-20461. <https://doi.org/10.1364/OE.19.020444>.

- Diehl, R. (Ed.). (2000). *High-power diode lasers: fundamentals, technology, applications, with contributions by numerous experts*. Springer.
- Dutta, N. K. (2021). Basic principles of laser diodes. *Handbook of laser technology and applications* (2. baskı), CRC Press.
- Fan, T. Y., & Byer, R. L. (1988). Diode laser-pumped solid-state lasers. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 24(6), 895-912. doi:10.1109/3.210.
- Fan, T. Y., Huber, G., Byer, R. L., Mitscherlich, P. (1988). Spectroscopy and diode laser-pumped operation of Tm, Ho:YAG. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 24(6), 924-933. doi:10.1109/3.213.
- Feng, T., Yang, K., Zhao, S., Zhao, J., Qiao, W., Li, T., Zheng, L., Xu, J., Wang, Q., Xu, X., Su, L., & Wang, Y. (2015). Efficient cw dual-wavelength and passively Q-switched Tm:LuAG lasers. *IEEE Photonics Technology Letters*, 27(1), 7-10. doi:10.1109/Ipt.2014.2357800.
- Gao, W. L., Ma, J., Xie, G. Q., Zhang, J., Luo, D. W., Yang, H., Tang, D.Y., Ma, J., Yuan, P., & Qian, L. J. (2012). Highly efficient 2 μ m Tm:YAG ceramic laser, *Optics Letters*. 37(6), 1076-1078. <https://doi.org/10.1364/OL.37.001076>.
- Goldberg, D. J. (1993). Benign pigmented lesions of the skin. *The Journal of Dermatologic Surgery and Oncology*, 19(4), 376-379. doi:10.1111/j.1524-4725.1993.tb00360.x
- Hooker, S., & Webb, C. (2010). *Laser Physics*. Oxford University Press.
- Jackson, S. D., & Lauto, A. (2002). Diode-pumped fiber lasers: a new clinical tool?. *Lasers in Surgery and Medicine*, 30(3), 184-190. doi:10.1002/IsM.10023.
- Jackson, S. D. (2012). Towards high-power mid-infrared emission from a fibre laser. *Nature Photonics*. 6(7), 423-431. doi:10.1038/nphoton.2012.149.
- Jelinek, M. (2011). Functional planar thin film optical waveguide lasers. *Laser Physics Letters*, 9(2), 91-99. doi:10.1002/lapl.201110098
- Kalaycıoğlu, H., Sennaroğlu, A., Kurt, A., & Ozen, G. (2007). Spectroscopic analysis of Tm⁺³:LuAG. *Journal of Physics: Condensed Matter*, 19(3), 036208. doi:10.1088/0953-8984/19/3/036208.
- Kebes. (2008, 1 Temmuz). *Absorption spectrum of liquid water.png*. https://tr.m.wikipedia.org/wiki/Dosya:Absorption_spectrum_of_liquid_water.png.
- Kahraman, İ. (2017). Katı-hal lazerlerin özelliklerine sıcaklığın etkileri, Yüksek Lisans Tezi, Uludağ Üniversitesi.

- Kmetec, J. D., Kubo, T. S., Kane, T. J., & Grund, C. J. (1994). Laser performance of diode-pumped thulium-doped $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$, $(\text{Y}, \text{Lu})_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$, and $\text{Lu}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ crystals. *Optics Letters*, 19(3), 186. doi:10.1364/ol.19.000186.
- Lai, K. S., Phua, P. B., Wu, R. F., Lim, Y. L., Lau, E., Toh, S. W., Toh, B. T., & Chng, A. (2000). *Optics Letters*, 15(21), 1591-1593. <https://doi.org/10.1364/OL.25.001591>.
- Lee, J., Lee, Y., Jeong, E., Jung, M. Y., Lee, S., Kim, B. K., & Song, D. H. (2016). *Applied Optics*, 55(20), 5419-5422. <https://doi.org/10.1364/AO.55.005419>.
- Li, C., Song, J., Shen, D., Kim, N. S., & Ueda, K. (1999). Diode-pumped high-efficiency Tm:YAG lasers. *Optics Express*, 4(1), 12. doi:10.1364/oe.4.000012.
- Li, Y. F., Wang, Y. Z., & Ju, Y. L. (2008). Comparative study of LD-pumped Tm:YAG and Tm:LuAG lasers. *Lasers. Laser Physics*, 18(6), 722-724. doi:10.1134/s1054660x08060042.
- Lim, J. J., Benson, T. M., & Larkins, E. C. (2005). Design of wide-emitter single-mode laser diodes. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 41(4), 506-516. doi:10.1109/JQE.2005.843924.
- Mackenzie, J. I., Mitchell, S. C., Beach, R. J., Meissner, H. E. & Shepherd, D. P. (2001). 15 W diode-side-pumped Tm:YAG waveguide laser at 2 μm . *Electronics Letters*, 37(14), 898-899. doi:10.1049/el:20010611.
- Maiman, T. H. (1960). Optical and microwave-optical experiments in ruby. *Physical Review Letters*, 4(11), 564-566. doi:10.1103/physrevlett.4.564.
- Mateos, X., Petrov, V., Liu, J., Pujol, M. C., Griebner, U., Aguilo, M., Diaz, F., Galan, M., & Viera, G. (2006). Efficient 2- μm continuous-wave laser oscillation of $\text{Tm}^{+3}:\text{KLu}(\text{WO}_4)_2$. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 42(10).
- Moshonov, J., Orstavik, D., Yamauchi, S., Pettiette, M., & Trope, M. (1995). Nd:YAG laser irradiation in root canal disinfection. *Endodontics & Dental Traumatology*, 11(6), 220-224. doi:10.1111/jc1600-9657.1995.tb00492.x.
- Moulton, P. F. (1986). Spectroscopic and laser characteristics of $\text{Ti}:\text{Al}_2\text{O}_3$. *Journal of the Optical Society of America B*, 3(1), 125. doi:10.1364/josab.3.000125.
- Nowak, M. R., Antonczak, A. J., Koziol, P. E., & Abramski, K. M. (2013). Laser prototyping of printed circuit boards. *Opto-Electronics Review*, 21(3). doi:10.2478/s11772-013-0096-4.
- Poppas, D. P., & Scherr, D. S. (1998). Laser tissue welding: a urological surgeon's perspective. *Haemophilia*, 4(4), 456-462. doi:10.1046/j.1365-2516.1998.440456.x.
- Qiao, J., Zhao, S., Yang, K., Song, W., Qiao, W., Wu, C., Zhao, J., Li, G., Li, D., Li, T., Liu, H., & Lee, C. (2018). High-quality 2- μm Q-switched pulsed solid-state

- lasers using spin-coating-coreduction approach synthesized Bi₂Te₃ topological insulators. *Photonics Research*, 6(4), 314-320. <https://doi.org/10.1364/PRJ.6.000314>.
- Quarles, G. J., Rosenbaum A., Marquardt, C. L., & Esterowitz, L. (1989). High-efficiency 2.09 μm flashlamp-pumped laser. *Applied Physics Letters*. 55(11), 1062-1064. <https://doi.org/10.1063/1.101705>.
- Quarles, G. J., Rosenbaum, A., Marquardt, C. L., & Esterowitz, L. (1990). Efficient room-temperature operation of a flash-lamp-pumped, Cr,Tm:YAG laser at 2.01 μm . *Optics Letters*, 15(1), 42-44. <https://doi.org/10.1364/OL.15.000042>.
- Sadighha, A., Saatee, S., & Muhaghegh-Zahed, G. (2008). Efficacy and adverse effects of Q-switched ruby laser on solar lentigines: A prospective study of 91 patients with fitzpatrick skin type II, III, and IV. *Dermatologic Surger* 34(11), 1465-1468. doi:10.1111/j.1524-4725.2008.34310.x.
- Sennaroglu, A. (Ed.). (2007). *Solid-state lasers and applications*. CRC Press. Taylor & Francis Group.
- Scholle, K., Heumann, E., & Huber, G. (2004). Single mod Tm and Tm,Ho:LuAG lasers for LIDAR applications. *Laser Physics Letters*. 1(6), 285-290. doi:10.1002/lapl.200410067.
- Scholle, K., Lamrini, S., Koopmann, P., & Fuhrberg, P. (2010). 2 μm Laser sources and their possible applications. *Frontiers in Guided Wave Optics and Optoelectronics*. 21. doi:10.5772/39538.
- Schetzen, M., & Yıldırım, R. (2003). System theory of the single-mode laser-diode. *Optics Communications*. 219(1-6), 341-350. [https://doi.org/10.1016/S0030-4018\(03\)01302-6](https://doi.org/10.1016/S0030-4018(03)01302-6).
- Schubert, E. F. (2018). *Light-Emitting Diodes* (3. baskı). Cambridge University Press.
- Siegman, A. E. (1993). Defining, measuring, and optimizing laser beam quality. Proceeding Volume 1868, Laser Resonators and Coherent Optics: Modeling, Technology, and Applications. doi:10.1117/12.150601.
- Sievers, M., Frentzan, M., Kosina, A., & Koort, H. J. (1993). Scaling of root surfaces with lasers: an in vitro study. *Proceedings of SPIE-Dental Applications of Lasers*, 2080, 83-88. <https://doi.org/10.1117/12.166170>.
- Song, P., Zhao, Z., Xu, X., Jang, B., Deng, P., & Xu, J. (2004). Growth and properties of Tm:YAG crystals. *Journal of Crystal Growth*. 270(3-4), 433-437. doi:10.1016/j.jcrysgro.2004.06.04.
- Strohmaier, S., Tillkorn, C., Olschowsky, P., & Hostetler, J. (2010). High-power, high-brightness direct-diode lasers. *Optics and photonics news*, 21(10), 24-29. doi:10.1364/opn.21.10.000024.

- Stoneman, R. C., & Esterowitz, L. (1990). Efficient, broadly tunable, laser-pumped Tm:YAG and Tm:YSGG cw lasers. *Optics Letters*, 15(9), 486-488. <https://doi.org/10.1364/OL.15.000486>.
- Stoneman, R. C., Pinto, J. F., Esterowitz, L., & Rosenblatt, G. H. (1992). 681-nm-pumped 2-/spl mu/m Tm:YAG laser. in LEOS '92 Conference Proceedings, 304-305.
- Sudesh, V., & Goldys, E. M. (2000). Spectroscopic properties of thulium-doped crydtalline materials including a novel host, La₂Be₂O₅: a comparative study. *Journal of the Optical Society of America B*, 17(6), 1068-1076. <https://doi.org/10.1364/JOSAB.17.001068>.
- Sudesh, V., & Piper, J. A. (2000). Spectroscopy, modeling, and laser operation of thulium-doped crystals at 2.3 μ m. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 36(7), 879-884. doi:10.1109/3.848362.
- Sumpf, B., Adamiec, P., Fricke, J., Ressel, P., Wenzel, H., Erbert, G., & Trankle, G. (2010). Comparson of 650 nm tapered lasers with different lateral geometries at output Powers up to 1 W. Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering 7616. doi:10.1117/12.840642.
- Sumpf, B., Adamiec, P., Zorn, M., Wenzel, H., & Erbert, G. (2011). Nearly diffraction-limited tapered lasers at 675 nm with 1-W output power and conversion efficiencies above 30%. *IEEE Photonics Technology Letters*, 23(4), 266-268. doi:10.1109/Ipt.2010.2100377.
- Sumpf, B., Erbert, G., Fricke, J., Froese, P., Haring, R., Kaenders, W. G., Klehr, A., Lison, F., Ressel, P., Wenzel, H., Weyers, M., Zorn, M., & Trankle, G. (2007). 670 nm tapered lasers and amplifiers with output Powers $P \geq 1$ W and nearly diffraction limited beam quality. Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering 6485. doi:10.1117/12.697935.
- Sun, H. (2012). *Laser diode beam basics, manipulations and characterizations*. Springer Dordrechr Heidelberg New York London.
- Suni, P. J. M., & Henderson, S. W. (1991). 1-mJ/pulse Tm:YAG laser pumped by a 3-W diode laser. *Optics Letters*, 16(11), 817-819. <https://doi.org/10.1364/OL.16.000817>.
- Targ, R., Steakley, B. C., Hawley, J. G., Ames, L. L., Forney, P., Swanson, D., Stone, R., Otto, R. G., Zarifis, V., Brockman, P., Calloway R. S., Klein, S. H., & Robinson, P. A. (1996). Coherent lidar airborne wind sensor II:flight-test results at 2 and 10 μ m. *Applied Optics*, 20;35(36), 7117-7127. doi:10.1364/AO.35.007117.
- Tiffany, W. B. (1985). Drilling, marking and other applications for industrial Nd:YAG lasers. SPIE Volume 527 Applications of High Power Lasers. doi:10.1117/12.946392.

- Traxer, O., & Keller, E. X. (2019). Thulium fiber laser: the new player for kidney stone treatment? A comparison with Holmium:YAG laser. *World Journal of Urology*. doi:10.1007/s00345-019-02654-5.
- Uppendra, N. S., Williams-Byrd, J. A., Barnes, N. P., Yu, J., Petros, M., Lockard, G. E., & Modlin, E. A. (1997). Diode-pumped 2- μm solid state lidar transmitter for wind measurements. Proceedings SPIE 3104, Lidar Atmospheric Monitoring. <https://doi.org/10.1117/12.275147>.
- Weber, H., Ifflander, R., & Seiler, P. (1986). High power Nd-Lasers for industrial applications. Proceedings SPIE 0650, High Power Lasers and Their Industrial Applications. doi:10.1117/12.938086.
- Wenzel, H., Sumpf, B., & Erbert, G. (2003). High-brightness diode lasers. *Comptes Rendus Physique*, 4(6), 649-661, doi:10.1016/s1631-0705(03)00074-4.
- Wilson, J., & Hawkes, J. F. B. (1987). *Lasers principles and applications*, New York London Sydney Tokyo:Prentice Hall.
- Wolters, M., Kramer, M. W., Becker J. U., Christgen, M., Nagele, U., Imkamp, F., Burchardt, M., Merseburger, A. S., Kuczyk, M. A., Bach, T., Gross, A. J., & Herrmann, T. R. W. (2011). Tm:YAG laser en bloc muscosectomy for accurate staging of primary bladder cancer: early experience. *World Journal of Urology*, 29(4), 429-432. doi:10.1007/s00345-011-00686-z.
- White, J. M., Goodis, H. E., & Rose, C. L. (1991). Use of the pulsed Nd:YAG laser for intraoral soft tissue surgery. *Lasers in Surgery and Medicine*, 11(5), 455-461. doi:10.1002/Ism.1900110511.
- Wu, C. T., Ju, Y. L., Wang, Z. G., Wang, Q., Song, C. W., & Wang, Y. Z. (2008). Diode-pumped single frequency Tm:YAG laser at room temperature. *Laser Physics Letters*. 5(11), 793-796. doi:10.1002/lapl.200810069.
- Xu, X. D., Wang, X. D., Lin, Z. F., Cheng, Y., Li, D. Z., Cheng, S. S., Wu, F., Zhao, Z. W., Gao, C. Q., Gao, M. W., & Xu, J. (2009). Crystal growth, spectroscopic and laser properties of Tm:LuAG crystal. *Laser Physics*. 19, 2140-2143. <https://doi.org/10.1134/S1054660X09210129>.
- Yan, Y., Olszewski, A. E., Hoffman, M. R., Zhuang, P., Ford, C. N., Dailey, S. H., & Jiang, J. J. (2010). *Journal of Voice*, 24(1), 102-109, doi:10.1016/j.jvoice.2008.09.006.
- Yang, K., Yang, Y., He, J., & Zhao, S. (2019). Q-Switched 2 micron solid-state lasers and their applications. In *Laser Technology*, IntechOpen.
- Yi, H. J., Diaz, J., Eliashevich, I. Stanton, M., Erdtmann, M., He, X., Wang, L. J., & Razeghi, M. (1995). Temperature dependence of threshold current density J_{th} and differential efficiency η_d of high-power InGaAsP/GaAs $\lambda = 0.8 \mu\text{m}$ lasers. *Applied Physics Letters*, 66, 253-255. <https://doi.org/10.1063/1.114193>.

- Yu, H., Petrov, V., Griebner, U., Parisi, D., Veronesi, S., & Tonelli, M. (2012). Compact passively Q-switched diode-pumped Tm:LiLuF₄ laser with 1.26 mJ output energy. *Optics Letters*, 37(13), 2544-2546. <https://doi.org/10.1364/OL.37.002544>.
- Zha, F., Yu, X., Chu, H., Pan, H., Zhao, S., Loiko, P., Pan, Z., & Li, D. (2022). Compact diode-pumped continuous wave and passively Q switched Tm:YAG laser at 2.33 μm . *Optics Letters*. 47(23). 6265-6268. <https://doi.org/10.1364/OL.478341>.
- Zhou, J., Taft, G., Huang C., Murnane, M. M., Kapteyn, H. C., & Christov, I. P. (1994). Pulse evolution in a broad-bandwidth Ti:sapphire laser. *Optics Letters*, 19(15), 1149-1151. <https://doi.org/10.1364/OL.19.001149>.
- Zyoud, S. H., Abdelkader, A., & Zyoud, A. H. (2020). The impact of temperature on the performance of semiconductor laser diode. *International Journal of Advanced Science and Technology*, 29(6), 1167-1180.