



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

**BANT-İÇİ DİYOT POMPALI Tm:YAG VE Tm:LuAG KATI-HAL
LAZER SİSTEMLERİNİN GELİŞTİRİLMESİ VE
PERFORMANSLARININ İNCELENMESİ**

(Yüksek Lisans Tezi)

Hatice BİLİCİ

**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, Hatice BİLİCİ tarafından hazırlanan *Bant-İçi Diyot Pompalı Tm:YAG ve Tm:LuAG Katı-Hal Lazer Sistemlerinin Geliştirilmesi ve 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 “Bant-İçi Diyot Pompaalı Tm:YAG ve Tm:LuAG Katı-Hal Lazer Sistemlerinin Geliştirilmesi ve 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 anlaşılacak bir durumun ortaya çıkması halinde; Üniversiteniz ve eğitim kadronuzun hiçbir şekilde sorumlu tutulmayacağını hür irademle kabul, beyan ve taahhüt ederim.

30 /01/2025

Hatice BİLİCİ

ÖN SÖZ

Bu çalışmanın her aşamasında bilgi ve deneyimleriyle yolumu aydınlatan, teşvik edici yaklaşımı ve sabırlı rehberliğiyle bana ilham veren, sayın danışmanım Ersen BEYATLI'ya en içten teşekkürlerimi sunarım. Gerek akademik bilgi birikimini paylaşarak gerekse süreç boyunca gösterdiği anlayış ve destekle, bu çalışmanın ortaya çıkmasında büyük bir pay sahibidir. Onun rehberliğinde edindiğim değerli kazanımlar, akademik hayatım boyunca yol gösterici olacaktır.

Bu çalışmaya sağladığı bilimsel katkılar ve kıymetli rehberliği için Ümit Demirbaş'a en içten teşekkürlerimi sunarım.

Bilgi ve enerjisiyle her zaman yanımda olan değerli arkadaşım Fatma KAYA'ya gönülden teşekkür ederim. Dostluğuyla bana güç verdi ve çözüm odaklı yaklaşımı ve moral veren sohbetleri, bu yolculuğu hem daha verimli hem de daha anlamlı kıldı. Onun varlığı, bu çalışmanın tamamlanmasında büyük bir paya sahiptir.

Maddi desteklerinde ötürü TÜBİTAK'a ve bana bu nadir fırsatı verdiği için Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi'ne en derin şükranlarımı sunuyorum.

Bu süreçte her zaman yanımda olan, sevgileri, sabırları ve destekleriyle bana güç veren kıymetli aileme en derin teşekkürlerimi sunarım. İyi ki varsınız.

Bu tez çalışmamı, hayatımın en değerli armağanı, sevgili kardeşim Hanife Azra BİLİCİ'ye, varlığıyla yaşamıma anlam katan bir ışık olduğu için derin bir sevgi ve minnetle ithaf ediyorum...

“Bu çalışma TÜBİTAK tarafından 1001 Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Projelerini Destekleme Programı kapsamında desteklenmiştir. Proje Adı/Numarası: “680 nm’de daralan kılavuz yapılı ve 1,6 μm bölgesinde yüksek parlaklığa sahip diyotlarla uyarılan Tm:YAG ve Tm:LuAG lazerlerinin geliştirilip performanslarının incelenmesi ve modellenmesi”/119F308.” (“This study was supported by TUBITAK within the scope of 1001 Scientific and Technological Research Projects Support Program. Project Name/ Number: “Development and Modelling of 680 nm tapered diode and 1.6 μm high-brightness diode pumped Tm:YAG and Tm:LuAG Lasers”/ 119F308.”)

Hatice BİLİCİ

RİZE/2025

İÇİNDEKİLER

KABUL VE ONAY	I
ETİK BEYAN.....	II
ÖN SÖZ	III
ÖZET	VI
ABSTRACT.....	VII
KISALTMALAR.....	VIII
TABLolar LİSTESİ.....	X
ŞEKİLLER LİSTESİ	XI
GİRİŞ	1
1. LAZER FİZİĞİ	4
1.1. Lazer Işığının Oluşumu.....	6
1.2. Lazer Işığının Özellikleri	8
1.3. Aktif Ortama Göre Lazerler	9
1.4. Lazer Pompalama Tekniğı	9
2. DİYOT POMPALI KATI HAL LAZER SİSTEMLERİ.....	11
2.1. Çalışma Dalga Boyu	12
2.2. Güç ve Verimlilik.....	13
2.3. Termal Performans.....	15
2.4. Işın Kalitesi	18
2.5. Darbeli Dalga Modları	22
3. TULYUM LAZERLERİ-LİTERATÜR	24
4. GEREÇ VE YÖNTEM.....	29
5. BULGULAR.....	35
5.1. Sürekli Dalga Rejimindeki Sonuçlar.....	35
5.1.1. %6 Katkılı 3-mm Tm:YAG Kristali.....	39
5.1.2. %6 Katkılı 5-mm Tm:YAG Kristali.....	41
5.1.3. %6 Katkılı 7-mm Tm:YAG Kristali.....	44
5.1.4. %6 Katkılı 7-mm Tm:LuAG Kristali	47
5.1.5. %6 Katkılı 5-mm Tm:LuAG Kristali	50
5.1.6. %6 Katkılı 3-mm Tm:LuAG Kristali	53

5.1.7. %4 Katkılı 7-mm Tm:LuAG Kristali	56
5.1.8. %4 Katkılı 5-mm Tm:LuAG Kristali	59
5.1.9. %4 Katkılı 3-mm Tm:LuAG Kristali	62
5.1.10. %3 Katkılı 7-mm Tm:YAG Kristali.....	65
5.1.11. %3 Katkılı 5-mm Tm:YAG Kristali.....	68
5.1.12. %3 Katkılı 3-mm Tm:YAG Kristali.....	71
5.1.13. %1,5 Katkılı 9-mm Tm:YAG Kristali.....	74
5.1.14. %1,5 Katkılı 7-mm Tm:YAG Kristali.....	77
5.1.15. %1,5 Katkılı 5-mm Tm:YAG Kristali.....	80
5.1.16. %1,5 Katkılı 3-mm Tm:YAG Kristali.....	83
5.1.17. %2 Katkılı 7-mm Tm:LuAG Kristali	86
5.1.18. %2 Katkılı 5-mm Tm:LuAG Kristali	89
5.1.19. %2 Katkılı 9-mm Tm:LuAG Kristali	92
5.1.20. %2 Katkılı 3-mm Tm:LuAG Kristali	95
5.2. Dalga Boyu Değişim Aralığı ve Çift Dalga Boyu Çalışma Sonuçları	98
5.2.1. Dalga Boyu Bileşim Grafikleri.....	100
5.2.2. Çift Dalga Boyu Spektrumları.....	110
5.3. Darbeli Rejim Sonuçları.....	120
6. SONUÇ- TARTIŞMA	142
KAYNAKÇA.....	144

Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Anabilim Dalı : Elektrik-Elektronik Mühendisliği

Tez Türü : Yüksek Lisans Tezi

Danışman : Doç. Dr. Ersen BEYATLI

Hazırlayan : Hatice BİLİCİ

Yıl : 2025

Sayfa Sayısı : 150

ÖZET

BANT-İÇİ DİYOT POMPALI Tm:YAG VE Tm:LuAG KATI-HAL LAZER SİSTEMLERİNİN GELİŞTİRİLMESİ VE PERFORMANSLARININ İNCELENMESİ

Bu tez çalışmasında son yıllarda geliştirilen 1,6 μm bölgesindeki yüksek parlaklığa sahip telekom uygulamalarında sıklıkla kullanılan lazer diyotları ile Tm^{+3} katkılı lazerler uyarılmıştır. Bu lazer diyotlar kullanılarak 10 farklı Tm:YAG ve 10 farklı Tm:LuAG kristali ile kurulan katı-hal lazer sistemleri uyarılarak sürekli-dalga rejimindeki ve darbeli rejimlerdeki performansları incelenmiştir. Tm:YAG lazerlerinden (1 W giriş gücü ile) 189 mW çıkış gücüne ve %64 verime kadar sonuçlar elde edilmiştir. Q-anahtarlamalı rejimde en kısa 1,09 μs genişliğinde, en sık 22,54 kHz tekrarlama frekansında darbeler elde edilmiştir. Bu sistemlerde en yüksek darbe tepe gücü 2,03 W ve darbe enerjisi 2,35 μJ değerindedir. Tm:LuAG lazerlerinden (1 W giriş gücü ile) 147 mW çıkış gücüne ve %68 verime kadar sonuçlar elde edilmiştir. Q-anahtarlamalı rejimde en kısa 1,99 μs genişliğinde, en sık 27,46 kHz tekrarlama frekansında darbeler elde edilmiştir. Bu sistemlerde en yüksek darbe tepe gücü 0,56 W ve darbe enerjisi 1,42 μJ değerindedir. Ayrıca dalga boyu değişim dinamikleri incelenmiş ve Tm:YAG lazerleri ile 204 nm'ye kadar (1871-2075 nm arası), Tm:LuAG lazerleri ile 159 nm'ye kadar (1924-2083 nm arası) değişim gözlemlenmiştir.

Katı hal Tulyum lazerleri uygun dalga boyu ile uyarıldığında, 2 μm bölgesinde ışıyım yapabilmektedir. 2 μm bölgesindeki lazerler göze zararsız bölgede ışıma yapabilen lazerlerdir. Bu lazerler suda yüksek absorpsiyon özelliği gösterirler ve nispeten bu özellik etkisi ve spektral özellikleriyle LiDAR sistemleri, mikro cerrahi, polimer, yarı iletken ve metallerin işlenmesi, savunma sanayisi, gaz algılama endüstrileri gibi birçok alanda yaygın olarak kullanılırlar. Rüzgar hızı ölçümü, su buharı, karbondioksit konsantrasyonu tespiti gibi uzun menzil tespitleri ile meteorolojik veriler sağlarlar. Yine dokunun ana bileşeninin su olduğu düşünüldüğünde, dokuda mikrometre seviyesinde penetrasyon derinliği gösterebildiklerinden yüksek hassasiyet gerektiren cerrahi ameliyatlarında dokunun oldukça hassas bir şekilde kesimi sağlanır. Bu tez çalışmasında gerçekleştirilen lazerlerin özellikle LiDAR ve spektroskopi gibi alanlarda büyük ilgi uyandıracığı düşünülmektedir.

Anahtar Kelimeler: Diyot pompalı katı-hal lazerleri, 2 μm lazerleri, Tm:YAG lazerleri, Tm:LuAG lazerleri, Q-anahtarlamalı lazerler, Çok-renkli lazerler

Recep Tayyip Erdogan University Institute of Graduate Studies

Department : Electrical Electronics Engineering

Thesis Type : Master's Thesis

Supervisor : Assoc. Prof. Dr. Ersen BEYATLI

Author : Hatice BILICI

Year : 2025

Pages : 150

ABSTRACT

DEVELOPMENT AND PERFORMANCE INVESTIGATION OF IN-BAND DIODE PUMPED Tm:YAG AND Tm:LuAG SOLID STATE LASER SYSTEMS

In this thesis study, laser diodes developed in recent years and frequently used in telecom applications with high brightness in the 1,6 μm region and Tm^{3+} doped lasers were excited. Using these laser diodes, solid-state laser systems established with 10 different Tm:YAG and 10 different Tm:LuAG crystals were excited and their performances in continuous-wave and pulsed regimes were investigated. Results up to 189 mW output power and 63% efficiency were obtained from Tm:YAG lasers (with 1 W input power). In the Q-switched regime, the shortest pulses with a width of 1.09 μs and a repetition frequency of 22.54 kHz were obtained. The highest pulse peak power in these systems was 2.03 W and the pulse energy was 2.35 μJ . Results up to 147 mW output power and 68% efficiency were obtained from Tm:LuAG lasers (with 1 W input power). In the Q-switched regime, the shortest 1.99 μs wide, most frequent 27.46 kHz repetition frequency pulses were obtained. The highest pulse peak power in these systems was 0.56 W and the pulse energy was 1.42 μJ . In addition, wavelength change dynamics were examined and changes up to 204 nm (between 1871 nm and 2075 nm) were observed with Tm:YAG lasers and up to 159 nm (between 1924 nm and 2083 nm) with Tm:LuAG lasers.

When solid-state thulium lasers are excited with the appropriate wavelength, they can emit radiation in the 2 μ region. Lasers in the 2 μ region are lasers that can emit radiation in the eye-safe region. These lasers exhibit high absorption properties in water and are widely used in many areas such as LIDAR systems, microsurgery, polymer, semiconductor and metal processing, defense industry, gas detection industries due to this feature effect and spectral properties. They provide meteorological data with long-range detections such as wind speed measurement, water vapor, carbon dioxide concentration detection. Again, considering that the main component of the tissue is water, they can show a penetration depth of micrometer level in the tissue, thus providing a very precise cutting of the tissue in surgical operations that require high precision. It is thought that the lasers developed in this thesis will attract great interest especially in areas such as LIDAR and spectroscopy.

Keywords: Diode pumped solid-state lasers, 2 μm lasers, Tm:YAG lasers, Tm:LuAG lasers, Q-switched lasers, Multi-color lasers

KISALTMALAR

A	:	Transfer Alanı
BPP	:	Işın Parametre Ürünü
c	:	Işık Hızı
$^{\circ}C$	:	Sıcaklık (Celsius)
ÇKP	:	Çift Kırınımlı Filtre
$DSPP$	:	Diyot Pompalı Katı Hal Lazerleri
E_g	:	Bant Enerjisi
$E_g(0)$	:	Mutlak Sıfır Noktasındaki Bant Aralığı Enerjisi
f_{thermal}	:	Termal Lens Odak Uzaklığı
h	:	Plank Sabiti
k	:	Malzemenin Termal İletkenliği (W/m.K), dalga vektörü
L	:	Isı Transfer Mesafesi, Modlar Arası Mesafe
LD	:	Lazer Diyot
M^2	:	Işık kalite faktörü
P_{pump}	:	Pompa Gücü
N_{laser}	:	Lazer Fotonlarının Sayısı
N_{pump}	:	Pompa Fotonlarının Sayısı
P	:	Pompa Gücü
P_{abs}	:	Absorbe Edilen Pompa Gücü
P_{align}	:	Hizalama Gücü
P_{gen}	:	Üretilen Güç
P_{heat}	:	Isıl Güç
P_{in}	:	Giriş Gücü
P_{out}	:	Çıkış Gücü
$P(z)$	:	Aksiyel Faz Faktörü
r	:	Enine Radyal Koordinat
R_{th}	:	Termal Direnç
$R(z)$	:	Işının Dalga Cephesindeki Eğriliği
T	:	Sıcaklık

ΔT	:	Sıcaklık Değişimi
z	:	Boyuna Radyal Koordinat
z_0	:	Rayleigh Uzunluğu
z_f	:	Gauss Işınının Odak Noktası
η_{abs}	:	Absorbsiyon Verimi
η_{stokes}	:	Stokes Verimi
η_q	:	Kuantum Verimi
η_{opt}	:	Optik Verim
η_{therm}	:	Termal Verim
η_{align}	:	Hizalama Verimi
α	:	Bant Aralığının Sıcaklığa Duyarlılığı (eV/K)
β	:	Sıcaklık Etkisinin Doyuma Ulaştığı Sıcaklık Aralığı (K)
$\omega(z)$	:	Işının Spot Boyutu
$q(z)$	:	Gauss q Parametresi
λ	:	Dalga Boyu
λ_L	:	Lazer Işını Dalga Boyu
λ_p	:	Pompa Işını Dalga Boyu
n	:	Ortamin Kırılma İndisi
ω_0	:	Fokus Spot Çapı
θ	:	Işığın Diverjans Açısı

TABLÖLAR LİSTESİ

Tablo 1. 1,6 μm 'de uyarılan sürekli dalga rejimindeki Tm:YAG lazerlerinin sonuçları	36
Tablo 2. 1,6 μm 'de uyarılan sürekli dalga rejimindeki Tm:LuAG lazerlerinin sonuçları	38
Tablo 3. 1,6 μm 'de uyarılan Tm:YAG ve Tm:LuAG lazerlerinin dalga boyu değişim aralığı ve çift dalga boyu çalışma sonuçları	99
Tablo 4. 1,6 μm 'de uyarılan Q-anahtarlamalı Tm:YAG ve Tm:LuAG lazerlerinin sonuçları.....	121



ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1. Basit yapıllı diyot pompalı katı hal lazer sistemi	4
Şekil 2. 1962, orijinal lazer diyot patentinin sembolik gösterimi.....	5
Şekil 3. Lazer 2,3,4 enerji seviyeleri muhtemel diyagramları. (a) iki seviyeli lazer, (b) ve (c) üç seviyeli lazer, (d) dört seviyeli lazer gösterimi	5
Şekil 4. Kendiliğinden emisyon olayı, rastgele fotonlar	7
Şekil 5. Uyarılmış geçiş, kopya fotonlar	7
Şekil 6. Uyarılmış radyasyon emisyonu ile ışık amplifikasyonu	8
Şekil 7. Lazer çalışma ortamında termal kamerayla ölçülmüş örnek bir kristal sıcaklığı.....	16
Şekil 8. Kazanç ortamında ışığın kırmızıya kayması	17
Şekil 9. Yüksek ışın kalitesinde Gauss ışınının odak noktası çevresindeki elektrik alan yoğunluğunun anlık görseli.....	19
Şekil 10. Zayıf ışın kalitesinde Gauss ışınının odak noktası çevresindeki elektrik alan yoğunluğunun anlık görseli	19
Şekil 11. Lazer ışını şekil analizi: gauss ışını ve rayleigh aralığı.....	21
Şekil 12. AlGaAs lazer diyotları kompakt gösterim.....	26
Şekil 13. Örnek bir Tm:YAG kristalinin soğurma spektrumu, (Nasa -1988)	26
Şekil 14. Tm^{+3} iyonlarının muhtemel bant diyagramı ve çapraz sönmelenme etkisi	27
Şekil 15. Kurulan lazer sisteminin genel şeması	29
Şekil 16. Kurulan InGaAsP diyot pompalı lazer sisteminin pompa düzeneği	30
Şekil 17. Lazer rezonatörü.....	30
Şekil 18. M^2 ölçümleri için kullanılan bıçak kenarı düzeneğinin görüntüsü	31
Şekil 19. Kurulan sistemin genel görüntüsü.....	32
Şekil 20. Dalga boyu değişimi için sisteme eklenen ÇKP'nin şematik ve deneysel gösterimi	33
Şekil 21. Darbeli rejim çalışmaları için sisteme eklenen SESAM'nın şematik ve deneysel gösterimi	33
Şekil 22. Deneysel çalışmaların yapıldığı lazer kurulumun genel hali	34
Şekil 23. %6 katkılı 3-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminin 15 °C'deki verim eğrisi	39
Şekil 24. %6 katkılı 3-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazerinin M^2 ölçüm sonucu ...	39

Şekil 25. %6 katkılı 3-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminin 10 °C'deki verim eğrisi	40
Şekil 26. %6 katkılı 3-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminin 20 °C'deki verim eğrisi	40
Şekil 27. %6 katkılı 3-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminin 25 °C'deki verim eğrisi	41
Şekil 28. %6 katkılı 3-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer çıkışının sıcaklığa bağlı değişim grafiği	41
Şekil 29. %6 katkılı 5-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminin 15 °C'deki verim eğrisi	42
Şekil 30. %6 katkılı 5-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazerinin M^2 ölçüm sonucu ..	42
Şekil 31. %6 katkılı 5-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminin 10 °C'deki verim eğrisi	43
Şekil 32. %6 katkılı 5-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminin 20 °C'deki verim eğrisi	43
Şekil 33. %6 katkılı 5-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminin 25 °C'deki verim eğrisi	44
Şekil 34. %6 katkılı 5-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer çıkışının sıcaklığa bağlı değişim grafiği	44
Şekil 35. %6 katkılı 7-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminin 15 °C'deki verim eğrisi	45
Şekil 36. %6 katkılı 7-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazerinin M^2 ölçüm sonucu....	45
Şekil 37. %6 katkılı 7-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminin 10 °C'deki verim eğrisi	46
Şekil 38. %6 katkılı 7-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminin 20 °C'deki verim eğrisi	46
Şekil 39. %6 katkılı 7-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminin 25 °C'deki verim eğrisi	47
Şekil 40. %6 katkılı 7-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer çıkışının sıcaklığa bağlı değişim grafiği	47
Şekil 41. %6 katkılı 7-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminin 15 °C'deki verim eğrisi	48
Şekil 42. %6 katkılı 7-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazerinin M^2 ölçüm sonucu ..	48
Şekil 43. %6 katkılı 7-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminin 10 °C'deki verim eğrisi	49
Şekil 44. %6 katkılı 7-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminin 20 °C'deki verim eğrisi	49

Şekil 45. %6 katkılı 7-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminin 25 °C’deki verim eğrisi	50
Şekil 46. %6 katkılı 7-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer çıkışının sıcaklığa bağlı değişim grafiği	50
Şekil 47. %6 katkılı 5-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminin 15 °C’deki verim eğrisi	51
Şekil 48. %6 katkılı 5-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazerinin M^2 ölçüm sonucu ..	51
Şekil 49. %6 katkılı 5-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminin 10 °C’deki verim eğrisi	52
Şekil 51. %6 katkılı 5-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminin 25 °C’deki verim eğrisi	53
Şekil 52. %6 katkılı 5-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer çıkışının sıcaklığa bağlı değişim grafiği	53
Şekil 53. %6 katkılı 3-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminin 15 °C’deki verim eğrisi	54
Şekil 54. %6 katkılı 3-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazerinin M^2 ölçüm sonucu ..	54
Şekil 55. %6 katkılı 3-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminin 10 °C’deki verim eğrisi	55
Şekil 56. %6 katkılı 3-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminin 20 °C’deki verim eğrisi	55
Şekil 57. %6 katkılı 3-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminin 25 °C’deki verim eğrisi	56
Şekil 58. %6 katkılı 3-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer çıkışının sıcaklığa bağlı değişim grafiği	56
Şekil 59. %4 katkılı 7-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminin 15 °C’deki verim eğrisi	57
Şekil 60. %4 katkılı 7-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazerinin M^2 ölçüm sonucu ..	57
Şekil 61. %4 katkılı 7-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminin 10 °C’deki verim eğrisi	58
Şekil 62. %4 katkılı 7-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminin 20 °C’deki verim eğrisi	58
Şekil 63. %4 katkılı 7-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminin 25 °C’deki verim eğrisi	59
Şekil 64. %4 katkılı 7-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer çıkışının sıcaklığa bağlı değişim grafiği	59
Şekil 65. %4 katkılı 5-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminin 15 °C’deki verim eğrisi	60

Şekil 67. %4 katkılı 5-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminin 10 °C’deki verim eğrisi	61
Şekil 68. %4 katkılı 5-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminin 20 °C’deki verim eğrisi	61
Şekil 69. %4 katkılı 5-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminin 25 °C’deki verim eğrisi	62
Şekil 70. %4 katkılı 5-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer çıkışının sıcaklığa bağlı değişim grafiği	62
Şekil 71. %4 katkılı 3-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminin 15 °C’deki verim eğrisi	63
Şekil 72. %4 katkılı 3-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazerinin M^2 ölçüm sonucu..	63
Şekil 73. %4 katkılı 3-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminin 10 °C’deki verim eğrisi	64
Şekil 74. %4 katkılı 3-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminin 20 °C’deki verim eğrisi	64
Şekil 75. %4 katkılı 3-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminin 25 °C’deki verim eğrisi	65
Şekil 76. %4 katkılı 3-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer çıkışının sıcaklığa bağlı değişim grafiği	65
Şekil 77. %3 katkılı 7-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminin 15 °C’deki verim eğrisi	66
Şekil 78. %3 katkılı 7-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazerinin M^2 ölçüm sonucu....	66
Şekil 79. %3 katkılı 7-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminin 10 °C’deki verim eğrisi	67
Şekil 80. %3 katkılı 7-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminin 20 °C’deki verim eğrisi	67
Şekil 81. %3 katkılı 7-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminin 25 °C’deki verim eğrisi	68
Şekil 82. %3 katkılı 7-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer çıkışının sıcaklığa bağlı değişim grafiği	68
Şekil 83. %3 katkılı 5-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminin 15 °C’deki verim eğrisi	69
Şekil 84. %3 katkılı 5-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazerinin M^2 ölçüm sonucu ...	69
Şekil 85. %3 katkılı 5-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminin 10 °C’deki verim eğrisi	70
Şekil 86. %3 katkılı 5-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminin 20 °C’deki verim eğrisi	70

Şekil 87. %3 katkılı 5-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminin 25 °C'deki verim eğrisi	71
Şekil 88. %3 katkılı 5-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer çıkışının sıcaklığa bağlı değişim grafiği	71
Şekil 89. %3 katkılı 3-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminin 15 °C'deki verim eğrisi	72
Şekil 90. %3 katkılı 3-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazerinin M^2 ölçüm sonucu ...	72
Şekil 91. %3 katkılı 3-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminin 10 °C'deki verim eğrisi	73
Şekil 92. %3 katkılı 3-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminin 20 °C'deki verim eğrisi	73
Şekil 93. %3 katkılı 3-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminin 25 °C'deki verim eğrisi	74
Şekil 94. %3 katkılı 3-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer çıkışının sıcaklığa bağlı değişim grafiği	74
Şekil 95. %1,5 katkılı 9-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminin 15 °C'deki verim eğrisi	75
Şekil 96. %1,5 katkılı 9-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazerinin M^2 ölçüm sonucu	75
Şekil 97. %1,5 katkılı 9-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminin 10 °C'deki verim eğrisi	76
Şekil 98. %1,5 katkılı 9-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminin 20 °C'deki verim eğrisi	76
Şekil 99. %1,5 katkılı 9-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminin 25 °C'deki verim eğrisi	77
Şekil 100. %1,5 katkılı 9-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer çıkışının sıcaklığa bağlı değişim grafiği	77
Şekil 101. %1,5 katkılı 7-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminin 15 °C'deki verim eğrisi	78
Şekil 102. %1,5 katkılı 7-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazerinin M^2 ölçüm sonucu	78
Şekil 103. %1,5 katkılı 7-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminin 10 °C'deki verim eğrisi	79
Şekil 104. %1,5 katkılı 7-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminin 20 °C'deki verim eğrisi	79
Şekil 105. %1,5 katkılı 7-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminin 25 °C'deki verim eğrisi	80
Şekil 106. %1,5 katkılı 7-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer çıkışının sıcaklığa bağlı değişim grafiği	80

Şekil 107. %1,5 katkılı 5-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminin 15 °C'deki verim eğrisi	81
Şekil 108. %1,5 katkılı 5-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazerinin M^2 ölçüm sonucu	81
Şekil 109. %1,5 katkılı 5-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminin 10 °C'deki verim eğrisi	82
Şekil 110. %1,5 katkılı 5-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminin 20 °C'deki verim eğrisi	82
Şekil 111. %1,5 katkılı 5-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminin 25 °C'deki verim eğrisi	83
Şekil 112. %1,5 katkılı 5-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer çıkışının sıcaklığa bağlı değişim grafiği	83
Şekil 113. %1,5 katkılı 3-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminin 15 °C'deki verim eğrisi	84
Şekil 114. %1,5 katkılı 3-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazerinin M^2 ölçüm sonucu	84
Şekil 115. %1,5 katkılı 3-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminin 10 °C'deki verim eğrisi	85
Şekil 116. %1,5 katkılı 3-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminin 20 °C'deki verim eğrisi	85
Şekil 117. %1,5 katkılı 3-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminin 25 °C'deki verim eğrisi	86
Şekil 118. %1,5 katkılı 3-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer çıkışının sıcaklığa bağlı değişim grafiği	86
Şekil 119. %2 katkılı 7-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminin 15 °C'deki verim eğrisi	87
Şekil 120. %2 katkılı 7-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazerinin M^2 ölçüm sonucu	87
Şekil 121. %2 katkılı 7-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminin 10 °C'deki verim eğrisi	88
Şekil 122. %2 katkılı 7-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminin 20 °C'deki verim eğrisi	88
Şekil 123. %2 katkılı 7-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminin 25 °C'deki verim eğrisi	89
Şekil 124. %2 katkılı 7-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer çıkışının sıcaklığa bağlı değişim grafiği	89
Şekil 125. %2 katkılı 5-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminin 15 °C'deki verim eğrisi	90
Şekil 126. %2 katkılı 5-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazerinin M^2 ölçüm sonucu	90

Şekil 127. %2 katkılı 5-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminin 10 °C'deki verim eğrisi	91
Şekil 128. %2 katkılı 5-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminin 20 °C'deki verim eğrisi	91
Şekil 129. %2 katkılı 5-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminin 25 °C'deki verim eğrisi	92
Şekil 130. %2 katkılı 5-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer çıkışının sıcaklığa bağlı değişim grafiği	92
Şekil 131. %2 katkılı 9-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminin 15 °C'deki verim eğrisi	93
Şekil 132. %2 katkılı 9-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazerinin M^2 ölçüm sonucu	93
Şekil 133. %2 katkılı 9-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminin 10 °C'deki verim eğrisi	94
Şekil 134. %2 katkılı 9-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminin 20 °C'deki verim eğrisi	94
Şekil 135. %2 katkılı 9-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminin 25 °C'deki verim eğrisi	95
Şekil 136. %2 katkılı 9-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer çıkışının sıcaklığa bağlı değişim grafiği	95
Şekil 137. %2 katkılı 3-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminin 15 °C'deki verim eğrisi	96
Şekil 138. %2 katkılı 3-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazerinin M^2 ölçüm sonucu	96
Şekil 139. %2 katkılı 3-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminin 10 °C'deki verim eğrisi	97
Şekil 140. %2 katkılı 3-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminin 20 °C'deki verim eğrisi	97
Şekil 141. %2 katkılı 3-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminin 25 °C'deki verim eğrisi	98
Şekil 142. %2 katkılı 3-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer çıkışının sıcaklığa bağlı değişim grafiği	98
Şekil 143. %6 katkılı 3-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminin dalga boyu değişim aralığı	100
Şekil 144. %6 katkılı 5-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminin dalga boyu değişim aralığı	101
Şekil 145. %6 katkılı 7-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminin dalga boyu değişim aralığı	101

Şekil 146. %6 katkılı 7-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminin dalga boyu değişim aralığı	102
Şekil 147. %6 katkılı 5-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminin dalga boyu değişim aralığı	102
Şekil 148. %6 katkılı 3-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminin dalga boyu değişim aralığı	103
Şekil 149. %4 katkılı 7-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminin dalga boyu değişim aralığı	103
Şekil 150. %4 katkılı 5-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminin dalga boyu değişim aralığı	104
Şekil 151. %4 katkılı 3-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminin dalga boyu değişim aralığı	104
Şekil 152. %3 katkılı 7-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminin dalga boyu değişim aralığı	105
Şekil 153. %3 katkılı 5-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminin dalga boyu değişim aralığı	105
Şekil 154. %3 katkılı 3-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminin dalga boyu değişim aralığı	106
Şekil 155. %1,5 katkılı 9-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminin dalga boyu değişim aralığı	106
Şekil 156. %1,5 katkılı 7-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminin dalga boyu değişim aralığı	107
Şekil 157. %1,5 katkılı 5-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminin dalga boyu değişim aralığı	107
Şekil 158. %1,5 katkılı 3-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminin dalga boyu değişim aralığı	108
Şekil 159. %2 katkılı 7-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminin dalga boyu değişim aralığı	108
Şekil 160. %2 katkılı 5-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminin dalga boyu değişim aralığı	109
Şekil 161. %2 katkılı 9-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminin dalga boyu değişim aralığı	109
Şekil 162. %2 katkılı 3-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminin dalga boyu değişim aralığı	110
Şekil 163. %6 katkılı 3-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminde elde edilen çift dalga boyu çalışma durumunun spektrumu.....	110
Şekil 164. %6 katkılı 5-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminde elde edilen çift dalga boyu çalışma durumunun spektrumu.....	111

Şekil 165. %6 katkılı 7-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminde elde edilen çift dalga boyu çalışma durumunun spektrumu.....	111
Şekil 166. %6 katkılı 7-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminde elde edilen çift dalga boyu çalışma durumunun spektrumu.....	112
Şekil 167. %6 katkılı 5-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminde elde edilen çift dalga boyu çalışma durumunun spektrumu.....	112
Şekil 168. %6 katkılı 3-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminde elde edilen çift dalga boyu çalışma durumunun spektrumu.....	113
Şekil 169. %4 katkılı 7-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminde elde edilen çift dalga boyu çalışma durumunun spektrumu.....	113
Şekil 170. %4 katkılı 5-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminde elde edilen çift dalga boyu çalışma durumunun spektrumu.....	114
Şekil 171. %4 katkılı 3-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminde elde edilen çift dalga boyu çalışma durumunun spektrumu.....	114
Şekil 172. %3 katkılı 7-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminde elde edilen çift dalga boyu çalışma durumunun spektrumu.....	115
Şekil 173. %3 katkılı 5-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminde elde edilen çift dalga boyu çalışma durumunun spektrumu.....	115
Şekil 174. %3 katkılı 3-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminde elde edilen çift dalga boyu çalışma durumunun spektrumu.....	116
Şekil 175. %1,5 katkılı 9-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminde elde edilen çift dalga boyu çalışma durumunun spektrumu.....	116
Şekil 176. %1,5 katkılı 7-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminde elde edilen çift dalga boyu çalışma durumunun spektrumu.....	117
Şekil 177. %1,5 katkılı -5mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminde elde edilen çift dalga boyu çalışma durumunun spektrumu.....	117
Şekil 178. %1,5 katkılı 3-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminde elde edilen çift dalga boyu çalışma durumunun spektrumu.....	118
Şekil 179. %2 katkılı 7-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminde elde edilen çift dalga boyu çalışma durumunun spektrumu.....	118
Şekil 180. %2 katkılı 5-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminde elde edilen çift dalga boyu çalışma durumunun spektrumu.....	119
Şekil 181. %2 katkılı 9-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminde elde edilen çift dalga boyu çalışma durumunun spektrumu.....	119
Şekil 182. %1,5 katkılı 3-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminde elde edilen çift dalga boyu çalışma durumunun spektrumu.....	120
Şekil 183. %6 katkılı 3-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminde elde edilen Q-anahtarlama darbelerin genişliği.....	122

Şekil 184. %6 katkılı 3-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminde elde edilen Q-anahtarlama darbelerin periyodu	122
Şekil 185. %6 katkılı 5-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminde elde edilen Q-anahtarlama darbelerin genişliği.....	123
Şekil 186. %6 katkılı 5-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminde elde edilen Q-anahtarlama darbelerin	123
Şekil 187. %6 katkılı 7-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminde elde edilen Q-anahtarlama darbelerin genişliği.....	124
Şekil 188. %6 katkılı 7-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminde elde edilen Q-anahtarlama darbelerin periyodu	124
Şekil 189. %6 katkılı 7-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminde elde edilen Q-anahtarlama darbelerin genişliği.....	125
Şekil 190. %6 katkılı 7-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminde elde edilen Q-anahtarlama darbelerin periyodu	125
Şekil 191. %6 katkılı 5-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminde elde edilen Q-anahtarlama darbelerin genişliği.....	126
Şekil 192. %6 katkılı 5-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminde elde edilen Q-anahtarlama darbelerin periyodu	126
Şekil 193. %6 katkılı 3-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminde elde edilen Q-anahtarlama darbelerin genişliği.....	127
Şekil 194. %6 katkılı 3-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminde elde edilen Q-anahtarlama darbelerin periyodu	127
Şekil 195. %4 katkılı 7-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminde elde edilen Q-anahtarlama darbelerin genişliği.....	128
Şekil 196. %4 katkılı 7-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminde elde edilen Q-anahtarlama darbelerin periyodu	128
Şekil 197. %4 katkılı 5-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminde elde edilen Q-anahtarlama darbelerin genişliği.....	129
Şekil 198. %4 katkılı 5-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminde elde edilen Q-anahtarlama darbelerin periyodu	129
Şekil 199. %4 katkılı 3-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminde elde edilen Q-anahtarlama darbelerin genişliği.....	130
Şekil 200. %4 katkılı 3-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminde elde edilen Q-anahtarlama darbelerin periyodu	130
Şekil 201. %3 katkılı 7-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminde elde edilen Q-anahtarlama darbelerin genişliği.....	131
Şekil 202. %3 katkılı 7-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminde elde edilen Q-anahtarlama darbelerin periyodu	131

Şekil 203. %3 katkılı 5-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminde elde edilen Q-anahtarlama darbelerin genişliği.....	132
Şekil 204. %3 katkılı 5-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminde elde edilen Q-anahtarlama darbelerin periyodu	132
Şekil 205. %3 katkılı 3-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminde elde edilen Q-anahtarlama darbelerin genişliği.....	133
Şekil 206. %3 katkılı 3-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminde elde edilen Q-anahtarlama darbelerin periyodu	133
Şekil 207. %1,5 katkılı 9-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminde elde edilen Q-anahtarlama darbelerin genişliği.....	134
Şekil 208. %1,5 katkılı 9-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminde elde edilen Q-anahtarlama darbelerin periyodu	134
Şekil 209. %1,5 katkılı 7-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminde elde edilen Q-anahtarlama darbelerin genişliği.....	135
Şekil 210. %1,5 katkılı 7-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminde elde edilen Q-anahtarlama darbelerin periyodu	135
Şekil 211. %1,5 katkılı 5-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminde elde edilen Q-anahtarlama darbelerin genişliği.....	136
Şekil 212. %1,5 katkılı 5-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminde elde edilen Q-anahtarlama darbelerin periyodu	136
Şekil 213. %1,5 katkılı 3-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminde elde edilen Q-anahtarlama darbelerin genişliği.....	137
Şekil 214. %1,5 katkılı 3-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminde elde edilen Q-anahtarlama darbelerin periyodu	137
Şekil 215. %2 katkılı 7-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminde elde edilen Q-anahtarlama darbelerin genişliği.....	138
Şekil 216. %2 katkılı 7-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminde elde edilen Q-anahtarlama darbelerin periyodu	138
Şekil 217. %2 katkılı 5-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminde elde edilen Q-anahtarlama darbelerin genişliği.....	139
Şekil 218. %2 katkılı 5-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminde elde edilen Q-anahtarlama darbelerin periyodu	139
Şekil 219. %2 katkılı 9-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminde elde edilen Q-anahtarlama darbelerin genişliği.....	140
Şekil 220. %2 katkılı 9-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminde elde edilen Q-anahtarlama darbelerin periyodu	140
Şekil 221. %2 katkılı 3-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminde elde edilen Q-anahtarlama darbelerin genişliği.....	141

Şekil 222. %2 katkılı 3-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminde elde edilen Q-anahtarlama darbelerin periyodu 141



GİRİŞ

1960 yılında Theodore Maiman, Xenon flaş lambası ile çevrelediği yakut katı hal kristalini kullanarak tarihteki ilk lazeri icat etmiştir (Maiman, 1960). Uyarılmış emisyon sonucu elde edilen kırmızı renkte sabit ışık, o yıllarda lazerin pratik uygulanabilirliğine ilham olmuştur ve lazerler merak uyandıran bir teknolojik yenilik haline gelmiştir. Maiman'ın çalışmasında sistem verimliliği oldukça düşüktür. Flaş lamba geniş ışık yelpazesi sunarken lazer için enerjinin küçük bir kısmı kullanıldığından sistem oldukça verimsiz çalışmaktadır ve fazla enerji termal yönetim zorluklarına neden olmaktadır. Flaş lambasının sınırlı ömrü de göz önünde bulundurulduğunda, farklı lazer denemeleri kaçınılmaz olmuştur ve o yıllardan beri birçok kazanç ortamı ve farklı pompalama teknikleri denenmiştir. Flaş lambasından farklı olarak sonraki yıl He-Ne gaz karışımından elektrik akımı geçirilerek daha az karmaşık bir şekilde, ilk gaz lazeri ve aynı zamanda ilk sürekli dalga (CW) lazer olan Helium- Neon lazeri icat edilmiştir (Javan, Bennett ve Herriott, 1961). Ardından William Bridges tarafından Argon lazeri keşfedilmiştir (Bridges, 1964). Gaz lazerleri daha verimli sistem olmalarının yanı sıra spektroskopi (Russell, J.P., 1965), interferometri (Ashby, Jephcott, Malein ve Raynor, 1965), optik sistem testi (Murty ve Malacara-Hernandez, 1964) gibi sürekli ışık gerektiren uygulamalarda büyük bir avantaj sağlamıştır. Bu tezin alt konusu olan diyot lazerler ise ilk kez 1962 yılında, homoyapıda (tek malzemeli) saf GaAs (Galyum Arsenit) bileşke yarı iletken kullanılarak Robert N. Hall ve ekip arkadaşları tarafından geliştirilmiştir (Hal, 1962). Oldukça kompakt ve hafif olan diyot lazerleri, çok geçmeden ilgi odağı haline gelmiştir fakat o yıllarda diğer gaz ve optik lazerleri kadar güçlü bir çıkış ve verimli bir sonuç elde edilememiştir. Çünkü 1980'lerin sonlarına kadar henüz yüksek kalitede yarı iletken malzemelerin geliştirilmesi mümkün olmamıştır fakat çeşitli yöntemler denenmiştir. 1972 yılında Kato ve arkadaşları tarafından, heteroyapı (çok katmanlı yapı) yöntemi kullanılarak AlGaAs lazer diyotu üretilmesi başarılmıştır ve kafes uyumlu GaAs yarı iletkeninin bant aralığının genişlemesi sağlanmıştır (Kielioh, Lalaime ve Martin, 1972). Bant aralığı özellikleri iyileştirilen AlGaAs yarıiletken diyotuyla daha düşük eşik akımıyla uyarım, daha yüksek verimlilikte ışık üretimi sağlanmıştır. Bu tezin bir alt konusu olan InGaAsP lazer diyotları benzer tekniklerle,

özellikle, telekomünikasyon ve fiber optik teknolojilerindeki gelişmelerin, daha uzun dalga boylarında (1 dB/km'nin altında iletim kayıpları) çalışma ihtiyaçları doğrultusunda geliştirilmiştir (Horiguchi ve Osanai, 1976; Olsen, Channin ve Ettenberg, 1980). InGaAsP alaşımı, fiber optik iletişim sistemleri için ideal bant aralığı ve kırılma indisine sahiptir. İlerleyen yıllarda geliştirilen büyütme teknikleri ile AlGaAs, GaAs, GaAsP, InGaAsP gibi lazer diyotlarında yüksek kaliteli büyütme yapılarak homojen, verimliliği oldukça yüksek diyot lazerlerinin üretimi sağlanmıştır (Harder ve diğerleri, 1990; Hofmann ve Koch, 2023). Oldukça verimli, uzun ömürlü, maliyet etkin, kompakt ve entegre edile biliniyor oluşuyla diyot lazerleri, lazer teknolojisinin çığır aşan icadı olmuştur ve günümüz modern teknolojinin temel yapı taşlarını oluşturmaktadır.

Günümüze kadar spektrometrenin çeşitli bölgelerinde çok sayıda lazer çalışmaları denenmiştir ve diyot lazerler; görünür ışık, yakın kızılötesi ve 2 μm bölgesinde ışıma yapan lazerlerin pompa kaynağı olarak kullanılmıştır (La Rosa, 1988). Günümüzde, biyomedikal, bilimsel araştırma, endüstri alanlarında sıklıkla kullanılan Tm^{+3} lazerleri için 785 nm'de uyarımlar denenmiştir. (Mollae ve diğerleri, 2018; Talavera ve Mejía, 2005; Tang ve Xu, 2009, 2012; Thomas ve diğerleri, 2013; Yang, Zhao, Ren, Wu ve Yu, 2024). Bunun başlıca sebebi bahsi geçen lazer diyotlarının kolay erişilebilirliği ve bu dalga boyunda uyarılması durumunda çapraz sönümlenme dinamiğinin kolaylıkla gözlemlenebilmesi avantajlara sahip olmasıdır (Tang ve Xu, 2009). Ancak, Tm^{+3} kristallerinin soğurma bantlarına odaklanıldığında, 680 nm'de 785 nm'ye kıyasla yaklaşık üç kat daha etkili (yüksek absorpsiyon oranı) ve 1,6 μm bölgesinde ise 785 nm'ye kıyasla yaklaşık iki kat daha etkili bir soğurma bandının bulunduğu görülmektedir. Ayrıca 1,6 μm için daha az kendiliğinden soğurma kaybı gibi avantajlar da göze çarpmaktadır. Ancak, uygun pompa kaynaklarına sınırlı erişim nedeniyle bugüne kadar bu dalga boylarında uyarılan etkili bir Tm^{+3} lazer sistemi bulunmamıştır.

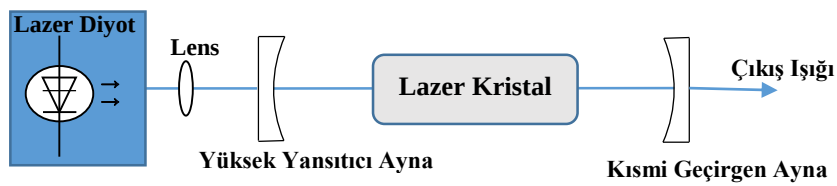
Bu projede, telekom çalışmaları için geliştirilen 1,6 μm bölgesinde yüksek parlaklığa sahip lazer diyotları ile Tm^{+3} lazerlerini uyarımı gerçekleştirilmiştir. Bunun için farklı katkılama oranlarında ve uzunluklarda 10 farklı $\text{Tm}:\text{YAG}$ ve 10 farklı $\text{Tm}:\text{LuAG}$ kristali ile ilgili dalga boylarında diyotlarla uyarılarak sistemlerin sürekli-dalga, dalga boyu değişim ve darbeleri rejimlerdeki performansları incelenmiştir.

Tezin başlıca amacı tek-kipli bir diyotun yüksek parlaklığa sahip 1,6 μm bölgesinde etkin uyarılma gösteren ve 2 μm 'de ışıma yapabilen Tm^{+3} katkı $\text{Tm}:\text{YAG}$ ve $\text{Tm}:\text{LuAG}$ katı hal lazer sistemlerinin kristal parametrelerine bağlı olarak performanslarının incelenmesi ve modellenmesidir. 1. kısımda ilerleyen kısımlardaki mantıksal işleyişin kavranması amacıyla lazer işleminin temel süreçlerinden kısaca bahsedilmiştir. 2. kısımda diyot pompalı katı hal lazer sistemlerinden, 3. kısımda tulyum lazerlerinden bahsedilmiştir. 4. ve 5. kısımlar deneysel çalışmaları içermektedir.



1. LAZER FİZİĞİ

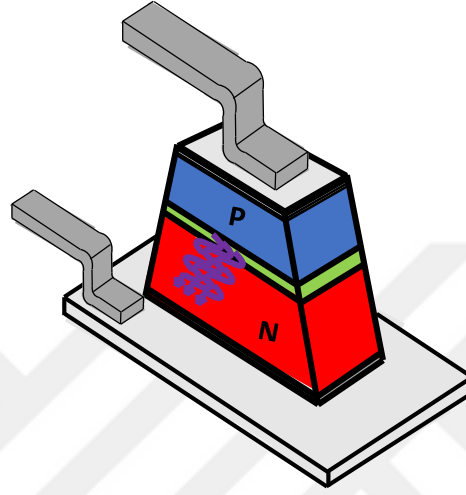
Lazer , “Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation” ifadesinin kısaltmasından oluşturulmuştur. Bu kısımda; bir atom, iyon ya da molekülün düşük enerji seviyelerinden yüksek enerjili seviyelere geçişlerini ifade eden absorbsiyon olayı, sonrasında, yüksek enerji seviyelerinden düşük enerji seviyelere rastgele geçişleri ifade eden kendiliğinden emisyon olayı ve elektromanyetik dalganın etkisiyle gerçekleşen, uyarılmış emisyon olayı kavramlarından bahsedilerek lazerlerin çalışma prensibi anlatılacaktır. Bu kavramların gerçekleşmesi üzerine lazerlerin elde edilebilmesi için öncelikle atom, iyon veya moleküllerin en düşük enerji seviyelerinde kalma eğilimlerini aşacak enerjiyi sağlayarak, popülasyon ters çevrilmesi olayının gerçekleşmesini sağlayacak pompa sistemine, ışığın monokromatik ve koherent oluşumunun gerçekleştiği aktif ortam olan kazanç ortamına ve ışığın güçlenmesini ve yönlendirilmesini sağlayacak optik bir düzenek olan rezonatör yapısına ihtiyaç vardır (Şekil 1). Burada popülasyon ters çevrilmesi kavramı oldukça önemlidir ve gerçekleşmesi için yüksek enerji seviyelerindeki atom, iyon veya moleküllerin sayıca düşük enerji seviyesindeki atom, iyon veya moleküllerden fazla olması gerekir. Bu durum, uyarılmış emisyon olayını absorbsiyon olayından daha baskın kılar ve lazer ışığının üretilmesine olanak tanır.



Şekil 1. Basit yapıda diyot pompalı katı hal lazer sistemi

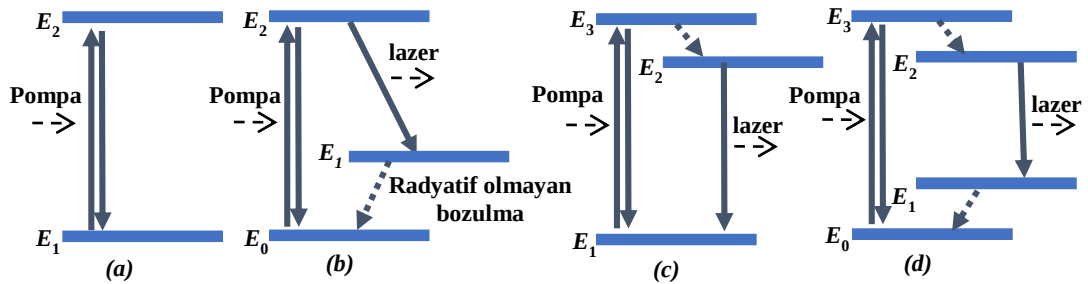
Lazer diyot için, Robert N. Hall'ın ABD patent çizimi Şekil 2'deki gibi renklendirilmiştir. Tipik bir PN yarı iletkenlerden oluşan lazer diyot incelendiğinde, p tipi ve n tipi bölgeler arasında rezonans boşluğu içermektedir (Hal, 1966). Robert N. Hall bu boşluğu yaklaşık 0.1μ (1000 Angstrom) kalınlığında kullanmıştır ve p ve n tipi bölgeler anot-katod bağlantıları için lehimle üst ve alt elektrotlara buradan konektörlere bağlanmıştır. Diyot rezonans boşluğunda birbirine göre paralel olmasına

dikkat edilerek, yarı iletkenlerin ön ve arka yüzeyleri sızıntı akımları minimize edecek ve ışığın yüzeyden daha az saçılmasını sağlayacak şekilde cilalanmıştır (lazer kazanç ortamını iyileştirmek için ayna ve metalik bir kaplamada kullanılabilmektedir). Ayrıca saçılan ışık miktarını minimize edecek şekilde diyot yan yüzeyleri pürüzlendirilmiş ve açılı kesilmiştir.



Şekil 2. 1962, orijinal lazer diyot patentinin sembolik gösterimi

Lazerlerde, analiz sırasında gerekli minimum enerji seviyeleri kullanılır ve yaklaşık bir analiz için yeterli seviye sayılarına göre sınıflandırılırlar ve bu seviyeler arasından farklı olasılıklarla absorpsiyon, emisyon kavramlarının gerçekleştiği olaylar vardır (Şekil 3).



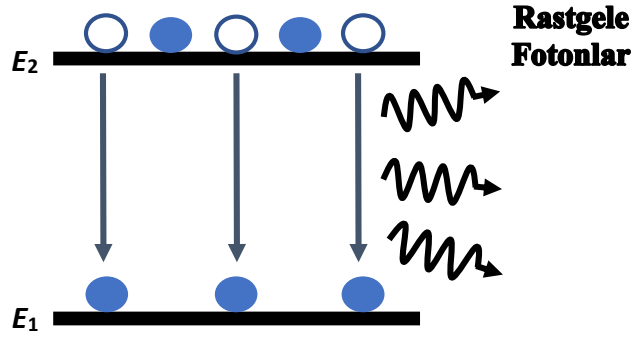
Şekil 3. Lazer 2,3,4 enerji seviyeleri muhtemel diyagramları. (a) iki seviyeli lazer, (b) ve (c) üç seviyeli lazer, (d) dört seviyeli lazer gösterimi

Şekil 3.a'daki gibi iki seviyeli bir lazerde, absorpsiyon ve emisyon dengesi ve sonuçta popülasyon ters çevrilmesinin zorluğu sürekli lazer çıkışı elde etmeyi zorlaştırır. Atomlar, fotonları absorbe ederek alt enerji seviyesinden üst enerji seviyesine ($E_1 \rightarrow$

E_2) geçer. Aynı zamanda, uyarılmış atomlar kendiliğinden ya da uyarılmış emisyon ile tekrar alt seviyeye ($E_2 \rightarrow E_1$) düşer. İki seviyeli bir sistemde, bu iki olay tam olarak aynı olasılıkla gerçekleşeceğinden, ters popülasyon oluşturmak ve sürekli lazer çıkışı elde etmek zordur ancak son yıllarda özellikle, ağ yapısındaki kuantum malzemelerde, mikro-kaviteler arasındaki tünelleme yöntemi (Tsarev, Morugin ve Alodjants, 2024), non-lineer uyarım mekanizmaları (Schumann, 2012) ile lazerleme gibi çalışmalar, ters popülasyon oluşumunu geçici olarak mümkün kılabilen yeni yöntemler üzerinde yoğunlaşmıştır. Üç seviyeli lazerler incelendiğinde, pompalama ile aydınlatma sonrası elektronların temel bant seviyelerinden üst enerji seviyelerine geçişlerinin ardından pompa gücünün de bir etkisi olarak farklı emisyon olayları gözlemlenir. Şekil 3.b klasik üç seviyeli bir lazer diyagramıdır. Lazer çıkışı, $E_2 \rightarrow E_1$ geçişi sırasında gerçekleşir. $E_1 \rightarrow E_0$ geçişinde ışımasız, hızlı geçiş söz konusudur. Burada elektronların E_1 enerji seviyesinde birikmemesi adına genellikle güçlü pompalama gereksinimi vardır. Şekil 3.c, metastabil ara seviye içeren üç seviyeli bir lazer diyagramını göstermektedir. Metastabil ara seviyede elektronlar görece uzun süre kalabilmektedir ve bu durum ters popülasyonu kolaylaştırmaktadır. Dört seviyeli lazerlerde ise geçiş muhtemel olasılıkları daha fazladır ve daha düşük pompalama enerjisi kullanılarak yüksek verimlilikte lazerler elde edilebilir (Asakura ve diğerleri, 2006).

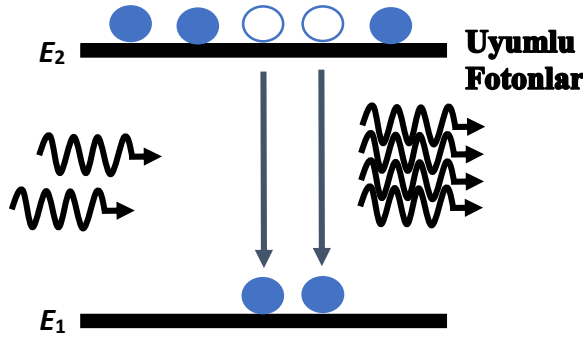
1.1. Lazer Işığının Oluşumu

Normal bir ışık kaynağının nasıl oluştuğuna baktığımızda, burada kendiliğinden emisyon olayı gerçekleşmektedir. Bu olayının gerçekleşmesi için elektronların dışarıdan bir uyarıcı ile uyarılması gerekmektedir. Enerji seviyeleri arasındaki fark kadar gerekli enerjiyi alan elektronlar uyarılarak üst enerji seviyelerine geçiş yaparlar. Burada görece bir süre kalırlar ve ardından kararlı hala dönmek isteyen elektronlar ışıınım (radyatif) ya da ışımasız (radyasyonsuz) geçişlerle alt enerji seviyelerine dönüş yaparlar. Elektronların kararlı hallere dönüşleri sırasında başlangıçta aldıkları enerji rastgele fotonlar olarak açığa çıkar. Bu olaya kendiliğinden emisyon denir. Burada açığa çıkan ışık enerjisi uyumsuz ve rastgele yöndedir (Şekil 4).



Şekil 4. Kendiliğinden emisyon olayı, rastgele fotonlar

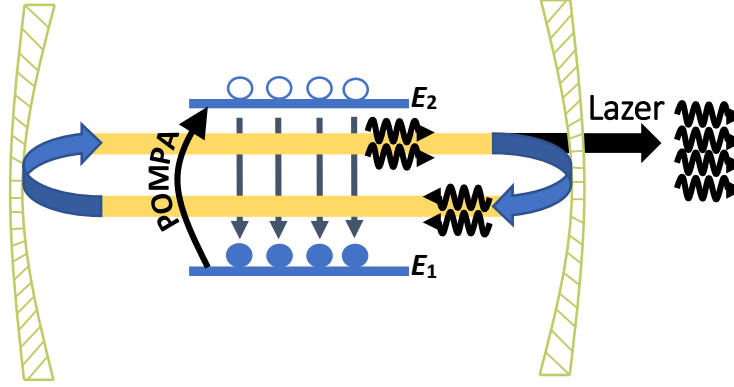
Elektronlar yüksek enerji seviyelerindeyken yeterli enerjiye sahip bir fotonla etkileşmesi durumunda ne olacağı hesaplamalarını 1917 yılında Einstein yapmıştır (Einstein, 1917/1996). Kuramsal olarak lazerin temelleri böylece atılmıştır. Einstein, yüksek enerji seviyelerindeki elektronlara dışarıdan ışık gönderilmeye devam edildiğinde buradaki elektronların düşük enerji seviyesine inmeye zorlanacağını ve daha kısa bir sürede ($\sim 10^{-8}$ saniye) ineceğini söylemiştir ve sonuçta açığa çıkan fotonların gönderilen fotonlar ile aynı özelliklere sahip olacağını ispatlamıştır. Uyarılmış emisyonun benzetimi Şekil 5’te gösterilmiştir.



Şekil 5. Uyarılmış geçiş, kopya fotonlar

Lazerleri oluşturmak için bir koşul sürekli uyarma enerjisinin sağlanması yani pompalamadır. Pompalama ile yüksek enerji seviyesine uyarılan elektronlar, bir süre sonra nüfus ters çevrilmesi gerçekleşir ve düşük enerji seviyesine geçiş yaparlar. Bu yöntem ile sonuçta aynı faz ve frekansta ışık elde edilse de çok güçlü değildir. Bu yüzden lazerleri oluşturmak için gerekli bir diğer koşul optik oyuk düzeneklerinin

kullanılmasıdır. Bu düzeneklerle ışığın kendini kopyalaması, böylece güçlenmesi sağlanır. Örnek gösterim Şekil 6'daki gibidir.



Şekil 6. Uyarılmış radyasyon emisyonu ile ışık amplifikasyonu

Şekil 6'daki gibi optik bir rezonatör içerisine yerleştirilen kazanç ortamının sağladığı ışık iki ayna arasında sürekli gidip gelerek güçlenir. Bu şekilde eşik şiddete ulaşan ışık aynalardan birinin daha az yansıtıcı özellikte olmasıyla sistemden sızar ve sonuçta sızan ışık lazer ışığıdır.

1.2. Lazer Işığı Özellikleri

Genellikle aydınlatmada kullanılan ışığın teknolojiye kullanımı lazerlerle geliştirilmiştir. Lazerler sıradan ışıktan farklı olarak tek renklilik, aynı faz ve frekansta yayılım, tutarlılık ve yönlülük gibi kendine özgü özelliklere sahiptir. Lazerin aksine normal ışık herhangi bir kaynaktan yayılırken farklı dalga boylarında yayılım özelliği gösterir. Güneşten gelen ışık ışınları farklı faz ve frekansta ışıma yaparlar. Akkor lambası gibi yapay ışık kaynakları bazı durumlar için aynı frekansta ışıma yapmış olsalar da fazları farklı, tutarsız ışık kaynaklarıdır. Normal ışıktan farklı olarak lazer ışıkları eş fazlı ışık özelliği göstermektedir. Yapay veya doğal ışık kaynaklarından elde edilen normal ışıklar lazerlere kıyasla çok daha az geometrik düzen özelliği gösterirler. Bunun sebebi geleneksel ışık kaynaklarında elektron geçişleri sırasında fotonların rastgele her yönde yayılım göstermesidir. Öte yandan lazerler tek yönde ışık yayılım özelliği gösterir, yaydıkları fotonlar yönlüdür (Csele, 2004).

Lazer ışığının tek renklilik özelliği tek bir frekansta ışıma yapıyor olmasından gelir. Lazer ışıkları tek bir dalga boyu üzerinden gösterilseler de gerçekte lazer ışıklarının

yoğunluklarında dalga boyuna karşı azda olsa bir yayılma görülür, çizgisel değildir. Normal ışıkların farklı dalga boylarında ışıma yapmaları ve geniş bir dalga boyu yoğunluğu sunmalarına kıyasla lazer ışıkları tek renkli ışıklar olarak kabul edilirler. Lazer uyumluluk, tek renklilik, yön ve kutupluluk gibi ışığa özgü özellikleri bir arada barındıran özel bir ışıktır ve sıradan ışıktan farklıdır. Bu özelliklere sahip ışık doğada kendiliğinden bulunmaz, sadece lazerlerle üretilebilir.

1.3. Aktif Ortama Göre Lazerler

Aktif ortam uyarılmış atomların sayıca alt enerji düzeyinden fazla olması, böylece uyarılmış emisyon olayının gerçekleşmesi için kullanılır. Aktif ortamda uyarılan elektronların sayıca fazla olması sonucu ışıma sağlanması ile düşük enerji seviyesindeki elektronların sayıca tekrar artması sağlanır, bu kez ters yönde nüfus terslenmesi gerçekleşir ve bu olay yayılan ışığı yükseltmesini önler ve faz dışı yayılımın önüne geçer. Aktif ortama gelen eş fazda ışın demeti aktif ortamdan geçerken uyarılmış emisyon olayı sonucu ışığın yoğunluğu artmış olur. Lazer kazanç ortamı, aktif ortam ile sağlanır. Aktif ortam aynı zamanda lazerlerin türünü belirler. Örneğin aktif ortam He-Ne veya CO₂ gibi bir gaz ise gaz lazerleri olarak adlandırılırlar. Benzer şekilde kazanç ortamı olarak bir diyot kullanılmışsa lazer yarı iletken lazerler olarak adlandırılır. Önemli bir özellik, aktif bölgede kullanılan malzemenin lazer oluşturması için nüfus terslenme özelliğinin olması gerekmektedir. Buna göre lazerlerin kazanç ortamına göre katı hal lazerler, gaz, sıvı, yarı iletken lazerler gibi birçok çeşidi vardır (Asakura ve diğerleri, 2006).

1.4. Lazer Pompalama Tekniği

Lazerlerde kazanç ortamına gerekli enerjinin sağlanması pompalama ile olur. Lazer pompalama, atom veya moleküllerin temel durumdan uyarılmış duruma geçmeleri için gerekli enerjinin verilmesi işlemidir. Pompala, optik, elektrik ve kimyasal pompalama gibi çeşitli şekillerde gerçekleştirilebilir. Katı ve sıvı lazerlerde sıklıkla optik pompalama kullanılırken, yarı iletken ve gaz lazerlerinde daha çok aktif ortamdan elektrik akıtılarak pompalama sağlanır.

Pompalama çeşitlerinden biri olan optik pompalama flaş lambası veya diyot lazerler gibi çeşitli şekillerde gerçekleştirilebilir (Asakura ve diğerleri, 2006). Optik

pompalamada diyot pompalı lazerlerin önemi ise giderek artmaktadır. Darbeli bir flaş lambası ile lazer kazanç ortamı uyarıldığında verilen radyasyon ışıkları birçok dalga boyunda uyarılma sağlar. Yani flaş lambası ile uyarma tekniğinde ışığın dalga boyu aralığı oldukça geniştir (Moulton, 1986). Lazerler oldukça dar bir bantta ışıma yaparlar yani kullanacakları ışık dalga boyu aralığı oldukça dardır ve buda flaş lambasındaki diğer tüm dalga boylarını gereksiz kılar. Flaş lambası kullanılarak pompalama tekniği oldukça verimsiz bir tekniktir. Ayrıca sürekli olarak çalıştırılan bu lambalar yaklaşık 200 saatlik ömürleri düşünüldüğünde yine daha az tercih edilirler (Demchenko, 2009). Diyot lazerle gerçekleştirilen pompalama, yüksek verimlilik ve 20.000 gibi daha uzun ömürde bir çalışma olanağı sağlar (Ott, 2001). Katı hal lazerlerinin en çok kullanılan iki türü; diyot pompalı katı hal lazerleri (DPKH) ve diyot lazerlerdir. Diyot lazerler maliyet etkin ve verimlidir. DPKH sıcaklık hassasiyeti yüksektir bu nedenle optimum çalışma aralıkları küçüktür, çıkış gücü dalgalanmaları, modlar arası atlama gibi kararlılıkta sorunlar çıkabilir. Öte yandan DPKH, diyot lazerlere kıyasla ışın kalitesi daha yüksektir, daha yüksek güç elde edilebilir.

Bu tez çalışmasını ilgilendiren Tm^{+3} lazerlerini pompalamak için günümüze kadar farklı teknikler denenmiştir. Flaş lambası kullanılarak uyarım, Ti:Safir lazer çıkışları ile uyarım veya yüksek güçlü diyot lazerler pompa sistemi olarak kullanılabilir (Moulton, 1986; Slimi, 2024). Flaş lambasının sınırlı ömrü ve geniş spektrumda yayılım özelliği düşünüldüğünde Tm^{+3} lazerlerini uyarmak için verimsiz bir tekniktir. Ti:Safir lazer çıkışları ile uyarım, soğutma zorunluluğu, hantallık gibi problemler içerir. Yüksek güçlü diyot lazer pompa sistemleri yine hantal sistemlerdir ve özel tasarım zorunlulukları gerektirir. Bu tez çalışmasında kullanılan InGaAsP lazer diyotları ile pompalama, InGaAsP lazer diyotun oldukça kompakt, maliyet etkin ve taşınabilir oluşu göz önünde bulundurularak tercih edilmiştir.

2. DİYOT POMPALI KATI HAL LAZER SİSTEMLERİ

Başlarda ışık kaynağı olarak kullanılan diyot lazerlerinin, 1964 yılında ilk kez Nd:YAG (808 nm civarında maksimum emilim) katı hal lazer sisteminde pompa kaynağı olarak kullanılabileceklerinin temelleri atılmıştır (Geusic, Marcos ve Uitert, 1964) ve bu çalışma, hangi dalga boylarının Nd:YAG kristali tarafından absorbe edildiğini belirleyerek, diyot pompaların tasarımı için temel bilgiler sağlamıştır. 1972’de GaAs lazer diyotlarının Nd:YAG kristallerini pompalamak için kullanılabileceği gösterilmiştir (Rosenkrantz, 1972). 1980’li yıllarda diyotlardaki iyileşmeler üzerine geleneksel pompalama sistemleri yerine, diyot lazer pompalama ile Nd:YAG (Smith, Rice, Douglas ve Box, 1980), Nd:Glass (Emmett, Krupke ve Trenholme, 1983) lazerleri gibi katı hal lazerlerinden, daha verimli ve performansı yüksek sistemler elde edilmeye başlanmıştır. Bunun bir nedeni pompa kaynağının çıkışıyla lazer kazanç ortamının emilim spektrumu daha iyi örtüşme sağlayabilmiş olmasıdır. Diyot lazerlerinin en büyük avantajlarından biri istenilen belirli dalga boylarında maksimum emilim ve kararlılık sağlayabiliyor olmalarıdır. Spektrumları lambda ve floresan gibi diğer pompa sistemlerinin aksine oldukça dardır ve sonuçta belirli bir dalga boyunda daha kararlı ve verimli enerji aktarımı sağlarlar. Bir diğer nokta maksimum enerji verimliliği için doğru dalga boyu seçimidir. Diyot lazerinin dalga boyunun lazer kazanç ortamının dalga boyuna yakın değerinde seçilmesi gerekir. Böylece ışık enerjisi çok daha iyi emilim gösterir ve yüksek verimli uyarılma sonucunda, minimum ısı kaybında daha güçlü lazerlerin üretimi sağlanır.

Diyot pompalı lazer sistemleri fiber lazerler, disk lazerleri gibi sistemlerinin temelini oluşturmaktadır ve günümüzde yarı iletken malzemesine göre InGaAs, AlGaAs, GaAs, AlInGaP gibi birçok lazer diyotu, farklı dalga boyları ve farklı spektrum özellikleriyle endüstri (Silfvast, 2004; Weber, 2012), askeriye (Hemmati, Biswas ve Djordjevic, 2011; Jung ve diğerleri, 2017), tıp(Nouri, 2018), telekomünikasyon (Agrawal, 2021) gibi çeşitli alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Diyot pompalı katı hal lazer sistemlerinin uygulamalardaki çeşitliliğini ve kullanılabilirliğini, çalışma dalga boyu aralığı, gücü, verimliliği, termal performansı, ışın kalitesi, darbeli dalga modları için atım süresi gibi özellikler belirlemektedir. Bu tezin ilerleyen kısımlarına motivasyon olması amacıyla bu özelliklerden kısaca bahsedilecektir.

2.1. Çalışma Dalga Boyu

Günümüzde diyot lazerleri özel tasarımlar dışında genellikle 380 nm ile 3.4 μm aralığında üretilirler (White, 2004). Farklı katkılanma oranlarıyla farklı dalga boyu aralıklarında çalışan AlGaAs/GaAs, InGaN/GaN-SiC, InGaAs/GaAs, InGaAsP/InP, gibi çok sayıda yaygın kullanılan diyot çeşidi vardır ve kullanıldıkları alanlar ile kendilerine özgüdürler. AlGaAs/GaAs diyotları sıklıkla 720-850 nm dalga boyu aralığında çalışırlar ve AlGaAs için substrat (ana malzeme) GaAs'dir. Burada Al (dopant), enerji dalga boyu aralığını (band gap) genişletir. GaAs daha düşük maliyette, daha az güç için tercih edilir. AlGaAs/GaAs diyotlarıyla bir çok kristal (Tm:YAG, Cr:LiSAF, Er:YAG ...) pompalanabilmektedir (Beyatlı, Naghizadeh, Kurt ve Sennaroglu, 2012; Demirbas, 2010; Honea ve diğerleri, 1997; Payne ve diğerleri, 1992). InGaN/GaN-SiC diyotlarında ise InGaN aktif bölge, GaN veya SiC substrat (alt tabaka)'dır ve alt tabaka yapısına göre farklı özellikler gösterebilmektedirler (Jafar, Jiang, Lu, Qasim ve Zhang, 2023; Xu ve diğerleri, 2015). Substrat tabaka GaN seçim (tipik 380-470 nm), daha ekonomik ve daha yaygın kullanılır. Substrat SiC seçim (tipik 405 nm, 450 nm), geniş bant aralığı, daha iyi termal iletkenlik, yüksek parlaklık gibi avantajlar içerir. InGaN diyotları, görünür ışık ve mor ötesi ışık (UV) çalışmalarıyla, Blu-ray(405 nm) (Wallace, 2016) ve lazer projektörlerde (450 nm) (Lutgen ve diğerleri, 2011) oldukça yaygın kullanılırlar. InGaAs/GaAs ise sıklıkla 900-1100 nm emisyon dalga boyu aralığında çalışırlar ve fiber optik, EDFA pompalama (980 nm) (Kim ve diğerleri, 2007; Uehara, 1990), LiDAR (1064 nm) (Krainak, Sun, Yang ve Lu, 2010), medikal (Hulicius ve Kubecek, 2013), spektroskopi ve algılama sistemleri (900-1100 nm) (Bohler ve Marton, 1994) gibi kullanım alanlarıyla 980 nm, 1064 nm tipik dalga boylarında yaygındırlar. Bu diyotlar AlGaAs kıyasla dar bant çalışırlar ve çalışması için gereken eşik değeri daha düşüktür (elektron uyarılma enerjisi daha düşük), termal stabilitesi yüksek çalıştırılabilirler. Bu tez çalışmasında kullanılan InGaAsP/InP diyotları yine oldukça yaygın kullanılan lazer diyotlardır. InGaAsP/InP (İndiyum Galyum Arsenit Fosfit / İndiyum Fosfit) diyot lazerlerinde aktif bölge InGaAsP (İndiyum Galyum Arsenit Fosfit) ile substrat InP (indiyum fosfit) alt tabakası mükemmel kafes uyumlu yapıda olduğundan yüksek optik geçirgenliğinde oldukça verimli, dayanıklı diyotlardır. Lazer diyotlarda aktif bölgenin bileşim oranınca bant aralığı, dolayısıyla çalışma dalga boyu ayarlanabilir ve geniş bir spektrumda

çalışabilirler. Infrared (IR) bölgede çalıştıkları için eşik enerjileri düşüktür ve termal performansları iyidir. Bu diyotların tipik emisyon dalga boyları 1.2-2 μm aralığındadır. Özellikle 1.3 μm ve 1,55 μm dalga boylarında çalıştırıldıklarında düşük dispersiyon ve düşük sinyal zayıflaması gibi özellikleriyle uzun mesafeli iletişim (neredeyse kayıpsız iletim) için oldukça yaygın kullanılırlar (Agrawal, 2021). İki ayrı dalga boyunun söz konusu olmasının sebebi, diyotun 1.3 μm çalışması; ~ 100 km kadar mesafeler için daha uygun maliyette ve çok daha düşük dispersiyon özellik gösterebiliyorken, 1,5 μm çalışması (Uehara, 1990); EDFA gibi optik yükselticileri desteklediğinden uzun mesafeler (~ 200 km - repeater olmadan) için uygun kullanım özelliği göstermesidir. InGaAsP lazer diyotlarının bahsedildiği üzere optik fiber iletişim sistemlerindeki yaygın kullanımlarının yanı sıra, 1-1.7 μm kadar uzun dalga boyu aralığında fotodedektörlerde (yüksek hassasiyet algılama) (Alping, Tell ve Eng, 1986; Roelkens, Van Thourhout, Baets, Nötzel ve Smit, 2006; van der Ziel, 1989), uzay ve uydu (O Gilard, G Quadri, M Boutiller, D Veyrie, 2014), askeri ve savunma teknolojileri (Kopp, 2008), LiDAR (Aho, Viheriala, Virtanen, Uusitalo ve Guina, 2018), Spektroskopi (Martinelli, Menna ve Cooper, 1994) gibi birçok alanda kullanılırlar.

2.2. Güç ve Verimlilik

Diyot pompalı katı hal lazerlerinde çıkış gücü, kullanılan pompa diyotlarının gücüne ve lazer kazanç ortamının bu gücü ne kadar verimli bir şekilde lazer ışınına dönüştürebildiğine bağlıdır. Sistem verimini, genel olarak seçilen pompa diyotunun çalışma dalga boyu ile lazer kazanç ortamının emilim spektrumunun ne kadar iyi örtüştüğü ve soğrulan pompa fotonlarının, lazer fotonlarına dönüşebilme miktarı belirler. Bunların yanında termal yönetim, rezonatör aynalarının doğru ve kaliteli seçimi, kullanılacak sürücü devresinin uygun akım-voltaj değerlerinde çalıştırılması gibi faktörler lazer çalışmasını dolayısıyla sistem güç ve verimini önemli ölçüde etkiler. Lazer sistemlerinde verim ifadeleri genellikle daha basit bir şekilde pompa giriş gücünün lazer çıkış gücüne oranı ($P_{\text{out}}/P_{\text{in}}$) şeklinde hesaplanabilmektedir. Lazer performansının daha doğru bir şekilde analiz edilebilmesi için, sistem verimliliğini etkileyen ve ideal olmayan koşullar altında oluşan kayıplar incelenecektir. Özellikle lazerin tasarımı ve doğru optimize edilebilmesi açısından,

sistem verimini etkileyen verim parametrelerini irdelemek amacıyla formül aşağıdaki gibi genişletilmiştir.

$$\eta = \eta_{abs} \cdot \eta_{stokes} \cdot \eta_q \cdot \eta_{opt} \cdot \eta_{therm} \cdot \eta_{align} \quad (1)$$

Burada η_{abs} , diyot pompa gücünün (P_{pump}), kazanç ortamının absorbe ettiği pompa gücüne (P_{abs}) oranıdır (P_{pump}/P_{abs}). Stokes kayması, bir maddenin aynı elektronik geçişi sırasında gerçekleşen absorpsiyon ve emisyon spektrumlarının maksimumları arasındaki dalga boyu veya frekans farkı olarak ifade edilir (Gispert, 2008). Bu bağlamda ikinci terim olan stokes verimi (η_{stokes}), sistemde oluşan lazer ışını dalga boyunun, pompa ışını dalga boyuna oranını (λ_L/λ_p) ifade eden etkin bir parametredir. Bu oran sistemdeki dalga boyu farkı etkisinin bir ölçütü olarak, ışığın yayılım (veya kayma) oranını verir. Burada bir sonuç, kazanç ortamına giren foton enerjisinin bir kısmı ısı veya ışık gibi enerji kaybına uğrayarak daha düşük enerji ve daha uzun dalga boyu elde edileceğinden her halükarda çıkış ışınının dalga boyunun pompa ışığı dalga boyundan daha uzun bir değerde olacağıdır. Sonuçta çıkış ışını dalga boyunun pompa ışını dalga boyuna yakınlığının verimi artıracağına dikkat edilmelidir.

Kuantum verimliliği terimi, bir fotosensitif cihazda gelen fotonların dönüştürülen elektronlara oranı olarak tanımlanabilmektedir (Burroughes ve diğerleri, 2001). Bu bağlamda kuantum verimi (η_q), sistem verimini etkileyen bir diğer parametre olarak lazer fotonları sayısının pompa fotonları sayısına oranı (N_{laser}/N_{pump}) şeklinde ifade edilebilir. Burada bu sayı değerleri aşağıdaki denklemlerle hesaplanabilir (Milonni ve Eberly, 2010).

$$N_{laser} = \frac{P_{out} \cdot \lambda_L}{h \cdot c} \quad (2)$$

$$N_{pump} = \frac{P_{pump} \cdot \lambda_p}{h \cdot c} \quad (3)$$

Burada c , ışık hızını ifade eder ve h plank sabitidir. Lazer rezonatöründe; aynaların yansıma katsayılarına bağlı olarak yansıma kayıpları, kazanç ortamı içerisindeki kusurlar, yüzey kusurları gibi sebeplerle oluşan dağılma kayıpları, kazanç ortamı ve aynalarda meydana gelebilecek absorpsiyon kayıpları ve ışığın kırınım sonrası bir kısmının dışarı sızması, kaybolmasına neden olabilecek kırınım (difraksiyon) kayıpları sebebiyle oluşabilecek kayıplar vardır (Hofmann ve Koch, 2023). Optik verim (η_{opt}), lazerin çıkış gücünün, kristalde üretilen (generation) toplam güce oranıyla (P_{out}/P_{gen}) bu kayıpların sistem verimi üzerindeki etkisini ifade eder. Termal verim (η_{therm}), kazanç ortamında oluşan ısı kayıplarının etkisini ölçer (Milonni ve Eberly, 2010).

$$\eta_{therm} = 1 - \frac{P_{heat}}{P_{abs}} \quad (4)$$

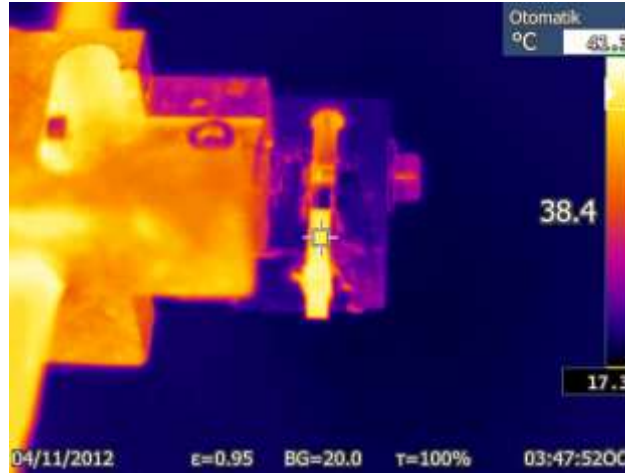
Burada P_{heat} kazanç ortamında yayılan ısı gücüdür ve P_{gen} aslında denklemin paydasıdır ($P_{abs} - P_{heat} = P_{gen}$). Son olarak hizalama verimi (η_{align}), optik elemanların hizalama kayıplarını ifade eder ve hizalama sonrası elde edilen gücün, lazerde üretilen güce oranıdır (P_{align}/P_{gen}). Optik hizalama, lazeri minimum kayıpta yönlendirmek, verimi arttırmak adına önemlidir (Hofmann ve Koch, 2023).

2.3. Termal Performans

İdeal durumda lazer oluşumunda gerekli absorpsiyon olayı için gereken enerjinin minimum bantlar arası enerji (E_g) kadar olacağıdır. Gerçekte elektronların yüksek enerji seviyelerinde kararlı kalabilmeleri için lazer fotonlarının enerjilerinden daha yüksek bir pompa fotonları enerjisi gerektirir. Fazla enerjinin bir kısmı kafes titreşimlerine (fonon etkileşimlerine) aktarılabilir ve termal genleşme oluşturarak, bant aralıklarını genişletebilir veya daraltabilir. Fononların artan etkileşimleriyle bant yapısında enerji seviyelerinde oluşan yeni hizalama efektif bant aralıklarını daraltır. Bu bağlamda Varshni deneysel denklemi (5)'deki gibidir (Ravindra ve Srivastava, 1979).

$$E_g(T) = E_g(0) - \frac{\alpha \cdot T^2}{T + \beta} \quad (5)$$

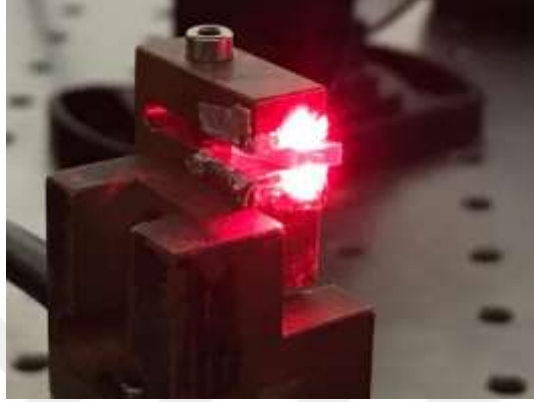
$E_g(T)$, sıcaklığın bir fonksiyonu olarak bant aralığı enerjisini ifade eder. $E_g(0)$, malzemenin kristal yapısına bağlı olan sabit bir değerdir ve mutlak sıfır sıcaklığındaki ($T = 0 \text{ K}$) bant aralığı enerjisini ifade eder. Burada α (bant aralığının sıcaklığa duyarlılığı, eV/K) ve β (sıcaklık etkisinin doyuma ulaştığı sıcaklık aralığı, K) malzeme sabitleridir. Sıcaklık sıfır kelvin değerine yaklaştıkça ($T \rightarrow 0 \text{ K}$); $E_g \approx E_g(0)$ kabul edilebilir. Sıcaklık arttıkça bant aralığı enerjisi azalır ve doyuma ulaşılan sıcaklık değerlerinin üstünde ($T \gg \beta$) enerji neredeyse doğrusal olarak azalır ($E_g \approx E_g(0) - \alpha T$). Bant aralıklarına etkisinin dışında enerji, kuantum geçişlerindeki ışımasız geçişler sonucu kayıplar, soğurulamayan enerji, stokes kayması ile oluşan enerji farkları gibi istenmeyen mekanizmalar sonucu ısı olarak dağılıp kaybolmak ister ve lazer sisteminde termal etkiler oluşturur. Yukarıda bahsedilen durumda olduğu gibi yüksek enerjili fotonlarının lazer fotonlarıyla enerji farkının kristalde ısı biriktirmesi termal etki sebeplerinden biridir. Kazanç ortamında sıcaklığın termal kamera ile ölçülmüş örnek görseli verilmiştir (Şekil 7).



Şekil 7. Lazer çalışma ortamında termal kamerayla ölçülmüş örnek bir kristal sıcaklığı

Termal etkilerin başlıca sebeplerinden bir diğeri pompa diyotlarının kazanç ortamı tarafından absorbe edilemeyen ışığının bir kısmının ısıya dönüşmesidir. Başka bir termal etki kazanç ortamında absorbe edilen fotonların floresans sürecinde ısı olarak

kaybolmasıdır. Burada foton emilmesi ve floresan yayma (birden fazla adımda enerji geçişleri) enerji farkları, stokes kaymasının oluşumunda etkindir. Optik yol boyunca gözle görülmez lazerin, bakır tutucuya yerleştirilmiş kristal üzerindeki renklenmesi kazanç ortamında termal etkiler sonucu stokes kaymasına (kırmızıya kayma) örnek gösterilebilir (Şekil 8).



Şekil 8. Kazanç ortamında ışığın kırmızıya kayması

Lazer ortamında termal direncin termal iletkenliği sınırlandırmasıyla sıcaklık gradyanlarının oluşması başka bir termal etki sebebidir. Termal direnç (R_{th}), ısıнын kaynağı ile sıcaklık farkının emilen pompa gücüne oranıdır ve kazanç ortamının ısıyı dağıtmadaki zorluğunu ifade eder (6). Aynı zamanda kazanç ortamının termal yönetim yeteneğini yansıtır, birimi K/W'tır. Düşük bir termal direnç değerinde kazanç ortamı, ısıyı daha etkin bir şekilde dağıtabileceğinden termal iletkenliği artırır, sistem performansı yükselir (Asakura ve diğerleri, 2006).

$$R_{th} = \frac{\Delta T}{P_{abs}} \quad (6)$$

Termal direnç hesabı aşağıdaki gibidir.

$$R_{th} = \frac{L}{k \times A} \quad (7)$$

L , ısı transfer mesafesi (örneğin kristal kalınlığı), k malzemenin termal iletkenliği (W/m.K), A , transfer alanını ifade eder. Son olarak termal etkinin bir sebebi optik yüzeylerdeki absorpsiyonun ısıya dönüşümüdür. Buradaki termal etkinin azaltılması için optik yüzeylerin kaplama teknolojisi, yüzey kalitesi, kaplama ve malzeme absorpsiyonu gibi kavramların performansa uygun ve kaliteli seçilmesi gerekir. Bahsedilen termal etki faktörleri bütünüyle lazer kazanç ortamı ve çevresinde sıcaklık gradyanları oluşturarak termal lens etkisi, dalga boyu kayması ve optik hizalamada bozulmalar gibi problemlere yol açabilmektedir. Termal lens etkisi, termal etkiler sonucu oluşan sıcaklık gradyanlarının lazer kristalinde kırılma indisini değiştirmesidir. Kırılma indisi değişen kristalin ışın kalitesi ve odak noktası değişir. Işığın mod stabilitesinde bozulma ve genel lazer verimliliğinde azalma meydana gelebilir. Bu etkileri azaltmak için kristal soğutma teknikleri uygulanır. Bu teknikler sıvı soğutma sistemleri ya da ısı emici malzemelerle uygulanabilir. Termal lens odak uzaklığının bilinmesi rezonatör stabilitesini sağlamak ve ışın kalitesini iyileştirerek lazer veriminin artırılması için önemlidir (Asakura ve diğerleri, 2006). Rezonatör geometrisi ile uyumsuzluğu, ışın kayıplarını artırır, ışının kalitesi bozulur ve rezonatör kararsız çalışmaya başlar. Termal lens odak uzaklığının matematiksel ifadesi aşağıda verilmiştir (8).

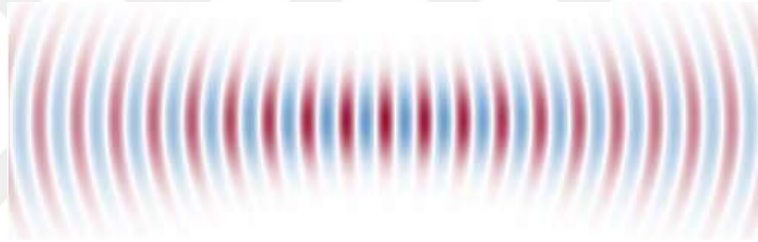
$$f_{\text{termal}} = \frac{k \cdot A}{P \cdot \Delta T} \quad (8)$$

Burada P , pompa gücüdür ve homojen dağılımı önemlidir. Ayrıca soğutma mekanizmaları ile ΔT minimize edilmelidir ve rezonatör aynalarının eğrilik yarıçapı ve yerleşim aralığı, termal mercek etkisini telafi edecek şekilde optimize edilmelidir.

2.4. Işın Kalitesi

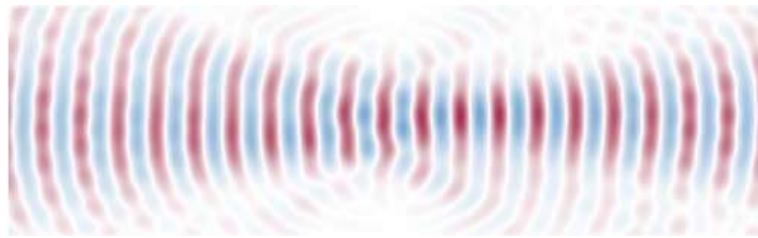
Lazer sistemlerinin çeşitli uygulamalardaki optimizasyonlarında ışığın karakterizasyonu, lazer performansları açısından kritik önem taşır. Işığın yoğunluk ve faz gibi bilgileri, yayılım davranışı ile karakterizasyonu araştırılarak ışın kalitesi incelenir ve sınırlı ışın sapması gibi belirli koşullar altında lazer ışınının ne kadar yoğun bir şekilde odaklanabileceğinin ölçüsüne bakılır. Işın kalitesi, genellikle lazer

ışının Gauss ışınına ne kadar benzediğini veya sapmalarını ifade etmek için kullanılır ve bu durum özellikle Işın Parametre Ürünü (Beam Parameter Product – BPP) ve M^2 faktörü (Beam Quality Factor) ile değerlendirilir. Maxwell denklemleri ve rezonatör sınır şartları elektrik alan genliğinin Gauss özellikte olduğunu gösterir. Enine düzlemde rezonatördeki elektromanyetik alan, Maxwell denklemleriyle türetildiğinde elde edilen dalga denkleminin çözümü Gauss dağılımı formundadır. Gauss dağılıma sahip bir ışının enerji yoğunluğu merkezinde maksimumdur ve lazerlerde optik eksen boyunca bu böyledir. Merkezden uzaklaştıkça enine eksen boyunca enerjinin yoğunluğu Gauss fonksiyonu şeklinde azalır. Lazer ışınları Gauss dağılımına sahip olduklarından yoğun ve düzgün enerji profilindedirler (Beyatlı, 2014). Şekil 9, Gauss formda yüksek ışın kalitesine sahip ışının elektrik alan dağılımını göstermektedir (Sirohi, 2018).



Şekil 9. Yüksek ışın kalitesinde Gauss ışınının odak noktası çevresindeki elektrik alan yoğunluğunun anlık görseli

Düzgün dalga cephelerine sahip ışın mercekle odaklandırıldığında yüksek ışın kalitesi oluşturur. Başka bir ifadeyle ışının bir mercekle odaklanması sağlandığında net ve küçük bir odak oluşturulur. Karmaşık dalga cephelerinde ise ışın daha zor odaklanmaktadır ve ışın sapması artar (Şekil 10). Odaklanan ışın daha geniş bir noktaya yayılır ve odak boyutunu küçültmek zorlaşır (Sirohi, 2018).



Şekil 10. Zayıf ışın kalitesinde Gauss ışınının odak noktası çevresindeki elektrik alan yoğunluğunun anlık görseli

Matematiksel olarak ışının elektrik alanı $u(r, z)$, r ve z koordinatlarında (9)'daki gibi ifade edilir.

$$u(r, z) = \exp \left[-i \left(P(z) + \frac{k}{2q(z)} r^2 \right) \right] \quad (9)$$

Burada r ışının radyal kordinatı, z boyuna kordinatıdır. k , dalga vektörüdür. $q(z)$, ışının dalga cephesindeki eğriliğini ($R(z)$) ve spot boyutunu ($\omega(z)$) belirleyen Gauss q parametresidir. $P(z)$, rezonatördeki elektromanyetik dalganın faz değişimlerini ifade eden aksiyel faz faktörüdür (Sennaroglu, 2010). Işığın yayılım davranışını ifade eden q parametresinin matematiksel ifadesi ise (10)'daki gibidir.

$$\frac{1}{q(z)} = \frac{1}{R(z)} - i \frac{\lambda}{\pi n \omega^2(z)} \quad (10)$$

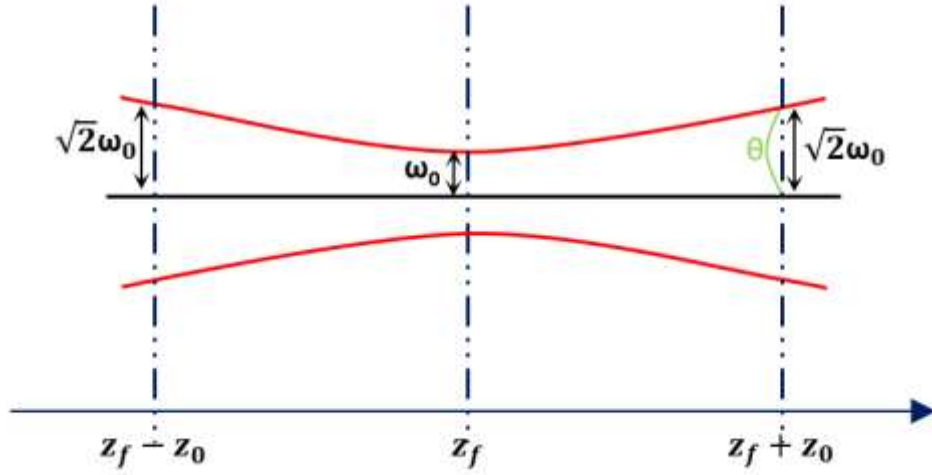
Burada $\omega(z)$, ışının çapını, enerji yoğunluğunun merkezdeki maksimum değerinin $1/e^2$ seviyesine düştüğü yer olarak tanımlar çünkü $1/e^2$ seviyesi ışın profilinde toplam enerjinin büyük çoğunluğunu içerir. λ ışığın dalga boyu, n ortamın kırılma indisi, z ışının optik eksenindeki konumunu ifade eder. $R(z)$ ve $\omega(z)$, matematiksel olarak denklem (11) ve (12)'deki gibi hesaplanabilir.

$$R(z) = (z - z_f) \left[1 + \left(\frac{z_0}{z - z_f} \right)^2 \right] \quad (11)$$

$$\omega(z) = \omega_0 \sqrt{1 + \left(\frac{z - z_f}{z_0} \right)^2} \quad (12)$$

Burada z_0 Rayleigh uzunluğudur ve ışının odak noktasından ne kadar uzağa odaklanacağını gösterir. Fokus spot çapı (ω_0), minimum spot boyutudur ve ışın burada en sıkışmış ve en yoğun haldedir. z_f odak noktasıdır ve bu noktada $R(z)$ sonsuz kabul edilir (dalga cephesi düzdür). Yakın mesafe için ($z \ll z_0$), ω_0 neredeyse sabit kalır. Ancak ($z \gg z_0$), durumunda ışın genişlemeye başlar. Gauss ışınının giriş belinden

başlayarak yayılımı ve çap ve yoğunluk değişimlerinin görsel bir ifadesi Şekil 11'deki gibidir.



Şekil 11. Lazer ışını şekil analizi: gauss ışını ve rayleigh aralığı

Rayleigh uzunluğu, ışının odak noktasında ne kadar iyi odaklandığını, düzgün bir şekilde ne kadar uzağa ilerlediğini gösteren bir ölçüttür ve matematiksel ifadesi denklem (13)'teki gibidir (Sennaroglu, 2010).

$$z_0 = \frac{n\pi\omega_0^2}{\lambda} \quad (13)$$

Burada λ lazerin ortamdaki dalga boyudur. Denklemden, lazer ışını ideal bir Gaussian ışını (kırınım sınırında bir ışın) olarak ele alınmıştır. Ancak gerçekte lazer ışınları her zaman ideal durumda olmaz. M^2 faktörü, gerçek ışının BPP değerinin kırınım sınırlı Gauss ışınının BPP değerine oranıdır ve ışığın idealden ne kadar saptığını ölçmek için kullanılır. Gerçekte Rayleigh uzunluğu denklem (14)'teki gibi ifade edilir.

$$z_0 = \frac{n\pi\omega_0^2}{M^2\lambda} \quad (14)$$

Lazerde düşük BPP ve M^2 faktörü ışığın kalitesinin yüksek olduğunu gösterir. BPP ışığın odaklana bilirliliğini ve odaklandığı davranışı tanımlar. Matematiksel ifadesi denklem (15)'teki gibidir.

$$BPP = \omega_0 \cdot \theta \quad (15)$$

Burada θ , ışının diverjans açısıdır (uzaktaki yayılma açısı). Başka bir ifadeyle BPP gerçek durumda (16)'daki gibi ifade edilir.

$$BPP = M^2 \frac{\lambda}{\pi} \quad (16)$$

M^2 ne kadar büyürse ışığın kalitesi o kadar düşer. Burada θ için denklem (17)'deki gibidir. Burada $M^2 = 1$ ideal Gauss ışını için geçerli olan yayılma açısını verir.

$$\theta = \frac{M^2 \cdot \lambda}{\pi \cdot \omega_0} \quad (17)$$

2.5. Darbeli Dalga Modları

Rezonatör aynaları, ışının dalga cephesini ve genliğini sınırlar ve bu sınır şartları ışığın modlarını oluşturur. Lazer rezonatöründe birden fazla uzunlamasına modun faz uyumu ile eş zamanlı olarak salınmasıyla Mode-locking (mod kilitleme) durumu oluşur. Bu faz uyumu, rezonatör içinde her biri farklı frekanslara sahip modların birbirleriyle konstrüktif olarak girişim yapmasına neden olur ve ultra kısa süreli yüksek yoğunluklu darbeler ortaya çıkar. Lazer rezonatöründe, belirli bir dalga boyunda duran dalga modelleri oluşur. Bu modeller rezonatörün geometrisi ve kazanç ortamına bağlıdır. Bir rezonatördeki modların frekansı (18)'deki gibidir.

$$f_n = f_o + n \cdot \Delta f \quad (18)$$

Burada f_o rezonatörün temel frekansıdır. n , burada mod sayısını verir. Δf modlar arası frekans aralığıdır ve (19)'daki gibi ifade edilir.

$$\Delta f = \frac{c}{2L} \quad (19)$$

Mod kilitleme, lazer modların fazlarının sabitlenmesini sağlar. Faz uyumu gerçekleştiğinde, zaman içinde modların birbirleriyle girişim ile yüksek tepe yoğunluğuna sahip kısa lazer darbeleri oluşur. Lazerde Mod kilitleme oluşturma'nın çeşitli yolları vardır. Düşük yoğunlukta gelen ışığı soğuracak doyurulabilir bir soğutucu (örn SESAM) kullanılarak pasif mod kilitleme elde edilebilir. Burada ışık yoğunluğu belli bir eşik değeri sonrası soğurucuda doyuma ulaşır ve ışığı geçirir ve böylece yüksek yoğunluklu kısa darbeler güçlendirilir. Düşük yoğunlukta sinyaller zayıflarken, kısa darbeler enerjilendirilmiş olur. Elektro-optik veya akusto-optik bir modülatör ile lazer rezonatörüne harici bir sinyal uygulayarak aktif mod kilitleme elde edilebilir. Burada modülatör, modların fazını uyumlu hale getirecek şekilde periyodik kazanç sağlar. Çalışma frekansı rezonatör modlarıyla eşleştiği durumda faz uyumu gerçekleşmiş olur. Burada otokorelasyon, FROG (Frequency-Resolved Optical Gating) gibi teknikler ve spektrometre tabanlı ölçüm teknikleriyle rezonatördeki darbeli atım sürelerinin ölçümü sağlanabilir (Rulière, 2005).

3. TULYUM LAZERLERİ-LİTERATÜR

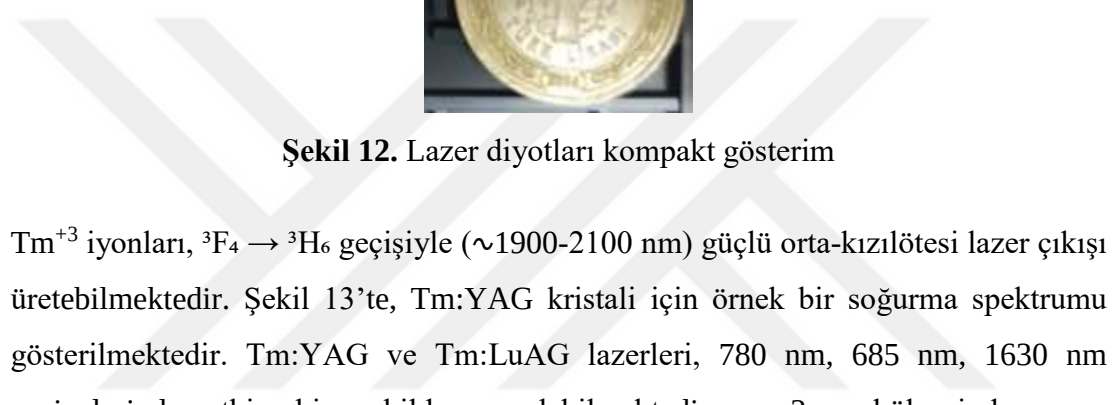
Diyot pompalı katı hâl lazerlerinde aktif lazer iyonları olarak Nd^{+3} (Neodimyum), Yb^{+3} (Ytterbiyum), Tm^{+3} (Tulyum), Er^{+3} (Erbiyum), Ho^{+3} (Holmiyum), Cr^{+3} (Krom) ve Ti^{+3} (Titanyum) iyonları kullanılmakta olup, bu iyonlar genellikle YAG (Yttrium Aluminum Garnet), YVO_4 (Yttrium Orthovanadate), YLF (Yttrium Lithium Fluoride), LiSAF (Lityum Stronsiyum Alüminyum Florür), Sapphire (Safir - Al_2O_3) ve cam bazlı fosfat veya silikat malzemeler içine katkılanmaktadır (Asakura ve diğerleri, 2006). Bu çalışmada kullanılan Tm^{+3} katkılı Tm:YAG ve Tm:LuAG kristalleri ile 2 μm bölgesi lazer dalga boyu verirler. 2 μm dalga boyu aralığında çalışan diyot pompalı katı hal lazerleri, göz için güvenli olmalarının yanı sıra, tıbbi uygulamalar, lazer radar sistemleri, malzeme işleme, optik frekans dönüşümü, gaz sensörleri ve Ho^{+3} ile Cr^{+2} katkılı lazerlerin pompalanması gibi çeşitli alanlarda verimli ışık kaynakları olarak kullanılmaktadır (Beach ve Deutsch, 2018; Bilici ve diğerleri, 2011; Horiguchi ve Osanai, 1976; Murari ve diğerleri, 2016; Scholle, Lamrini, Koopmann ve Fuhrberg, 2010; Suni ve diğerleri, 1995; Walsh, Barnes ve Di Bartolo, 1998; Xie ve diğerleri, 2020). Bu bağlamda, Tm:YAG ve Tm:LuAG gibi Tm^{+3} katkılı kristaller, söz konusu uygulamalar için yaygın olarak tercih edilen lazer kazanç ortamları arasındadır. Stoneman ve Esterowitz tarafından yapılan bir çalışma (Stoneman ve Esterowitz, 1990), Tm:YAG ve Tm:YSGG kristallerinin optik pompalamayla çalışabilen geniş ayarlanabilir lazer ortamları olduğunu ortaya koymuştur. Bu kristallerin 1,87-2,16 μm dalga boyları arasında şekillendirilebilir lazer çıkışı sunabilmesi, lazer sistemlerinde büyük bir esneklik sağlamaktadır. Suni ve Henderson (Suni ve Henderson, 1991) ise 3 W gücünde bir diyot lazerle pompalanan Tm:YAG lazerlerinin, Q-anahtarlamalı çalıştırıldığında 1 mJ/pulse enerjiye ulaşabildiğini göstermiştir. Bu, göz için güvenli dalga boyu aralığında yüksek enerjili darbeler üreten lazerlerin geliştirilmesi açısından kritik bir sonuçtur. Lai ve diğerleri tarafından gerçekleştirilen bir başka çalışma (Lai ve diğerleri, 2000), diyotla pompalanan Tm:YAG lazerlerinin yüksek gücünde sürekli dalga (CW) çıkış verebileceğini ortaya koymuş ve 120 W seviyesine ulaşılmıştır. Bu başarı, endüstriyel ve bilimsel uygulamalarda kullanılabilecek yüksek gücün mümkün olduğunu göstermektedir. Barnes ve ekibi, oda sıcaklığında çalışabilen diyot-pompalı

Tm:LuAG lazerlerinin performansını inceleyerek, bu kristalin Tm:YAG ile karşılaştırılabilir verimliliğe sahip olduğunu göstermişlerdir (Barnes, Jani ve Hutcheson, 1995). Li, Wang ve Ju tarafından yapılan karşılaştırmalı bir çalışma (Li, Wang ve Ju, 2008), LD-pompalı Tm:YAG ve Tm:LuAG lazerlerinin performans farklılıklarını analiz etmiş ve Tm:LuAG'in belirli dalga boylarında daha yüksek kazanca ve verime sahip olduğunu ortaya koymuştur. Bu, lazer kristali seçiminin uygulamaya göre optimize edilmesi gerektiğini göstermektedir. H. K. ve ekibi tarafından gerçekleştirilen spektral analiz çalışması (Kalaycioglu, Sennaroglu, Kurt ve Ozen, 2007), Tm³⁺ katkılı LuAG kristallerinin optik ve lazer özelliklerini detaylı olarak incelemiş, lazer dalga boyları ve spektrumlarına dair kritik bulgular ortaya koymuştur. Bu çalışmalar bir arada değerlendirildiğinde, Tm:YAG ve Tm:LuAG kristallerinin diyot pompalanan katı hal lazerleri için etkin kazanç ortamları sunduğu görülmektedir. Her iki kristal de yüksek verimlilik, güçlü lazer çıkışı ve geniş dalga boyu ayarlanabilirliği gibi avantajlar sağlamakta olup, uygulama bazlı özelleştirilmiş lazer tasarımlarında kritik rol oynamaktadır.

Günümüze kadar Tulyum lazerlerinin nasıl uyarıldığını inceleyecek olursak başlarda flaş lambası kullanılarak uyarılmıştır. Flaş lambasının en büyük dezavantajı geniş emisyon aralığında ışıma vermesidir. Haliyle Tulyum lazerlerinin kullanımına baktığımızda sadece 780, 685 nm gibi dalga boyunda ışık kullanılacaktır ve diğer bütün enerji boşa gidecektir. Dolayısıyla bu oldukça verimsiz bir uyarma tekniğidir. Daha sonra katkılандığı kristale bağlı olarak tam soğurma noktalarının değişiklik gösterdiği Titanyum Safır(Ti: Safır) lazerlerin çıkışlarıyla Tulyum lazerleri uyarılmaya başlanmıştır (Cornacchia, Di Lieto ve Tonelli, 2009; Cornacchia, Parisi, Bernardini, Toncelli ve Tonelli, 2004; Mateos ve diğerleri, 2006; Yu ve diğerleri, 2012). Ancak Tulyum lazerlerinin uyarılması için başka bir lazer sistemine ihtiyaç duyulması karmaşıklığı arttırmaktadır. Ayrıca Ti: Safır lazerlerinin maliyeti 60 bin doları bulmaktadır. Bu durumda oldukça maliyetlidir. Son yıllarda ise katı hal lazerleri pompalamak için diyot lazeri geliştirilmiştir (C. A. Wang ve Groves, 1992). Bunlarla Tulyum lazerleri uyarılmaya başlanmıştır. Bu sistemlerde özel lazer tasarımlarına ihtiyaç duyulduğu için sistemlerin tekrarlana bilirliğinde sorunlar yaşanmaktadır. Ayrıca özel tasarım oldukları için bütçesi oldukça yüksek sistemlerdir. 1,6 µm bölgesi dalga boylarında ışıma yapabilen maliyet etkin InGaAsP lazer diyotları kullanılarak



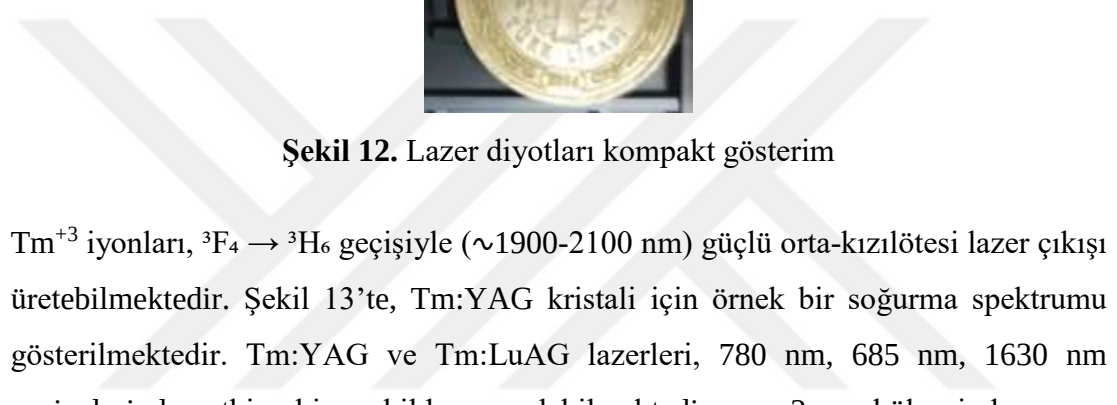
Şekil 12. Lazer diyotları kompakt gösterim



Şekil 12. Lazer diyotları kompakt gösterim

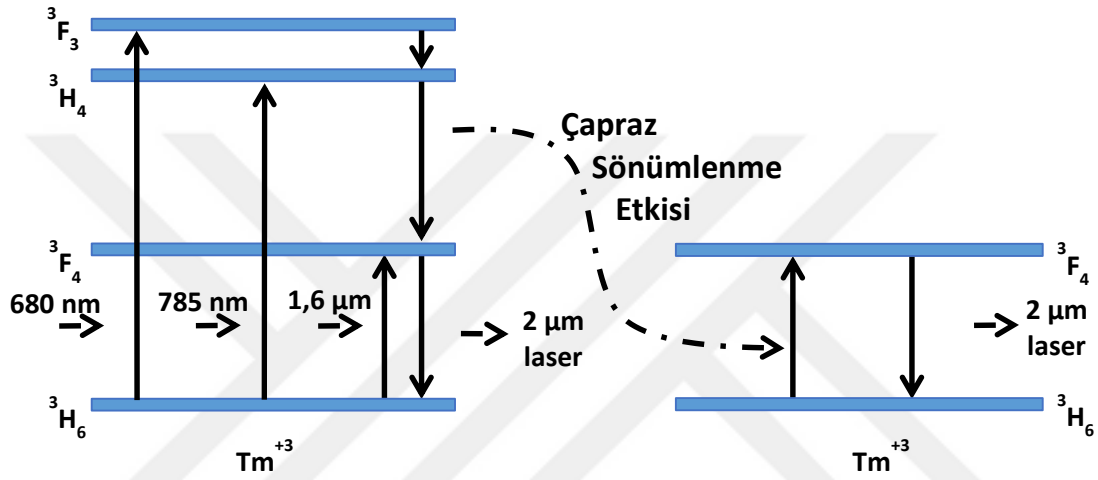


Şekil 12. Lazer diyotları kompakt gösterim



Şekil 12. Lazer diyotları kompakt gösterim

Tulyum lazerlerinin diğer lazerlerden farklı olarak çapraz sönümleme etkisi vardır (Şekil 14). Şöyle ki eğer bir tulyum iyonu, hemen yakınında başka bir Tulyum iyonu ile yan yana gelirse bu durumda yanındaki Tulyum iyonunu uyarabilmekte ve buradan başka bir tane daha lazer ışığı elde edilebilmektedir. Yani bir tane pompa fotonu ile 2 tane lazer fotonu elde edilebilmektedir. Bu durumda da diğer lazer sistemlerine göre yani normal durumlara göre verimini iki katına çıkarabilmektedir (Silfvast, 2004).



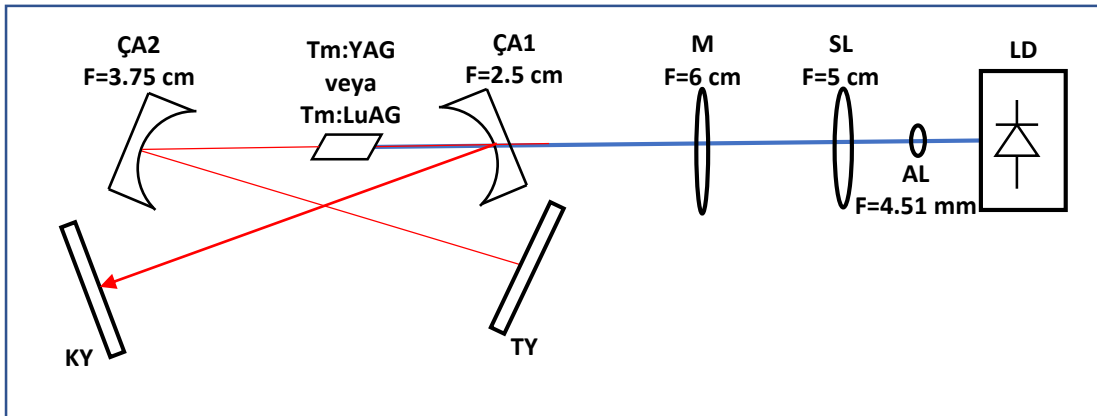
Şekil 14. Tm^{+3} iyonlarının muhtemel bant diyagramı ve çapraz sönümlenme etkisi

Tm^{+3} katkılı lazer sistemlerinin etkin bir şekilde uyarılması için alternatif yöntemler arasında, 1,6 μm bölgesindeki Tm^{+3} lazerlerin bant içi pompalama tekniği önemli bir seçenek olarak öne çıkmaktadır. Bu spektral aralıkta, Tm^{+3} iyonlarının soğurma bandı 785 nm bölgesine kıyasla yaklaşık iki kat daha yüksek absorpsiyon göstermektedir (Şekil 13). Özellikle, ışıma bandına oldukça yakın bir dalga boyunda gerçekleştirilen pompalama süreci, kuantum kusurlarını minimize ederek lazer/yükselteç sistemlerinde çok daha yüksek eğim verimliliğine ulaşılmasını mümkün kılmaktadır. Bu yaklaşımın bir diğer avantajı, lazer verimliliğinin çapraz sönümlenme mekanizmasına bağımlı olmamasıdır. Böylece, kazanç ortamındaki Tm^{+3} iyon konsantrasyonu, termal etkileri minimize edecek şekilde serbestçe optimize edilebilir. Bu durum, yüksek güçlü lazer sistemlerinin ölçeklendirilmesi açısından önemli bir avantaj sağlamaktadır. Ancak, bu spektral bölgede çalışan lazer diyotları henüz 785 nm bölgesindeki muadilleri kadar gelişmiş değildir. Bu nedenle, bant içi pompalama yöntemine yönelik yapılan çalışmaların büyük çoğunluğunda, pompa kaynağı olarak diğer katı hâl lazerlerinin

ıkış dalga boyları tercih edilmiştir. Cornacchia ve arkadaşları, oda sıcaklığında sürekli dalga (CW) rejimde çalışan bir Ho,Tm:YLF lazerini %59 verimle, 1,682 µm'de ayarlanmış sürekli dalga Co:MgF2 lazeri ile pompalayarak elde etmiştir. Bu çalışma ayrıca bant içi pompalama yönteminin etkinliğini gösterir (Cornacchia ve diğerleri, 2001). Kısmen yüksek verimli lazer çıktısı elde edilsede, sistemin optimizasyonu ve uzun vadeli stabilitesi hakkında detaylı veriler eksiktir. Kalachev ve ekibi, Raman kaydırmalı Erbiyum fiber lazer kullanarak 1,678 µm dalga boyunda bir Tm:YLF lazeri pompalamış ve sistemin temel çalışma prensiplerini incelemiştir (Kalachev, Mihailov, Podreshetnikov ve Shcherbakov, 2011). Burada sistem verimi yaklaşık %50 olarak elde edilmiştir. Wu ve arkadaşları, yüksek güçlü bir Raman fiber lazer tarafından pompalanan, 2 µm bandında sürekli dalga lazerini %60 verimle elde etmiştir ve Q-anahtarlama Tm:CaGdAlO4 lazeri geliştirmiştir (Wu ve diğerleri, 2017). Wang ve ekibi, Tm katkılı YAG seramik lazerini 1,617 µm dalga boyunda pompalamış, %62,3 verim değerinde bir sistem elde etmiştir (Y. Wang ve diğerleri, 2011). Tokurakawa ve ekibi, 1,611 µm'de bir Er⁺³:Yb⁺³ fiber ana güç amplifikatör kaynağı kullanarak bant içi pompalanan Tm⁺³:Sc2O3 tek kristalli lazerinde Kerr-lens mod kilitleme ultra kısa darbeler elde edilmiştir (Tokurakawa, Fujita ve Kränkel, 2017). Creeden ve ekibi tarafından yapılan araştırmada, uç bir örnek olarak 1908 nm'deki Tm katkılı fiber lazerle rezonans olarak (üst enerji seviyeleri doğrudan uyarılarak) pompalanan Tm katkılı fiber lazerin (2005 nm'de) %90'ın üzerinde eğim verimine sahip olduğu belirlenmiştir (Creeden, Johnson, Setzler ve Chicklis, 2014). Tm katkılı KY(WO4)2 kristalleri üzerine yapılan çalışmalarda, Troshin ve arkadaşları, bu kristallerin spektral özelliklerini ve lazer verimini analiz etmiş ve 800 nm dalga boyunda bir diyot lazer kullanarak bant içi pompalama sonucu %28 verim elde etmiştir (Troshin ve diğerleri, 2007). Bu çalışma Tm⁺³ lazerlerinin lazer diyotları ile bant içi uyarılmasının ilk performans analizidir. Yüksek verimle elde edilememesi muhtemelen diyot kaynağının sınırlı parlaklığının bir etkisidir. Son yıllarda geliştirilen yüksek parlaklığa sahip tek-kipli (single-mode) lazer diyotları, özellikle 1625 nm, 1650 nm ve 1660 nm dalga boylarında doğrudan pompalama için umut vaat etmektedir. Bu çalışma ile bu yeni nesil lazer diyotları kullanılarak Tm⁺³ lazerlerinin verimlilik, ışın kalitesi, termal yük yönetimi, dalga boyu değişimleri ve mod kilitli çalışma gibi parametreler açısından performansı detaylı şekilde incelenmiştir.

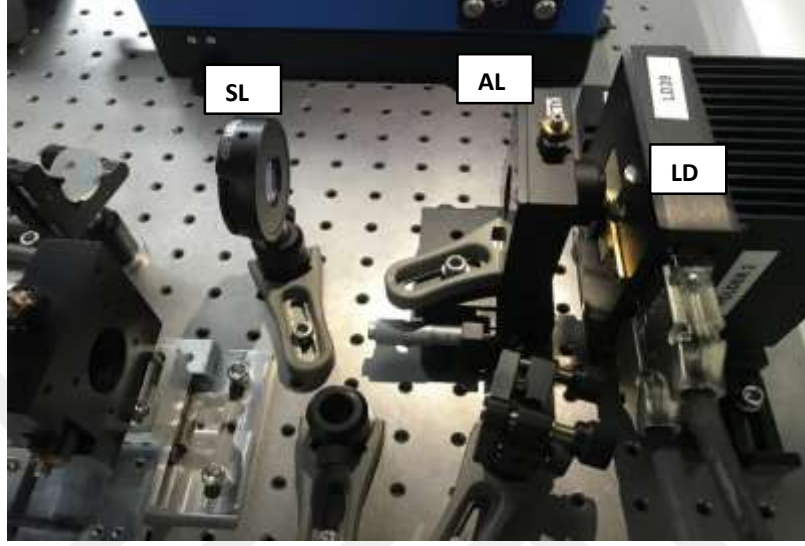
4. GEREÇ VE YÖNTEM

Çalışma için kurulan sistemin genel bir şeması Şekil 15'te görülmektedir. Çalışmalara ilk olarak yüksek parlaklığa sahip ve telekom bandında ışıma yapabilen 1,6 μm lazer diyotlarının hizalanması ile başlanmıştır. Öncesinde ilgili diyotlar C-yapılı diyot tutucularına (LD) yerleştirilmiştir ve diyot sürücüleri (sıcaklık kontrol sürücüsü ve akım kaynağı) ile bağlantıları yapılmıştır. Daha sonra lazer diyotunun önüne oldukça açılı yayılan ışığı toplamak için $f = 4,51$ mm odak uzaklığına sahip bir asferik lens (AL) yerleştirilmiştir. Böylece ilk olarak diyottan çıkan ışığın asferik lens (AL olarak gördüğümüz) kullanılarak toplanması sağlanmıştır. Söz konusu diyotun yatay ve dikey eksen yayılım açısı birbirinden farklıdır. Bu yayılım açılarını eşlemek için sadece bir ekseninde odaklama yapan $f = 5$ cm odak uzaklığına sahip silindirik lens (SL) kullanılmıştır. Daha sonra pompa ışığının 6 cm'lik bir lens (ML) yardımıyla kristalin içerisine odaklanması sağlanmıştır. Rezonatör olarak sistemde 4-aynalı x-katlamalı bir geometri kullanılmıştır. Bu geometri iki adet çukur ayna (ÇA1 ve ÇA2) ve bunların belirli bir uzaklıklarına yerleştirilmiş %1.3'lük kısmi yansıtıcı bir çıkış aynası (KY) ve yüksek yansıtıcı bir aynadan (TY) oluşmaktadır. Kristal iki çukur ayna arasına Brewster açısında yerleştirilerek sistemin sürekli dalga rejiminde çalıştırılması sağlanmıştır. Kristalin ısınmasını engellemek için su ile soğutma yöntemi kullanılmıştır ve bunun için kristal bakır tutucunun soğutma sistemi ile bağlatısı yapılmıştır.



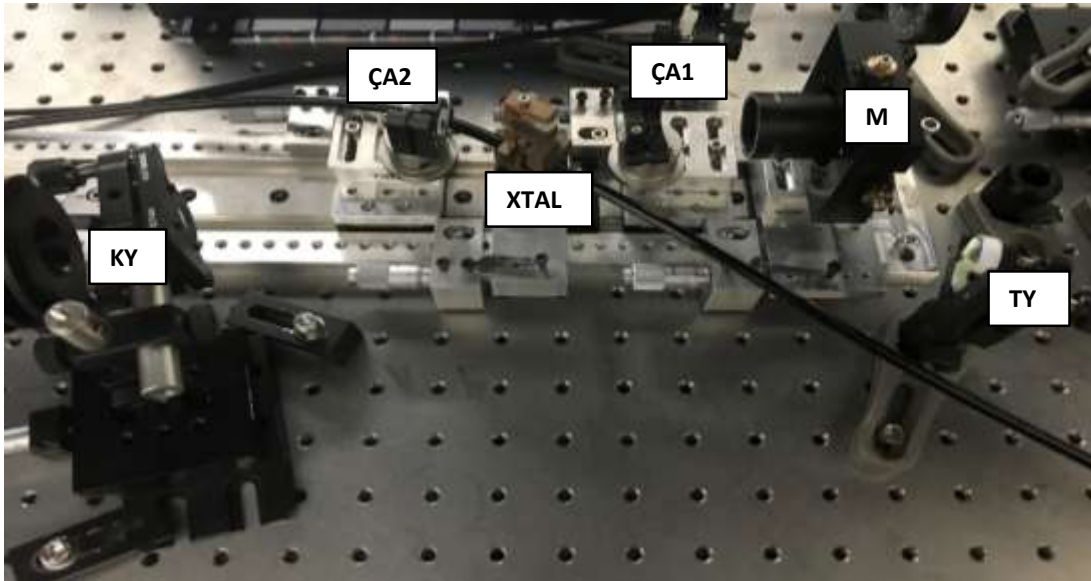
Şekil 15. Kurulan lazer sisteminin genel şeması

InGaAsP lazer diyotları ile Tm^{+3} iyonları uyarılabilmektedir. Şekil 16’da LD sürücüyeye yerleştirilmiş 1620 ± 15 nm dalga boyunda doğrusal polarizasyonda 6 A akımda çalışan 1 W güçte ışıma veren, InGaAsP lazer diyot pompalı lazerin pompa sistemi gösterilmiştir.



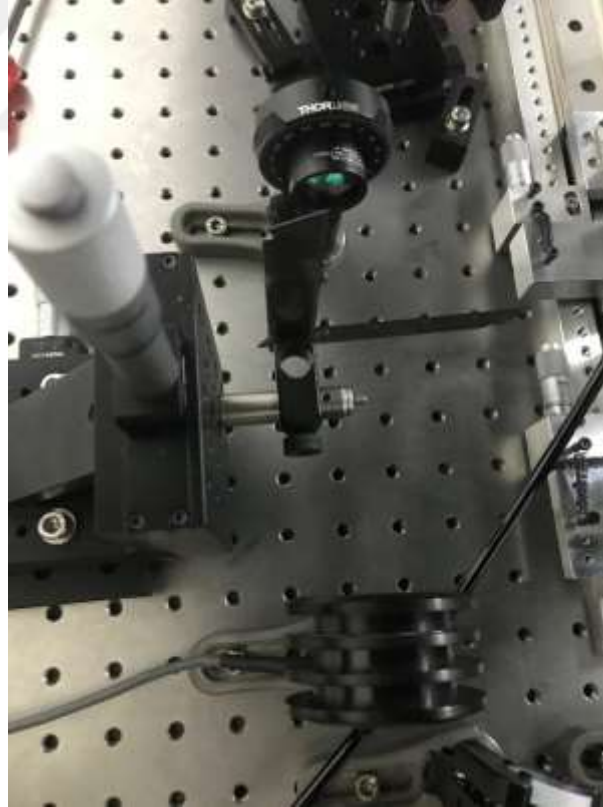
Şekil 16. Kurulan InGaAsP diyot pompalı lazer sisteminin pompa düzeneği

InGaAsP diyot pompalı katıhal lazerinin kazanç ortamı ve 4 aynalı x- katlamalı rezonatör geometrisi Şekil 17’deki gibidir.



Şekil 17. Lazer rezonatörü

Işımanın elde edilmesinden sonra su soğutma sistemi 15 °C ayarında çalıştırılmıştır. Lazer çıkış gücü maksimum elde edilecek şekilde sistemde gerekli hizalama ve açı ayarları denenmiştir. Gözlemlenebilen maksimum çıkış gücünde, kararlılığın (uzun süre değişmeyen çıkış gücü değeri) gözlemlenmesi sonrasında verim eğimi ölçümlerine geçilmiştir. Bunun için soğutucu sıcaklığı sırasıyla 10 °C, 15 °C, 20 °C, 25 °C ayarlanarak her bir sıcaklık ayar değerinde çıkış gücünün değişimi, giriş gücü değiştirilerek ölçülmüştür. Böylece sistemin bu sıcaklıklardaki verim eğimleri belirlenmiştir. Ardından, KY'den çıkan lazer ışığının ışın kalitesini gözlemleyebilmek amacıyla karakteristiğini ölçmek için bir bıçak kenarı düzeneği kurulmuştur ve bu sayede ışığın M^2 ölçümü yapılmıştır. Sisteme yerleştirilen bıçak kenarı düzeneği Şekil 18'deki gibidir. Aynı zamanda, kristal sıcaklığındaki değişikliklere bağlı olarak lazer gücünün değişimini incelemek amacıyla suyun sıcaklığı 10 °C ile 40 °C arasında değiştirilmiş ve bu sıcaklıklarda her bir kristal için verim eğrileri elde edilmiştir.



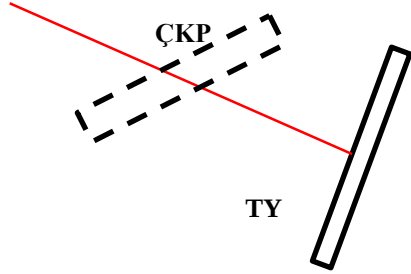
Şekil 18. M^2 ölçümleri için kullanılan bıçak kenarı düzeneğinin görüntüsü

Sistemin genel görüntüsü Şekil 19’da sunulmuştur.



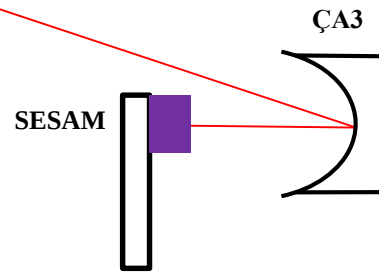
Şekil 19. Kurulan sistemin genel görüntüsü

Daha sonra sistemin içerisine Şekil 20’deki gibi (TY koluna) çift kırınımlı prizma eklenerek (ÇKP) dalga boyu değişim aralıklarına bakılmıştır ve çift dalga boyu incelemeleri yapılmıştır.



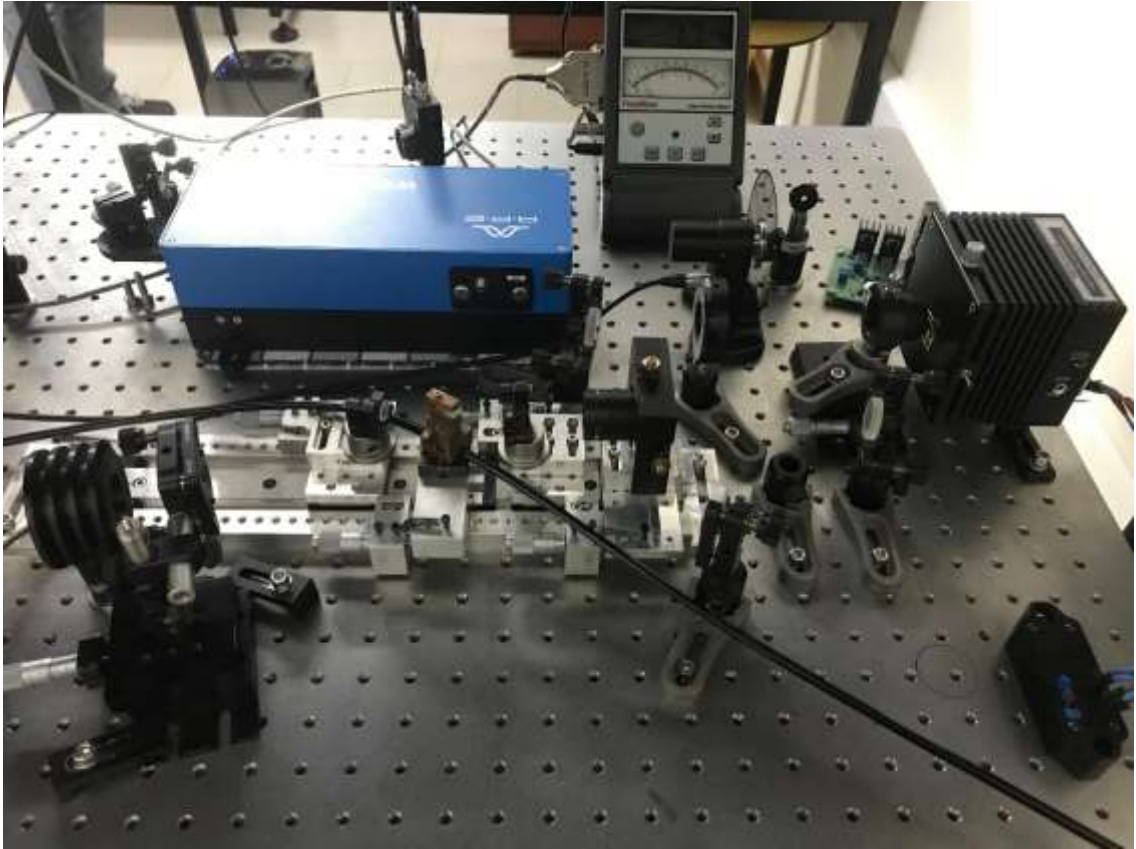
Şekil 20. Dalga boyu değişimi için sisteme eklenen ÇKP'nin şematik ve deneysel gösterimi

Daha sonra sistemden TY aynası çıkarılarak yerine bir çukur ayna (ÇA3) ve onun odağına da bir yarı iletken doyabilen yansıtıcı ayna (SESAM) Şekil 21'deki gibi yerleştirilmiştir. SESAM'ın eksenler boyunca konumu değiştirilmiştir ve böylece darbeli rejimler elde etmeye çalışılmıştır.



Şekil 21. Darbeli rejim çalışmaları için sisteme eklenen SESAM'nın şematik ve deneysel gösterimi

Şekil 22’de lazer pompa sistemi ve rezonatör sisteminin bir arada olduğu üzerinde çalışılan lazer sisteminin bir örneği gösterilmiştir. Lazer sistemi ilk olarak %6 katkılı 7-mm Tm:YAG kristali ile kurulmuştur. Yapılan ölçümler tamamlandıktan sonra kristal değiştirilerek %6’lık 5-mm’lik Tm:YAG, %6’lık 3-mm’lik Tm:YAG, %3’lük 7-mm’lik Tm:YAG, %3’lük 5-mm’lik Tm:YAG, %3’lük 3-mm’lik Tm:YAG, %1,5’lik 9-mm’lik Tm:YAG, %1,5’lik 7-mm’lik Tm:YAG, %1,5’lik 5-mm’lik Tm:YAG, %1,5’lik 3-mm’lik Tm:YAG kristalleri kullanılmıştır. Daha sonra Tm:LuAG kristalleri ile çalışmalara geçilmiş olup; %6’lık 7-mm’lik Tm:LuAG, %6’lık 5-mm’lik Tm:LuAG, %6’lık 3-mm’lik Tm:LuAG, %4’lük 7-mm’lik Tm:LuAG, %4’lük 5-mm’lik Tm:LuAG, %4’lük 3-mm’lik Tm:LuAG, %2’lik 9-mm’lik Tm:LuAG, %2’lik 7-mm’lik Tm:LuAG, %2’lik 5-mm’lik Tm:LuAG, %2’lik 3-mm’lik Tm:LuAG kristalleri kullanılmıştır. Bu çalışmalarda yapılan ölçümler tekrarlanmış ve her bir kristal için sonuçlar not edilmiştir.



Şekil 22. Deneysel çalışmaların yapıldığı lazer kurulumun genel hali

5. BULGULAR

5.1. Sürekli Dalga Rejimindeki Sonuçlar

1,6 μm ile uyarılan Tm:YAG ve Tm:LuAG lazer sistemlerinden sürekli dalga rejimlerinde elde edilen sonuçların genel bir tablosu Tablo-1 ile Tablo-2’de sunulmuştur. Detaylı sonuçlar ise her bir kristal için ilgili kısımda verilmektedir. Tablo 1’de 1,6 μm ’de uyarılan sürekli dalga rejimindeki Tm:YAG lazerlerinin farklı katkı oranları, uzunluklar ve sıcaklık koşulları altındaki verim ve çıkış gücü değerleri verilmektedir. Katkı oranının verime etkisi incelendiğinde, %1,5 katkı oranında, verim genellikle %50-62 arasında değişirken, çıkış gücü 75-171 mW arasında değişmektedir. %3 katkı oranında, verim %54-62 civarlarında iken, çıkış gücü biraz daha yüksek değerlere ulaşarak 121-189 mW arasında değişmiştir. %6 katkı oranında, verim %43-49 seviyelerine kadar düşmekte ve çıkış gücü 89-156 mW arasında değişmektedir. Sonuçta katkı oranı arttıkça (%1,5 $\rightarrow$ %3 $\rightarrow$ %6) verimde genel bir düşüş olduğu görülmektedir. Kristal uzunluğunun etkisi incelendiğinde, sistemin verimini ve çıkış gücünü doğrudan etkilemektedir. Uzun kristaller (9-mm, 7-mm) genellikle daha yüksek çıkış gücü ürettiği görülmektedir. Örneğin, %3 katkı oranı ve 7-mm uzunluk için 189 mW çıkış gücü elde edilirken, aynı katkı oranı ve 3-mm uzunluk için maksimum 132 mW çıkış gücü elde edilmiştir. Daha kısa kristallerde (3-mm, 5-mm) emilim oranı düşmekte ve lazer verimi azalmaktadır. Bu durum, yeterli lazer kazancı sağlamak için kristal uzunluğunun kritik bir parametre olduğunu ve çok kısa kristallerin emilim kapasitesinin düşük olması nedeniyle performansı sınırlayabileceğini göstermektedir. Sıcaklığın etkisi incelendiğinde, veriler, sıcaklığın artmasıyla lazer veriminin genellikle düştüğünü göstermektedir. Örneğin, %3 katkı oranı ve 7-mm uzunluk için 10 °C’de verim %63 iken, 25 °C’de %56’ ya düşmektedir. Benzer şekilde, çıkış gücü de sıcaklık arttıkça genellikle düşmektedir. Bu düşüş, yüksek sıcaklıklarda termal yüklenmenin artması ve stokes kayıplarının yükselmesi ile açıklanabilir. Termal lensleme etkileri de rezonatör kararlılığını olumsuz etkileyebilir. Sonuç olarak, 1,6 μm sürekli dalga Tm:YAG lazerleri için %3 katkı oranı, 7-mm uzunluk ve düşük sıcaklıkta çalışma koşulları en iyi performansı sunmaktadır.

Tablo 1. 1,6 μm 'de uyarılan sürekli dalga rejimindeki Tm:YAG lazerlerinin sonuçları

Katkı Oranı (%)	Uzunluk (mm)	Sıcaklık ($^{\circ}\text{C}$)	Verim (%)	Çıkış Gücü (mW)
1,5	9	10	62,41	171
		15	60,46	168
		20	59,05	168
		25	57,75	166
	7	10	64,31	165
		15	63,3	161
		20	62,26	157
		25	60,72	152
	5	10	59,88	127
		15	57,96	124
		20	54,58	119
		25	51,6	112
	3	10	52,12	78
		15	50,27	77
		20	49,98	75
		25	47,84	72
3	7	10	62,96	189
		15	61,18	187
		20	57,4	178
		25	55,77	171
	5	10	59,76	185
		15	58,12	180
		20	58,28	176
		25	57,95	171
	3	10	58,93	132
		15	57,3	128
		20	55,77	126
		25	54,02	121
6	7	10	47,84	156
		15	49,35	148
		20	46,46	141
		25	44,88	141
	5	10	49,56	114
		15	48,31	110
		20	47,85	103
		25	47,02	99
	3	10	50,23	99
		15	47,53	93
		20	46,48	89
		25	45,46	86

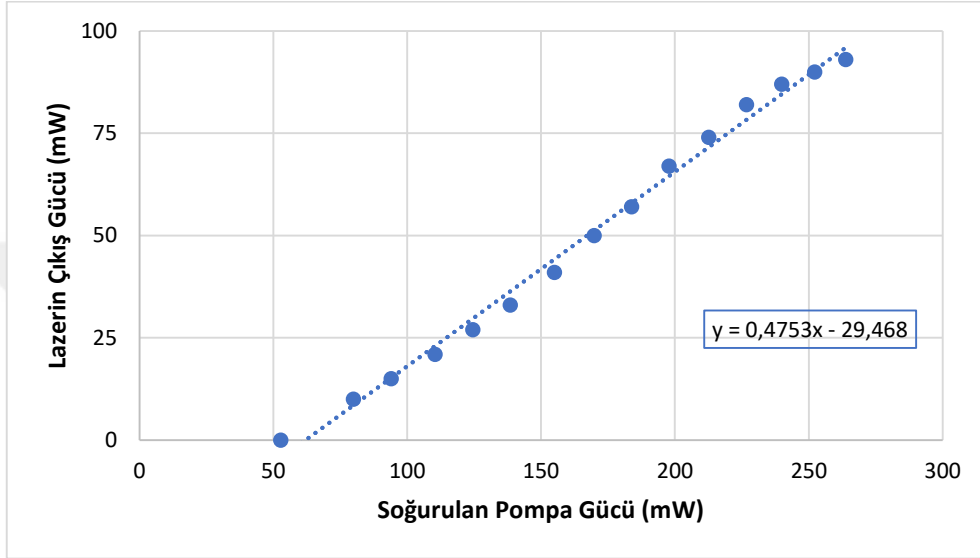
Tablo 2, 1,6 μm 'de uyarılan sürekli dalga rejimindeki Tm:LuAG lazerlerinin farklı katkı oranları, uzunluklar ve sıcaklık koşulları altındaki verim ve çıkış gücü değerlerini içermektedir. Katkı oranının verime etkisi incelendiğinde, Tm:LuAG lazerlerinde katkı oranı arttıkça verim düşme eğilimi göstermektedir. %2 katkı oranında, verim genellikle %55-67 arasında değişmekte olup, çıkış gücü 48-130 mW arasındadır. %4 katkı oranında, verim biraz daha düşük olup %54-60 arasında değişmektedir ve çıkış gücü 83-147 mW arasında gözlemlenmiştir. %6 katkı oranında, verim en düşük seviyelere inmekte (%53-65), çıkış gücü ise 103-141 mW arasında değişmektedir. Kristal uzunluğunun etkisi incelendiğinde, kristal uzunluğu arttıkça çıkış gücü yükseldiği söylenebilir. 9-mm uzunluğunda, %2 katkı oranı ile maksimum 130 mW çıkış gücü gözlemlenirken, 7-mm uzunlukta 103 mW, 5-mm uzunlukta 99 mW, 3-mm uzunlukta ise 76 mW elde edilmiştir. %4 katkı oranında, 7-mm uzunluğundaki kristaller en yüksek çıkış gücünü (147 mW) sağlamıştır. %6 katkı oranında, yine 7-mm uzunluğundaki kristaller 141 mW ile en yüksek çıkış gücünü üretmiştir. Bu durum, Tm:YAG için gözlemlenen eğilimle benzerdir: daha uzun kristallerde sıklıkla daha yüksek çıkış gücü sağlanmıştır, ancak verim katkı oranı ve sıcaklığa bağlı olarak değişmektedir. Tm:LuAG lazerleri için sıcaklık arttıkça verimin azaldığı görülmektedir. %2 katkı oranında, 9-mm uzunlukta verim %67.61 (10 °C) iken, %63.73'e (25 °C) düşmektedir. %4 katkı oranında, 7-mm uzunlukta verim %59.85 (10 °C) iken, %56.57'ye (25 °C) düşmektedir. %6 katkı oranında, 3-mm uzunlukta verim %62.32 (10 °C) iken, %57.65'e (25 °C) düşmektedir. Bu eğilim Tm:YAG ile paralellik göstermektedir: yüksek sıcaklıklar, stokes kayıpları ve termal lensleme etkileri nedeniyle lazer veriminin düştüğü şeklinde açıklanabilir.

Tablo 2. 1,6 μm 'de uyarılan sürekli dalga rejimindeki Tm:LuAG lazerlerinin sonuçları

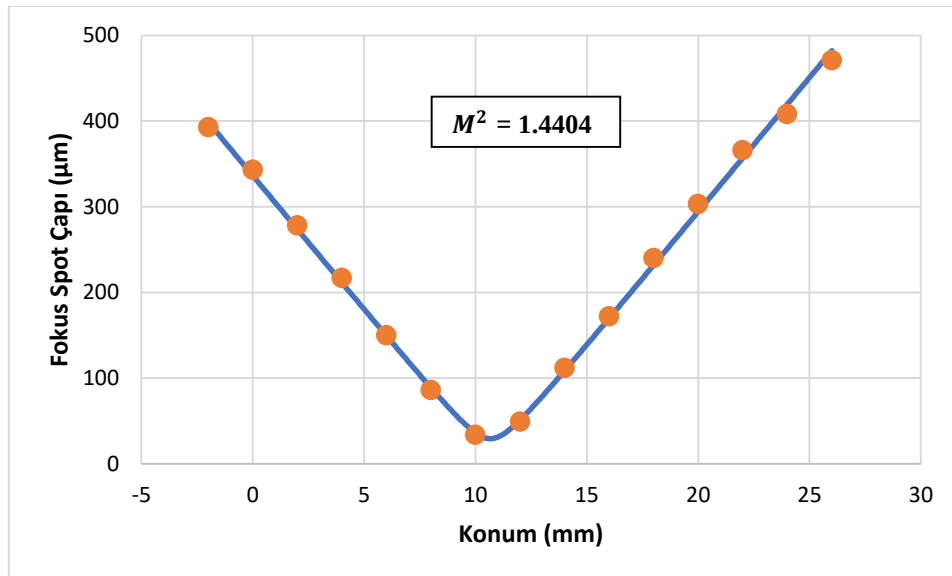
Katkı Oranı (%)	Uzunluk (mm)	Sıcaklık ($^{\circ}\text{C}$)	Verim (%)	Çıkış Gücü (mW)
2	9	10	67,61	130
		15	66,43	122
		20	64,84	119
		25	63,73	114
	7	10	58,32	103
		15	56,88	99
		20	57,18	96
		25	56,11	91
	5	10	57,54	90
		15	58,69	83
		20	56,02	78
		25	55,9	76
	3	10	59,08	53
		15	56,46	52
		20	51,43	51
		25	48,53	48
4	7	10	59,85	147
		15	60,15	145
		20	59,54	139
		25	59,57	135
	5	10	60,25	133
		15	58,03	129
		20	57,18	125
		25	56,54	121
	3	10	54,7	100
		15	55,12	94
		20	54,22	86
		25	53,67	83
6	7	10	53,34	141
		15	51,76	139
		20	45,19	137
		25	43,41	129
	5	10	59,4	138
		15	57,45	134
		20	54,75	125
		25	55,61	121
	3	10	62,32	118
		15	61,36	112
		20	59,42	109
		25	57,65	103

5.1.1. %6 Katkılı 3-mm Tm:YAG Kristali

%6'lık 3-mm Tm:YAG kristali ile yaptığımız çalışmalarda 15 °C'de 93 mW çıkış gücü %47 verim ile gözlemlenmiştir (Şekil 23). Yapılan ışın karakteristiği ölçümlerinde ise ideallığe yakınlığı ifade edecek şekilde M^2 sonuçları 2'den düşük çıkmıştır (Şekil 24).

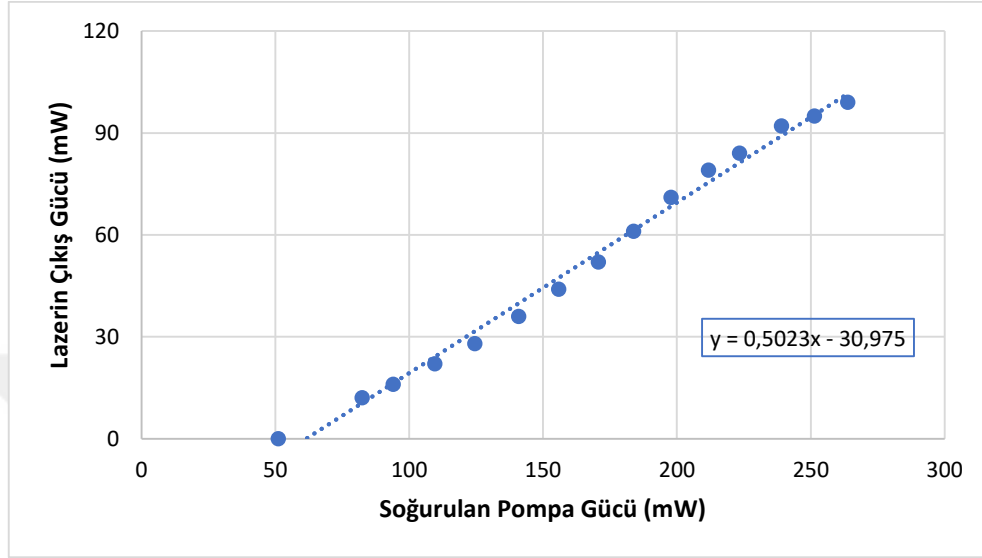


Şekil 23. %6 katkılı 3-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminin 15 °C'deki verim eğrisi

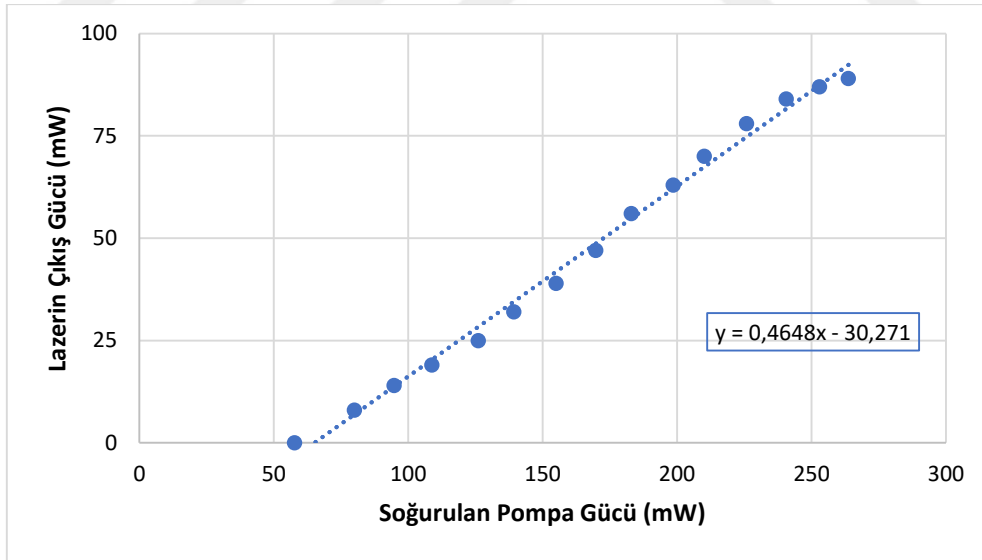


Şekil 24. %6 katkılı 3-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazerinin M^2 ölçüm sonucu

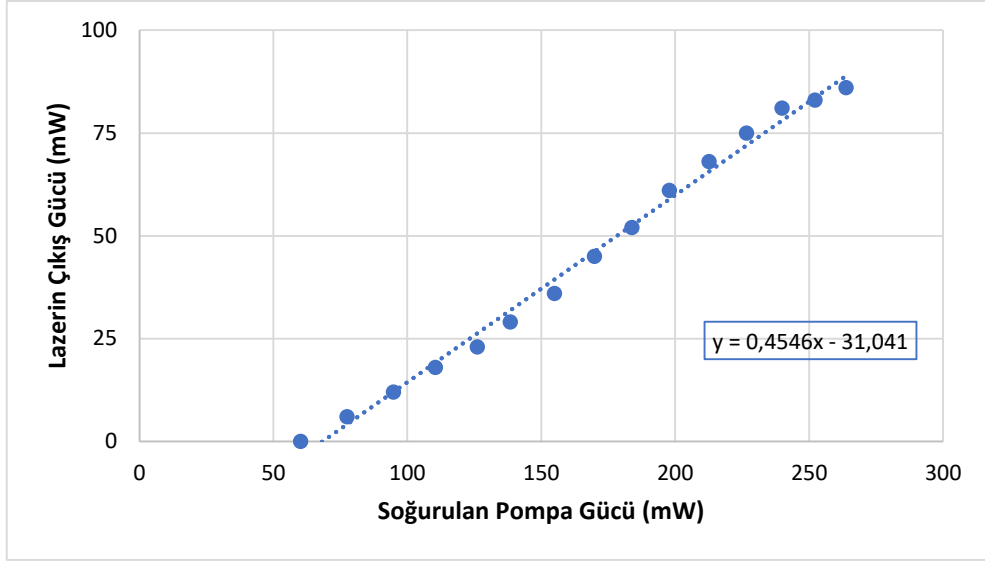
Daha sonra kristal sıcaklığı değiştirilerek 10 °C, 20 °C ve 25 °C’de verim eğrisi ölçümleri de alınmış (Şekil 25, 26, 27) ve 15 °C ile 40 °C arasında en yüksek güç değerleri (Şekil 28) kaydedilmiştir.



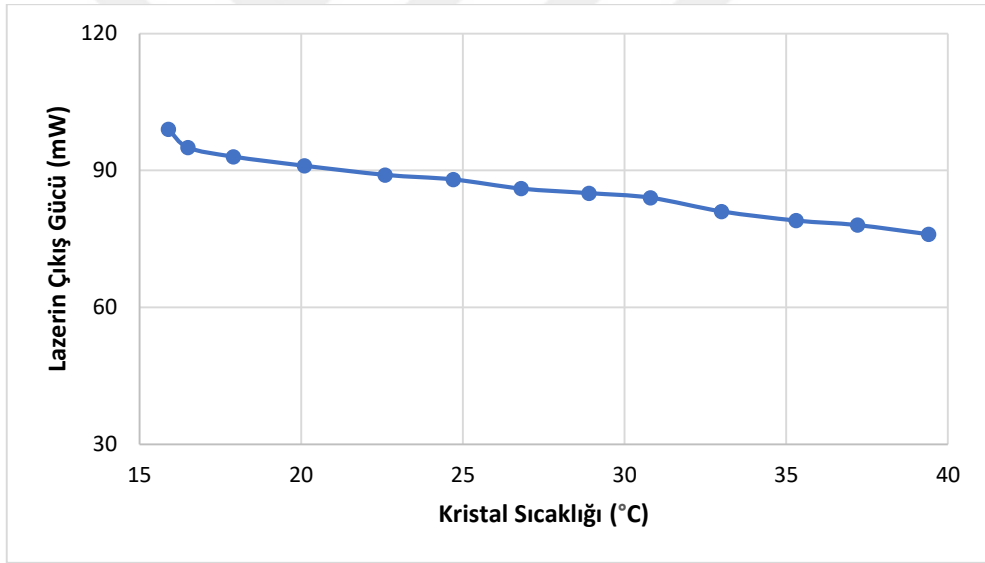
Şekil 25. %6 katkılı 3-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminin 10 °C’deki verim eğrisi



Şekil 26. %6 katkılı 3-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminin 20 °C’deki verim eğrisi



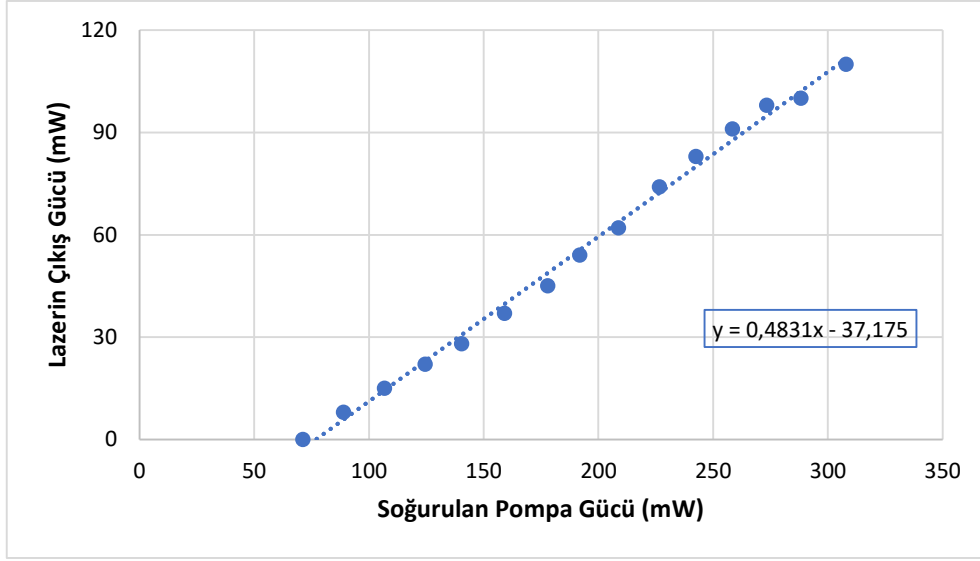
Şekil 27. %6 katkılı 3-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminin 25 °C'deki verim eğrisi



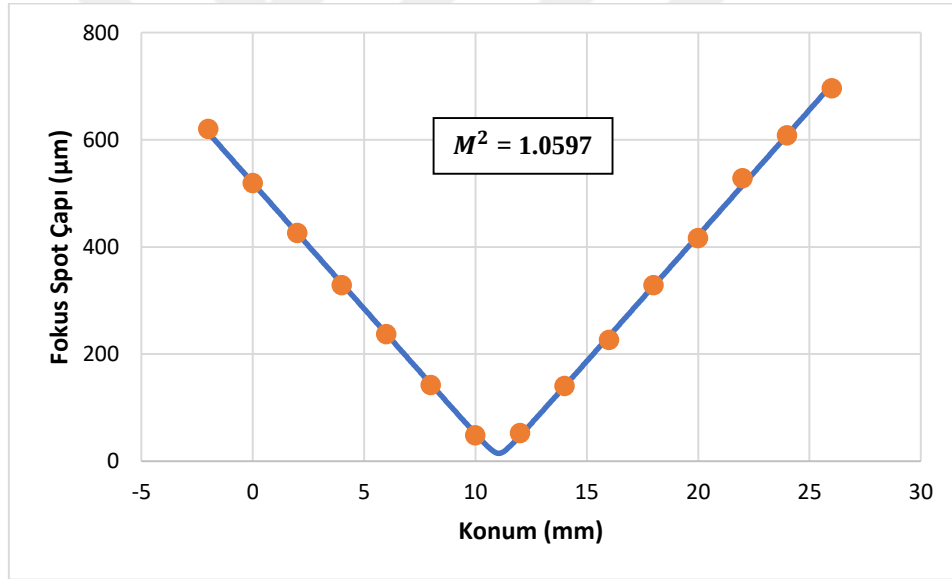
Şekil 28. %6 katkılı 3-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer çıkışının sıcaklığa bağlı değişim grafiği

5.1.2. %6 Katkılı 5-mm Tm:YAG Kristali

%6'lık 5-mm Tm:YAG kristali ile yaptığımız çalışmalarda 15 °C'de 110 mW çıkış gücü %48 verim ile gözlemlenmiştir (Şekil 29). Yapılan ışın karakteristiği ölçümlerinde ise M^2 sonuçları 2'den düşük çıkmıştır (Şekil 30).

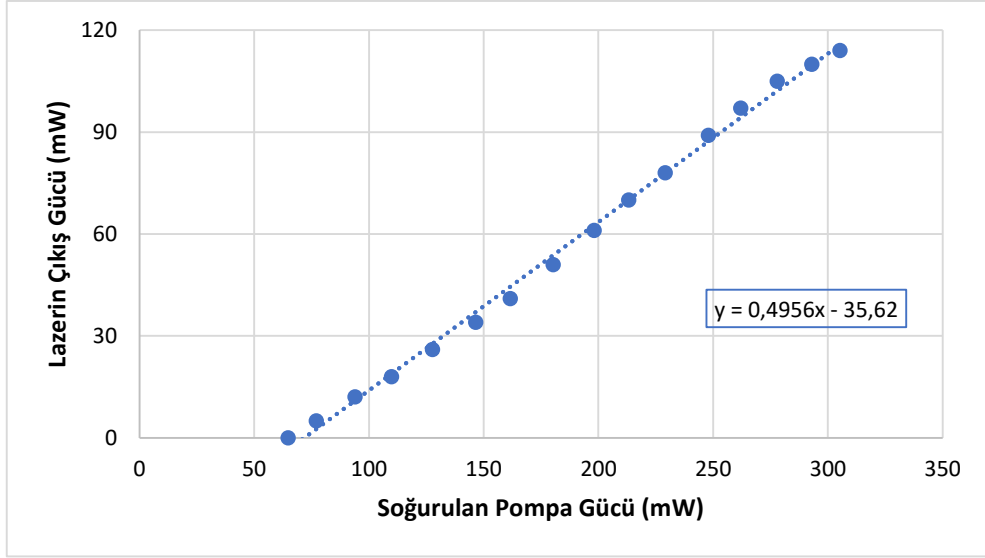


Şekil 29. %6 katkılı 5-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminin 15 °C'deki verim eğrisi

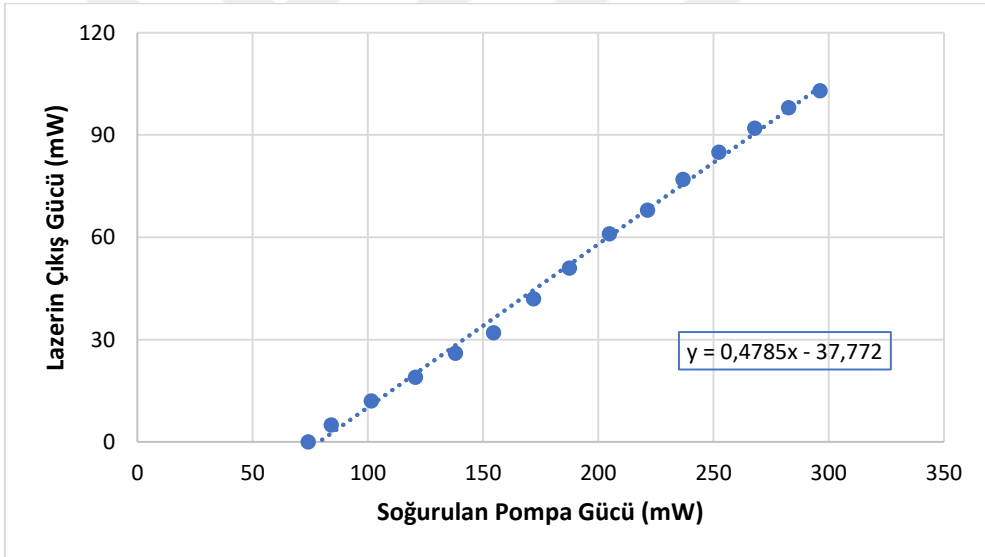


Şekil 30. %6 katkılı 5-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazerinin M^2 ölçüm sonucu

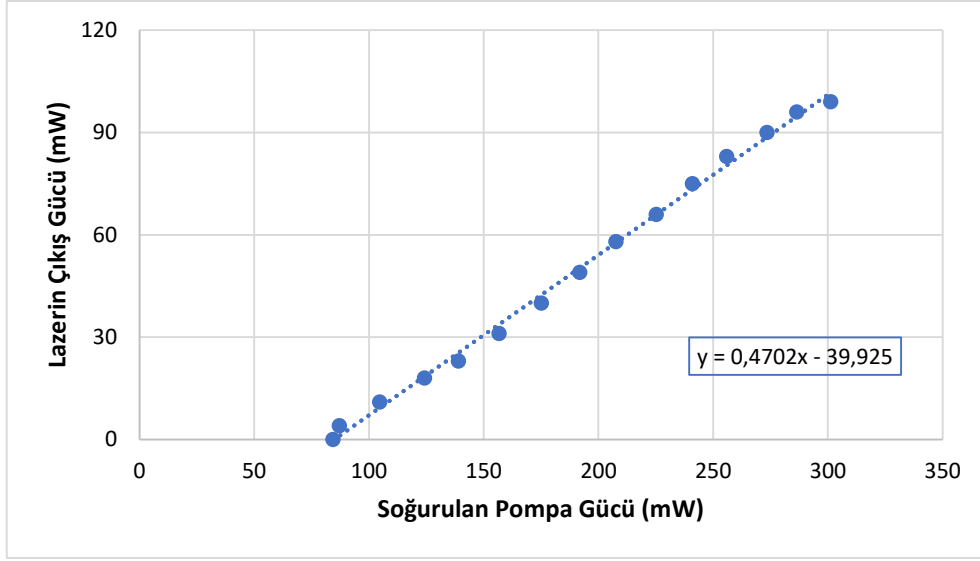
Daha sonra kristal sıcaklığı değiştirilerek 10, 20 ve 25 °C'lerde verim eğrisi ölçümleri de alınmış (Şekil 31, 32, 33) ve 15 °C ile 40 °C arasında en yüksek güç değerleri (Şekil 34) kaydedilmiştir.



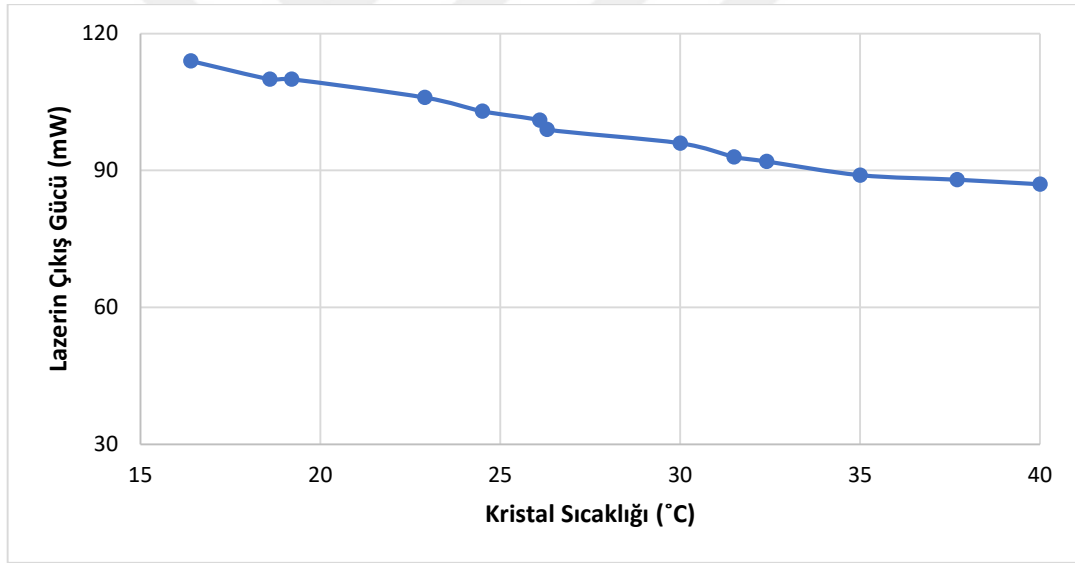
Şekil 31. %6 katkılı 5-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminin 10 °C’deki verim eğrisi



Şekil 32. %6 katkılı 5-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminin 20 °C’deki verim eğrisi



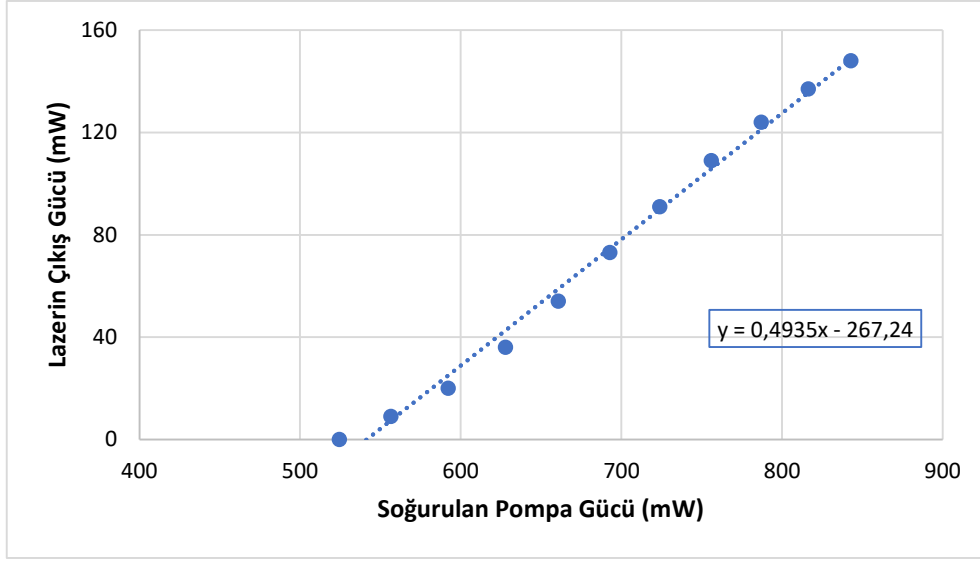
Şekil 33. %6 katkılı 5-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminin 25 °C'deki verim eğrisi



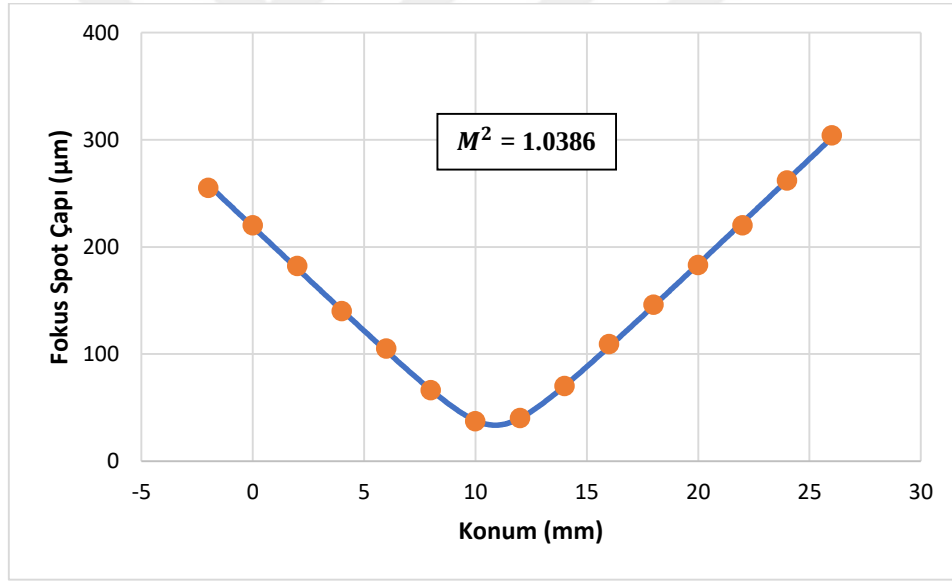
Şekil 34. %6 katkılı 5-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer çıkışının sıcaklığa bağlı değişim grafiği

5.1.3. %6 Katkılı 7-mm Tm:YAG Kristali

%6'lık 7-mm Tm:YAG kristali ile yaptığımız çalışmalarda 15 °C'de 148 mW çıkış gücü %49 verim ile gözlemlenmiştir (Şekil 35). Yapılan ışın karakteristiği ölçümlerinde ise M^2 sonuçları 2'den düşük çıkmıştır (Şekil 36).

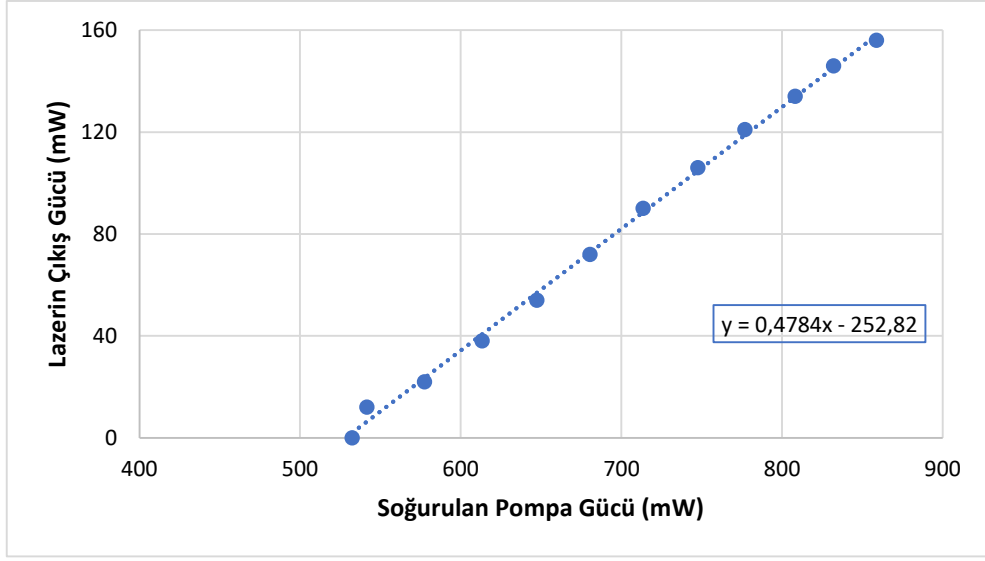


Şekil 35. %6 katkılı 7-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminin 15 °C'deki verim eğrisi

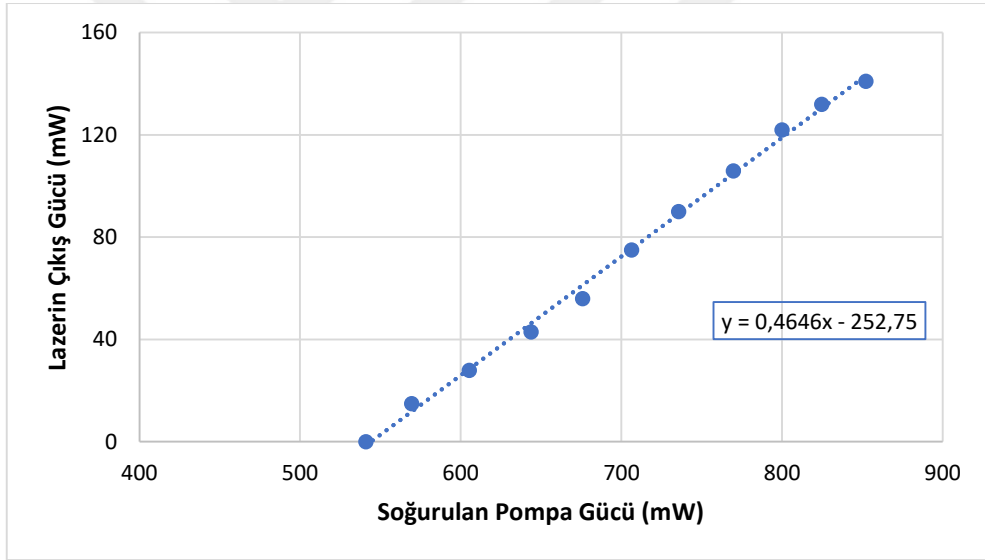


Şekil 36. %6 katkılı 7-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazerinin M^2 ölçüm sonucu

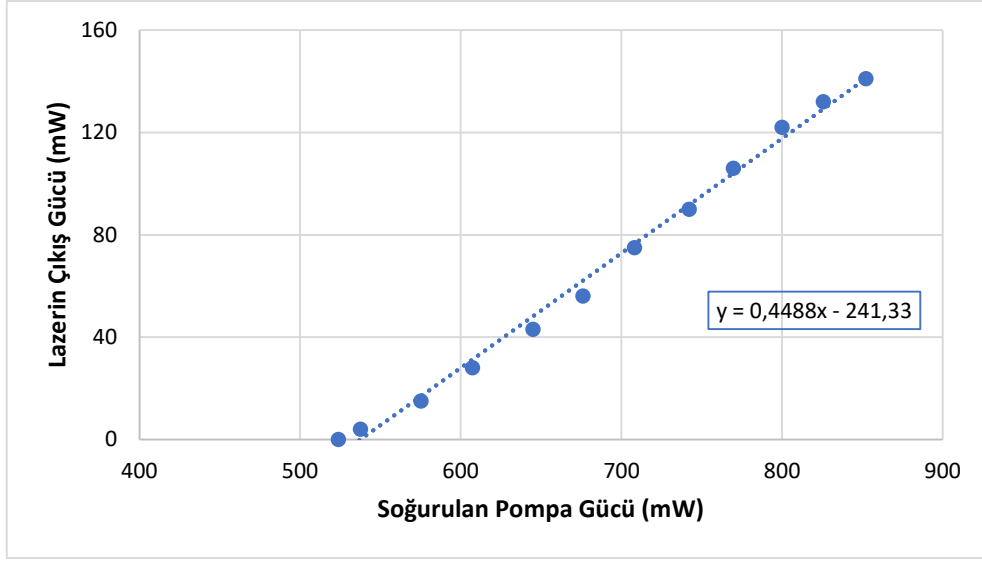
Daha sonra kristal sıcaklığı değiştirilerek 10 °C, 20 °C ve 25 °C'de verim eğrisi ölçümleri de alınmış (Şekil 37, 38, 39) ve 15 °C ile 40 °C arasında en yüksek güç değerleri (Şekil 40) kaydedilmiştir.



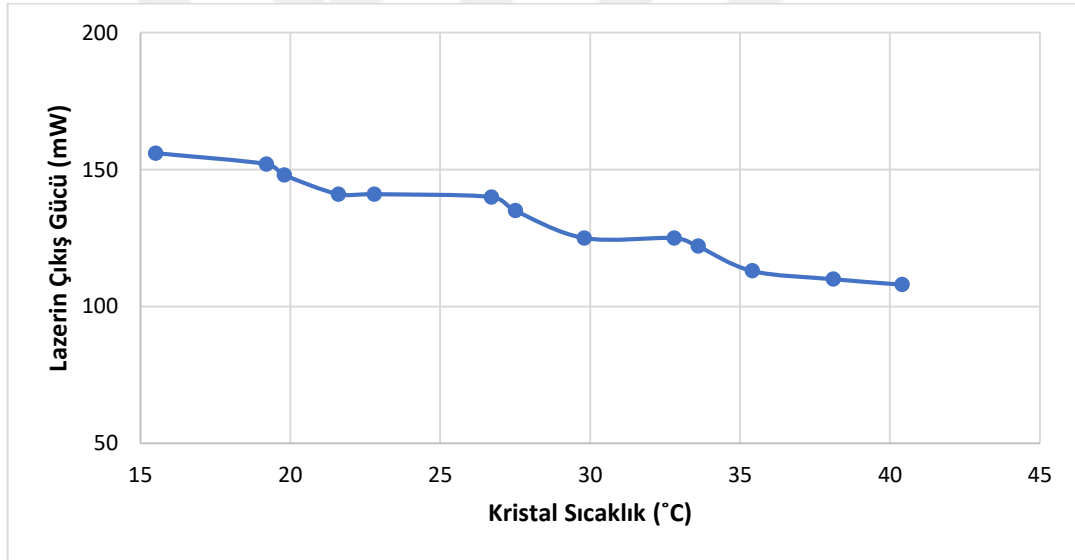
Şekil 37. %6 katkılı 7-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminin 10 °C’deki verim eğrisi



Şekil 38. %6 katkılı 7-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminin 20 °C’deki verim eğrisi



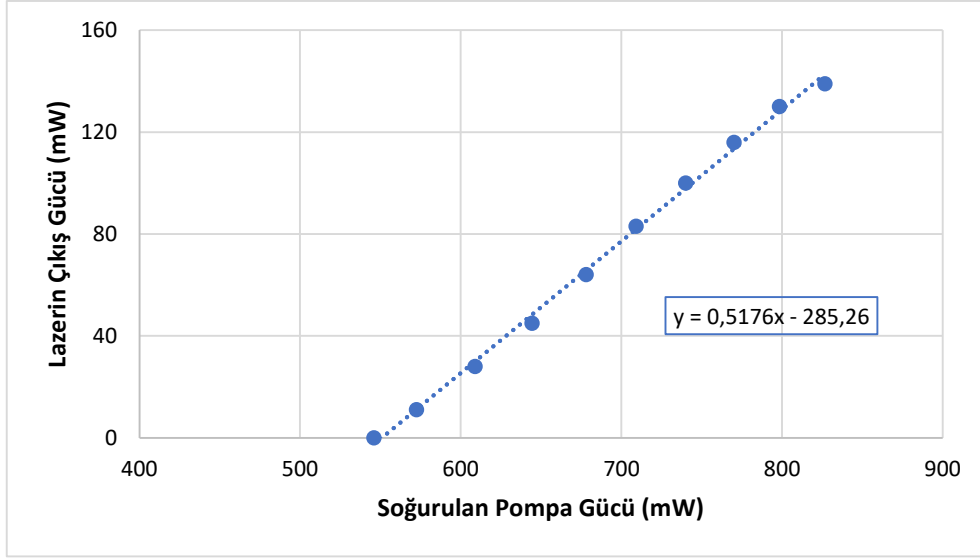
Şekil 39. %6 katkılı 7-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminin 25 °C'deki verim eğrisi



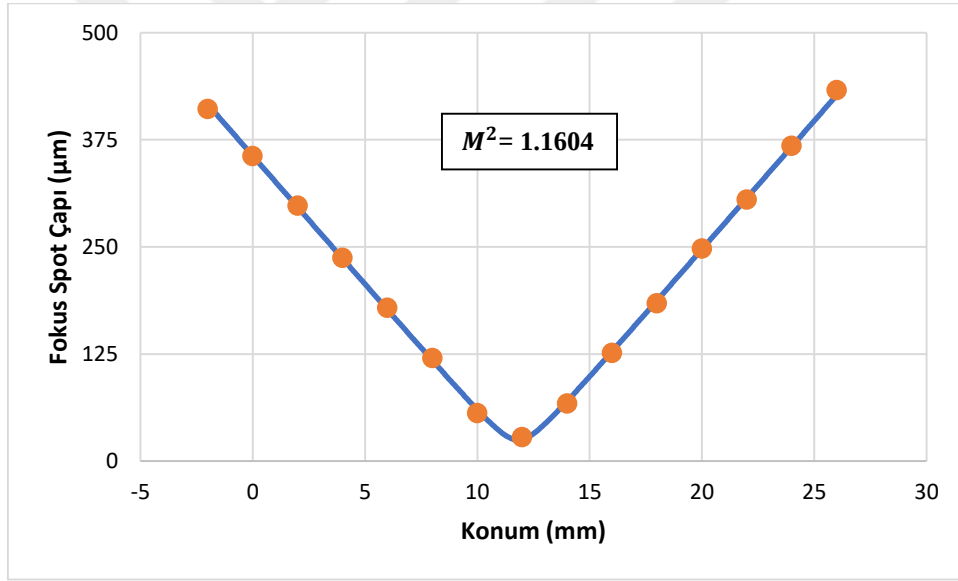
Şekil 40. %6 katkılı 7-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer çıkışının sıcaklığa bağlı değişim grafiği

5.1.4. %6 Katkılı 7-mm Tm:LuAG Kristali

%6'lık 7-mm Tm:LuAG kristali ile yaptığımız çalışmalarda 15 °C'de 139 mW çıkış gücü %51.76 verim ile gözlemlenmiştir (Şekil 41). Yapılan ışın karakteristiği ölçümlerinde ise M^2 sonuçları 2'den düşük çıkmıştır (Şekil 42).

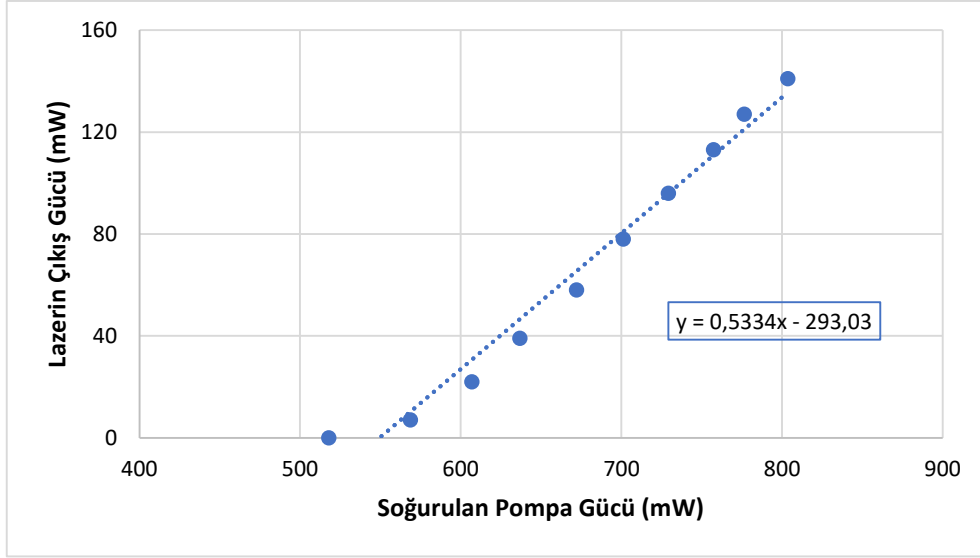


Şekil 41. %6 katkılı 7-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminin 15 °C'deki verim eğrisi

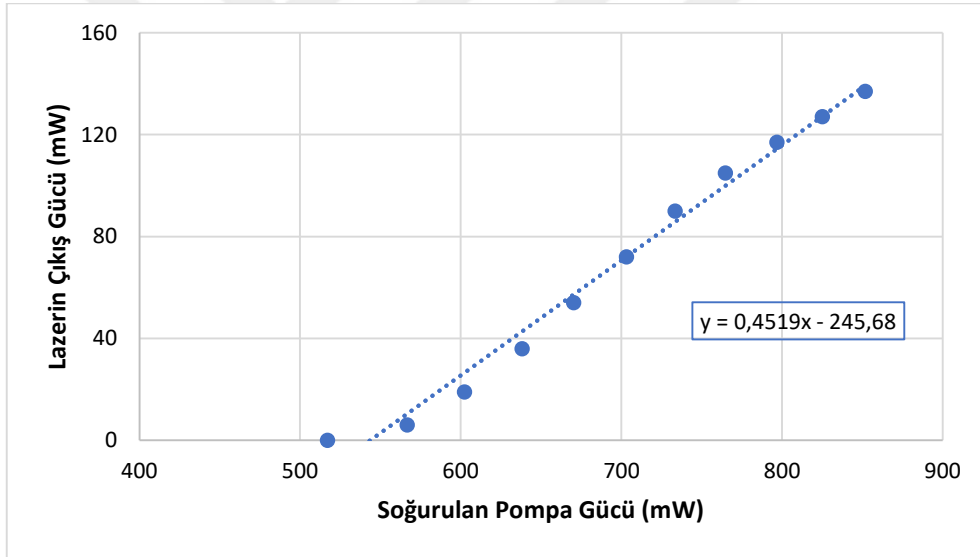


Şekil 42. %6 katkılı 7-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazerinin M^2 ölçüm sonucu

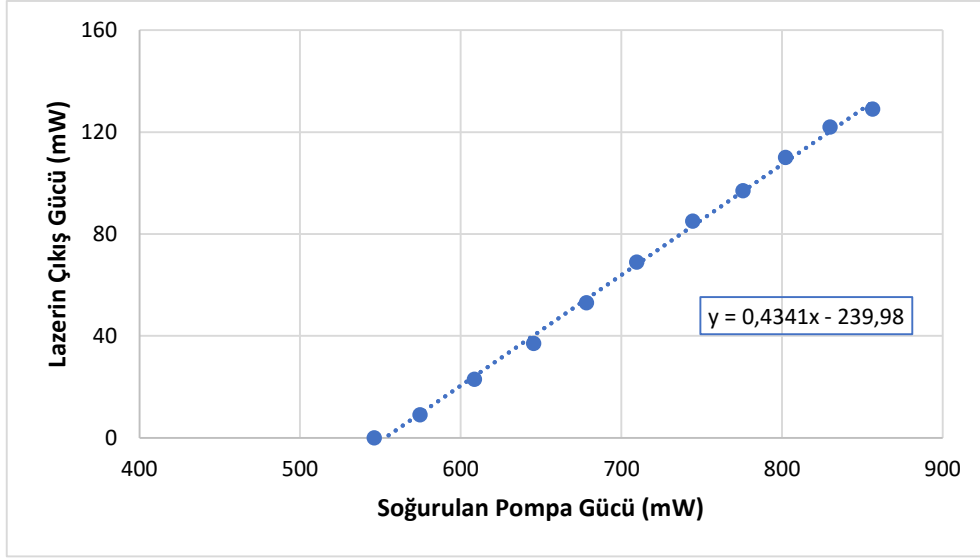
Daha sonra kristal sıcaklığı değiştirilerek 10, 20 ve 25 °C'lerde verim eğrisi ölçümleri de alınmış (Şekil 43, 44, 45) ve 15 °C ile 40 °C arasında en yüksek güç değerleri (Şekil 46) kaydedilmiştir.



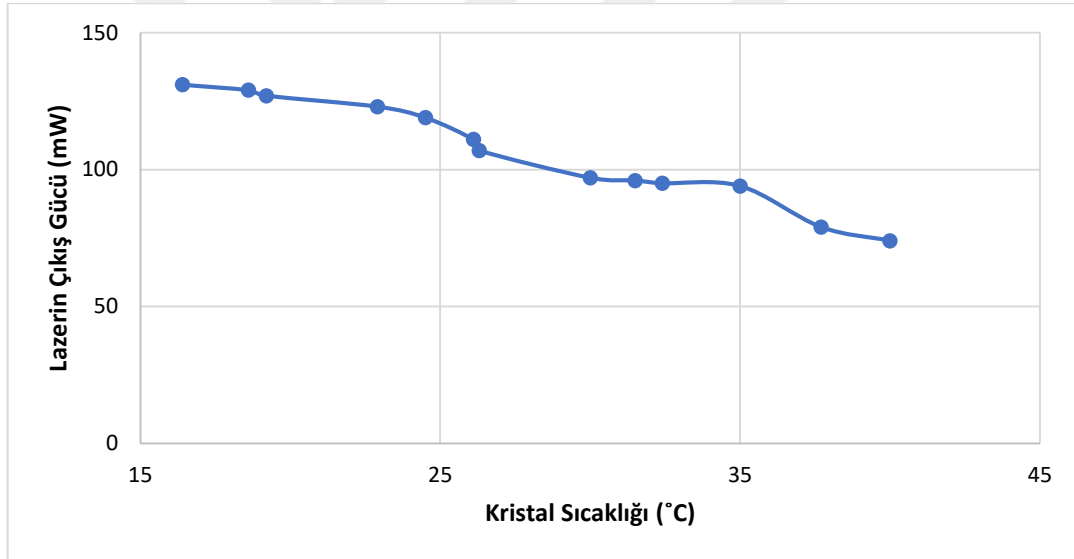
Şekil 43. %6 katkılı 7-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminin 10 °C'deki verim eğrisi



Şekil 44. %6 katkılı 7-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminin 20 °C'deki verim eğrisi



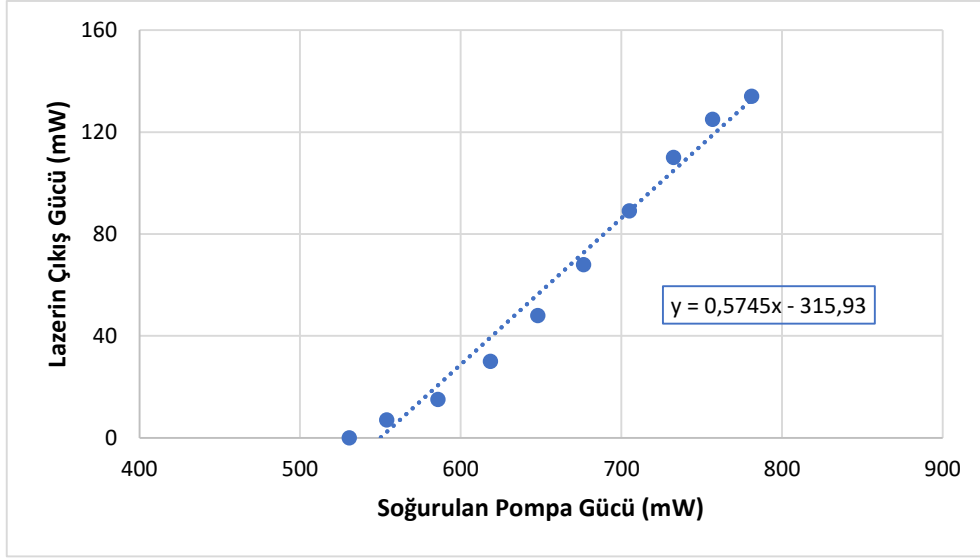
Şekil 45. %6 katkılı 7-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminin 25 °C'deki verim eğrisi



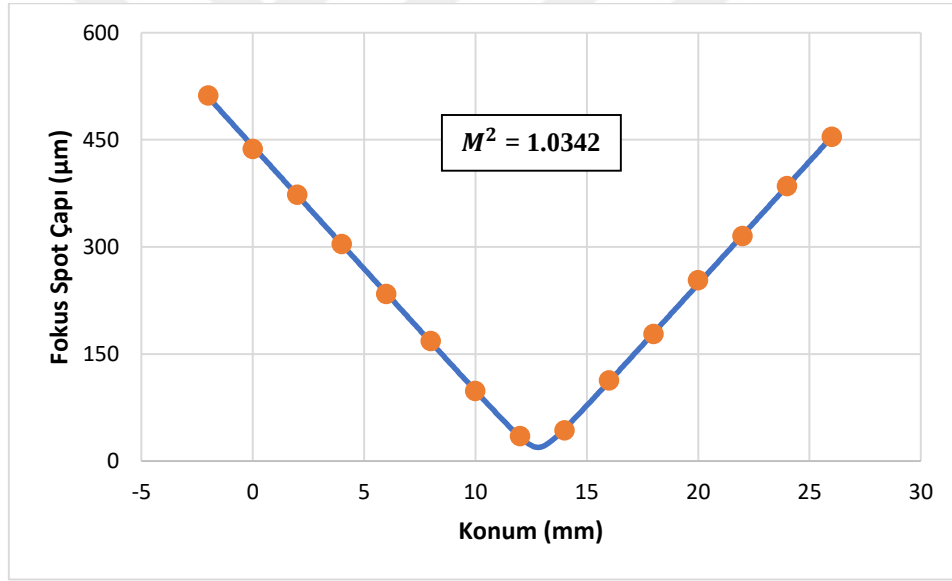
Şekil 46. %6 katkılı 7-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer çıkışının sıcaklığa bağlı değişim grafiği

5.1.5. %6 Katkılı 5-mm Tm:LuAG Kristali

%6'lık 5-mm Tm:LuAG kristali ile yaptığımız çalışmalarda 15 °C'de 134 mW çıkış gücü %59 verim ile gözlemlenmiştir (Şekil 47). Yapılan ısı karakteristiği ölçümlerinde ise M^2 sonuçları 2'den düşük çıkmıştır (Şekil 48).

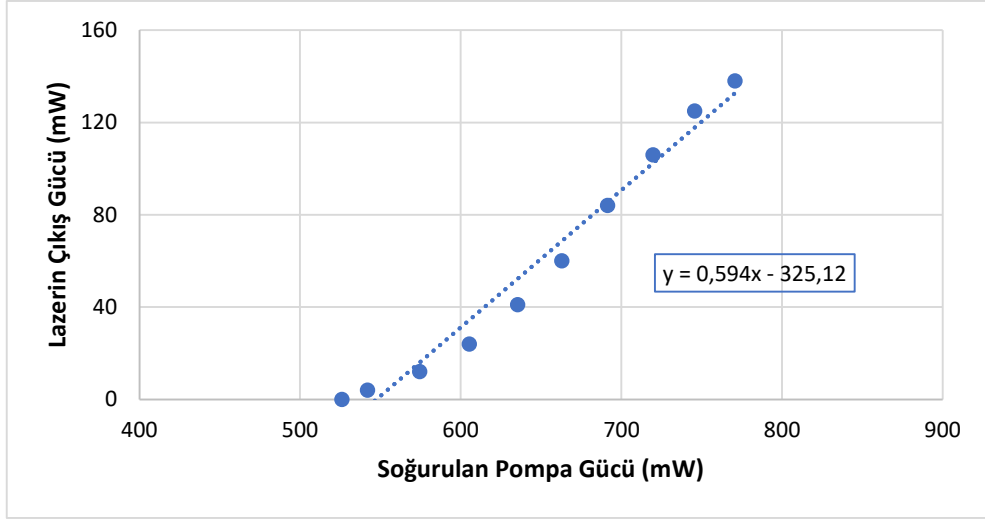


Şekil 47. %6 katkılı 5-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminin 15 °C'deki verim eğrisi

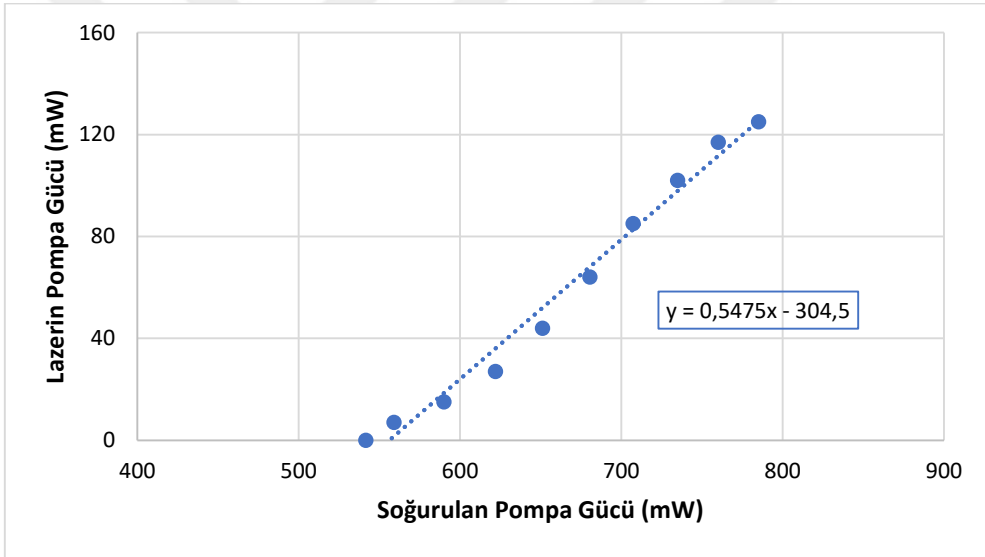


Şekil 48. %6 katkılı 5-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazerinin M^2 ölçüm sonucu

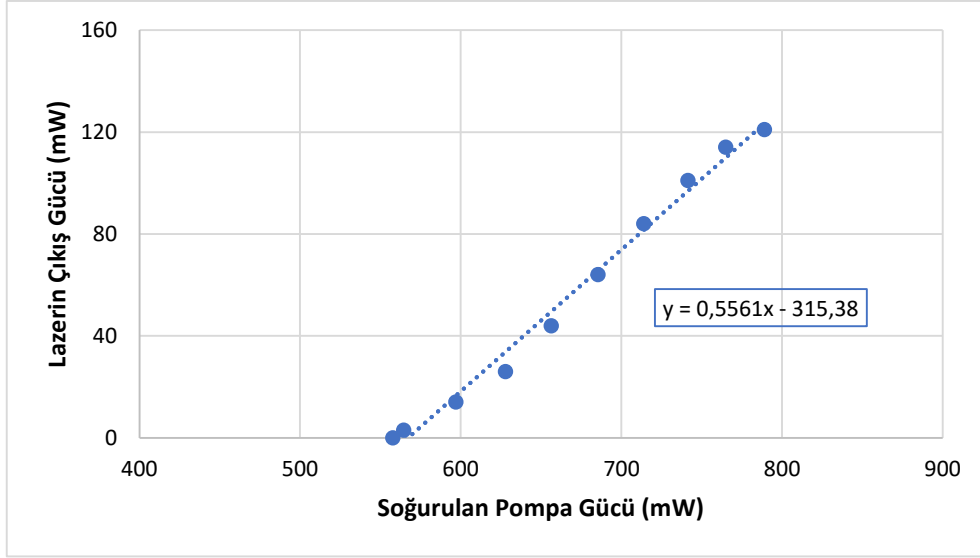
Daha sonra kristal sıcaklığı değiştirilerek 10, 20 ve 25 °C'lerde verim eğrisi ölçümleri de alınmış (Şekil 49, 50, 51) ve 15 °C ile 40 °C arasında en yüksek güç değerleri (Şekil 52) kaydedilmiştir.



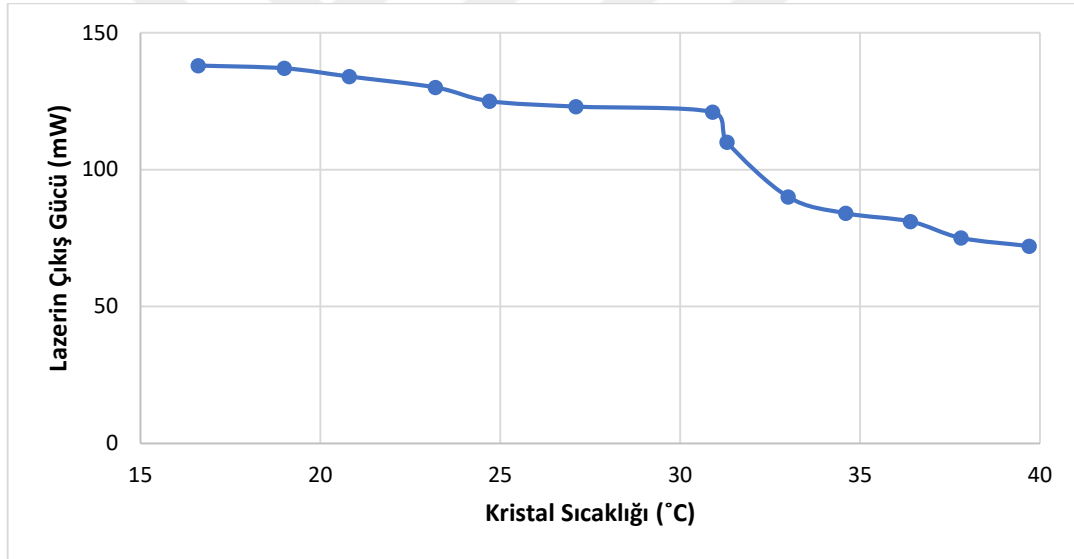
Şekil 49. %6 katkılı 5-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminin 10 °C'deki verim eğrisi



Şekil 50. %6 katkılı 5-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminin 20 °C'deki verim eğrisi



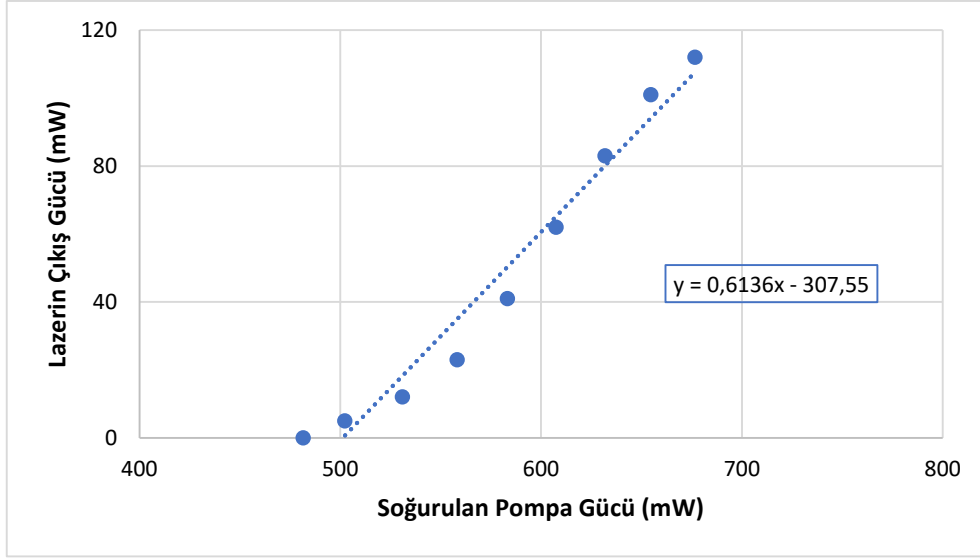
Şekil 51. %6 katkılı 5-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminin 25 °C'deki verim eğrisi



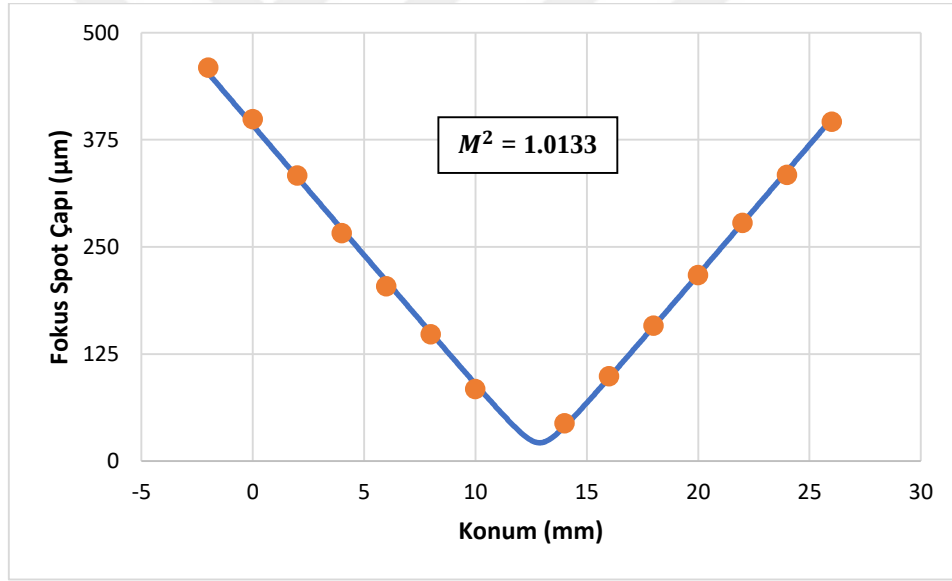
Şekil 52. %6 katkılı 5-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer çıkışının sıcaklığa bağlı değişim grafiği

5.1.6. %6 Katkılı 3-mm Tm:LuAG Kristali

%6'lık 3-mm Tm:LuAG kristali ile yaptığımız çalışmalarda 15 °C'de 112 mW çıkış gücü %61 verim ile gözlemlenmiştir (Şekil 53). Yapılan ışın karakteristiği ölçümlerinde ise M^2 sonuçları 2'den düşük çıkmıştır (Şekil 54).

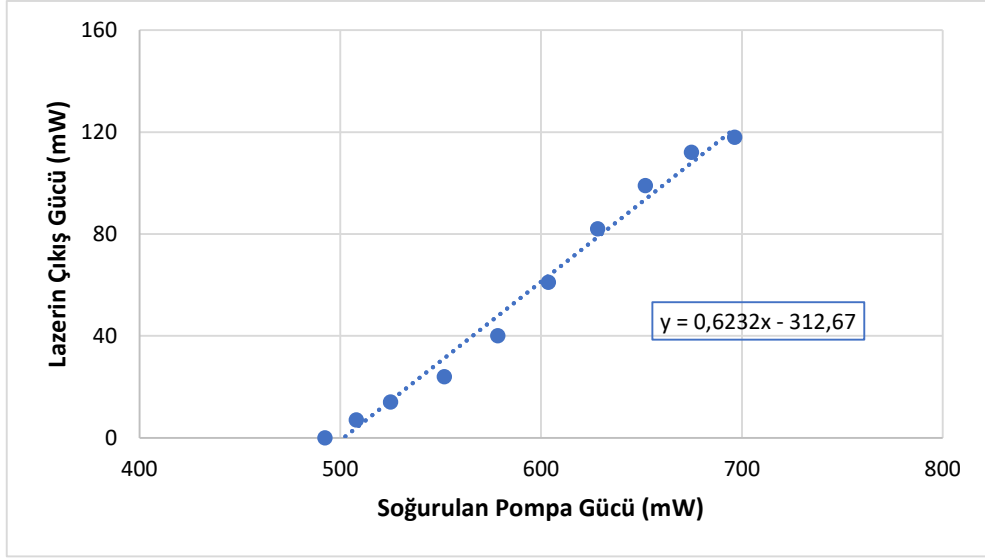


Şekil 53. %6 katkılı 3-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminin 15 °C'deki verim eğrisi

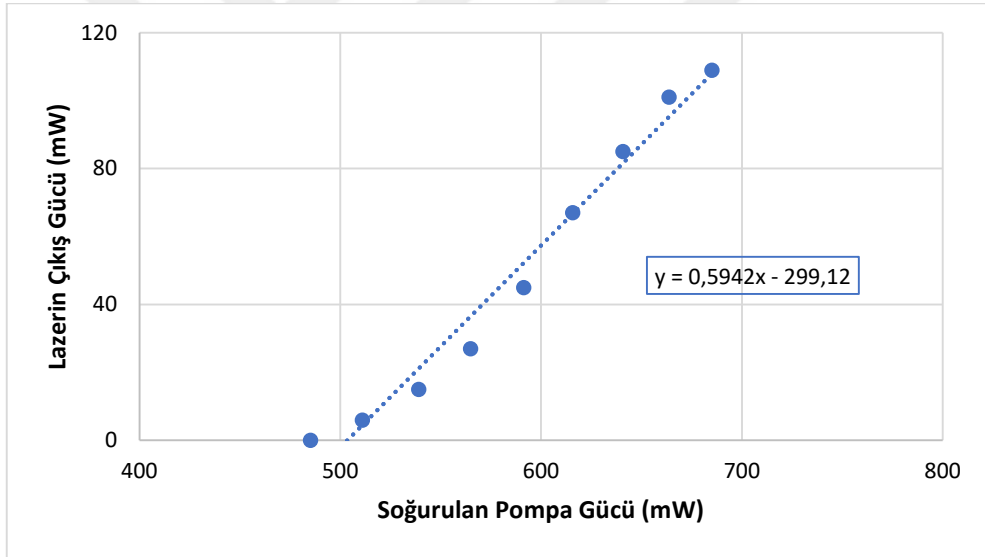


Şekil 54. %6 katkılı 3-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazerinin M^2 ölçüm sonucu

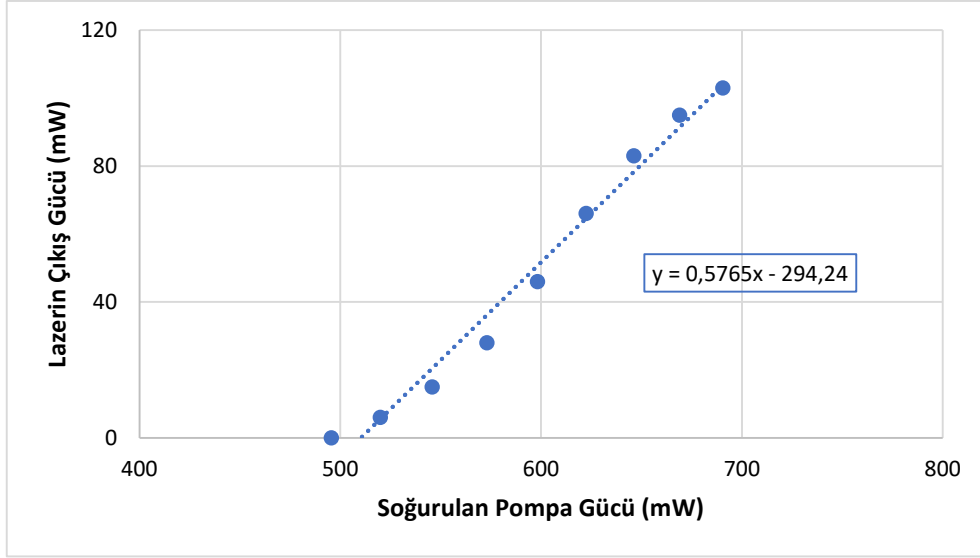
Daha sonra kristal sıcaklığı değiştirilerek 10, 20 ve 25 °C'lerde verim eğrisi ölçümleri de alınmış (Şekil 55, 56, 57) ve 15 °C ile 40 °C arasında en yüksek güç değerleri (Şekil 58) kaydedilmiştir.



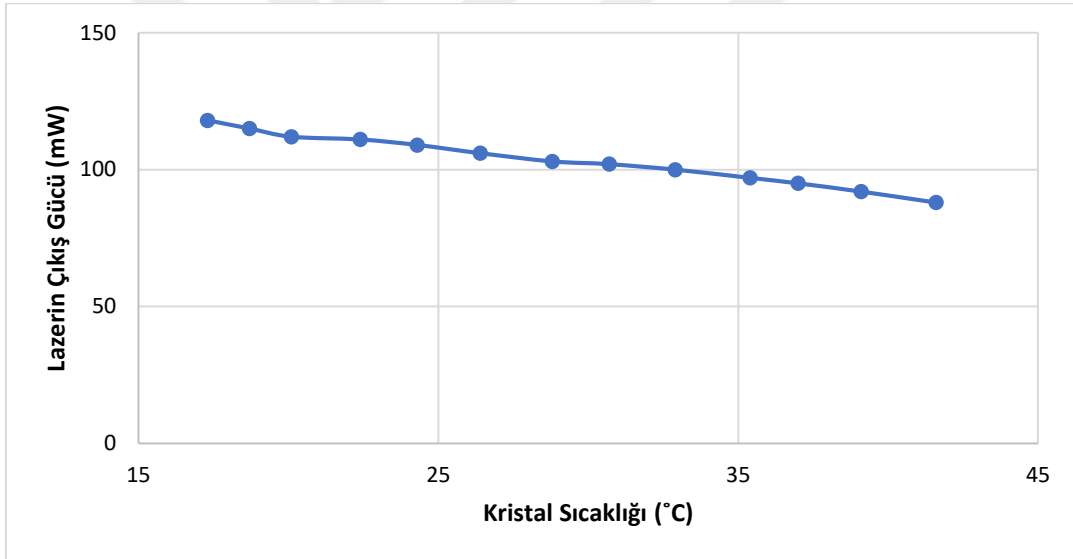
Şekil 55. %6 katkılı 3-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminin 10 °C'deki verim eğrisi



Şekil 56. %6 katkılı 3-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminin 20 °C'deki verim eğrisi



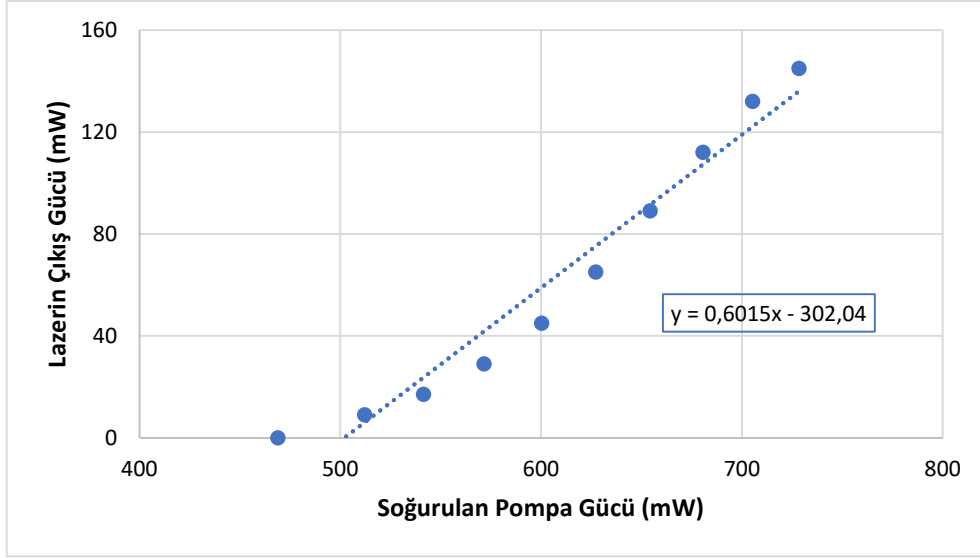
Şekil 57. %6 katkılı 3-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminin 25 °C'deki verim eğrisi



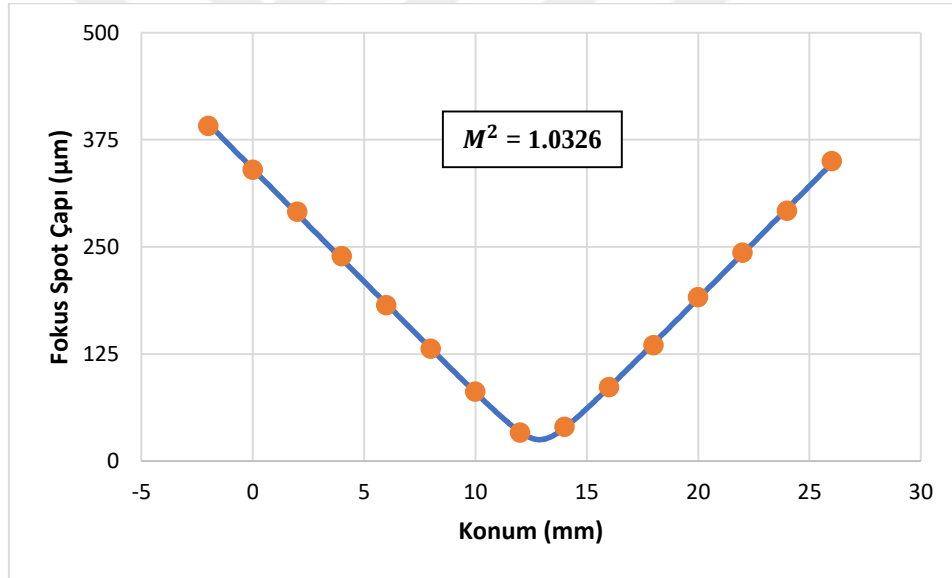
Şekil 58. %6 katkılı 3-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer çıkışının sıcaklığa bağlı değişim grafiği

5.1.7. %4 Katkılı 7-mm Tm:LuAG Kristali

%4'lük 7-mm Tm:LuAG kristali ile yaptığımız çalışmalarda 15 °C'de 145 mW çıkış gücü %60 verim ile gözlemlenmiştir (Şekil 59). Yapılan ışın karakteristiği ölçümlerinde ise M^2 sonuçları 2'den düşük çıkmıştır (Şekil 60).

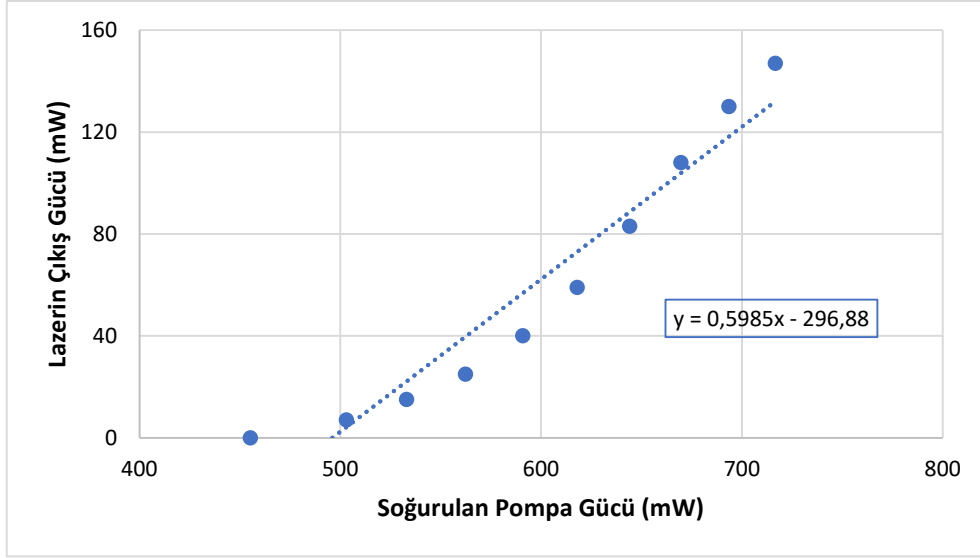


Şekil 59. %4 katkılı 7-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminin 15 °C'deki verim eğrisi

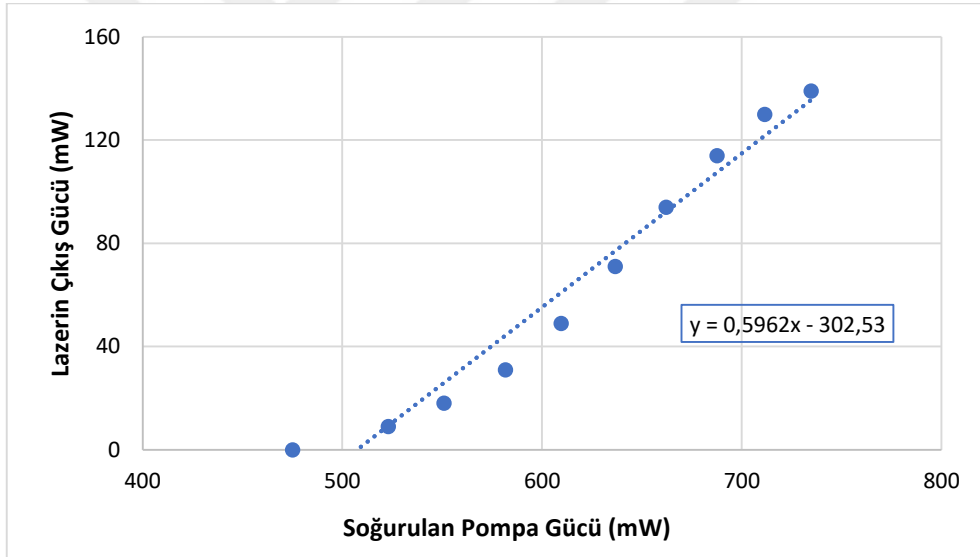


Şekil 60. %4 katkılı 7-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazerinin M^2 ölçüm sonucu

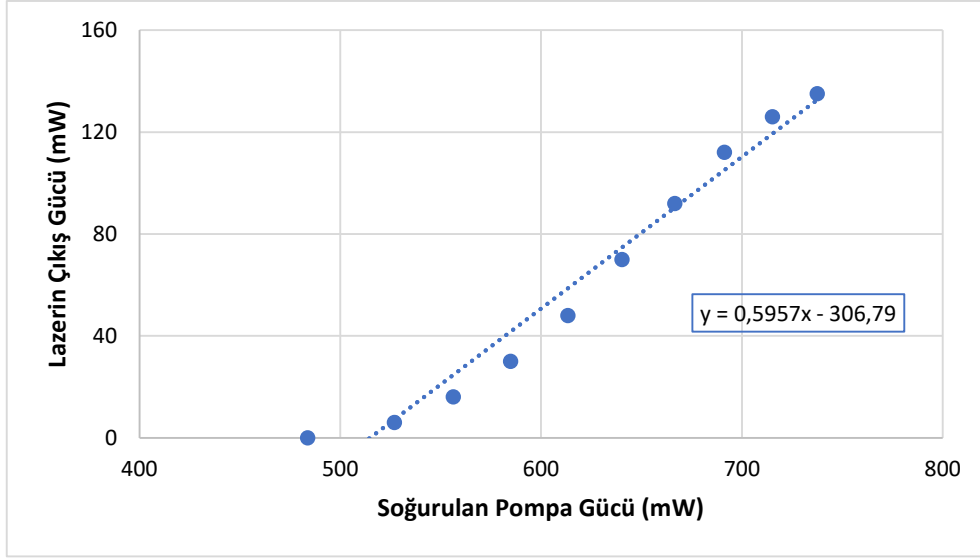
Daha sonra kristal sıcaklığı değiştirilerek 10, 20 ve 25 °C'lerde verim eğrisi ölçümleri de alınmış (Şekil 61, 62, 63) ve 15 °C ile 40 °C arasında en yüksek güç değerleri (Şekil 64) kaydedilmiştir.



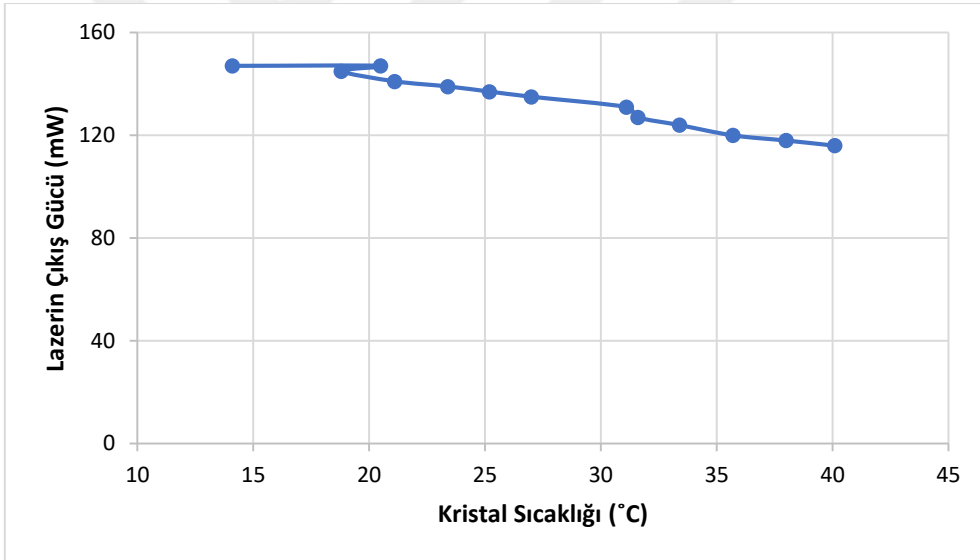
Şekil 61. %4 katkılı 7-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminin 10 °C'deki verim eğrisi



Şekil 62. %4 katkılı 7-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminin 20 °C'deki verim eğrisi



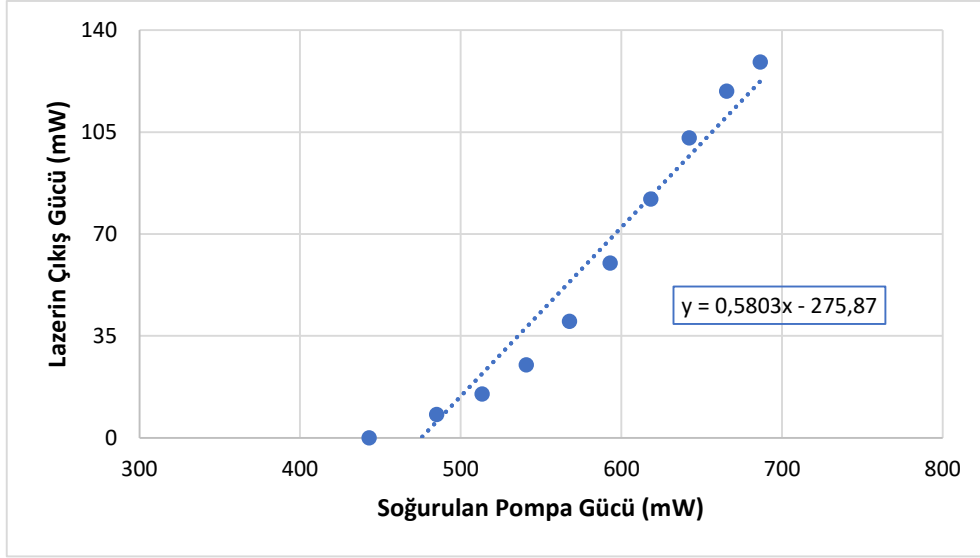
Şekil 63. %4 katkılı 7-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminin 25 °C'deki verim eğrisi



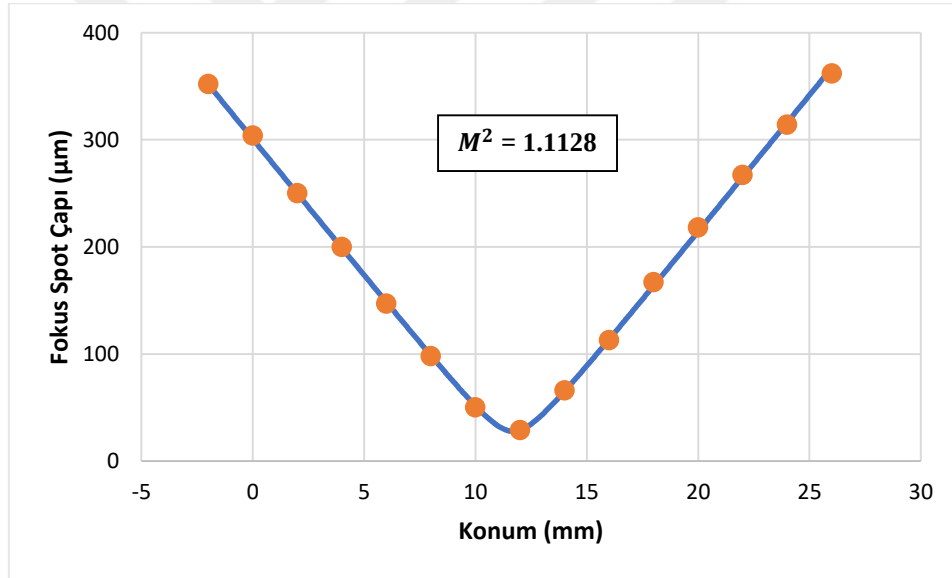
Şekil 64. %4 katkılı 7-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer çıkışının sıcaklığa bağlı değişim grafiği

5.1.8. %4 Katkılı 5-mm Tm:LuAG Kristali

%4'lük 5-mm Tm:LuAG kristali ile yaptığımız çalışmalarda 15 °C'de 129 mW çıkış gücü %58 verim ile gözlemlenmiştir (Şekil 65). Yapılan ışın karakteristiği ölçümlerinde ise M^2 sonuçları 2'den düşük çıkmıştır (Şekil 66).

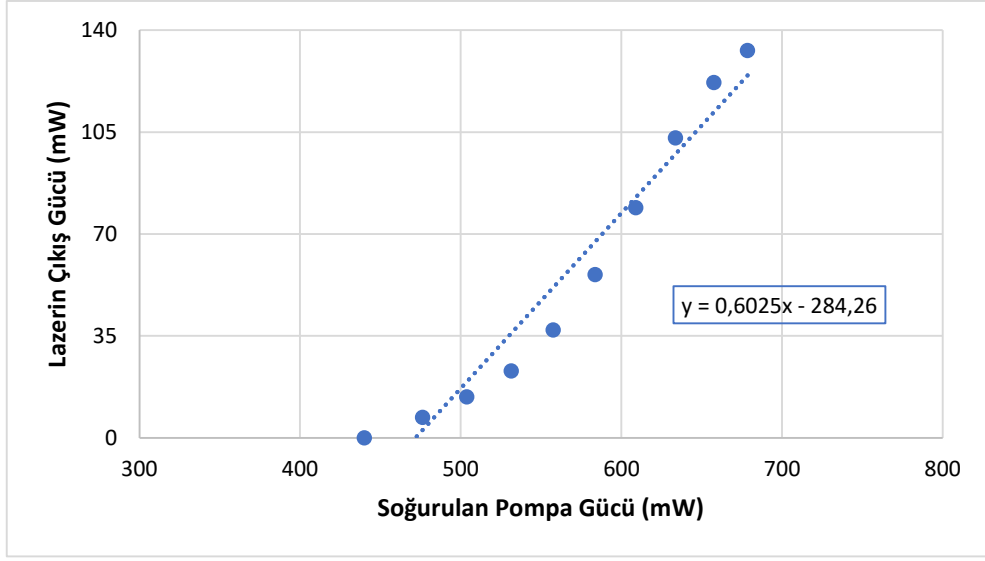


Şekil 65. %4 katkılı 5-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminin 15 °C'deki verim eğrisi

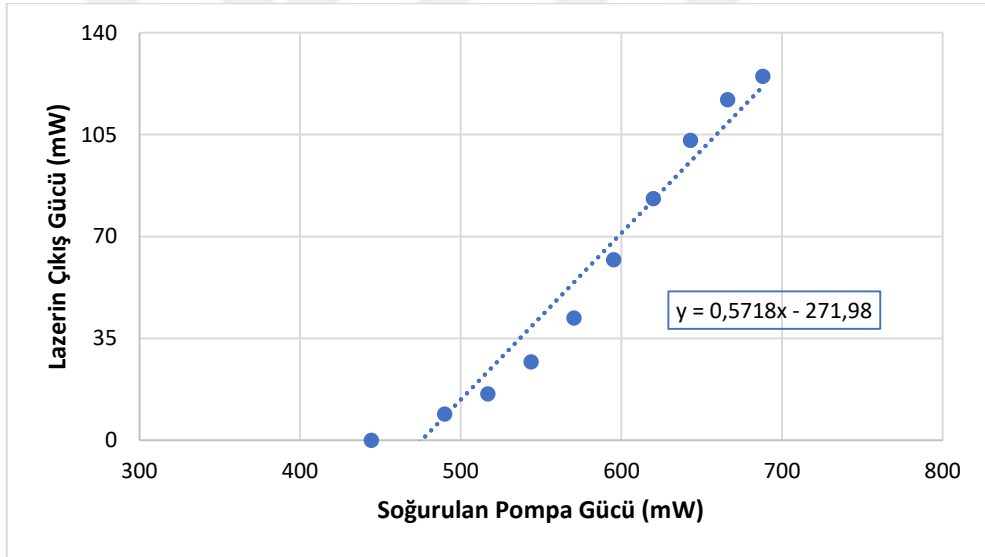


Şekil 66. %4 katkılı 5-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazerinin M^2 ölçüm sonucu

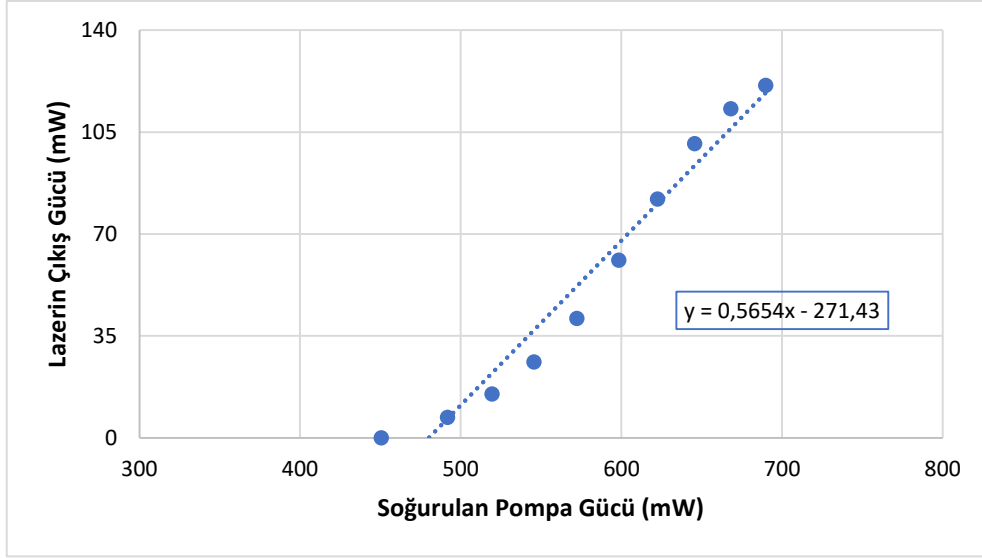
Daha sonra kristal sıcaklığı değiştirilerek 10 °C, 20 °C ve 25 °C'lerde verim eğrisi ölçümleri de alınmış (Şekil 67, 68, 69) ve 15 °C ile 40°C arasında en yüksek güç değerleri (Şekil 70) kaydedilmiştir.



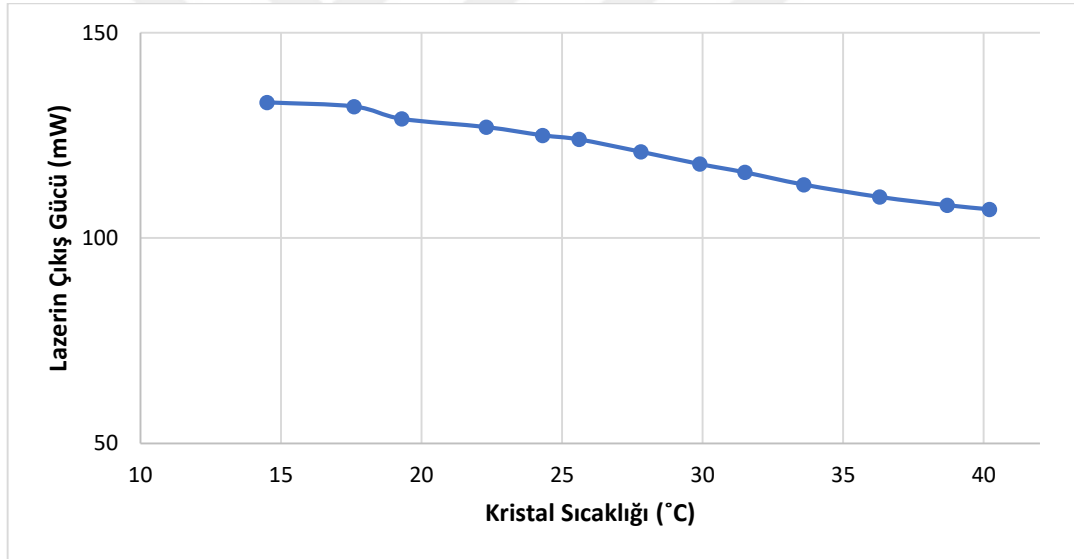
Şekil 67. %4 katkılı 5-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminin 10 °C'deki verim eğrisi



Şekil 68. %4 katkılı 5-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminin 20 °C'deki verim eğrisi



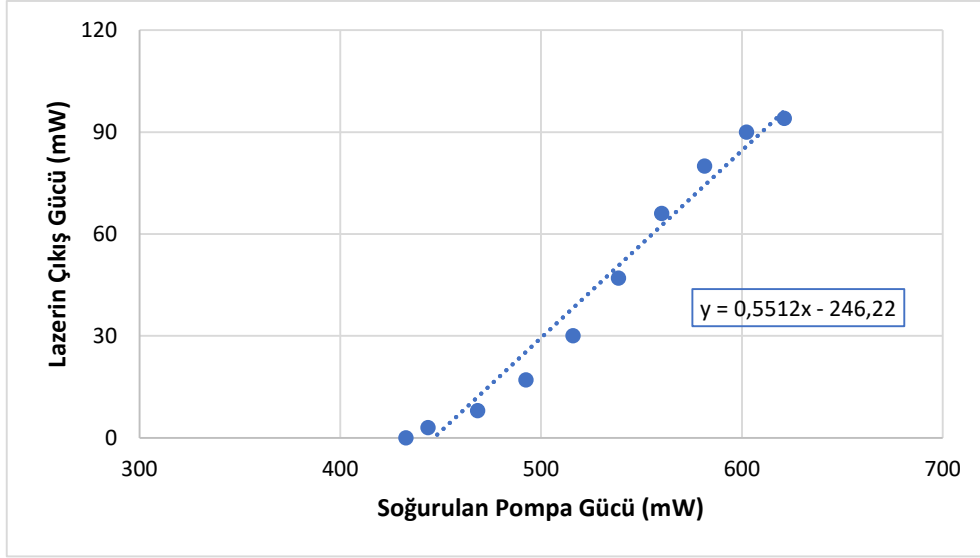
Şekil 69. %4 katkılı 5-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminin 25 °C'deki verim eğrisi



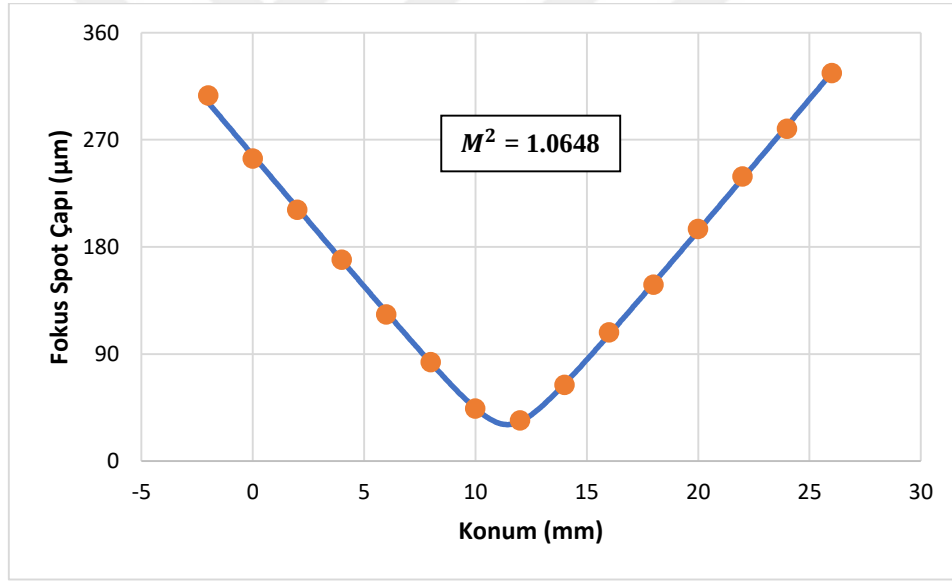
Şekil 70. %4 katkılı 5-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer çıkışının sıcaklığa bağlı değişim grafiği

5.1.9. %4 Katkılı 3-mm Tm:LuAG Kristali

%4'lük 3-mm Tm:LuAG kristali ile yaptığımız çalışmalarda 15 °C'de 94 mW çıkış gücü %55 verim ile gözlemlenmiştir (Şekil 71). Yapılan ışın karakteristiği ölçümlerinde ise M^2 sonuçları 2'den düşük çıkmıştır (Şekil 72).

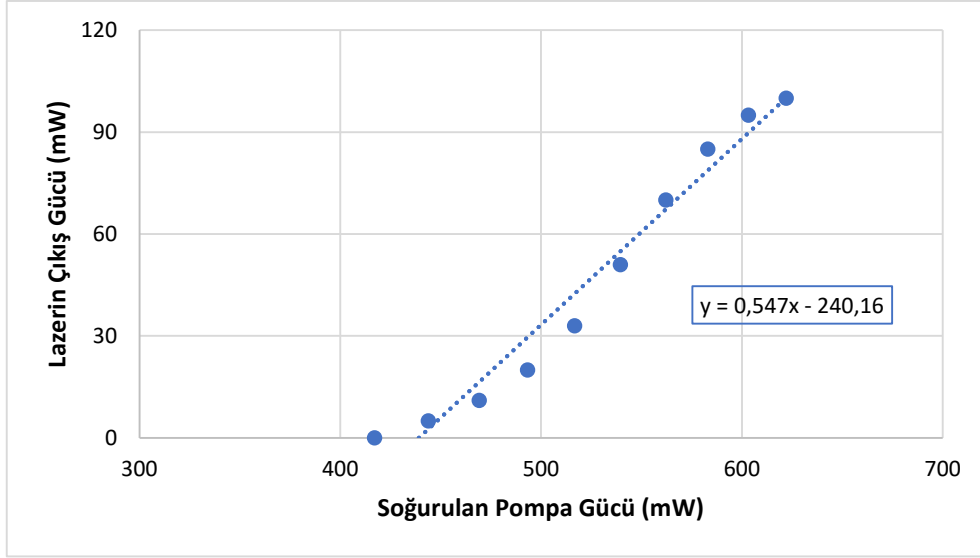


Şekil 71. %4 katkılı 3-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminin 15 °C'deki verim eğrisi

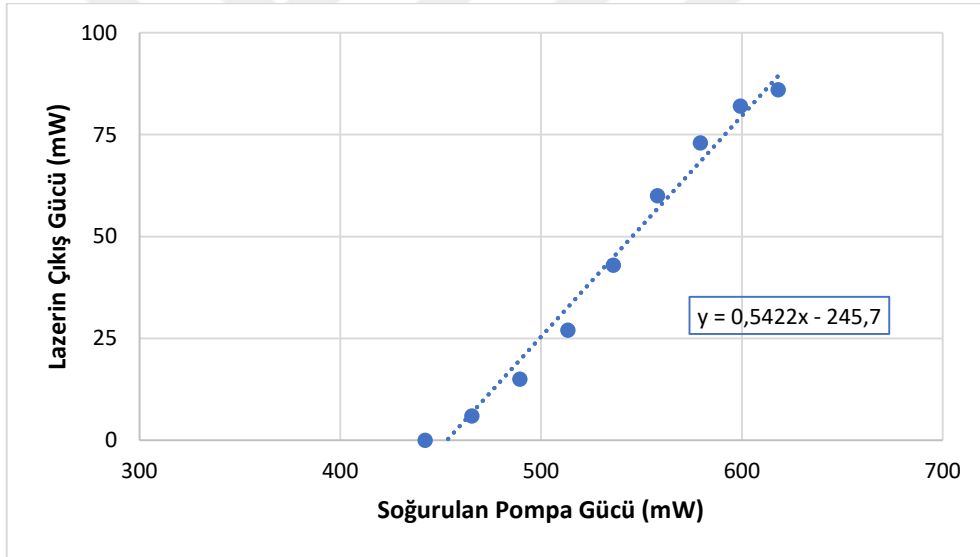


Şekil 72. %4 katkılı 3-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazerinin M^2 ölçüm sonucu

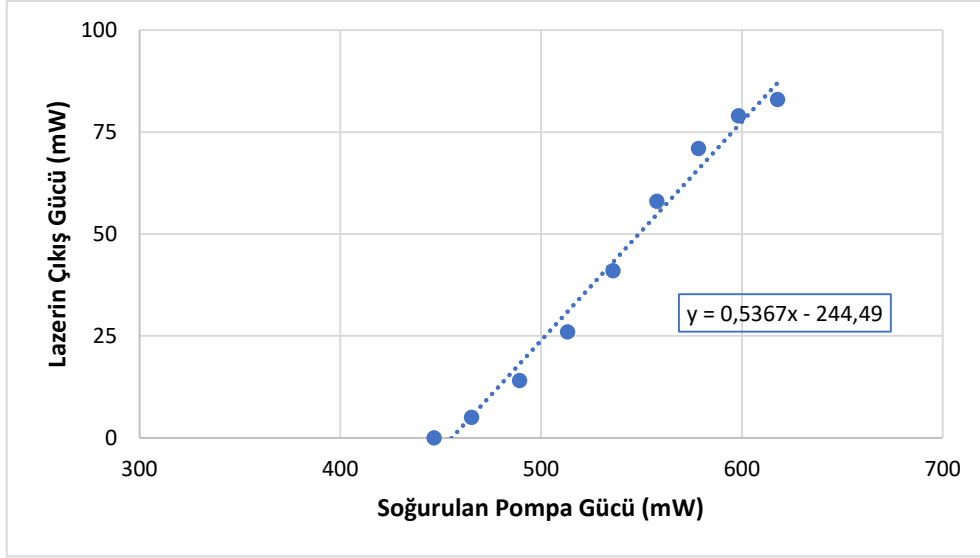
Daha sonra kristal sıcaklığı değiştirilerek 10 °C, 20 °C ve 25 °C'lerde verim eğrisi ölçümleri de alınmış (Şekil 73, 74, 75) ve 15 °C ile 40°C arasında en yüksek güç değerleri (Şekil 76) kaydedilmiştir.



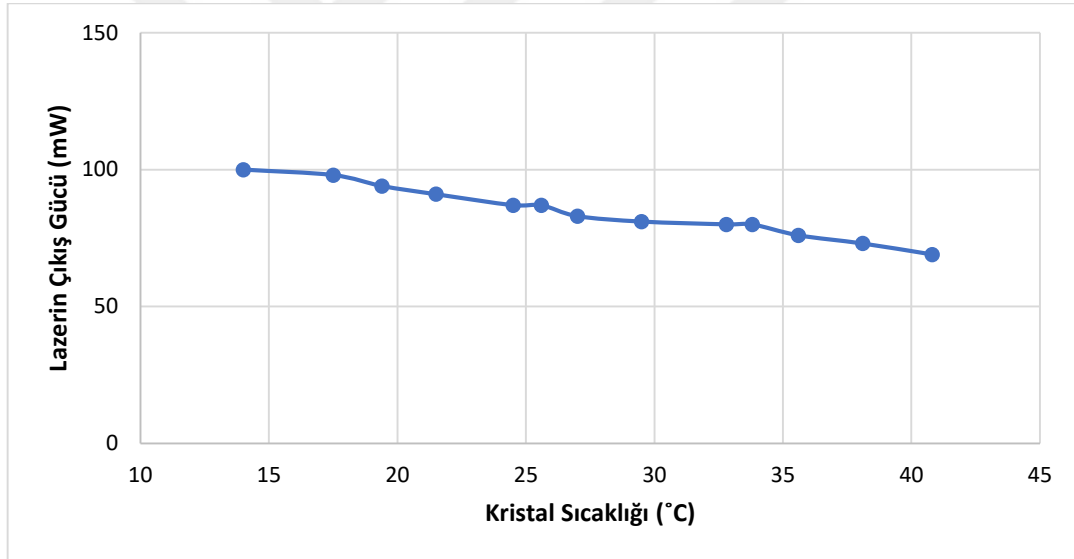
Şekil 73. %4 katkılı 3-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminin 10 °C'deki verim eğrisi



Şekil 74. %4 katkılı 3-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminin 20 °C'deki verim eğrisi



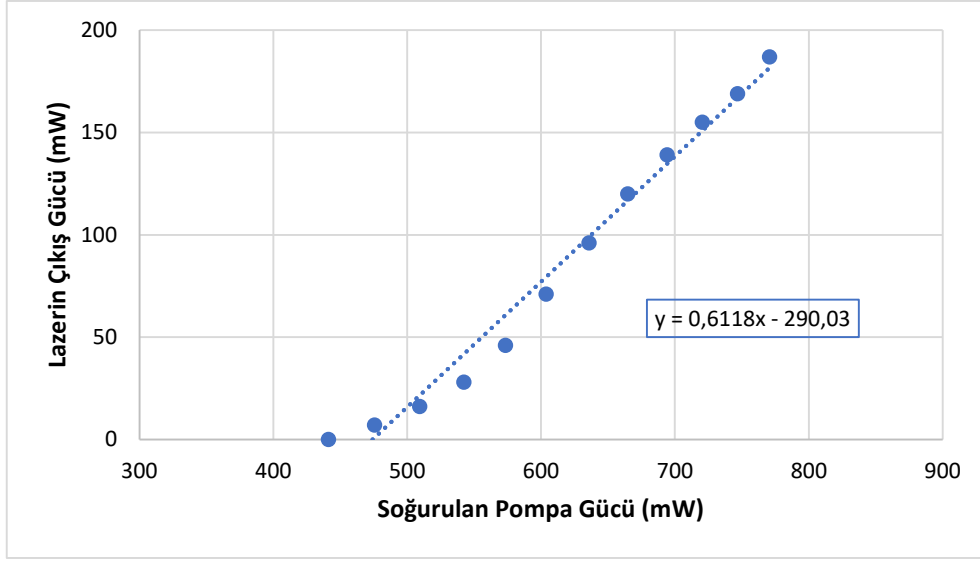
Şekil 75. %4 katkılı 3-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminin 25 °C'deki verim eğrisi



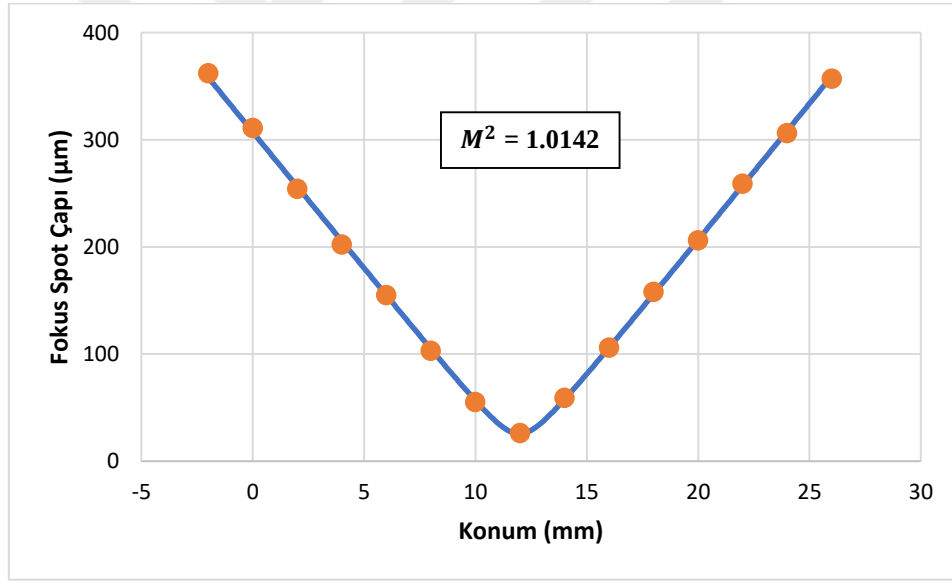
Şekil 76. %4 katkılı 3-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer çıkışının sıcaklığa bağlı değişim grafiği

5.1.10. %3 Katkılı 7-mm Tm:YAG Kristali

%3'lük 7-mm Tm:YAG kristali ile yaptığımız çalışmalarda 15 °C'de 187 mW çıkış gücü %61 verim ile gözlemlenmiştir (Şekil 77). Yapılan ışın karakteristiği ölçümlerinde ise M^2 sonuçları 2'den düşük çıkmıştır (Şekil 78).

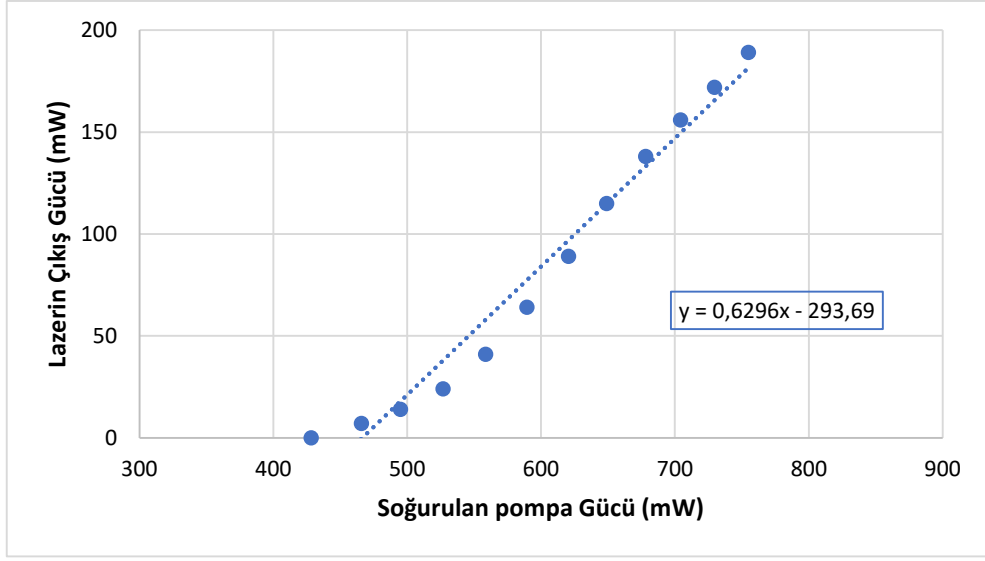


Şekil 77. %3 katkılı 7-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminin 15 °C’deki verim eğrisi

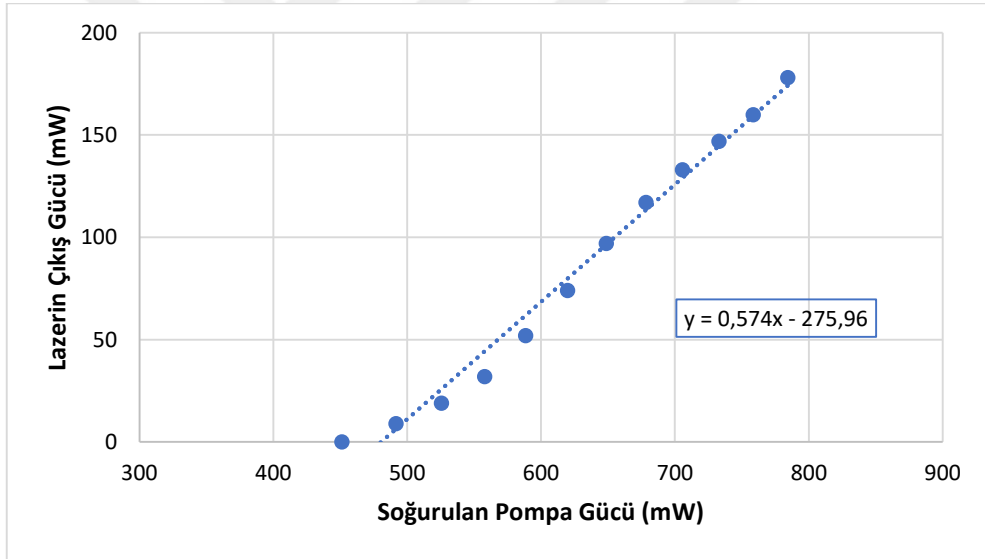


Şekil 78. %3 katkılı 7-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazerinin M^2 ölçüm sonucu

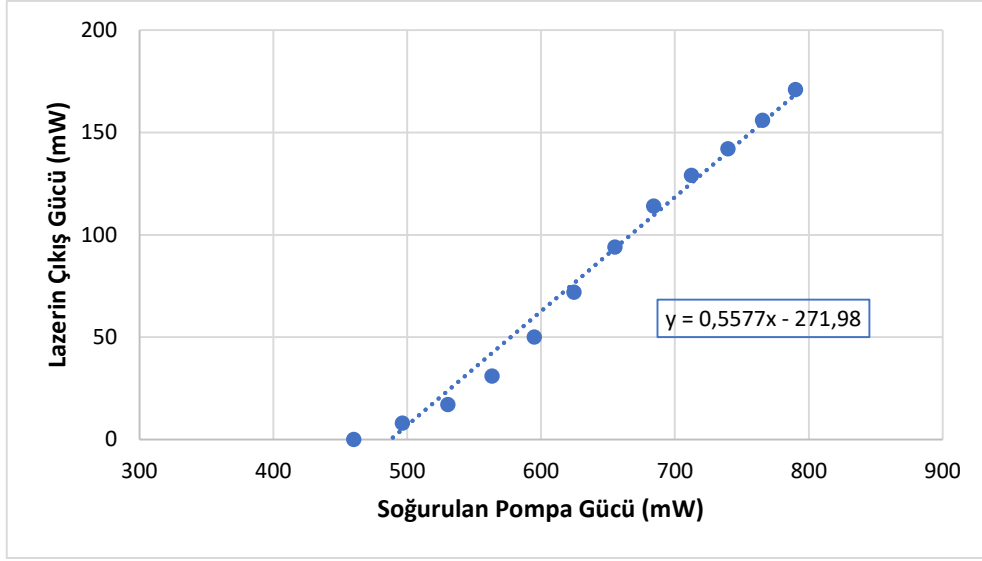
Daha sonra kristal sıcaklığı değiştirilerek 10 °C, 20 °C ve 25 °C’lerde verim eğrisi ölçümleri de alınmış (Şekil 79, 80, 81) ve 15 °C ile 40°C arasında en yüksek güç değerleri (Şekil 82) kaydedilmiştir.



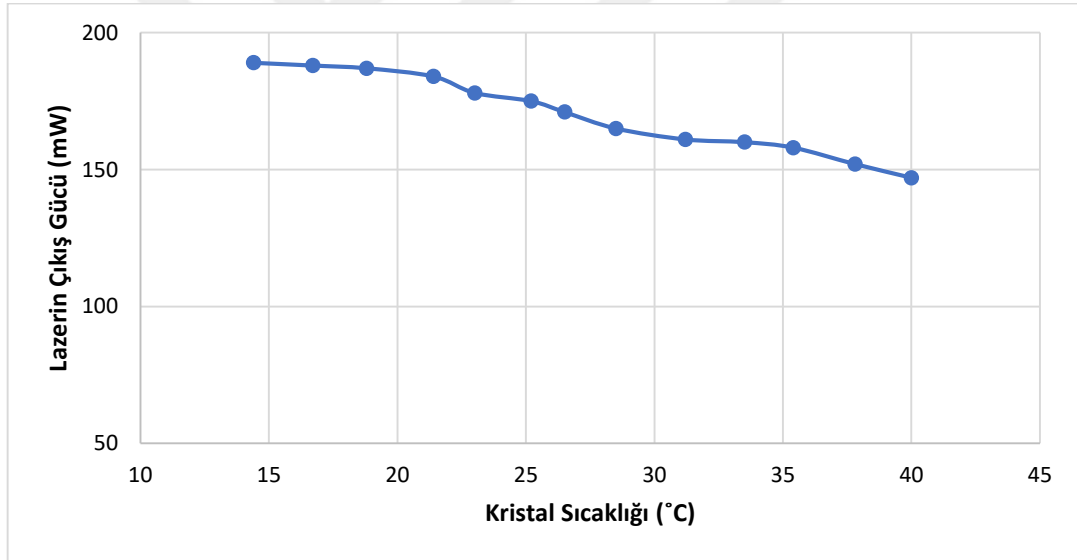
Şekil 79. %3 katkılı 7-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminin 10 °C’deki verim eğrisi



Şekil 80. %3 katkılı 7-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminin 20 °C’deki verim eğrisi



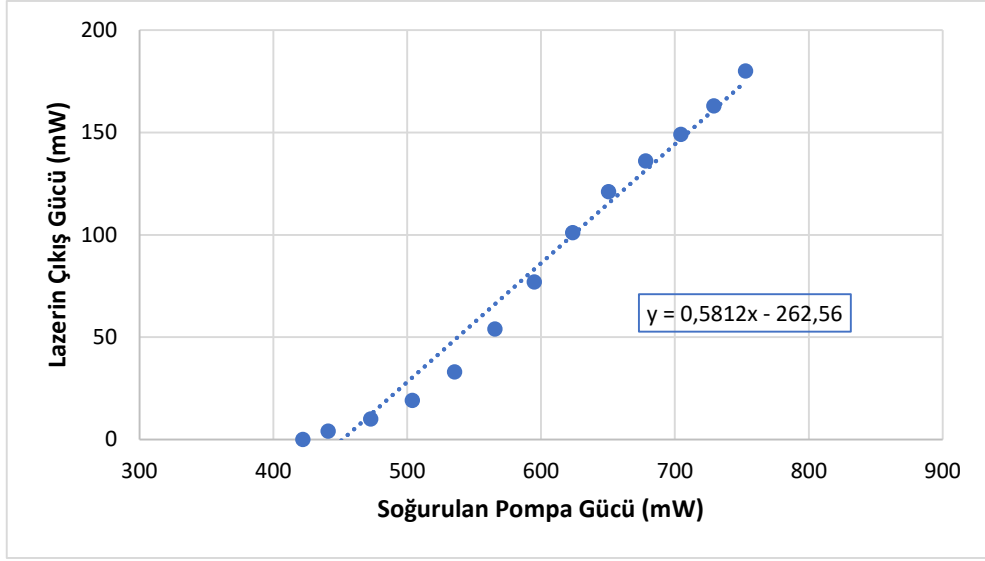
Şekil 81. %3 katkılı 7-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminin 25 °C’deki verim eğrisi



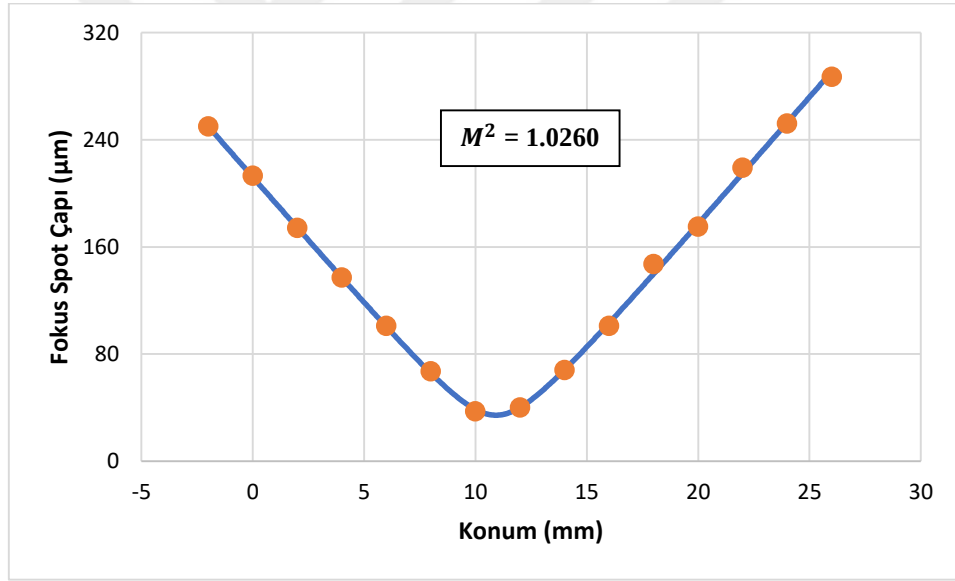
Şekil 82. %3 katkılı 7-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer çıkışının sıcaklığa bağlı değişim grafiği

5.1.11. %3 Katkılı 5-mm Tm:YAG Kristali

%3’lük 5-mm Tm:YAG kristali ile yaptığımız çalışmalarda 15 °C’de 180 mW çıkış gücü %58 verim ile gözlemlenmiştir (Şekil 83). Yapılan ışın karakteristiği ölçümlerinde M^2 değeri sonuçları 2’den düşük çıkmıştır (Şekil 84).

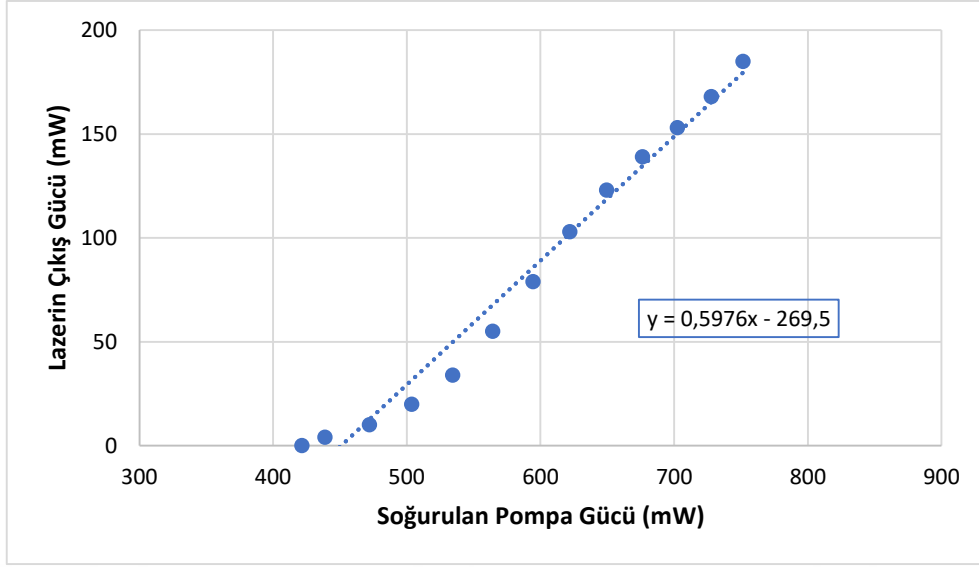


Şekil 83. %3 katkılı 5-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminin 15 °C'deki verim eğrisi

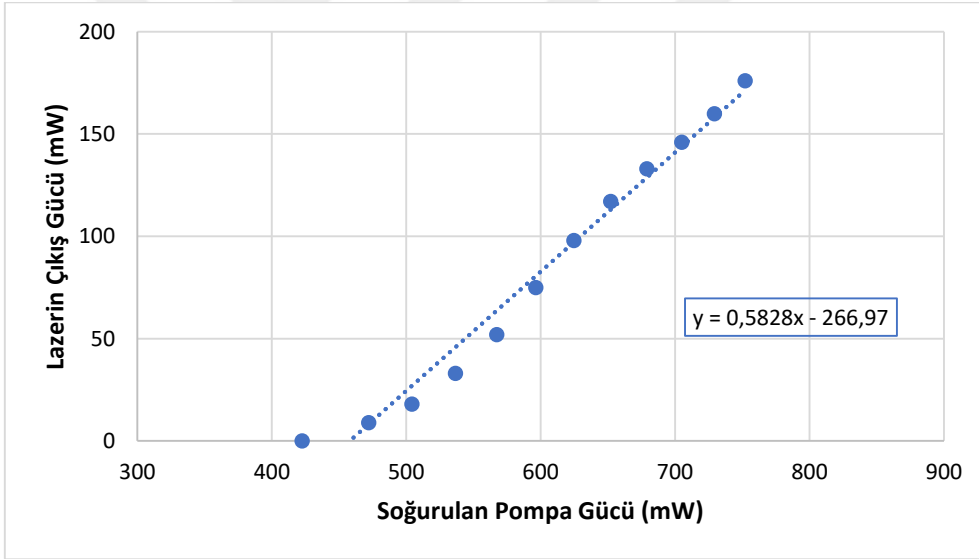


Şekil 84. %3 katkılı 5-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazerinin M^2 ölçüm sonucu

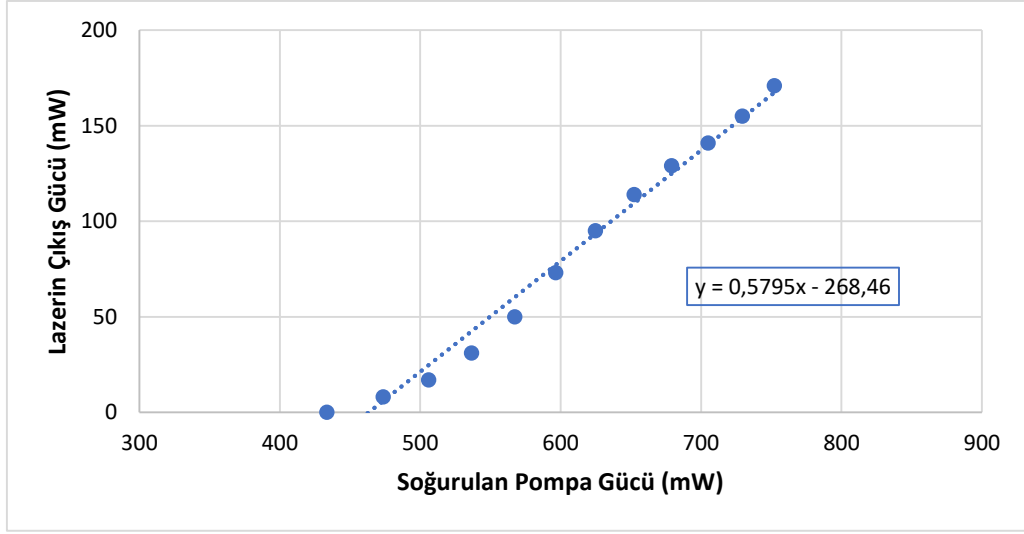
Daha sonra kristal sıcaklığı değiştirilerek 10 °C, 20 °C ve 25 °C'lerde verim eğrisi ölçümleri de alınmış (Şekil 85, 86, 87) ve 15 °C ile 40°C arasında en yüksek güç değerleri (Şekil 88) kaydedilmiştir.



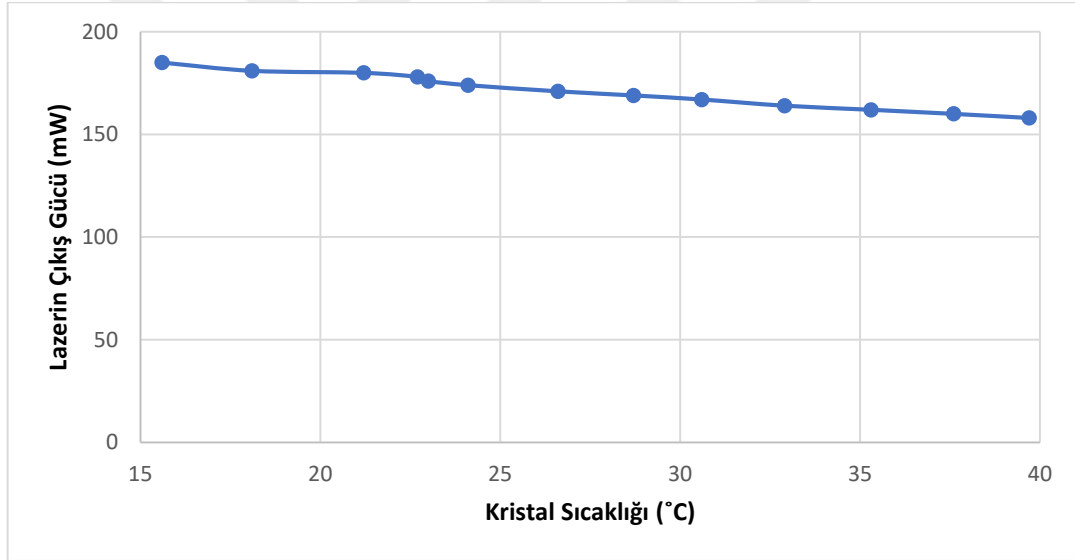
Şekil 85. %3 katkılı 5-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminin 10 °C’deki verim eğrisi



Şekil 86. %3 katkılı 5-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminin 20 °C’deki verim eğrisi



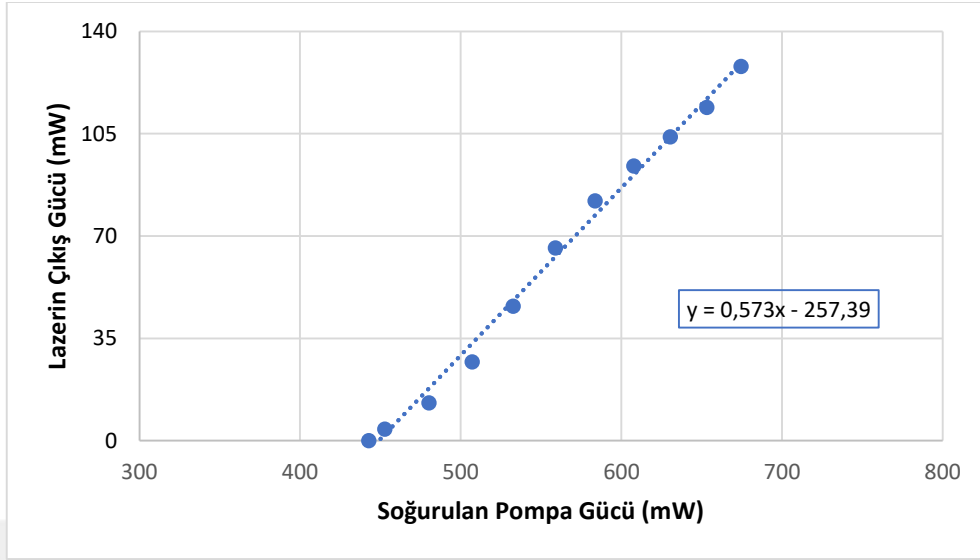
Şekil 87. %3 katkılı 5-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminin 25 °C'deki verim eğrisi



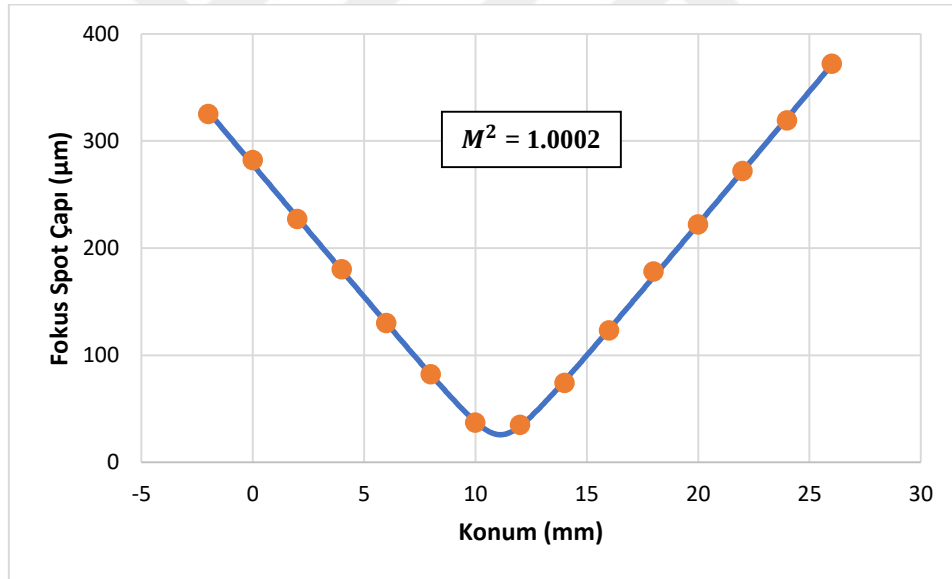
Şekil 88. %3 katkılı 5-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer çıkışının sıcaklığa bağlı değişim grafiği

5.1.12. %3 Katkılı 3-mm Tm:YAG Kristali

%3'lük 3-mm Tm:YAG kristali ile yaptığımız çalışmalarda 15 °C'de 128 mW çıkış gücü %57 verim ile gözlemlenmiştir (Şekil 89). Yapılan ışın karakteristiği ölçümlerinde ise M^2 sonuçları 2'den düşük çıkmıştır (Şekil 90).

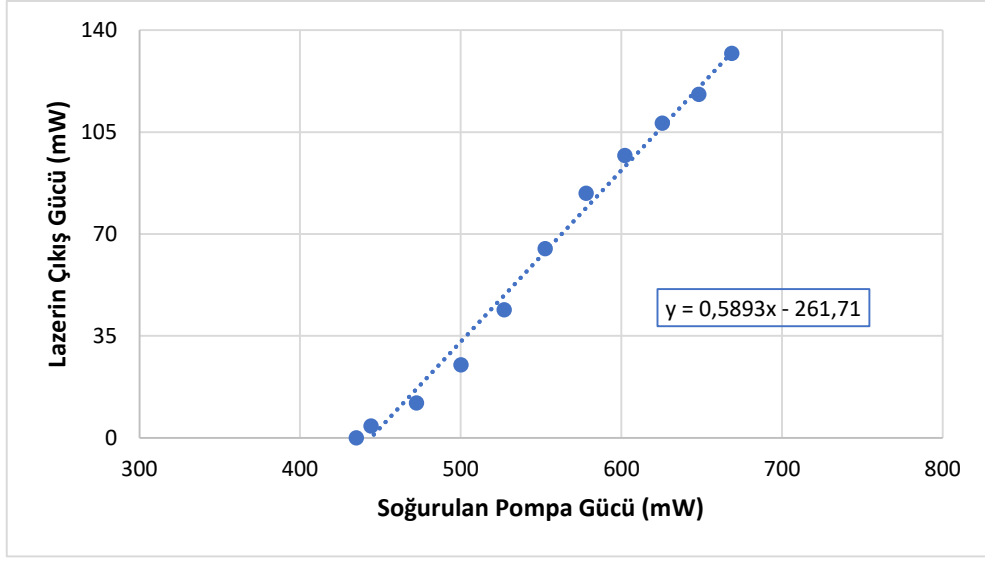


Şekil 89. %3 katkılı 3-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminin 15 °C’deki verim eğrisi

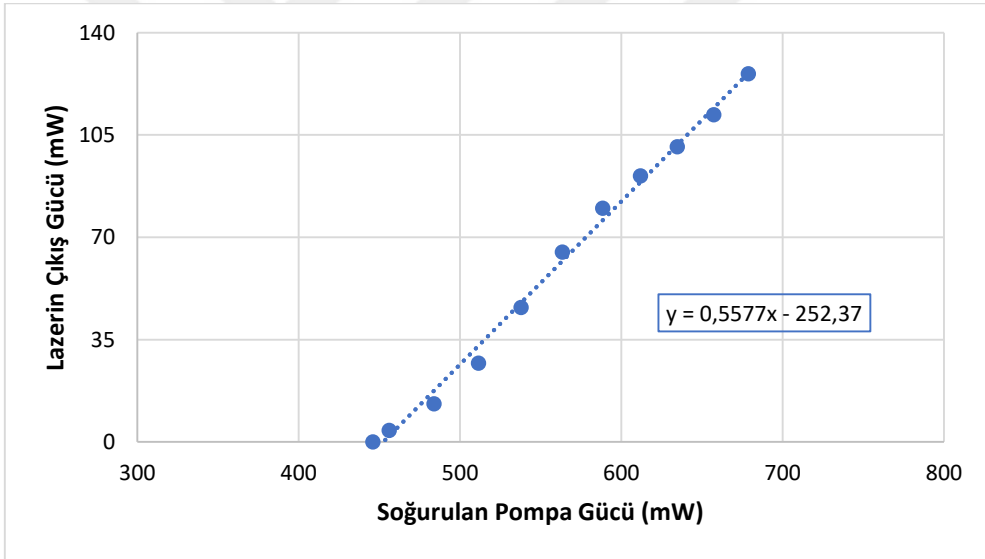


Şekil 90. %3 katkılı 3-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazerinin M^2 ölçüm sonucu

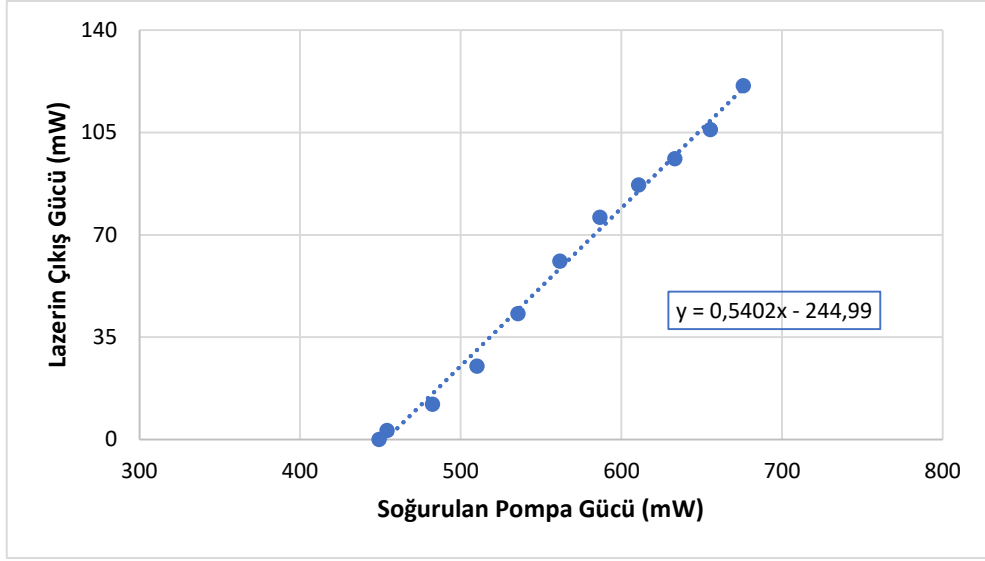
Daha sonra kristal sıcaklığı değiştirilerek 10 °C, 20 °C ve 25 °C’de verim eğrisi ölçümleri de alınmış (Şekil 91, 92, 93) ve 15 °C ile 40°C arasında en yüksek güç değerleri (Şekil 94) kaydedilmiştir.



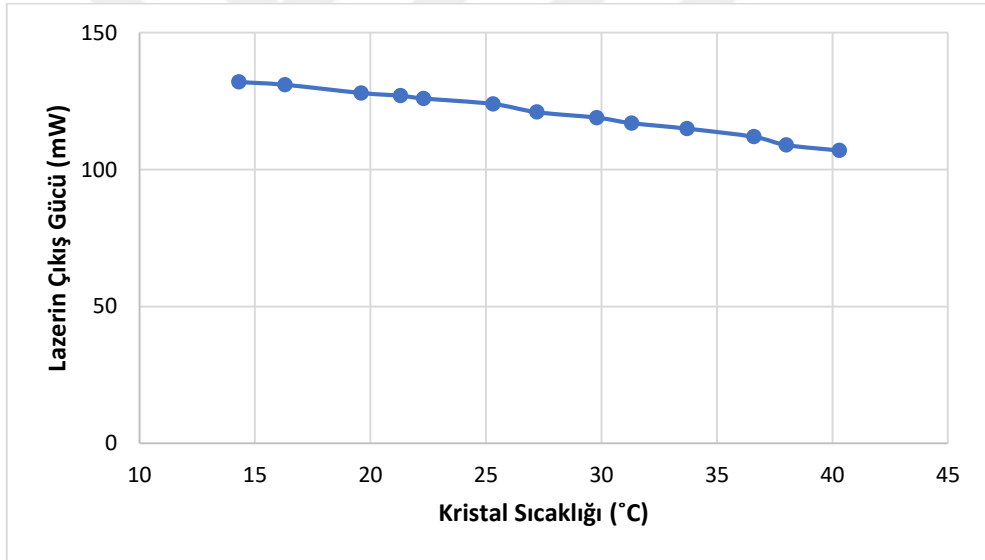
Şekil 91. %3 katkılı 3-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminin 10 °C’deki verim eğrisi



Şekil 92. %3 katkılı 3-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminin 20 °C’deki verim eğrisi



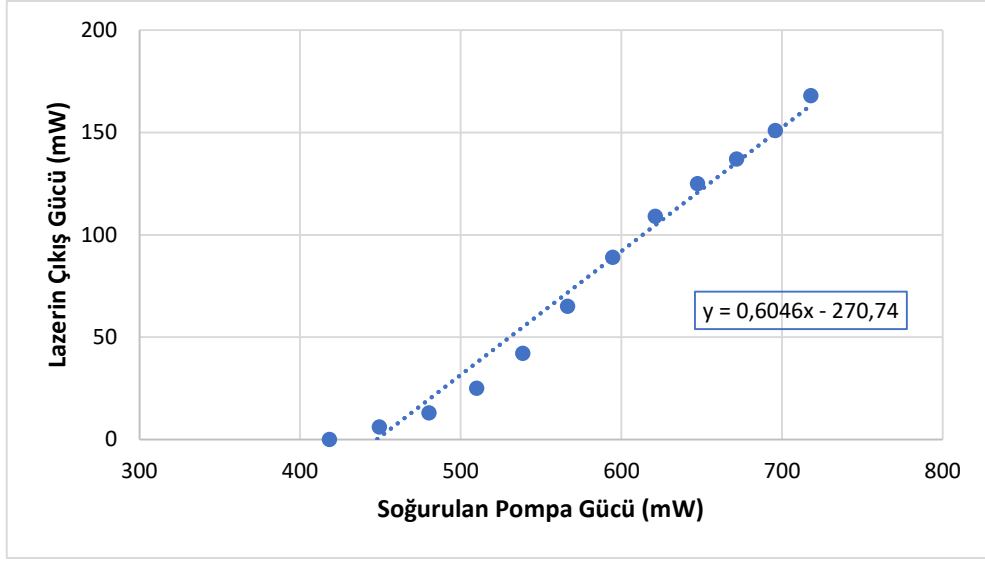
Şekil 93. %3 katkılı 3-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminin 25 °C'deki verim eğrisi



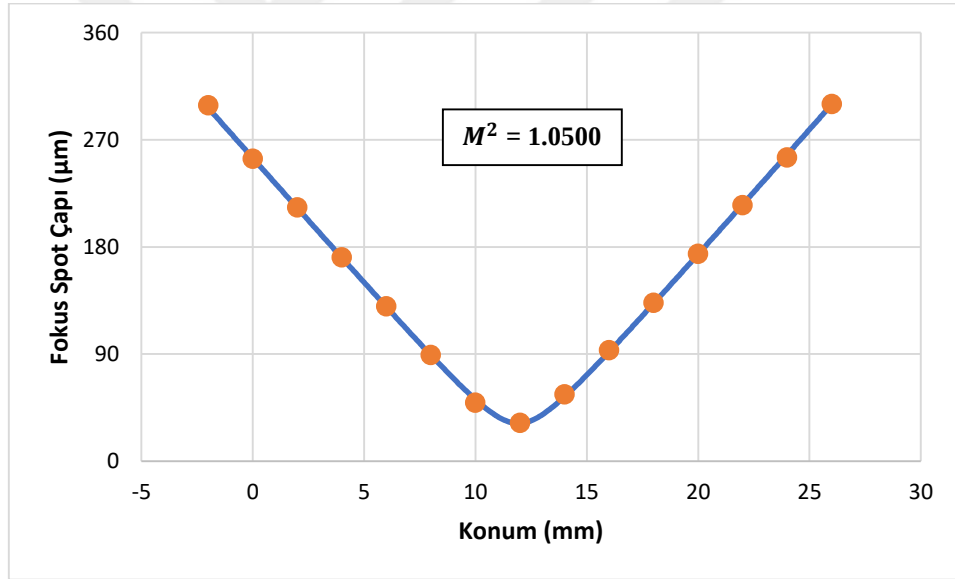
Şekil 94. %3 katkılı 3-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer çıkışının sıcaklığa bağlı değişim grafiği

5.1.13. %1,5 Katkılı 9-mm Tm:YAG Kristali

%1,5'lik 9-mm Tm:YAG kristali ile yaptığımız çalışmalarda 15 °C'de 168 mW çıkış gücü %60 verim ile gözlemlenmiştir (Şekil 95). Yapılan ışın karakteristiği ölçümlerinde ise M^2 sonuçları 2'den düşük çıkmıştır (Şekil 96).

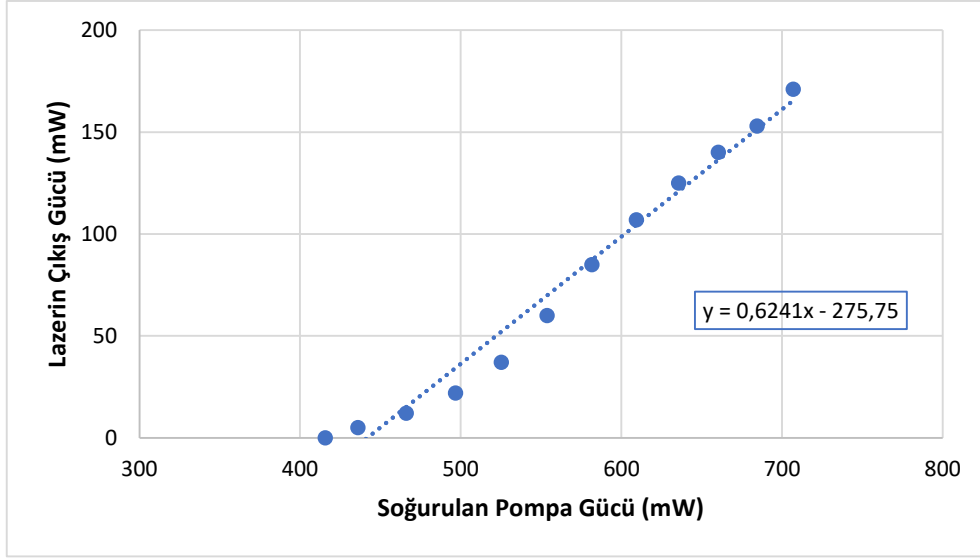


Şekil 95. %1,5 katkılı 9-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminin 15 °C’deki verim eğrisi

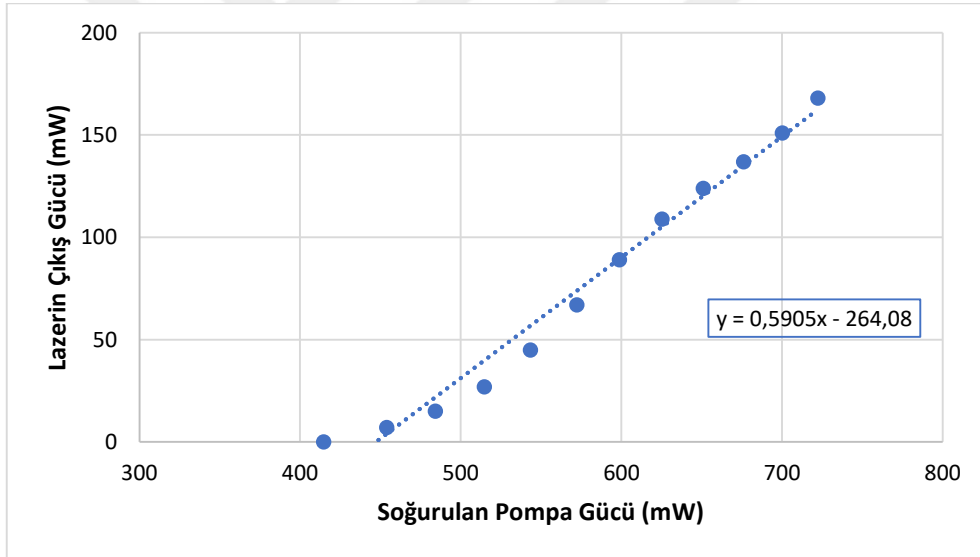


Şekil 96. %1,5 katkılı 9-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazerinin M^2 ölçüm sonucu

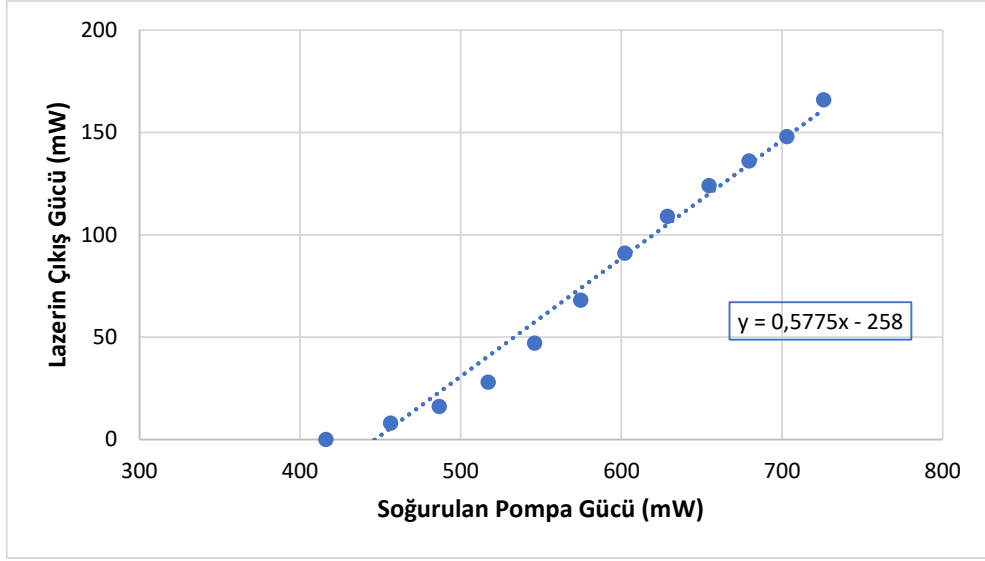
Daha sonra kristal sıcaklığı değiştirilerek 10 °C, 20 °C ve 25 °C’de verim eğrisi ölçümleri de alınmış (Şekil 97, 98, 99) ve 15 °C ile 40°C arasında en yüksek güç değerleri (Şekil 100) kaydedilmiştir.



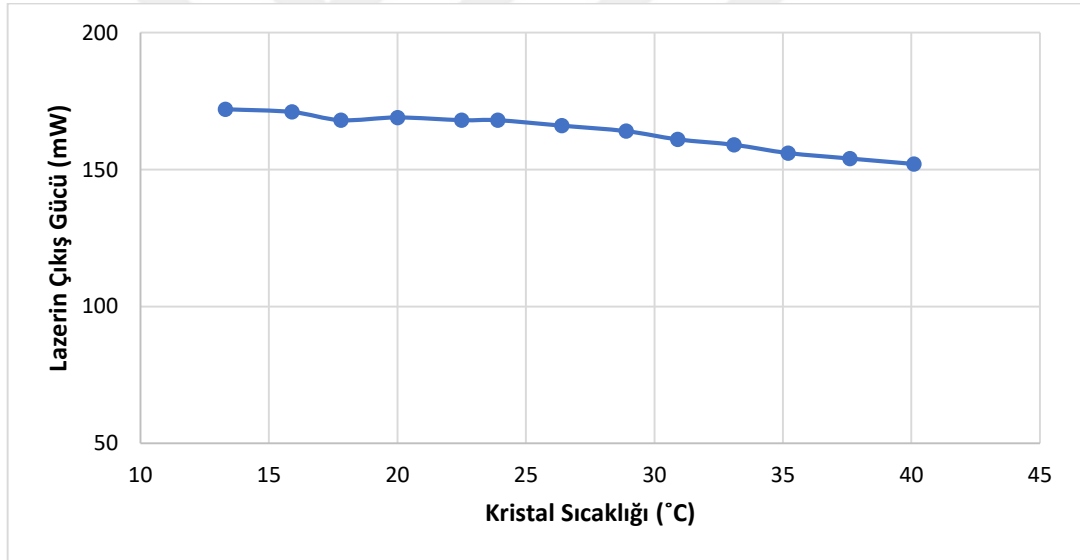
Şekil 97. %1,5 katkılı 9-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminin 10 °C’deki verim eğrisi



Şekil 98. %1,5 katkılı 9-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminin 20 °C’deki verim eğrisi



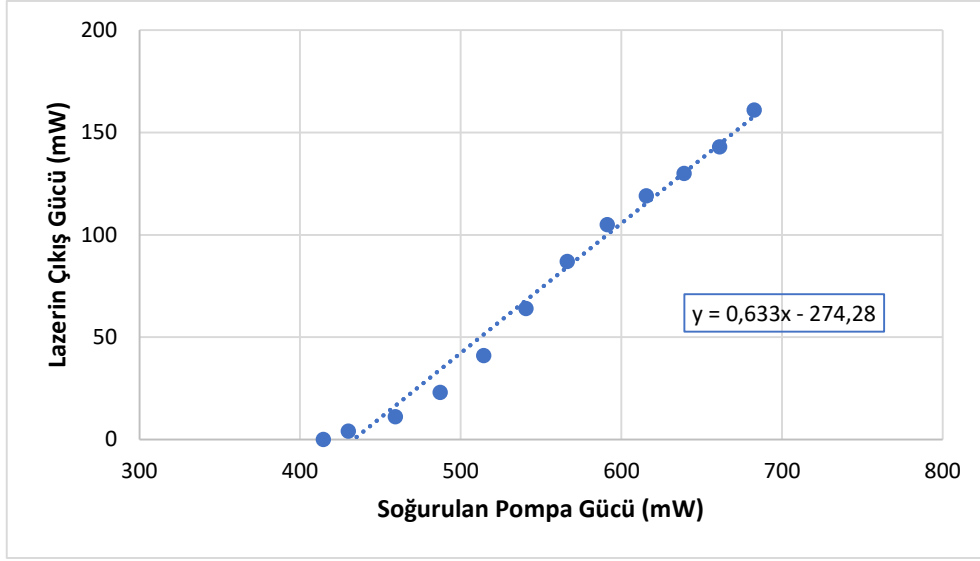
Şekil 99. %1,5 katkılı 9-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminin 25 °C’deki verim eğrisi



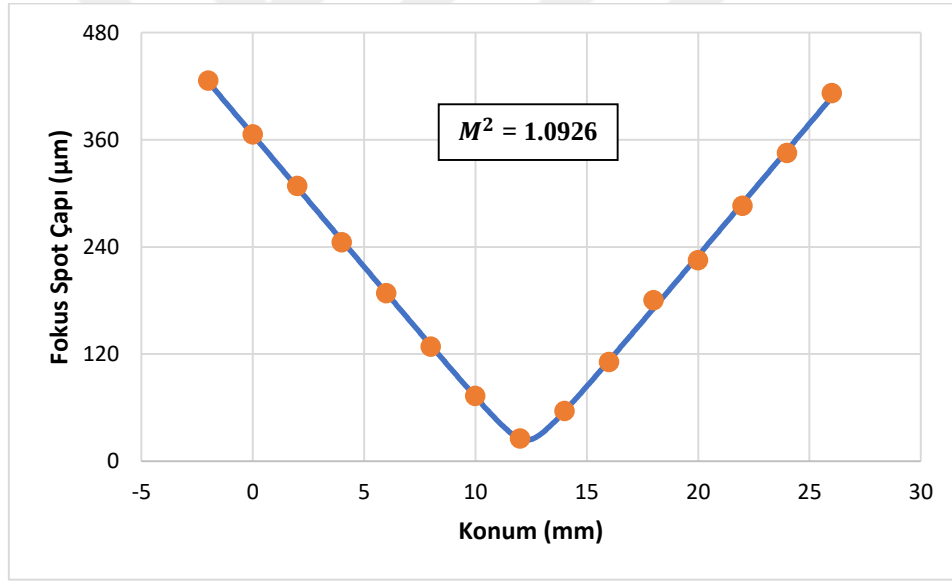
Şekil 100. %1,5 katkılı 9-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer çıkışının sıcaklığa bağlı değişim grafiği

5.1.14. %1,5 Katkılı 7-mm Tm:YAG Kristali

%1,5’lik 7-mm Tm:YAG kristali ile yaptığımız çalışmalarda 15 °C’de 161 mW çıkış gücü %63 verim ile gözlemlenmiştir (Şekil 101). Yapılan ışın karakteristiği ölçümlerinde ise M^2 sonuçları 2’den düşük çıkmıştır (Şekil 102).

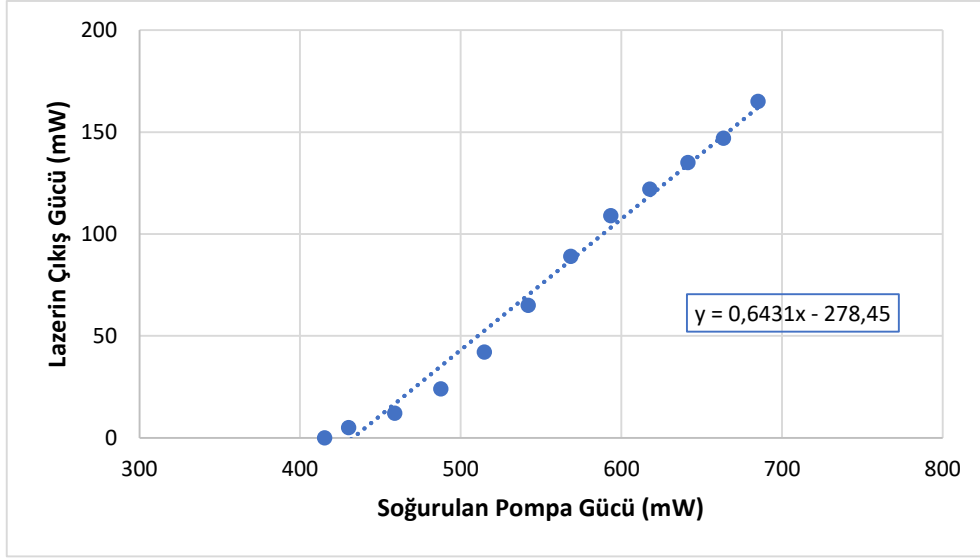


Şekil 101. %1,5 katkılı 7-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminin 15 °C’deki verim eğrisi

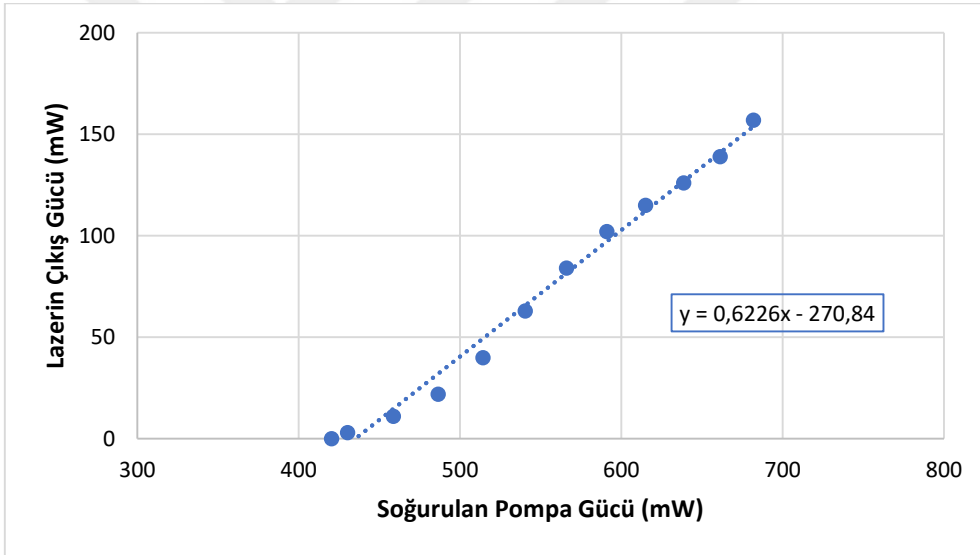


Şekil 102. %1,5 katkılı 7-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazerinin M^2 ölçüm sonucu

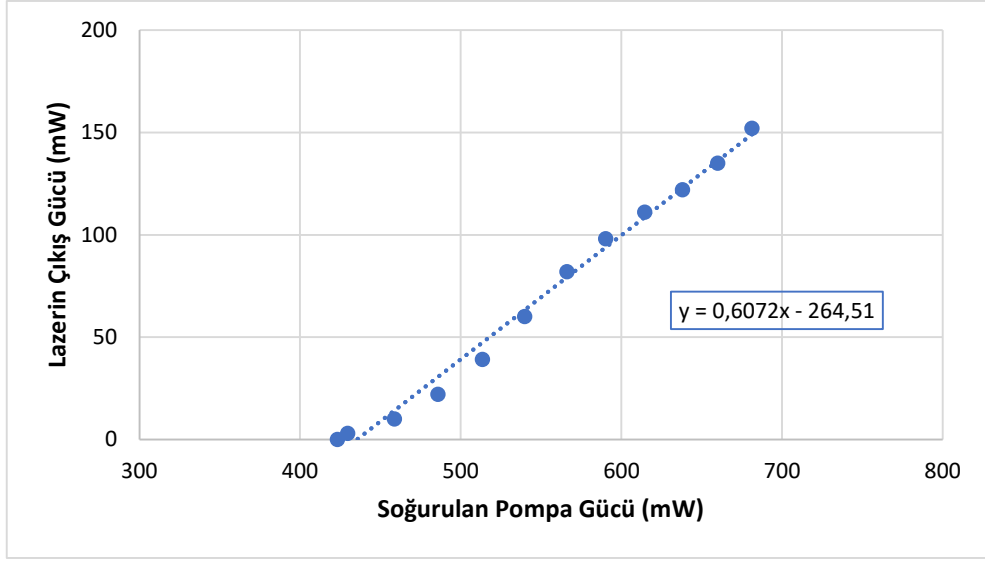
Daha sonra kristal sıcaklığı değiştirilerek 10, 20 ve 25 °C’lerde verim eğrisi ölçümleri de alınmış (Şekil 103, 104, 105) ve 15 °C ile 40 °C arasında en yüksek güç değerleri (Şekil 106) kaydedilmiştir.



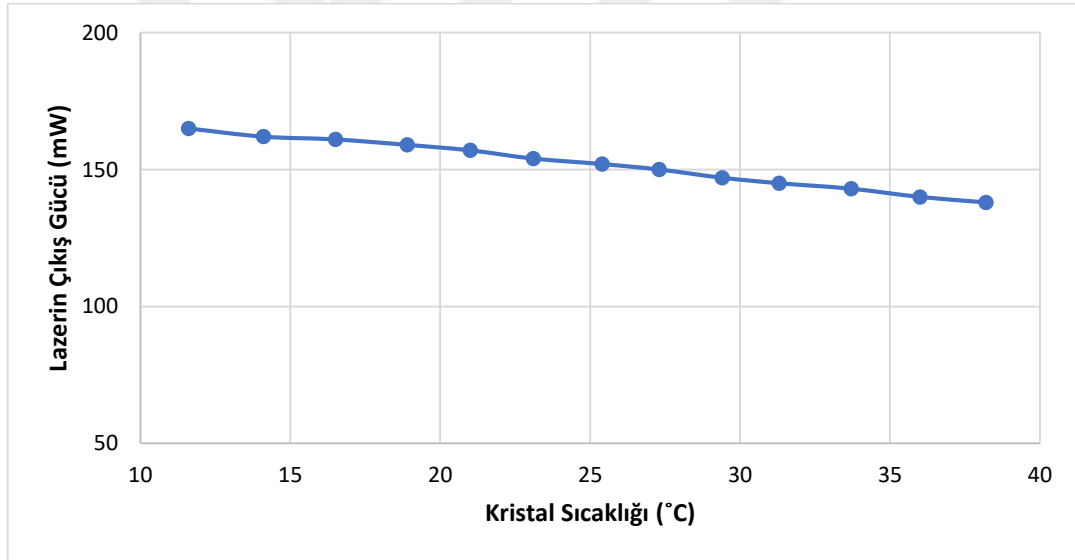
Şekil 103. %1,5 katkılı 7-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminin 10 °C'deki verim eğrisi



Şekil 104. %1,5 katkılı 7-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminin 20 °C'deki verim eğrisi



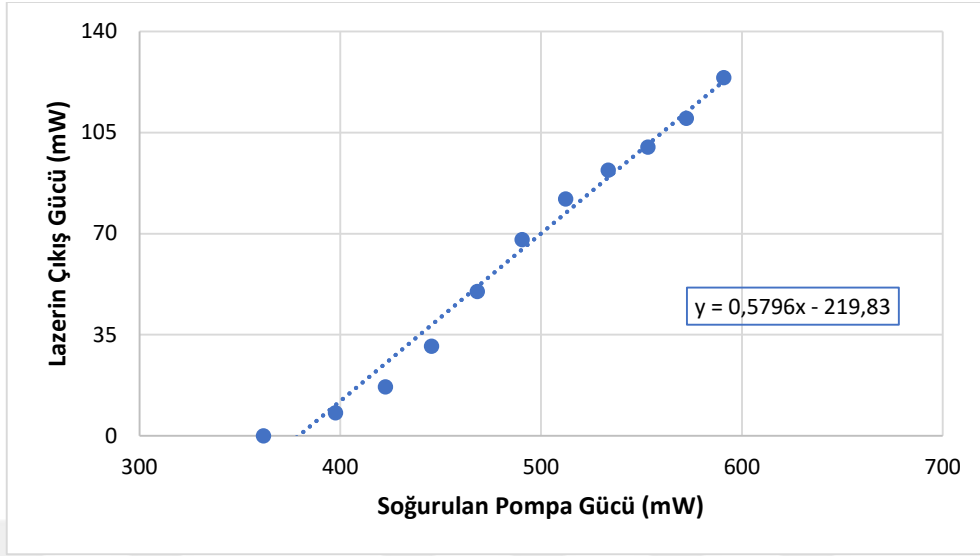
Şekil 105. %1,5 katkılı 7-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminin 25 °C'deki verim eğrisi



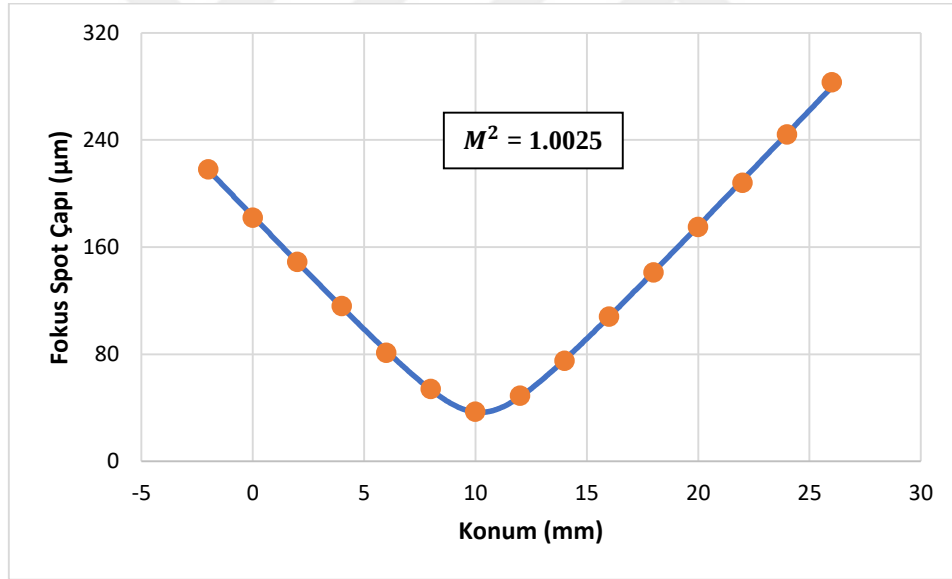
Şekil 106. %1,5 katkılı 7-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer çıkışının sıcaklığa bağlı değişim grafiği

5.1.15. %1,5 Katkılı 5-mm Tm:YAG Kristali

%1,5'lik 5-mm Tm:YAG kristali ile yaptığımız çalışmalarda 15 °C'de 124 mW çıkış gücü %57 verim ile gözlemlenmiştir (Şekil 107). Yapılan ışın karakteristiği ölçümlerinde ise M^2 sonuçları 2'den düşük çıkmıştır (Şekil 108).

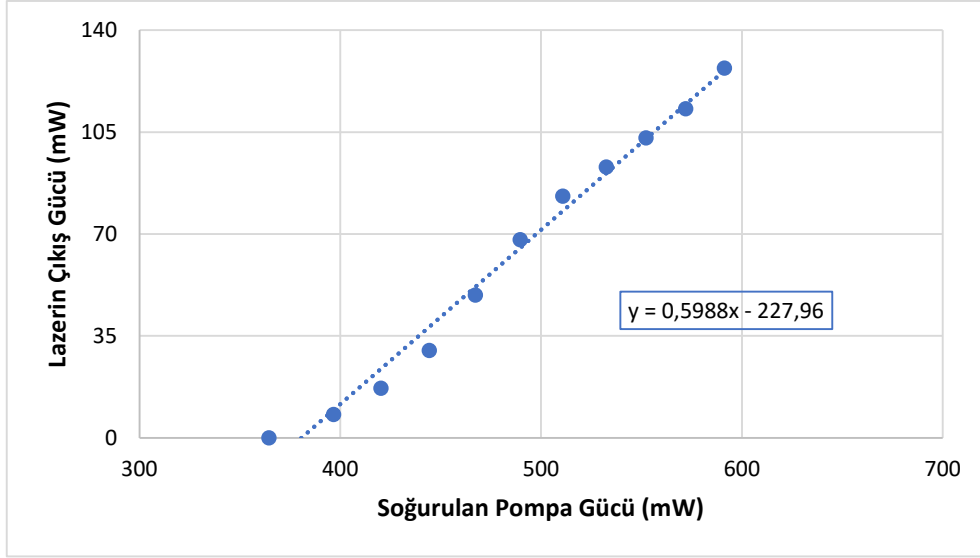


Şekil 107. %1,5 katkılı 5-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminin 15 °C'deki verim eğrisi

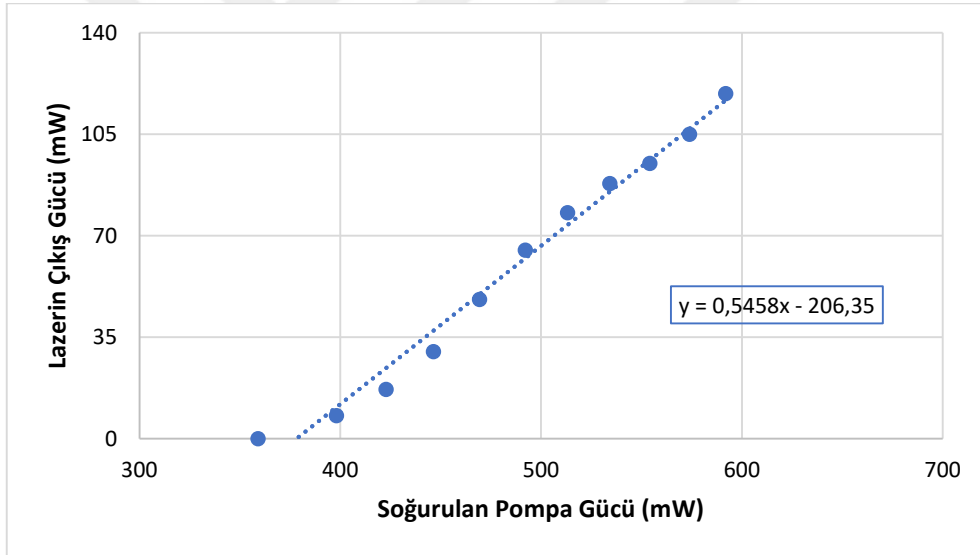


Şekil 108. %1,5 katkılı 5-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazerinin M^2 ölçüm sonucu

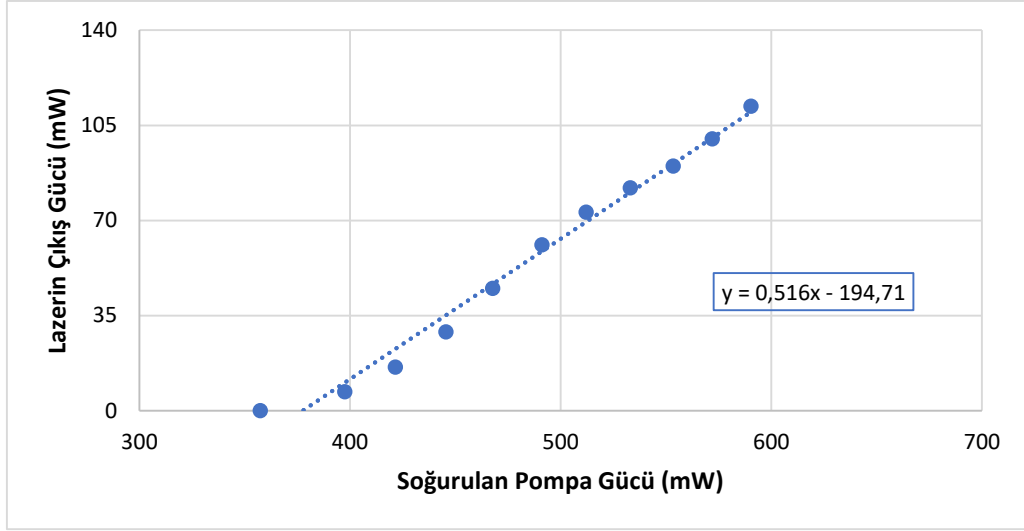
Daha sonra kristal sıcaklığı değiştirilerek 10 °C, 20 °C ve 25 °C'de verim eğrisi ölçümleri de alınmış (Şekil 109, 110, 111) ve 15 °C ile 40°C arasında en yüksek güç değerleri (Şekil 112) kaydedilmiştir.



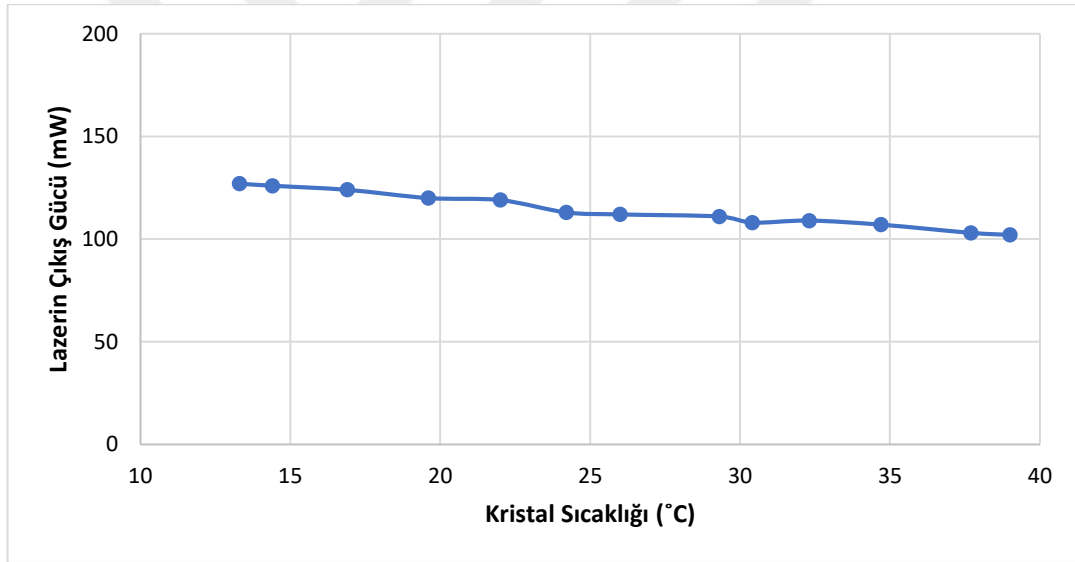
Şekil 109. %1,5 katkılı 5-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminin 10 °C'deki verim eğrisi



Şekil 110. %1,5 katkılı 5-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminin 20 °C'deki verim eğrisi



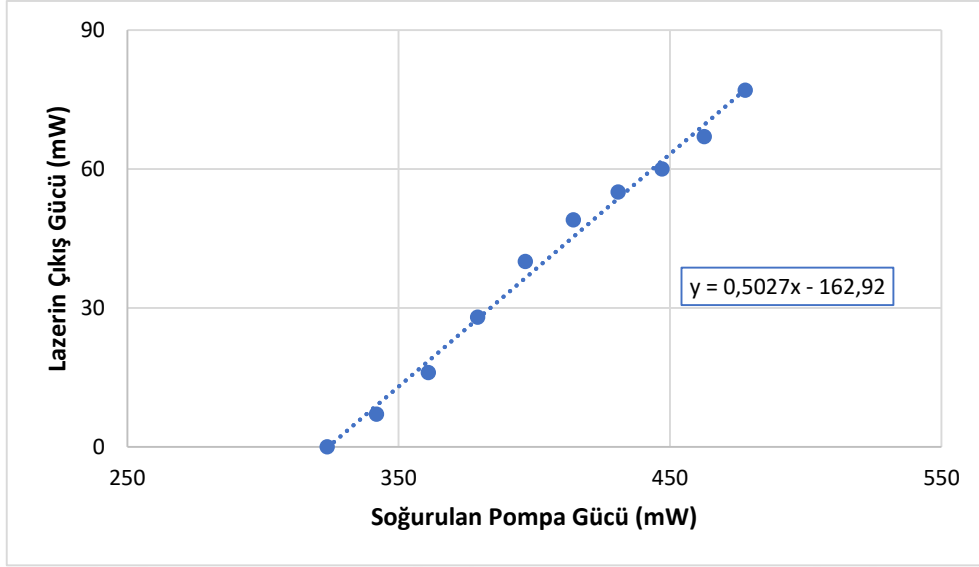
Şekil 111. %1,5 katkılı 5-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminin 25 °C'deki verim eğrisi



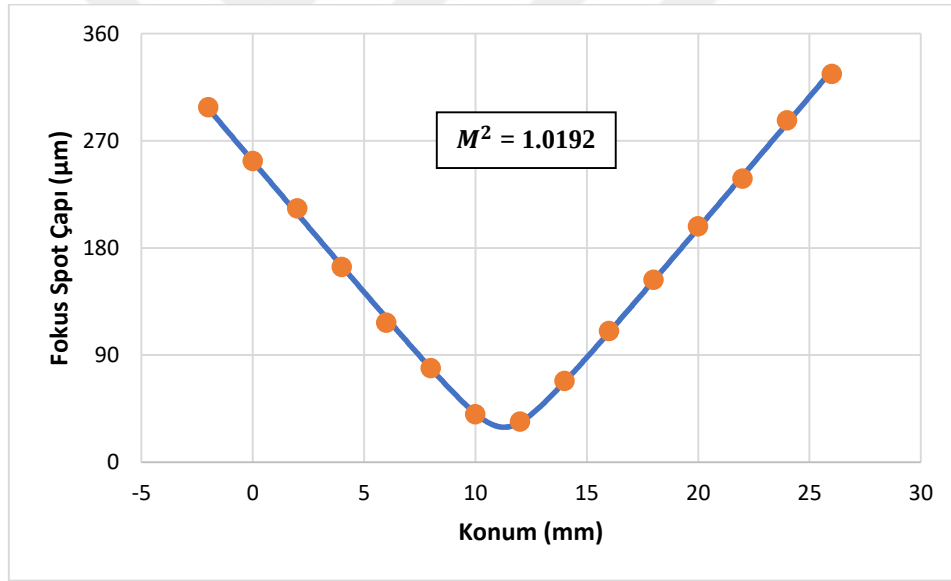
Şekil 112. %1,5 katkılı 5-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer çıkışının sıcaklığa bağlı değişim grafiği

5.1.16. %1,5 Katkılı 3-mm Tm:YAG Kristali

%1,5'lik 3-mm Tm:YAG kristali ile yaptığımız çalışmalarda 15 °C'de 77 mW çıkış gücü %50 verim ile gözlemlenmiştir (Şekil 113). Yapılan ışın karakteristiği ölçümlerinde ise M^2 sonuçları 2'den düşük çıkmıştır (Şekil 114).

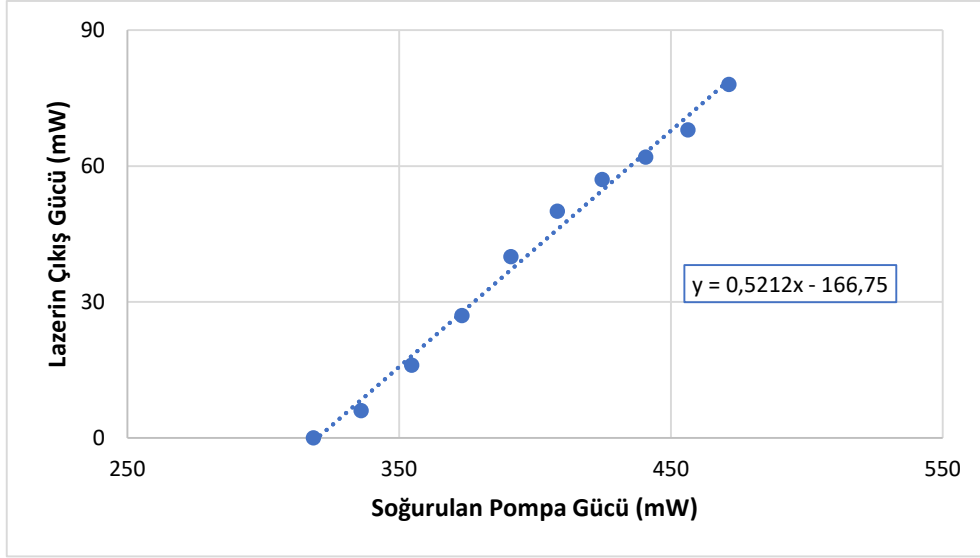


Şekil 113. %1,5 katkılı 3-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminin 15 °C'deki verim eğrisi

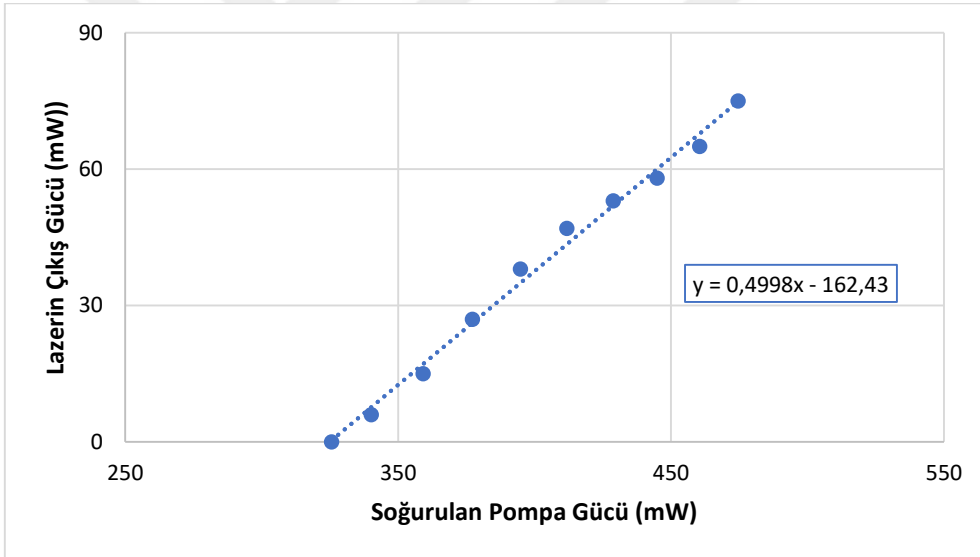


Şekil 114. %1,5 katkılı 3-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazerinin M^2 ölçüm sonucu

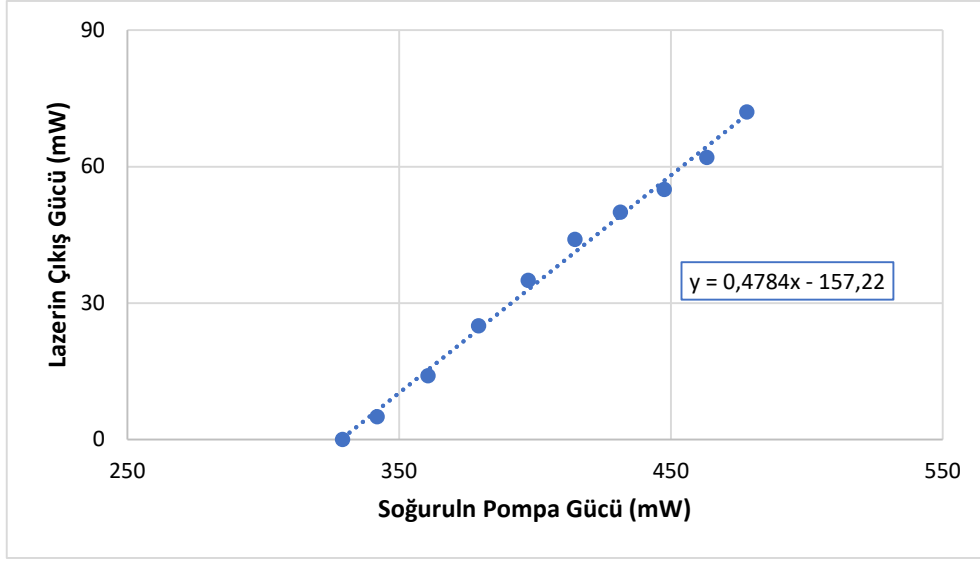
Daha sonra kristal sıcaklığı değiştirilerek 10 °C, 20 °C ve 25 °C'de verim eğrisi ölçümleri de alınmış (Şekil 115, 116, 117) ve 15 °C ile 40°C arasında en yüksek güç değerleri (Şekil 118) kaydedilmiştir.



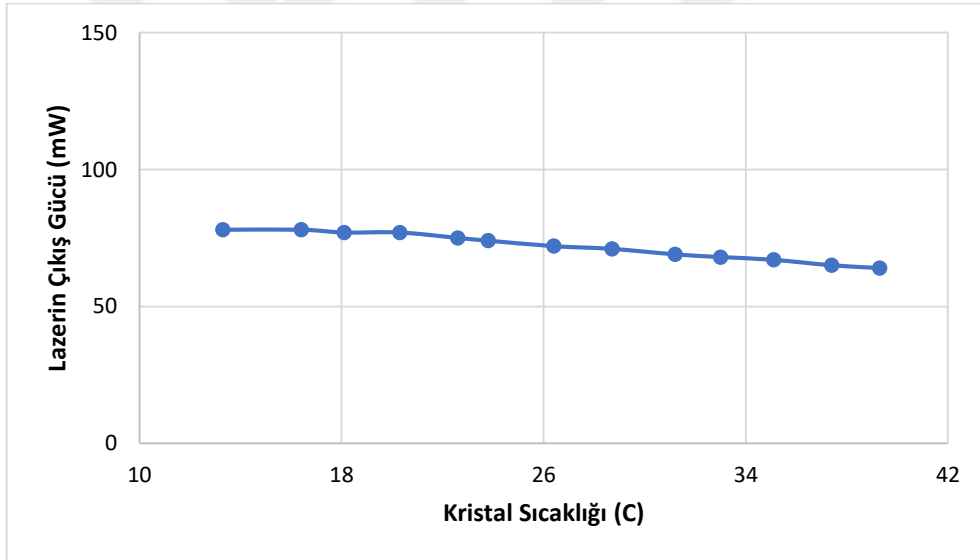
Şekil 115. %1,5 katkılı 3-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminin 10 °C’deki verim eğrisi



Şekil 116. %1,5 katkılı 3-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminin 20 °C’deki verim eğrisi



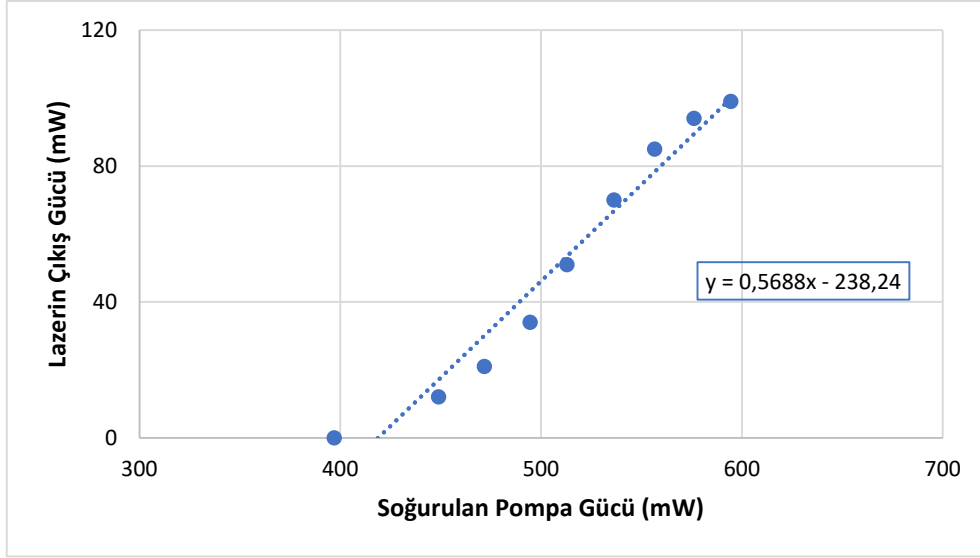
Şekil 117. %1,5 katkılı 3-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminin 25 °C'deki verim eğrisi



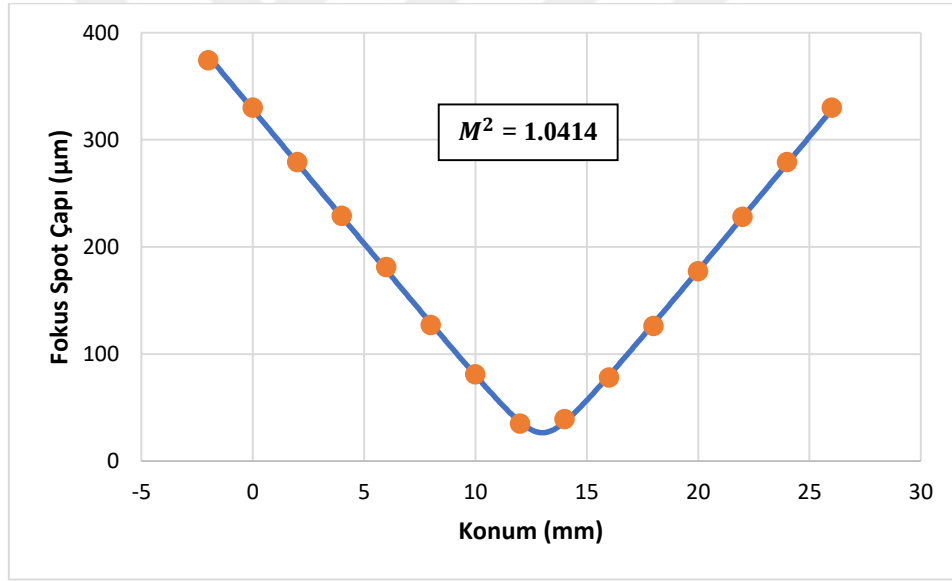
Şekil 118. %1,5 katkılı 3-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer çıkışının sıcaklığa bağlı değişim grafiği

5.1.17. %2 Katkılı 7-mm Tm:LuAG Kristali

%2'lik 7-mm Tm:LuAG kristali ile yaptığımız çalışmalarda 15 °C'de 99 mW çıkış gücü %56 verim ile gözlemlenmiştir (Şekil 119). Yapılan ışın karakteristiği ölçümlerinde ise M^2 sonuçları 2'den düşük çıkmıştır (Şekil 120).

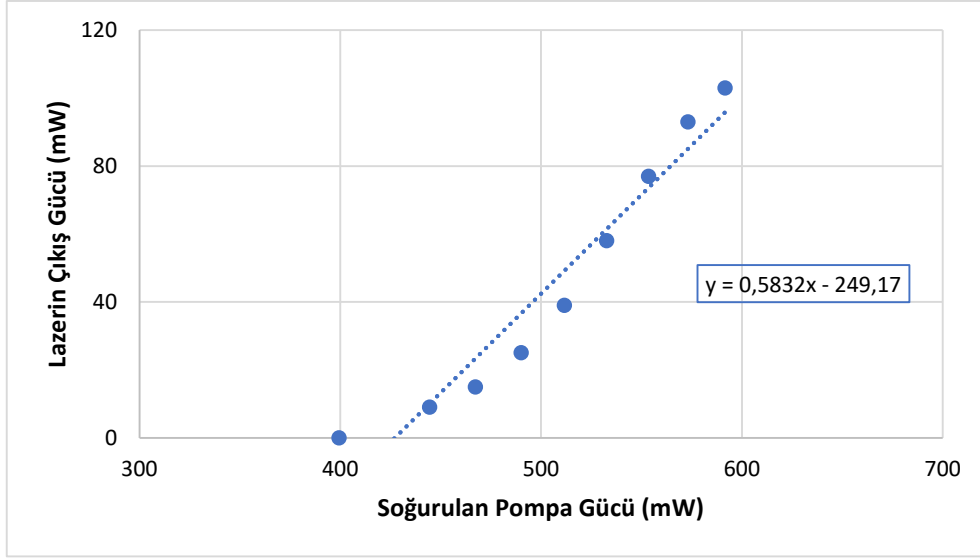


Şekil 119. %2 katkılı 7-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminin 15 °C’deki verim eğrisi

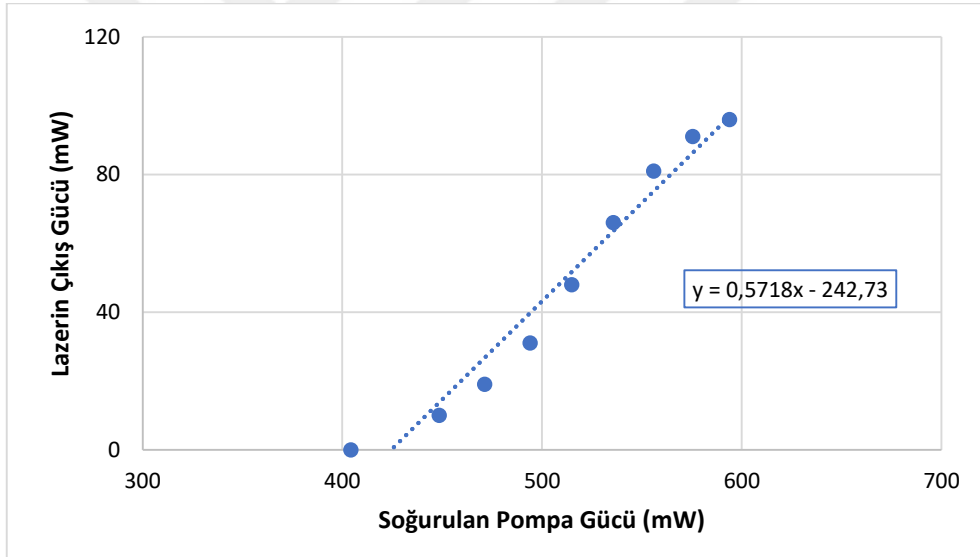


Şekil 120. %2 katkılı 7-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazerinin M^2 ölçüm sonucu

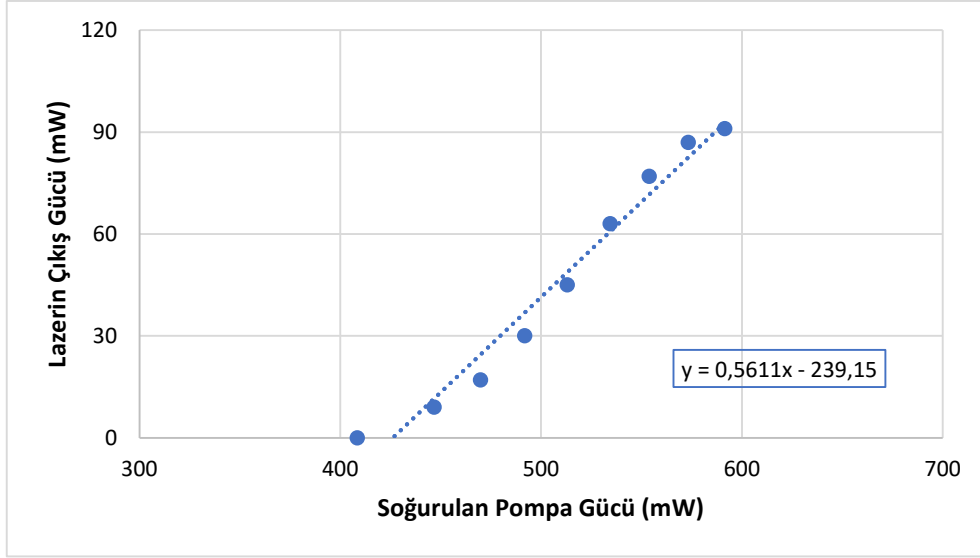
Daha sonra kristal sıcaklığı değiştirilerek 10 °C, 20 °C ve 25 °C’lerde verim eğrisi ölçümleri de alınmış (Şekil 121, 122, 123) ve 15 °C ile 40°C arasında en yüksek güç değerleri (Şekil 124) kaydedilmiştir.



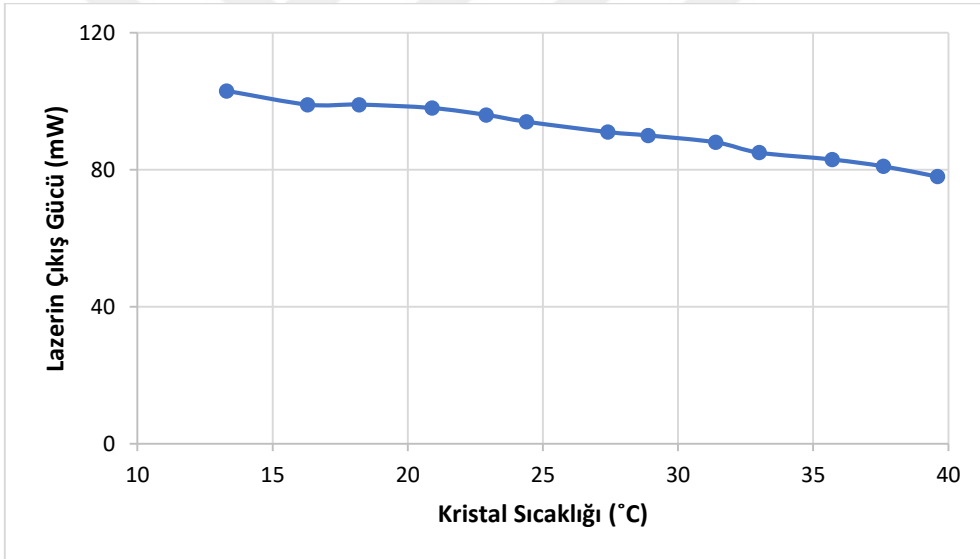
Şekil 121. %2 katkılı 7-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminin 10 °C’deki verim eğrisi



Şekil 122. %2 katkılı 7-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminin 20 °C’deki verim eğrisi



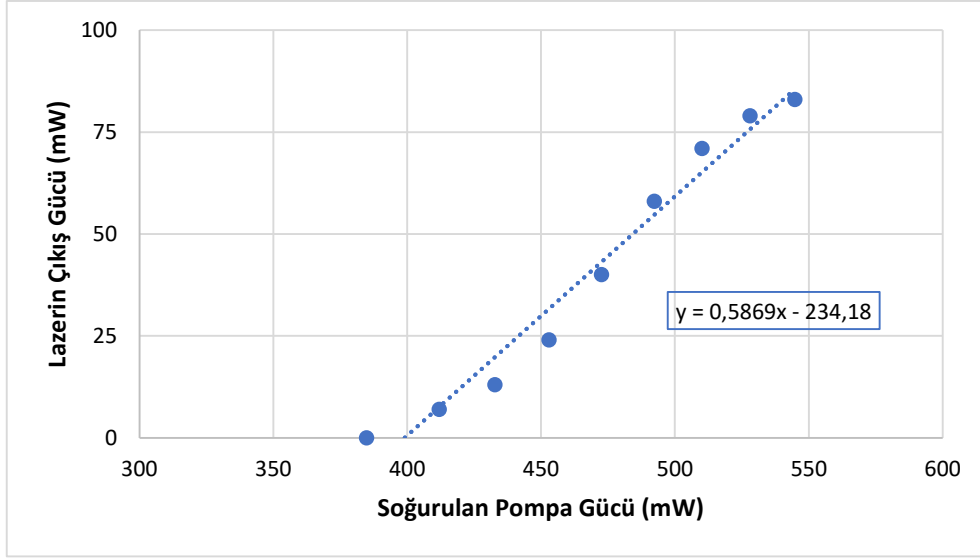
Şekil 123. %2 katkılı 7-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminin 25 °C'deki verim eğrisi



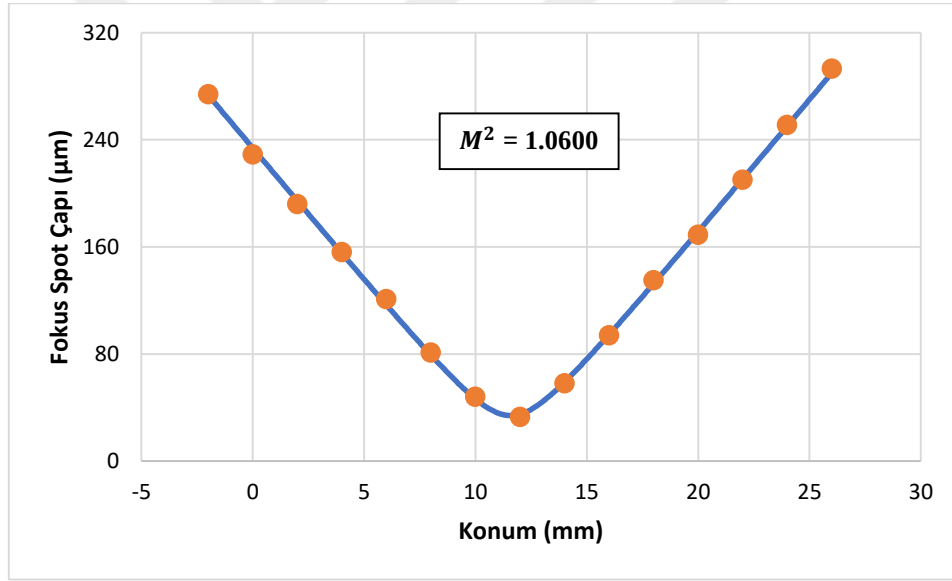
Şekil 124. %2 katkılı 7-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer çıkışının sıcaklığa bağlı değişim grafiği

5.1.18. %2 Katkılı 5-mm Tm:LuAG Kristali

%2'lik 5-mm Tm:LuAG kristali ile yaptığımız çalışmalarda 15 °C'de 83 mW çıkış gücü %58 verim ile gözlemlenmiştir (Şekil 125). Yapılan ışın karakteristiği ölçümlerinde ise M^2 sonuçları 2'den düşük çıkmıştır (Şekil 126).

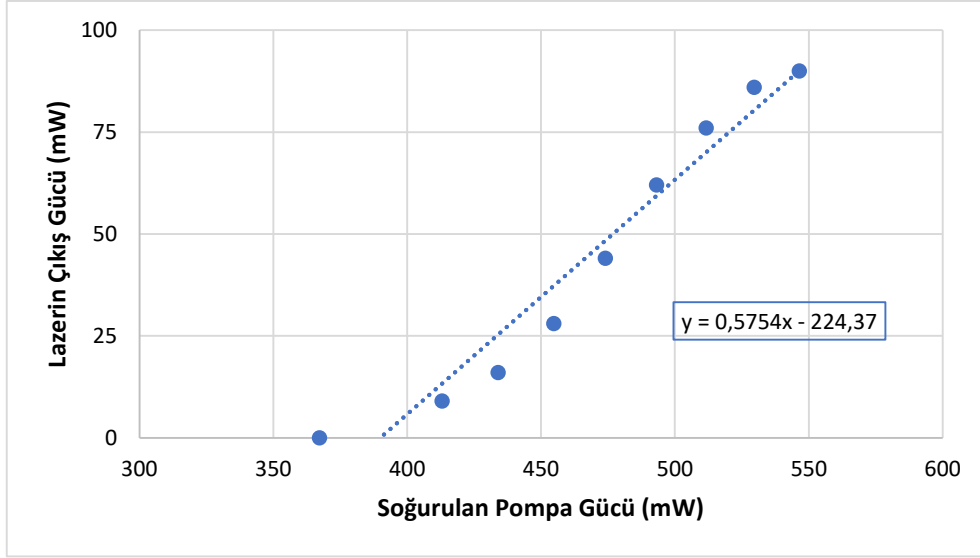


Şekil 125. %2 katkılı 5-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminin 15 °C’deki verim eğrisi

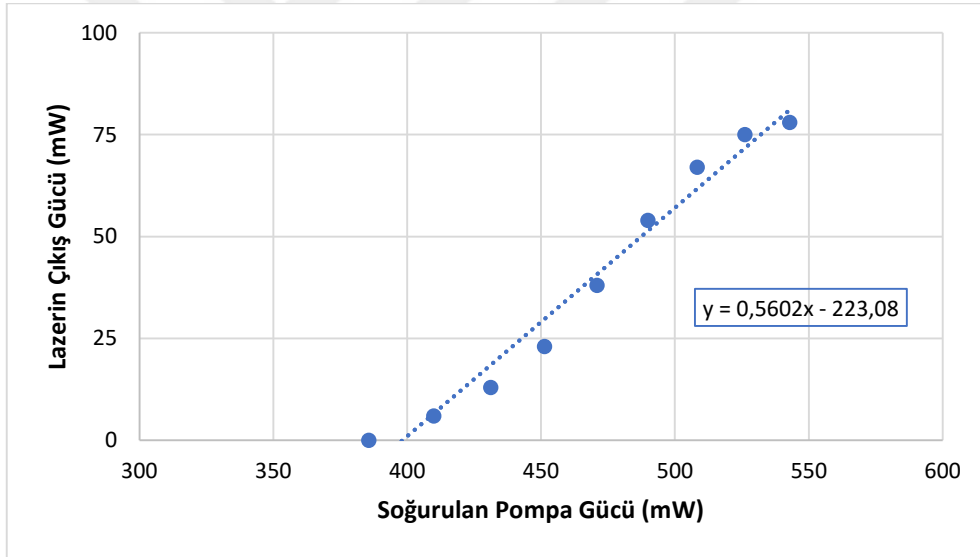


Şekil 126. %2 katkılı 5-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazerinin M^2 ölçüm sonucu

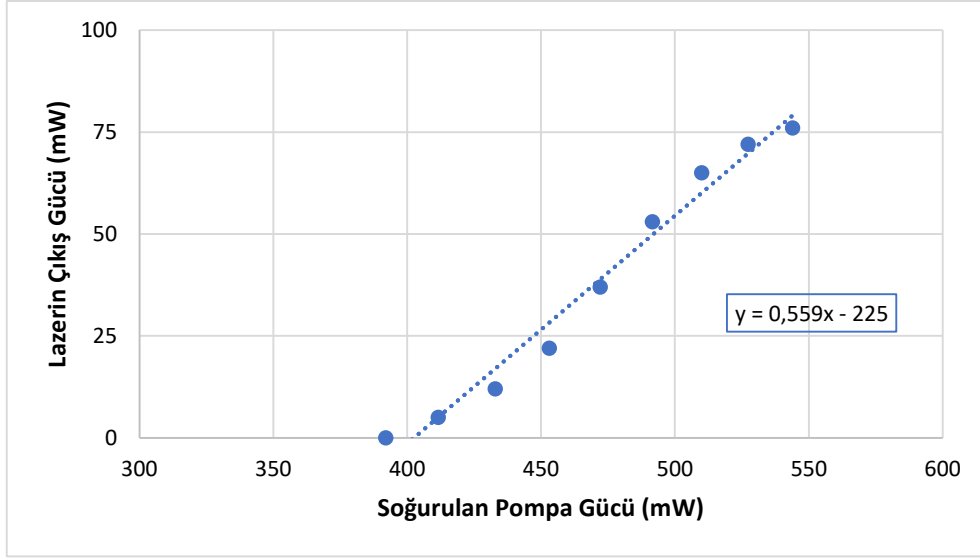
Daha sonra kristal sıcaklığı değiştirilerek 10 °C, 20 °C ve 25 °C’de verim eğrisi ölçümleri de alınmış (Şekil 127, 128, 129) ve 15 °C ile 40°C arasında en yüksek güç değerleri (Şekil 130) kaydedilmiştir.



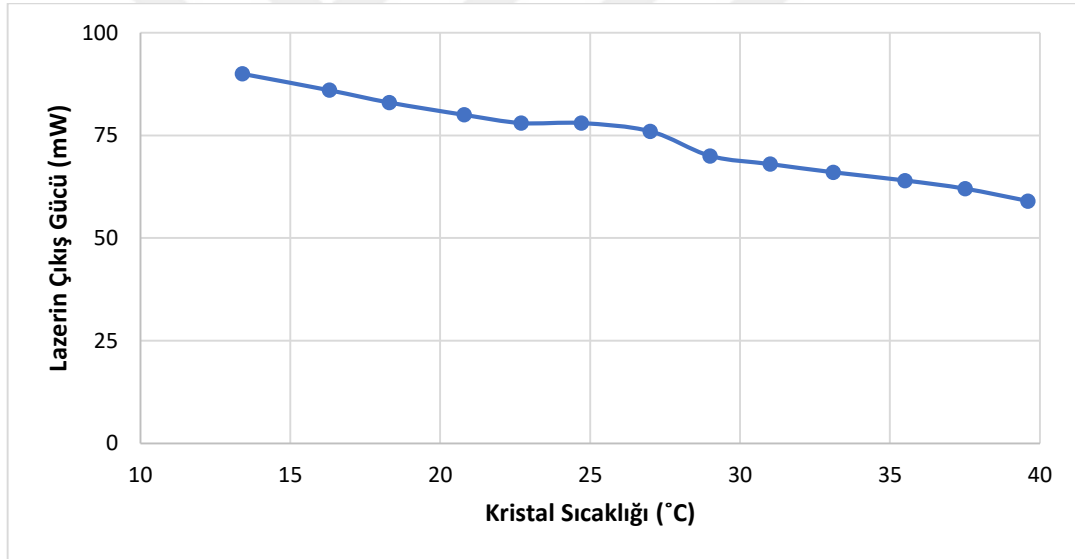
Şekil 127. %2 katkılı 5-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminin 10 °C’deki verim eğrisi



Şekil 128. %2 katkılı 5-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminin 20 °C’deki verim eğrisi



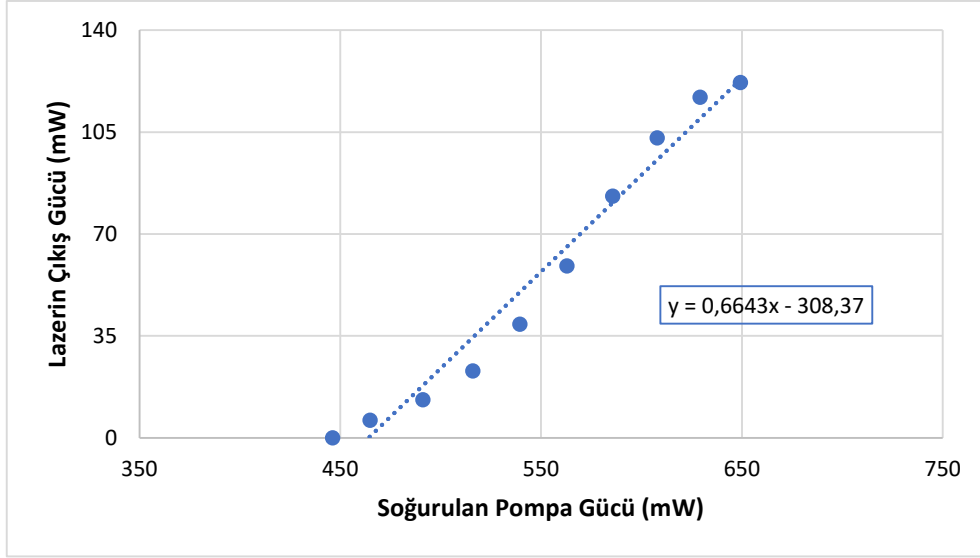
Şekil 129. %2 katkılı 5-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminin 25 °C'deki verim eğrisi



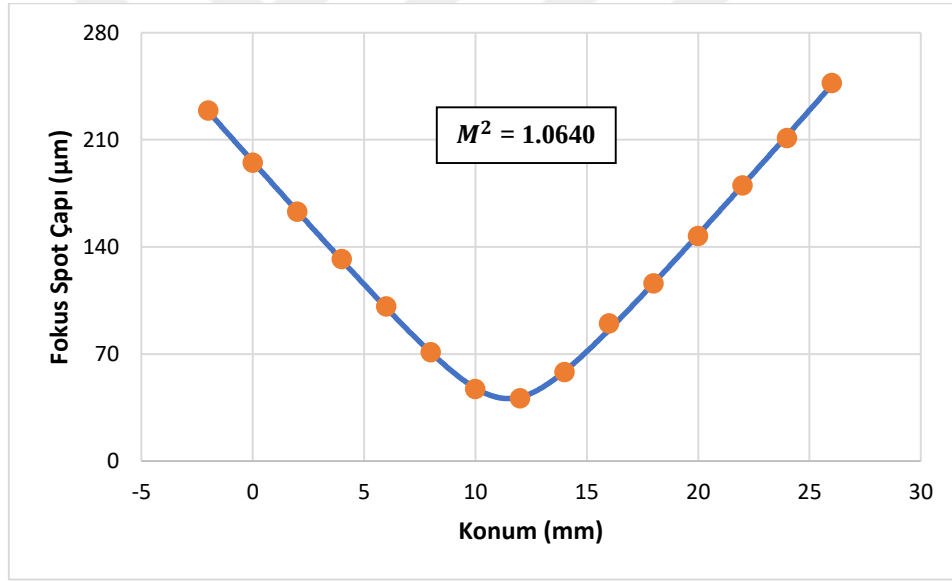
Şekil 130. %2 katkılı 5-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer çıkışının sıcaklığa bağlı değişim grafiği

5.1.19. %2 Katkılı 9-mm Tm:LuAG Kristali

%2'lik 9-mm Tm:LuAG kristali ile yaptığımız çalışmalarda 15 °C'de 122 mW çıkış gücü %66 verim ile gözlemlenmiştir (Şekil 131). Yapılan ışın karakteristiği ölçümlerinde ise M^2 sonuçları 2'den düşük çıkmıştır (Şekil 132).

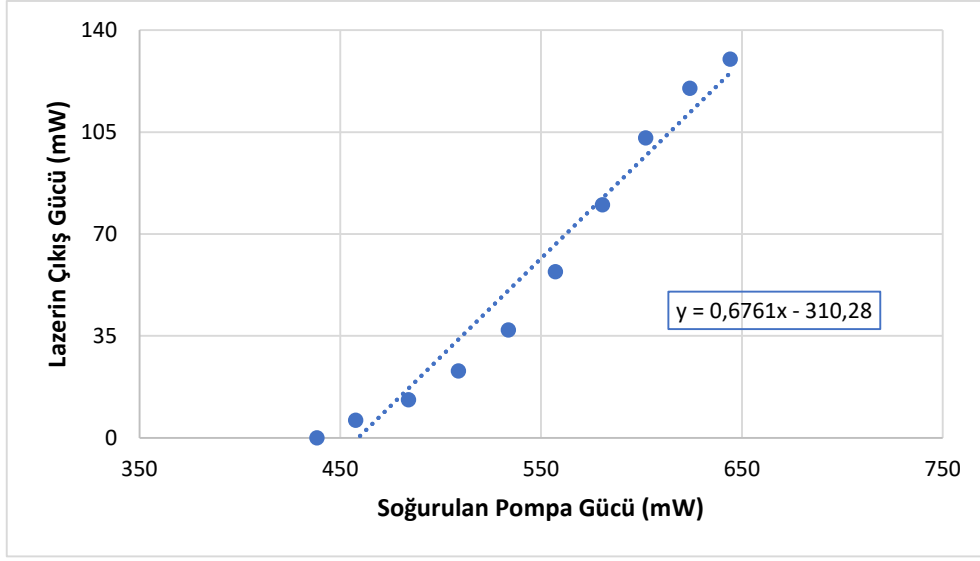


Şekil 131. %2 katkılı 9-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminin 15 °C’deki verim eğrisi

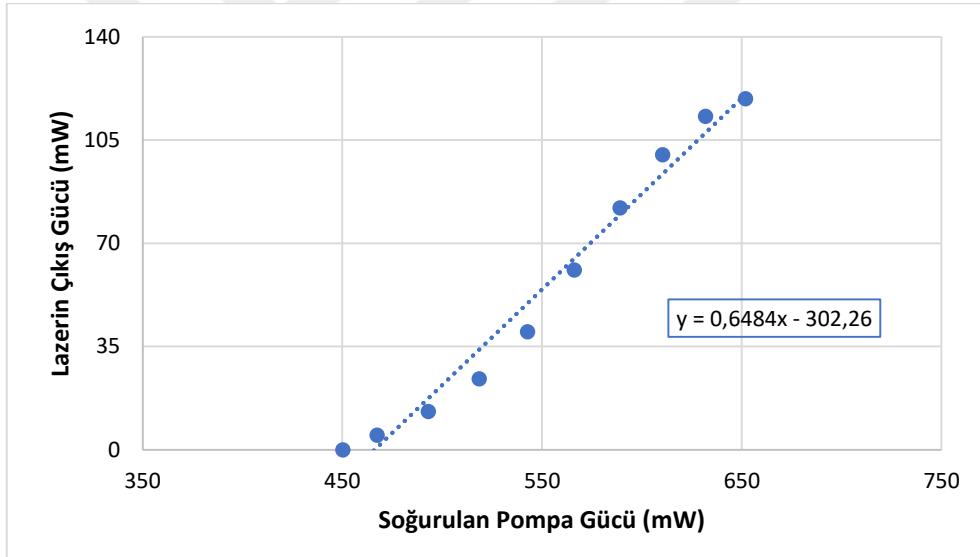


Şekil 132. %2 katkılı 9-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazerinin M^2 ölçüm sonucu

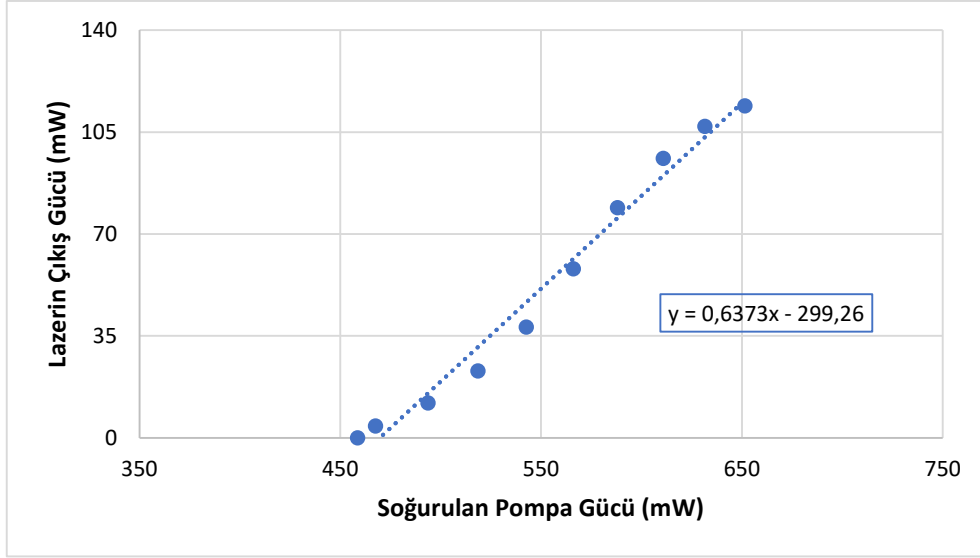
Daha sonra kristal sıcaklığı değiştirilerek 10 °C, 20 °C ve 25 °C’de verim eğrisi ölçümleri de alınmış (Şekil 133, 134, 135) ve 15 °C ile 40°C arasında en yüksek güç değerleri (Şekil 136) kaydedilmiştir.



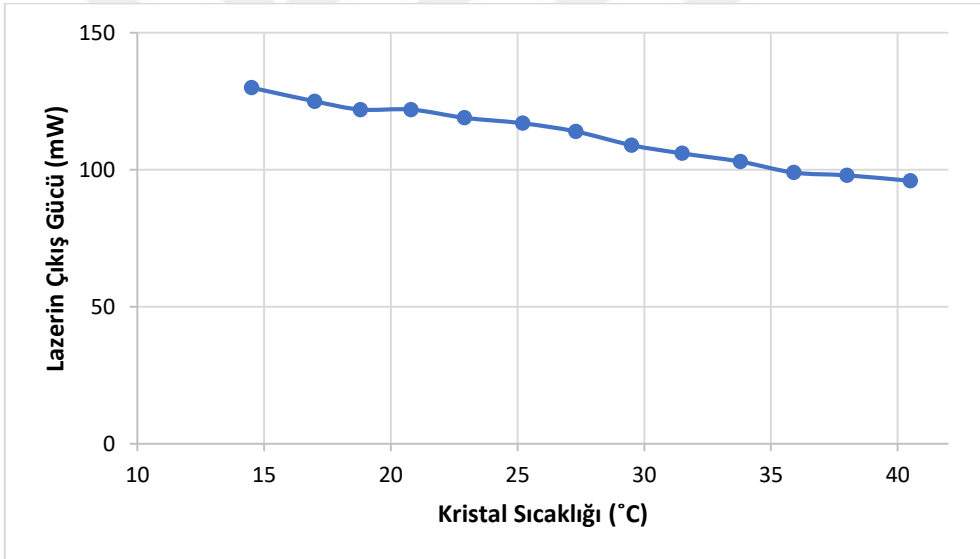
Şekil 133. %2 katkılı 9-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminin 10 °C’deki verim eğrisi



Şekil 134. %2 katkılı 9-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminin 20 °C’deki verim eğrisi



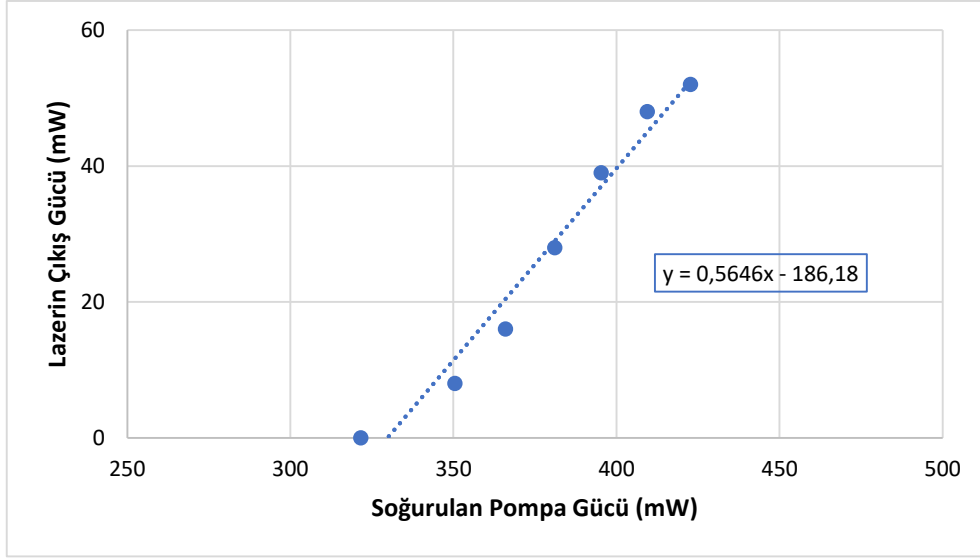
Şekil 135. %2 katkılı 9-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminin 25 °C'deki verim eğrisi



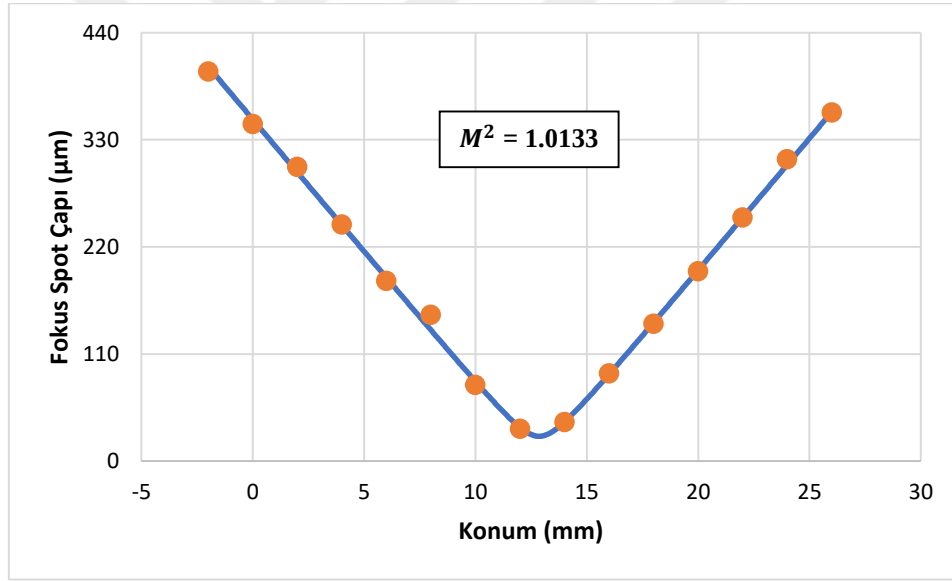
Şekil 136. %2 katkılı 9-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer çıkışının sıcaklığa bağlı değişim grafiği

5.1.20. %2 Katkılı 3-mm Tm:LuAG Kristali

%2'lik 3-mm Tm:LuAG kristali ile yaptığımız çalışmalarda 15 °C'de 52 mW çıkış gücü %56 verim ile gözlemlenmiştir (Şekil 137). Yapılan ışın karakteristiği ölçümlerinde ise M^2 sonuçları 2'den düşük çıkmıştır (Şekil 138).

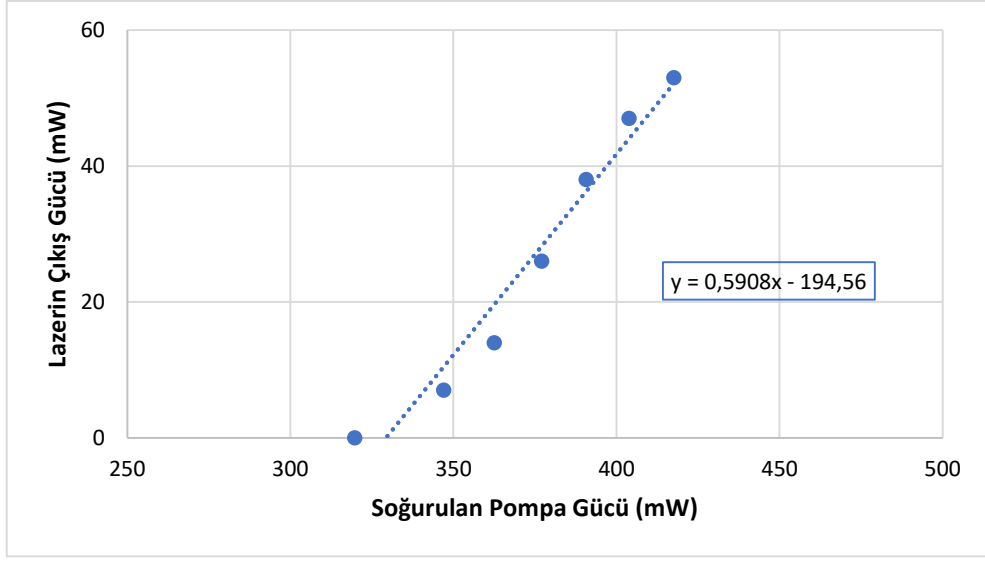


Şekil 137. %2 katkılı 3-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminin 15 °C’deki verim eğrisi

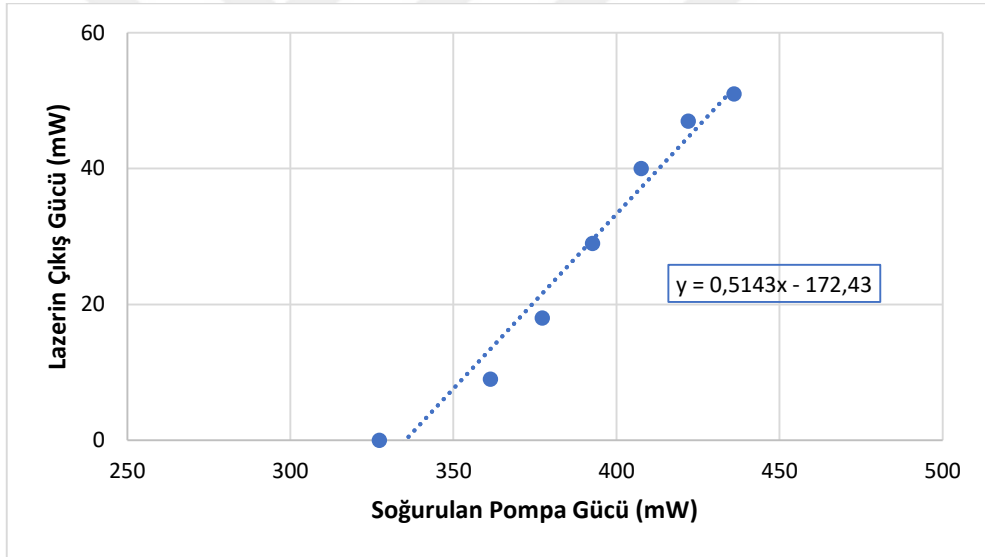


Şekil 138. %2 katkılı 3-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazerinin M^2 ölçüm sonucu

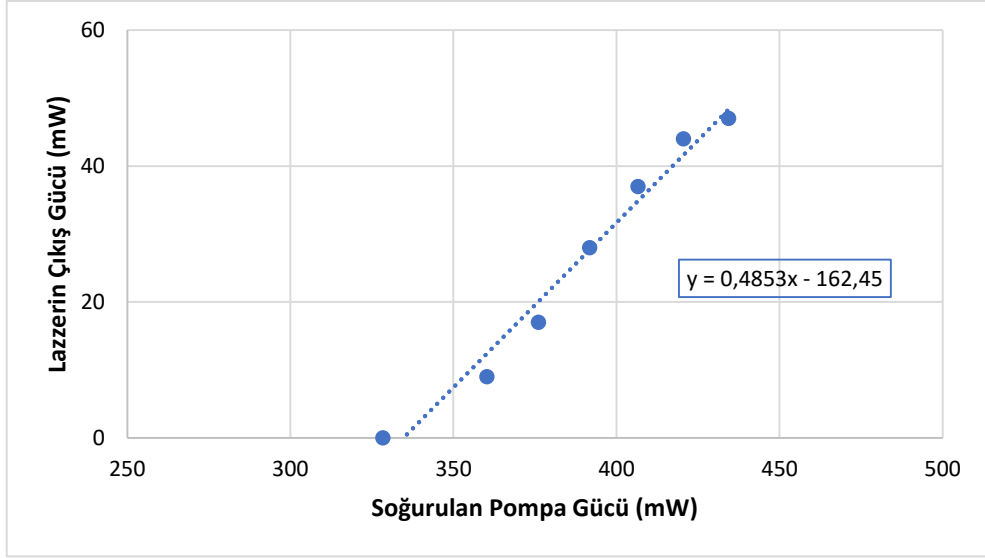
Daha sonra kristal sıcaklığı değiştirilerek 10, 20 ve 25 °C’lerde verim eğrisi ölçümleri de alınmış (Şekil 139, 140, 141) ve 15 °C ile 40 °C arasında en yüksek güç değerleri (Şekil 142) kaydedilmiştir.



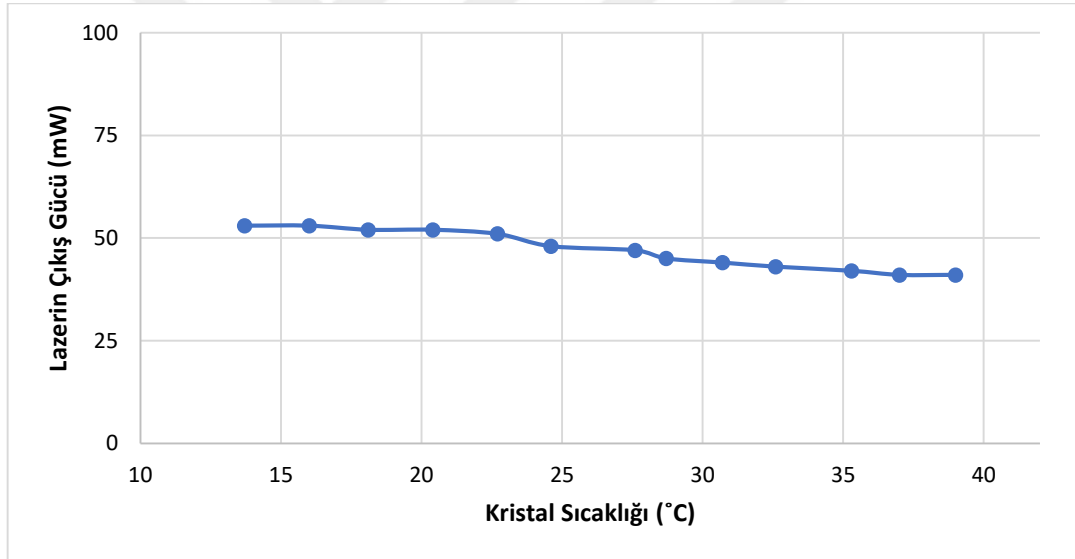
Şekil 139. %2 katkılı 3-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminin 10 °C'deki verim eğrisi



Şekil 140. %2 katkılı 3-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminin 20 °C'deki verim eğrisi



Şekil 141. %2 katkılı 3-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminin 25 °C’deki verim eğrisi



Şekil 142. %2 katkılı 3-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer çıkışının sıcaklığa bağlı değişim grafiği

5.2. Dalga Boyu Değişim Aralığı ve Çift Dalga Boyu Çalışma Sonuçları

Lazer sistemlerine çift kırınımlı prizma eklenmesi ile elde edilen dalga boyu değişim sonuçları ile çift dalga boyunda çalışma sonuçlarının genel tablosu Tablo 3’te sunulmuştur.

Tablo 3. 1,6 μm 'de uyarılan Tm:YAG ve Tm:LuAG lazerlerinin dalga boyu değişim aralığı ve çift dalga boyu çalışma sonuçları

Kristal	Katkı Oranı (%)	Uzunluk (mm)	Dalga Boyu Değişim Aralığı (nm)	Dalga Boyu Değişim Miktarı (nm)	Çift Dalga Boyu (nm)
Tm:YAG	1,5	9	1874-2077	203	1882, 2012
		7	1871-2075	204	1871, 2074
		5	1871-2065	194	1933, 2045
		3	1872-2054	182	1882, 2013
		7	1921-2080	159	1933, 2073
	3	5	1917-2075	158	1934, 2062
		3	1931-2075	144	1941, 2040
		7	1958-2078	120	1989, 2070
	6	5	1933-2084	151	1981, 2071
		3	1936-2071	135	1964, 2045
Tm:LuAG	2	9	1924-2083	159	1933, 2073
		7	1945-2045	100	1965, 2054
		5	1931-2069	138	1946, 2058
		3	1942-2059	117	1965, 2045
		7	1944-2079	135	1962, 2068
	4	5	1937-2075	138	1969, 2059
		3	1956-2058	102	1989, 2055
		7	1960-2076	116	2016, 2050
	6	5	1958-2076	118	2021, 2055
		3	1956-2070	114	1987, 2058

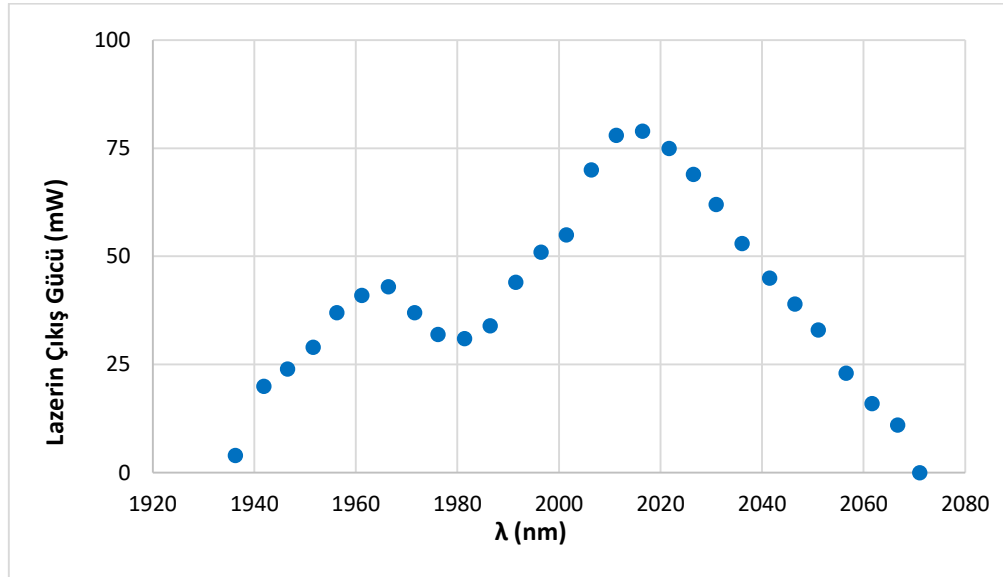
Tablo 3, 1,6 μm bölgesinde uyarılan Tm:YAG ve Tm:LuAG lazer kristallerinin dalga boyu değişim aralığını, dalga boyu değişim miktarını ve çift dalga boyu çalışma özelliklerini içermektedir. Tm:YAG ve Tm:LuAG lazerleri, farklı katkı oranlarında ve kristal uzunluklarında incelenmiş olup, her iki kristal için dalga boyu değişim aralığı ve çift dalga boyu değerleri detaylandırılmıştır. Tm:YAG kristali için en geniş dalga boyu değişim aralığı, %1,5 katkı oranı ve 7-mm uzunlukta (1871-2075 nm, 204 nm değişim miktarı) gözlenmiştir. Bununla birlikte, Tm:LuAG kristali genellikle daha dar bir değişim aralığı sunmakta olup en büyük değişim miktarı %3 katkı oranı ve 9-mm uzunlukta (1924-2083 nm, 159 nm değişim miktarı) elde edilmiştir. Bu durum, Tm:YAG kristalinin daha geniş bir dalga boyu ayarlanabilirliği sunduğunu göstermektedir. Çift dalga boyu çalışma sonuçları, iki lazer türü arasında belirgin farklılıklar göstermektedir. Özellikle Tm:YAG kristali için çift dalga boyları 1882-2012 nm ile 1941-2040 nm arasında değişirken, Tm:LuAG kristali için bu değerler 1965-2054 nm ile 1987-2058 nm arasında yoğunlaşmaktadır. Bu da Tm:LuAG

kristalinin daha uzun dalga boylarında çift dalga boyu üretebildiğini ortaya koymaktadır. Katkı oranı ve kristal uzunluğu, dalga boyu değişim aralığı üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Genel olarak, daha yüksek katkı oranlarının dalga boyu değişim miktarını azalttığı gözlemlenmiştir. Tm:YAG için %1,5 katkı oranında geniş değişim aralıkları elde edilirken, %6 katkı oranında (1936-2071 nm, 135 nm değişim miktarı) daha dar bir değişim gözlenmiştir. Tm:LuAG için benzer şekilde, katkı oranı arttıkça değişim miktarında azalma görülmektedir.

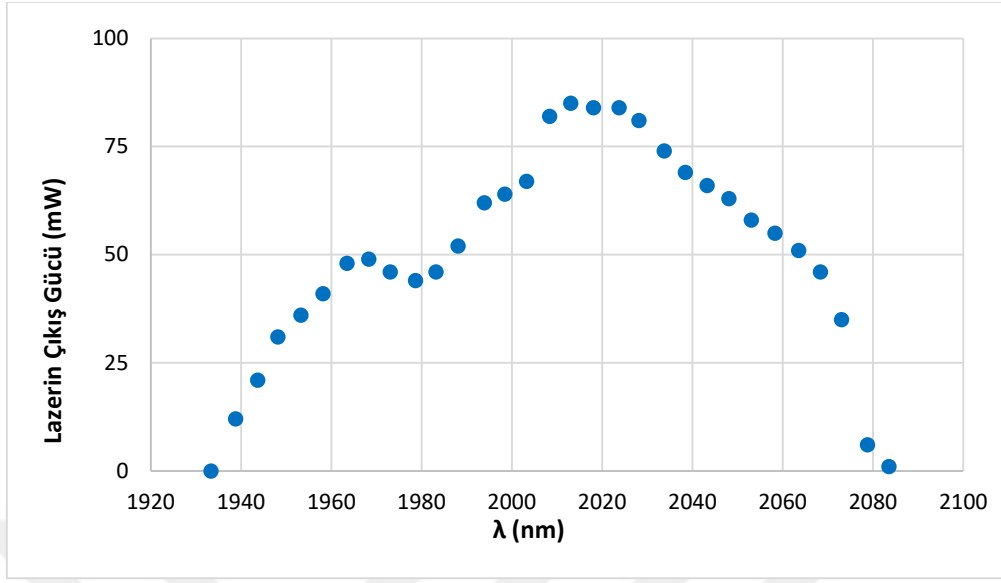
Bu veriler, Tm:YAG kristalinin geniş ayarlanabilir dalga boyu aralığı ile daha esnek bir lazer kaynağı sunduğunu, Tm:LuAG kristalinin ise daha uzun dalga boylarında çift dalga boyu üretimi açısından avantaj sağlayabileceğini göstermektedir. Çalışma, katkı oranı ve kristal uzunluğunun lazer performansı üzerindeki etkisini ortaya koyarak, farklı uygulamalar için uygun lazer kaynağının seçiminde rehberlik edebilecek önemli bulgular sunmaktadır.

5.2.1. Dalga Boyu Bileşim Grafikleri

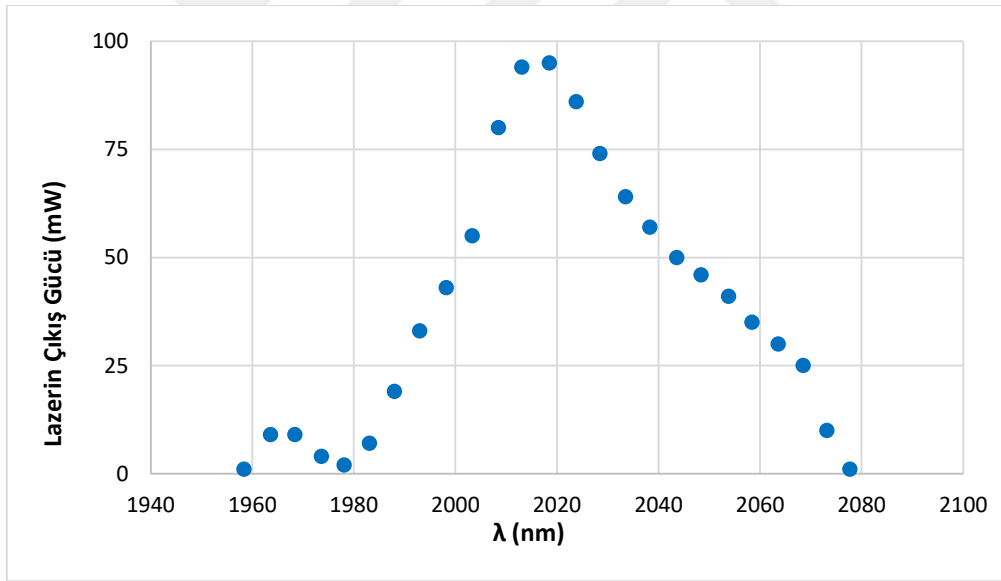
1,6 μm 'de uyarılan Tm:YAG ve Tm:LuAG lazer sistemlerinin dalga boyu değişim grafikleri Şekil 143 - 162 arasında sunulmuştur.



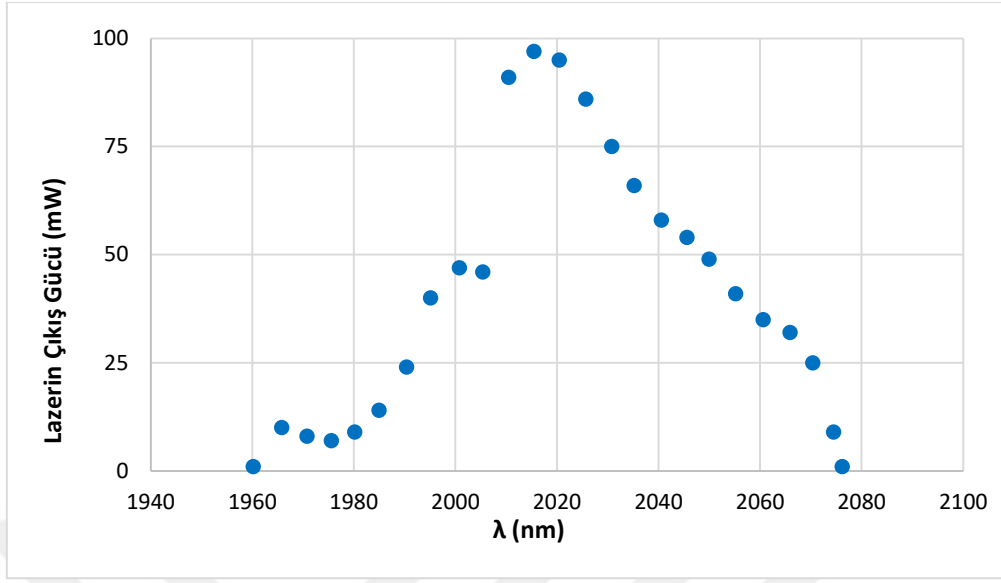
Şekil 143. %6 katkılı 3-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminin dalga boyu değişim aralığı



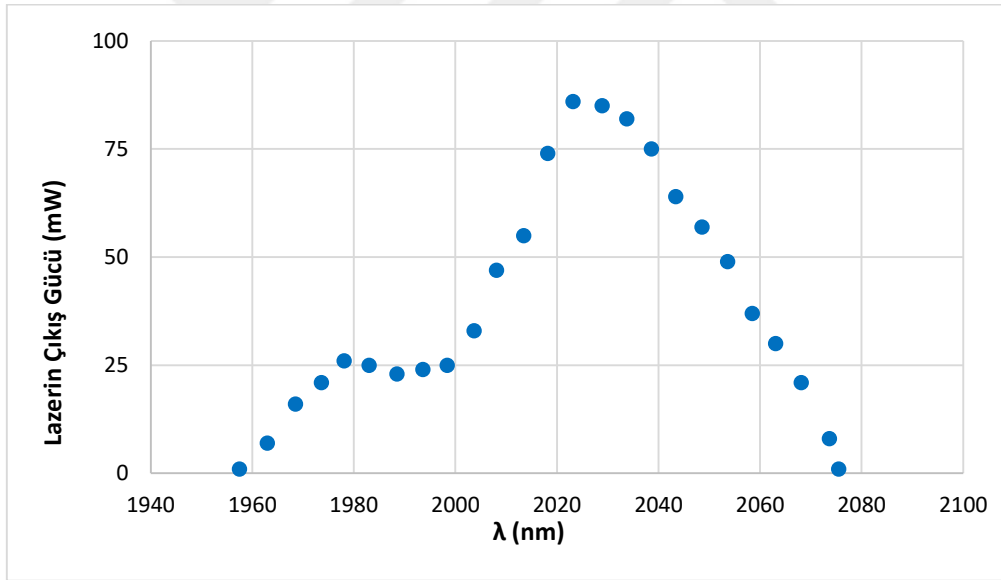
Şekil 144. %6 katkılı 5-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminin dalga boyu değişim aralığı



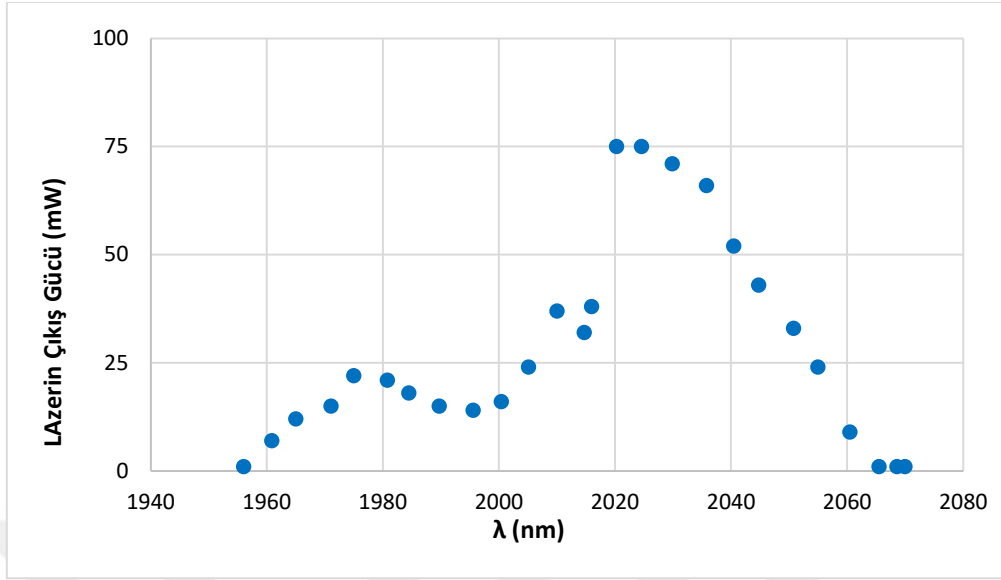
Şekil 145. %6 katkılı 7-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminin dalga boyu değişim aralığı



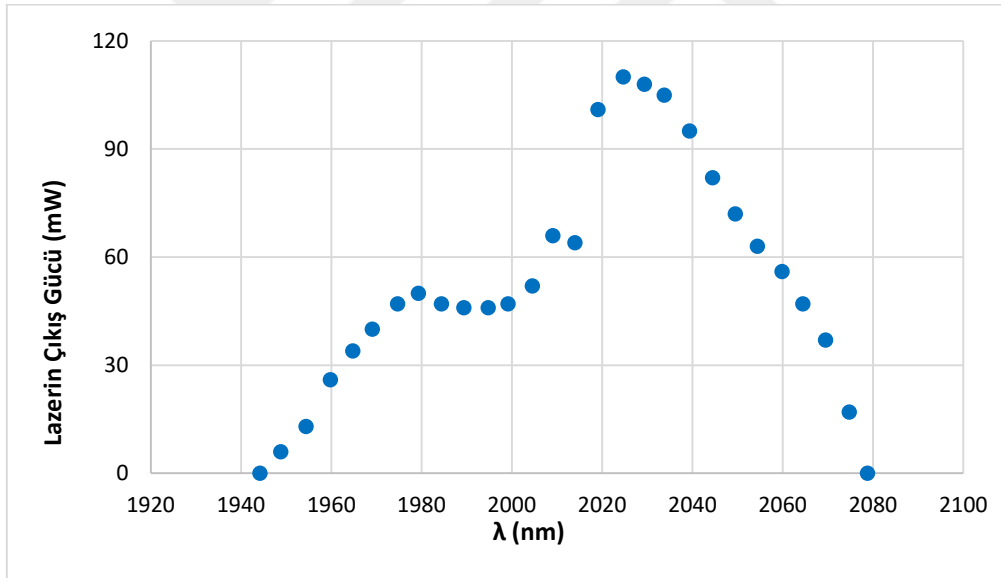
Şekil 146. %6 katkılı 7-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminin dalga boyu değişim aralığı



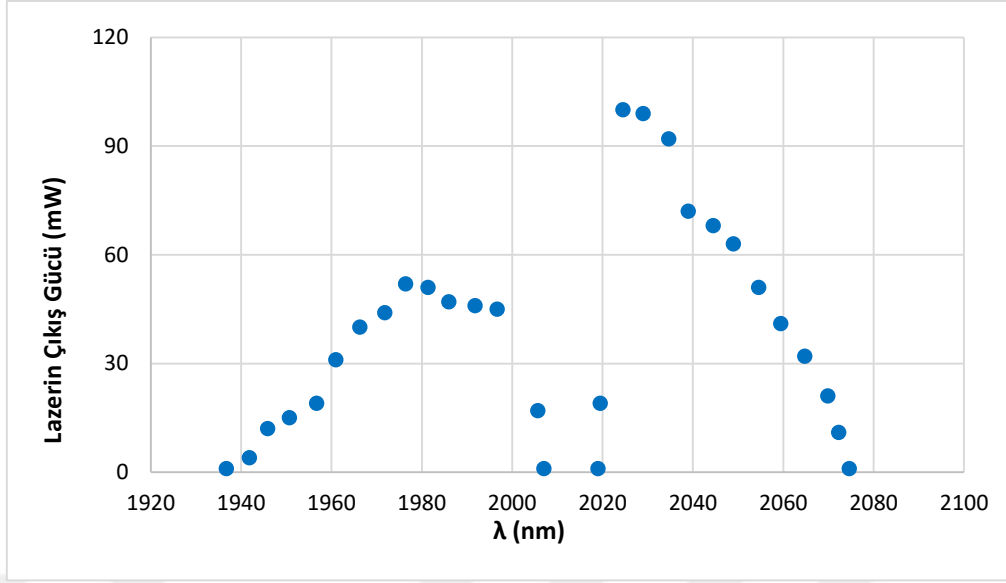
Şekil 147. %6 katkılı 5-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminin dalga boyu değişim aralığı



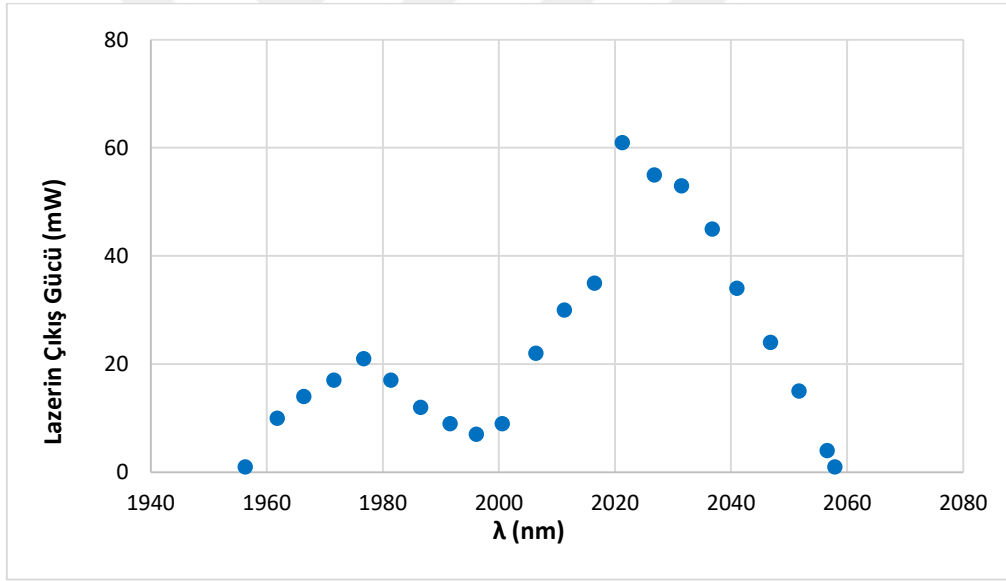
Şekil 148. %6 katkılı 3-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminin dalga boyu değişim aralığı



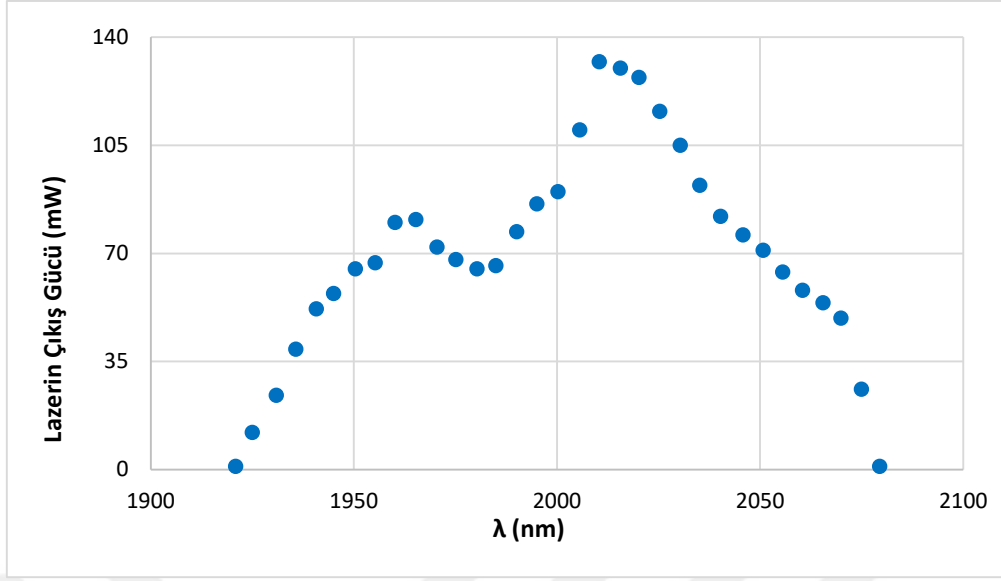
Şekil 149. %4 katkılı 7-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminin dalga boyu değişim aralığı



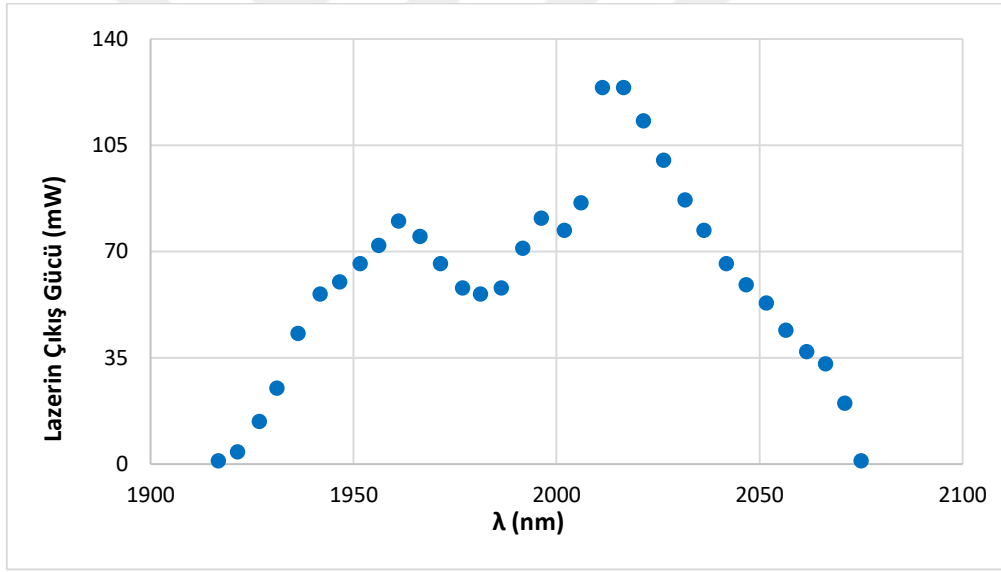
Şekil 150. %4 katkılı 5-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminin dalga boyu değişim aralığı



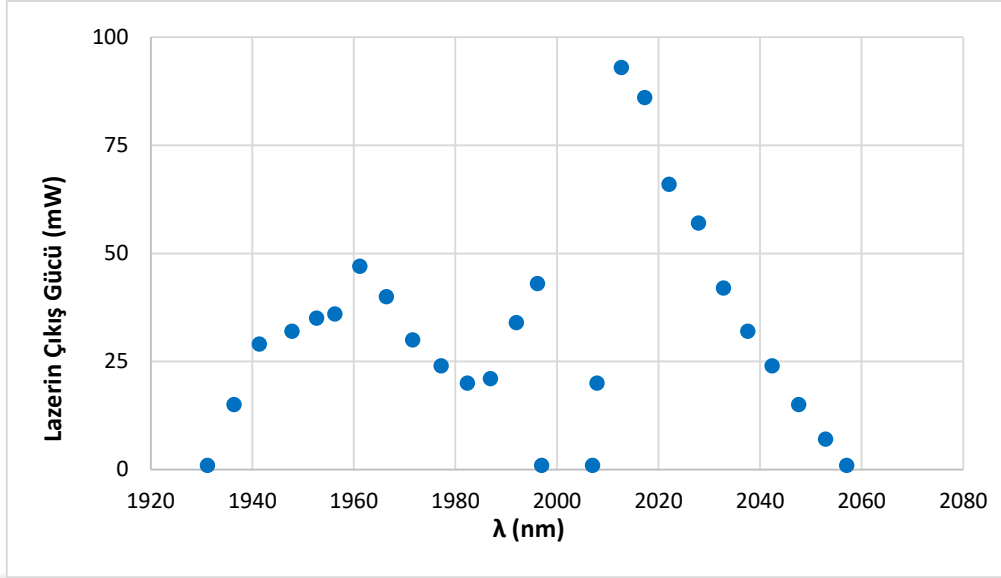
Şekil 151. %4 katkılı 3-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminin dalga boyu değişim aralığı



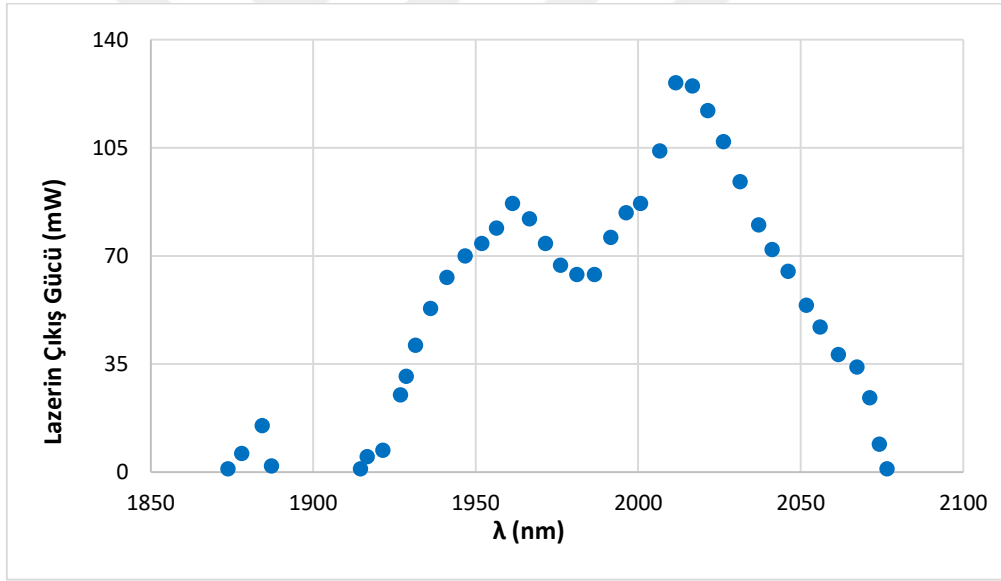
Şekil 152. %3 katkılı 7-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminin dalga boyu değişim aralığı



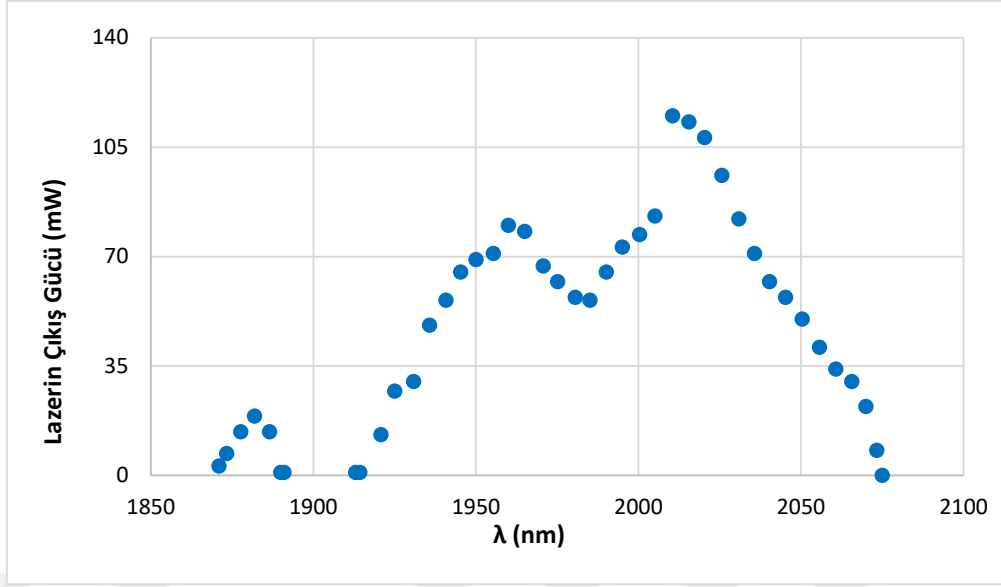
Şekil 153. %3 katkılı 5-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminin dalga boyu değişim aralığı



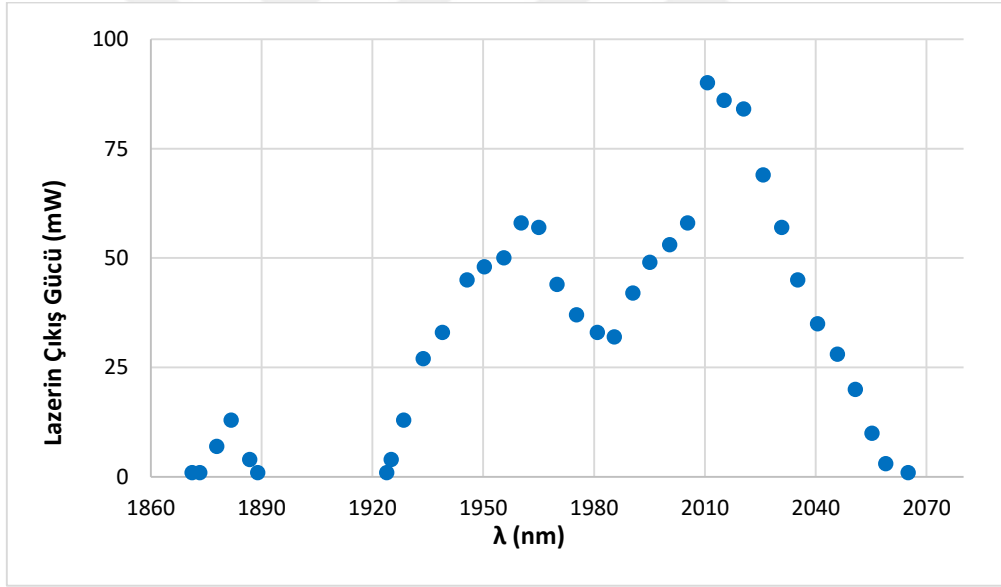
Şekil 154. %3 katkılı 3-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminin dalga boyu değişim aralığı



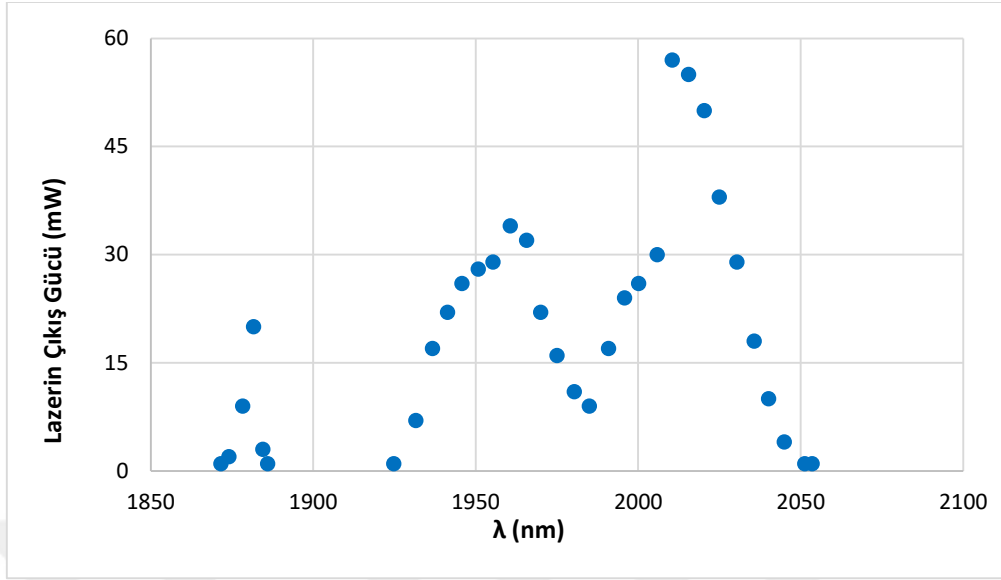
Şekil 155. %1,5 katkılı 9-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminin dalga boyu değişim aralığı



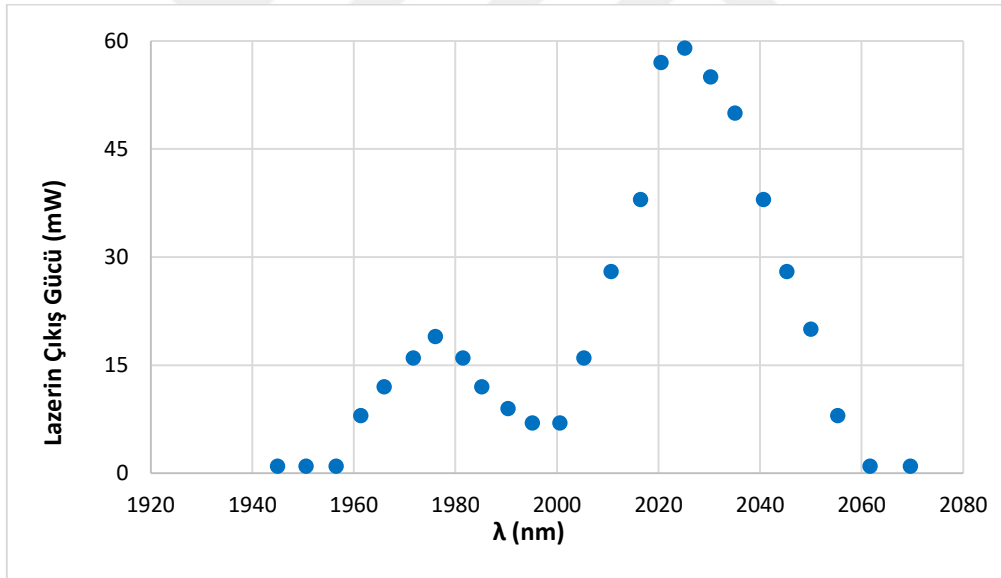
Şekil 156. %1,5 katkılı 7-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminin dalga boyu değişim aralığı



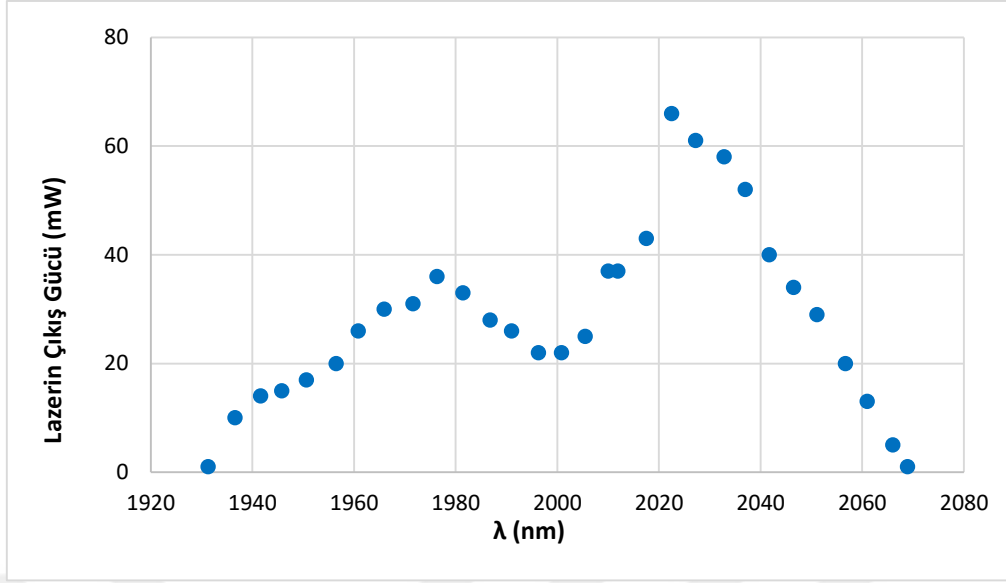
Şekil 157. %1,5 katkılı 5-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminin dalga boyu değişim aralığı



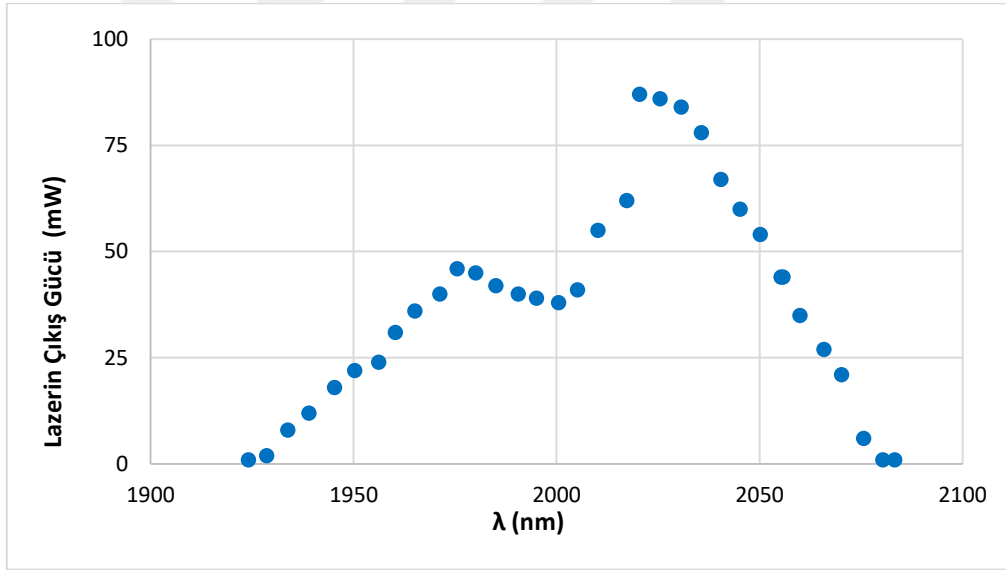
Şekil 158. %1,5 katkılı 3-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminin dalga boyu değişim aralığı



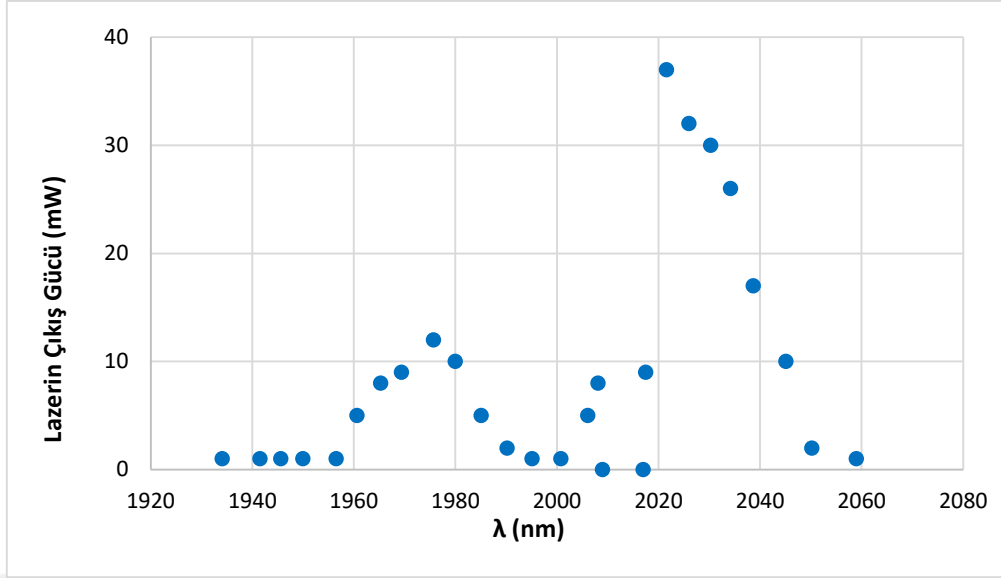
Şekil 159. %2 katkılı 7-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminin dalga boyu değişim aralığı

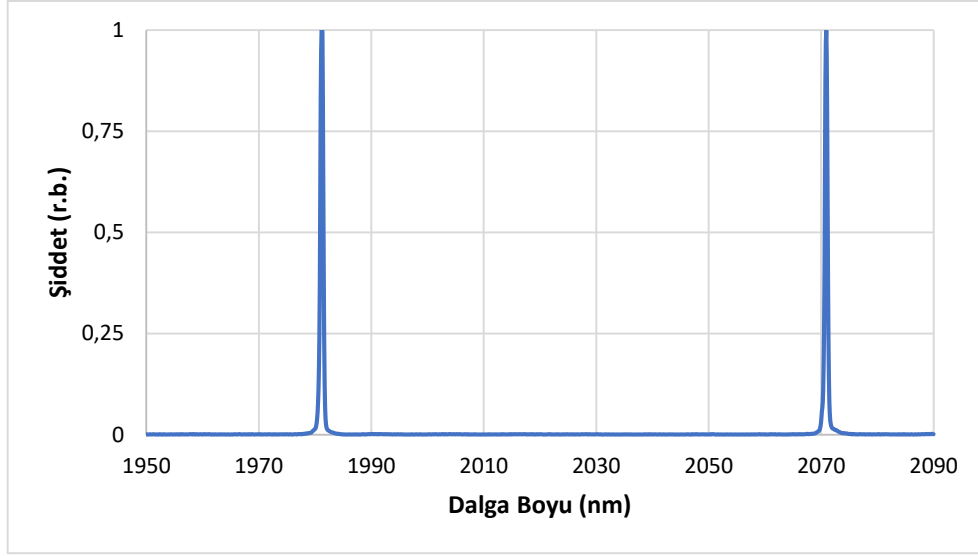


Şekil 160. %2 katkılı 5-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminin dalga boyu değişim aralığı

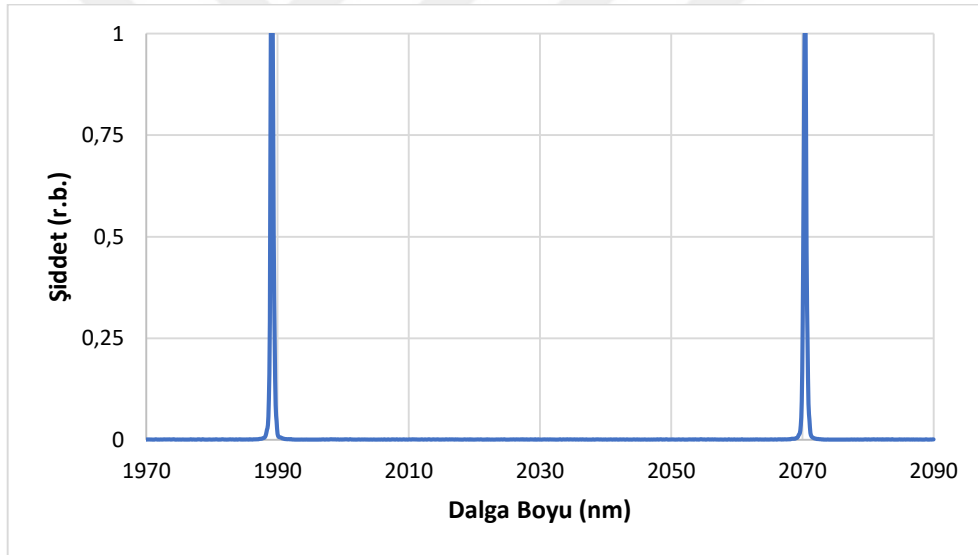


Şekil 161. %2 katkılı 9-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminin dalga boyu değişim aralığı

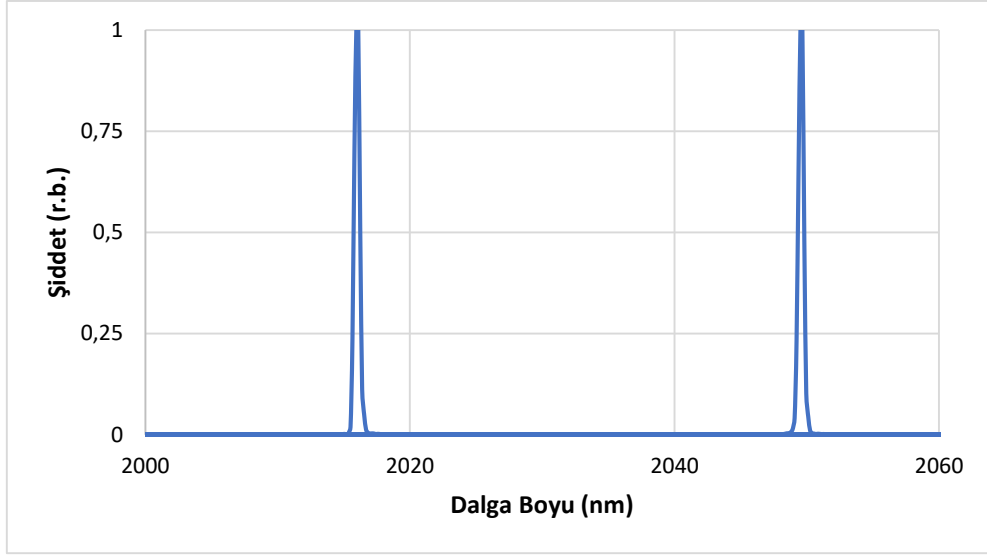




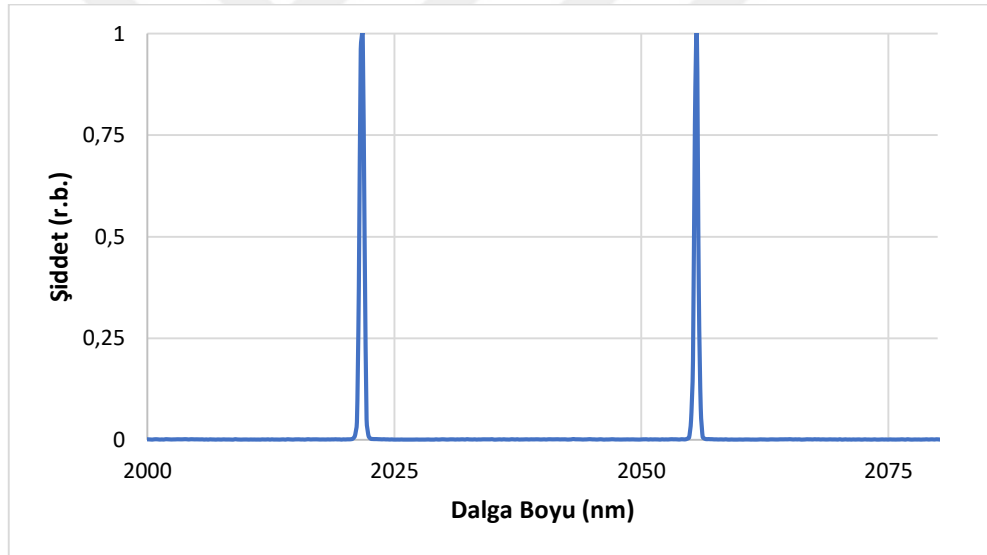
Şekil 164. %6 katkılı 5-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminde elde edilen çift dalga boyu çalışma durumunun spektrumu



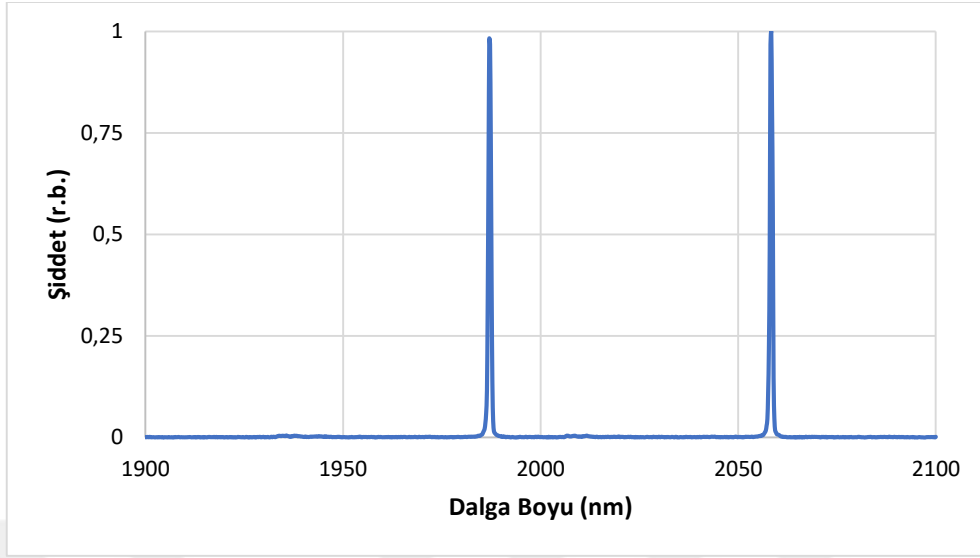
Şekil 165. %6 katkılı 7-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminde elde edilen çift dalga boyu çalışma durumunun spektrumu



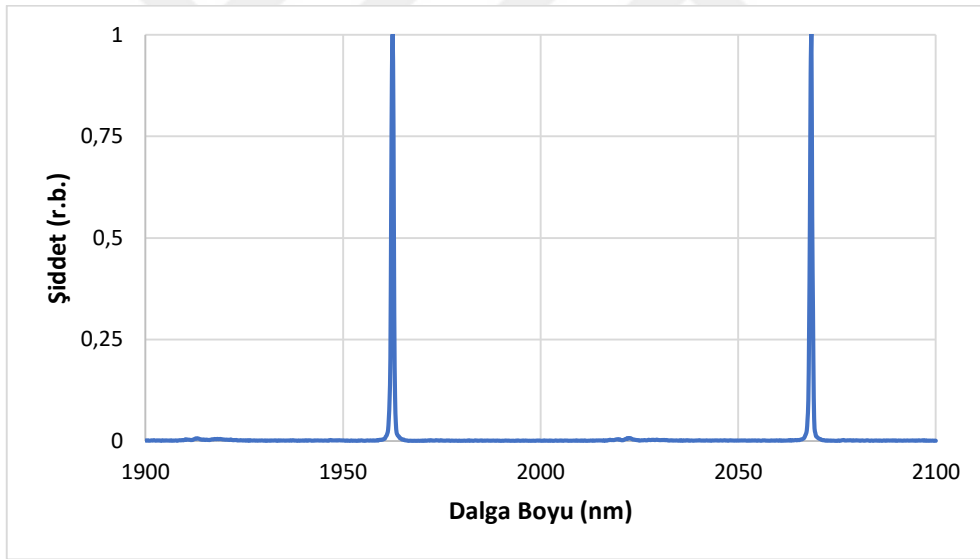
Şekil 166. %6 katkılı 7-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminde elde edilen çift dalga boyu çalışma durumunun spektrumu



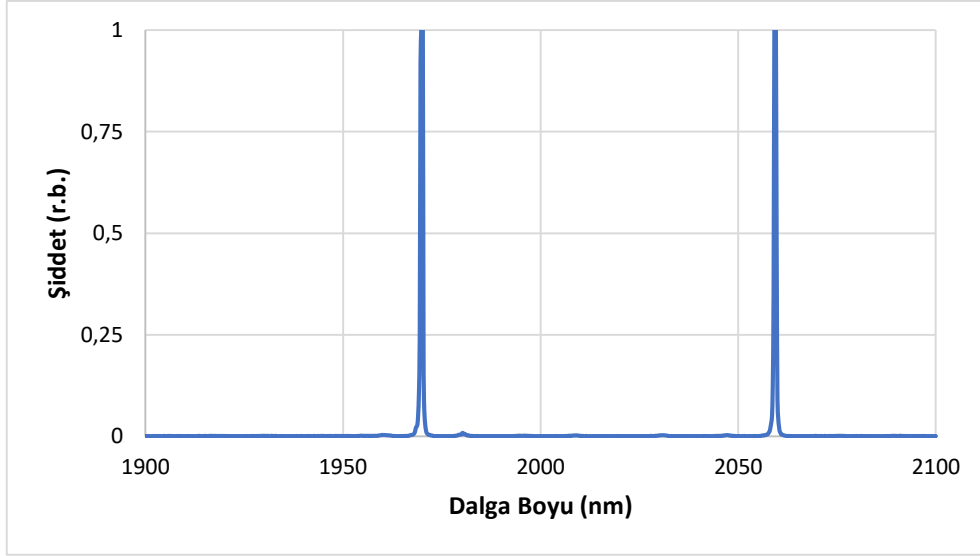
Şekil 167. %6 katkılı 5-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminde elde edilen çift dalga boyu çalışma durumunun spektrumu



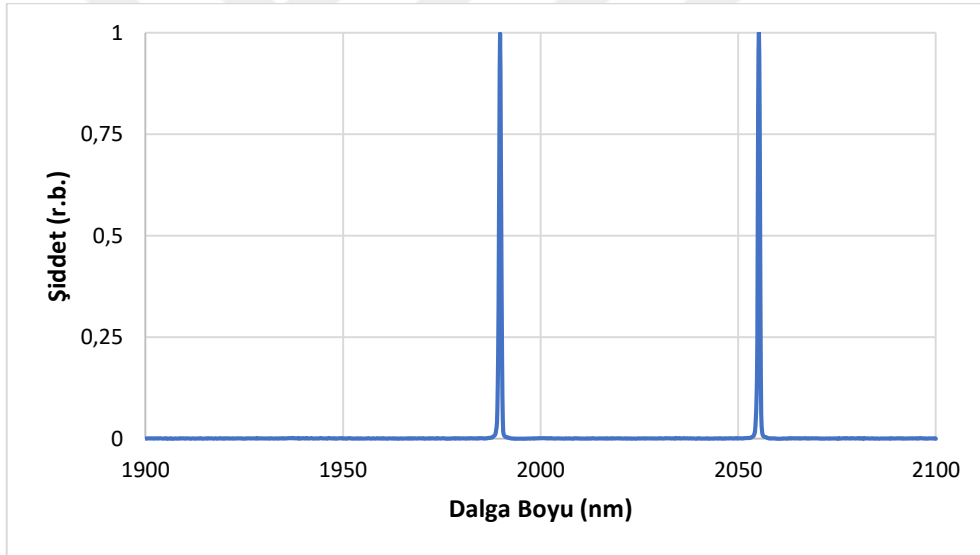
Şekil 168. %6 katkılı 3-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminde elde edilen çift dalga boyu çalışma durumunun spektrumu



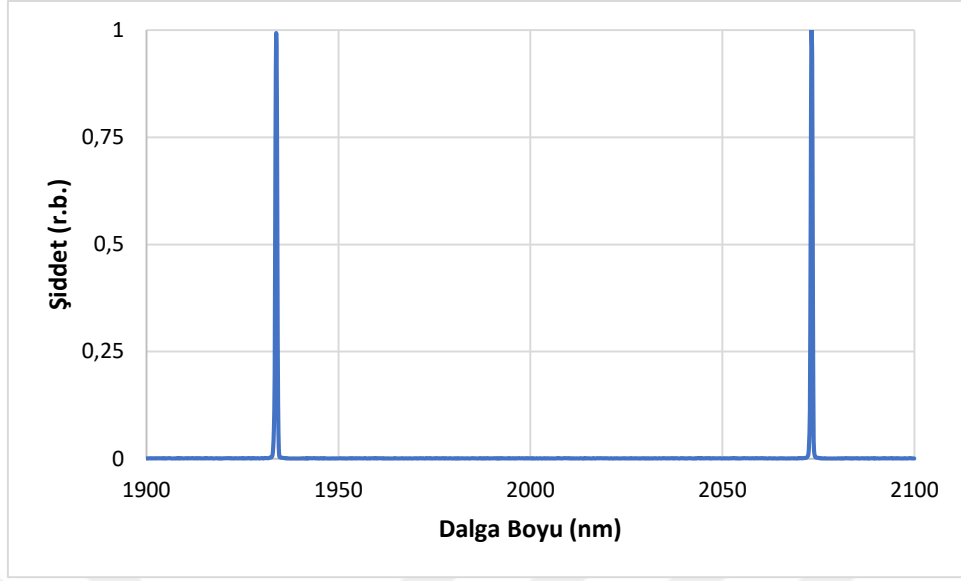
Şekil 169. %4 katkılı 7-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminde elde edilen çift dalga boyu çalışma durumunun spektrumu



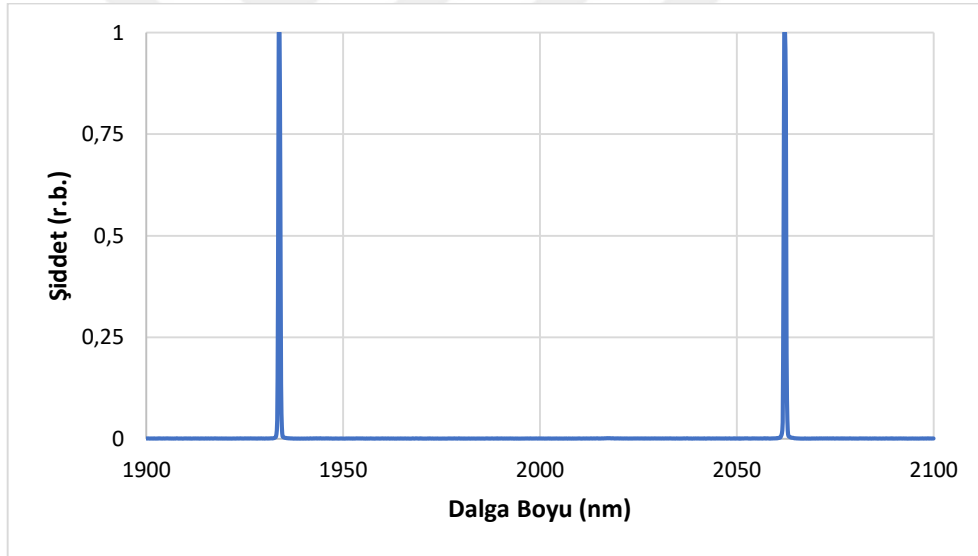
Şekil 170. %4 katkılı 5-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminde elde edilen çift dalga boyu çalışma durumunun spektrumu



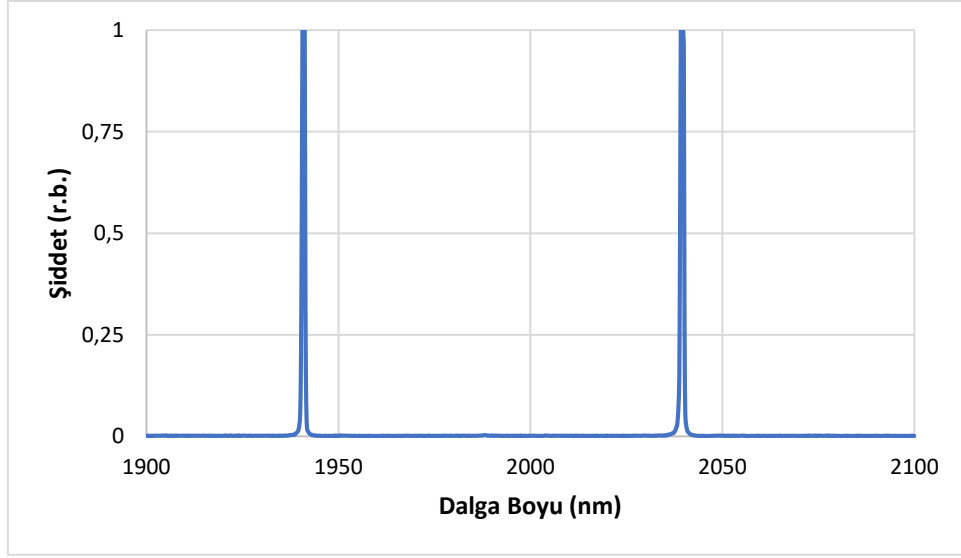
Şekil 171. %4 katkılı 3-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminde elde edilen çift dalga boyu çalışma durumunun spektrumu



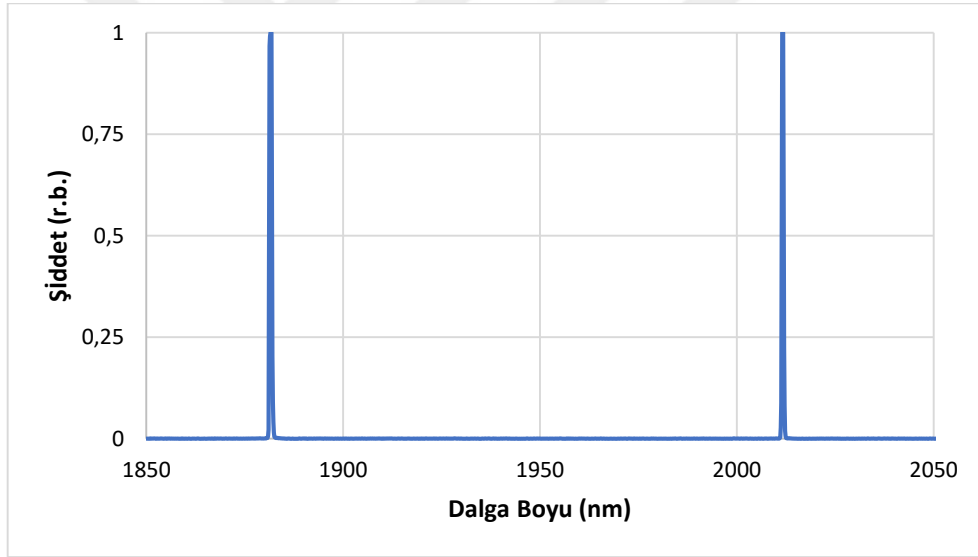
Şekil 172. %3 katkılı 7-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminde elde edilen çift dalga boyu çalışma durumunun spektrumu



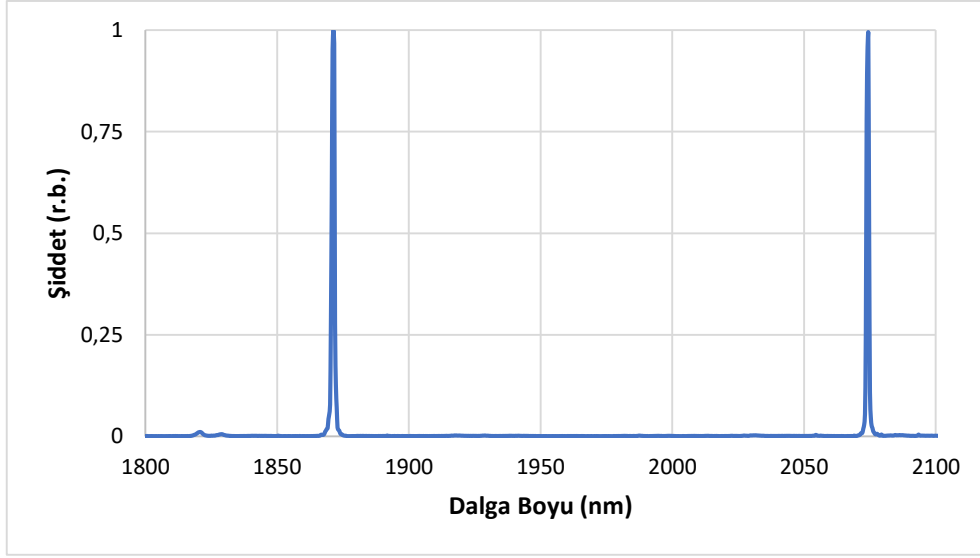
Şekil 173. %3 katkılı 5-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminde elde edilen çift dalga boyu çalışma durumunun spektrumu



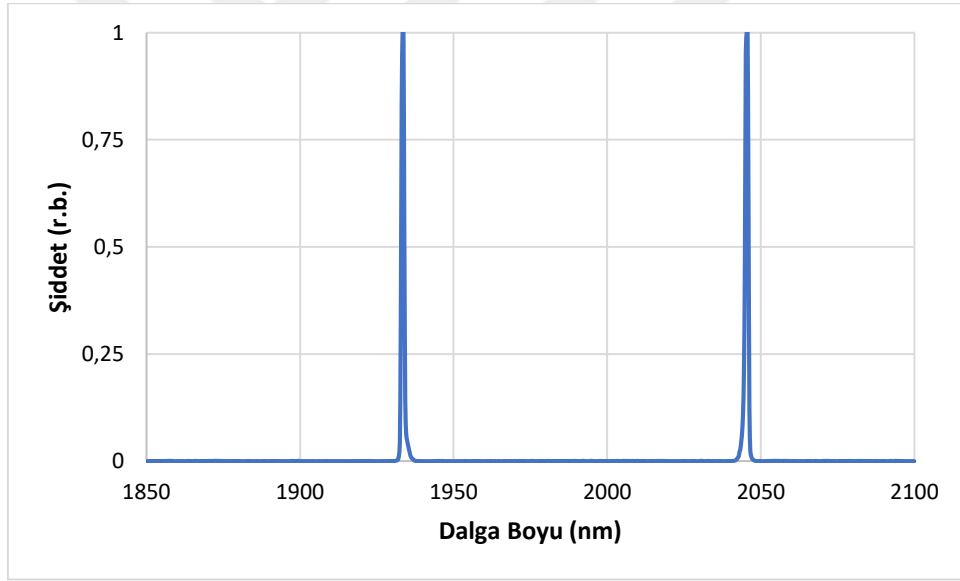
Şekil 174. %3 katkılı 3-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminde elde edilen çift dalga boyu çalışma durumunun spektrumu



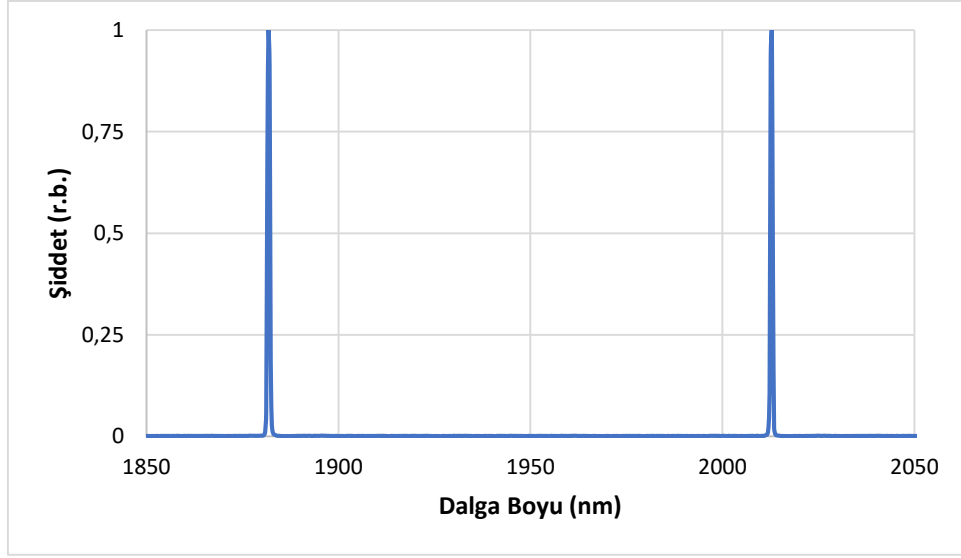
Şekil 175. %1,5 katkılı 9-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminde elde edilen çift dalga boyu çalışma durumunun spektrumu



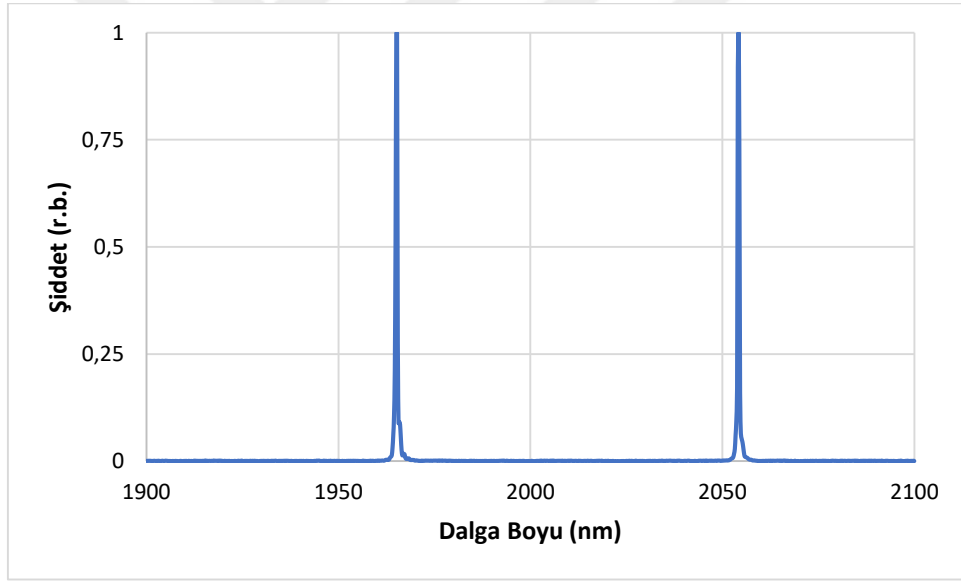
Şekil 176. %1,5 katkılı 7-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminde elde edilen çift dalga boyu çalışma durumunun spektrumu



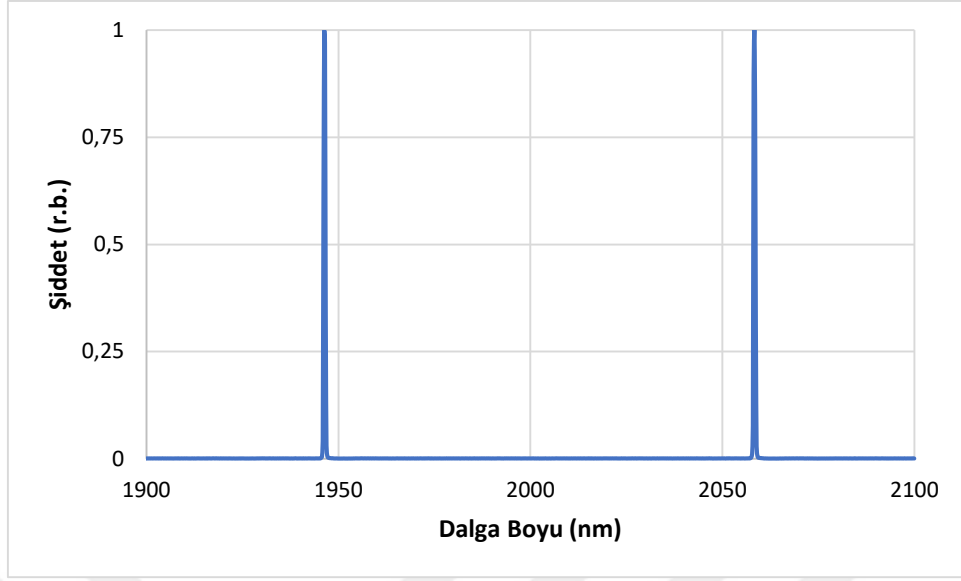
Şekil 177. %1,5 katkılı 5-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminde elde edilen çift dalga boyu çalışma durumunun spektrumu



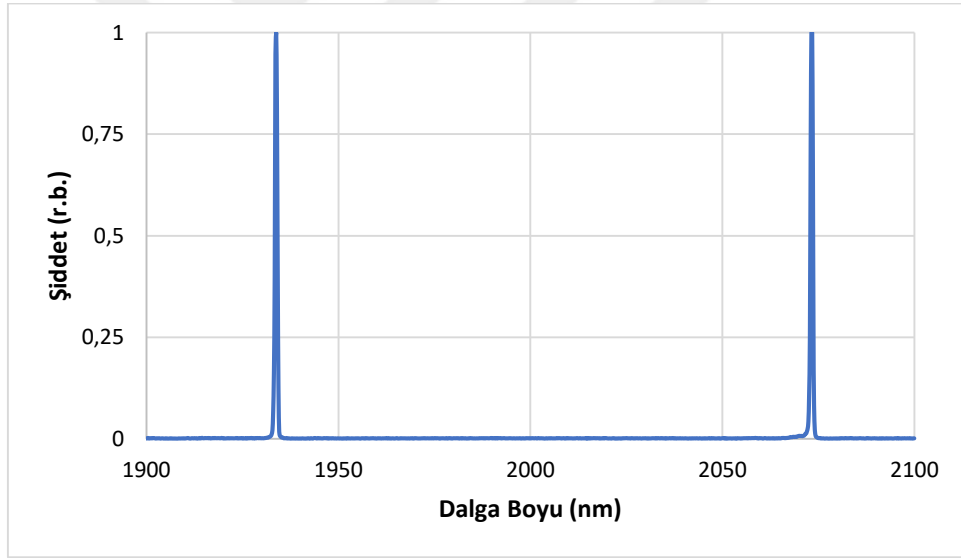
Şekil 178. %1,5 katkılı 3-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminde elde edilen çift dalga boyu çalışma durumunun spektrumu



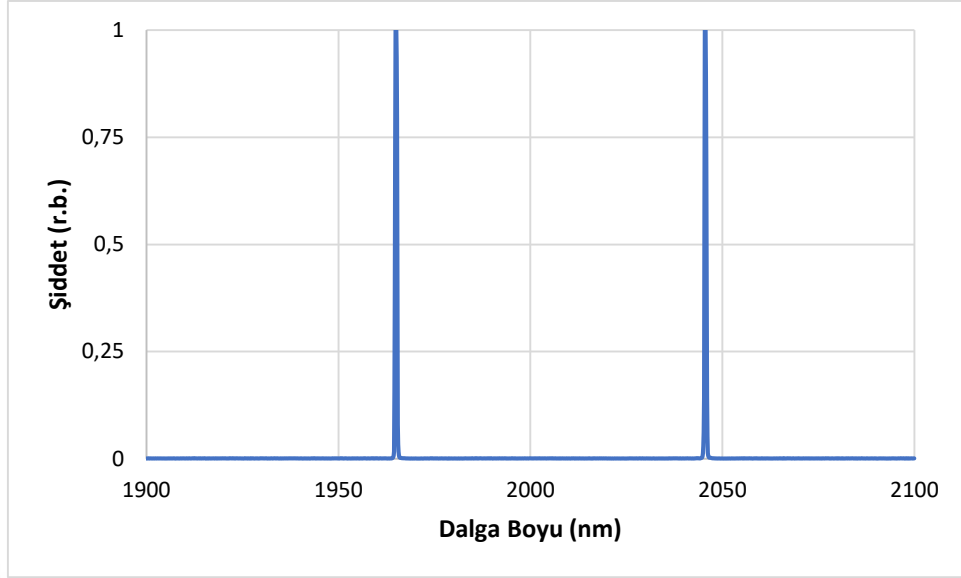
Şekil 179. %2 katkılı 7-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminde elde edilen çift dalga boyu çalışma durumunun spektrumu



Şekil 180. %2 katkılı 5-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminde elde edilen çift dalga boyu çalışma durumunun spektrumu



Şekil 181. %2 katkılı 9-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminde elde edilen çift dalga boyu çalışma durumunun spektrumu



Şekil 182. %1,5 katkılı 3-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminde elde edilen çift dalga boyu çalışma durumunun spektrumu

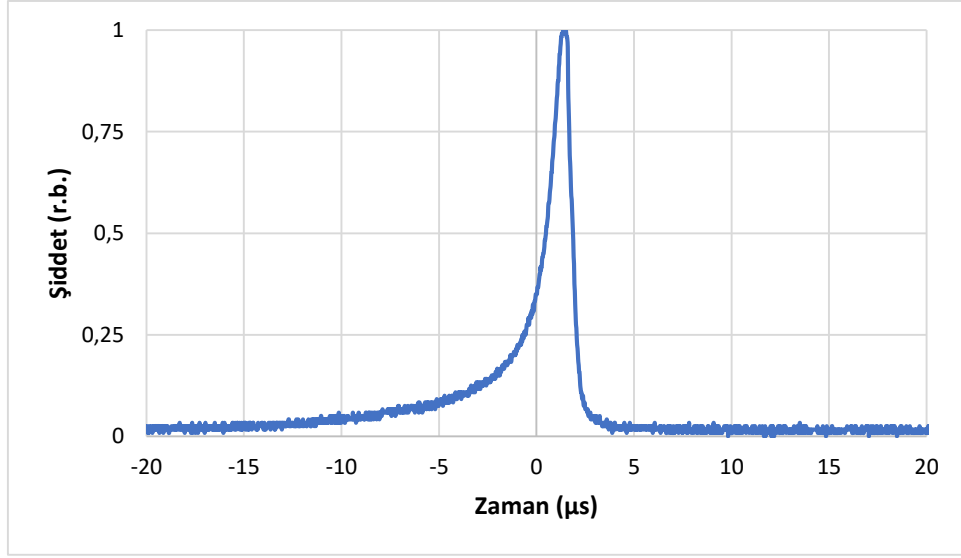
5.3. Darbeli Rejim Sonuçları

Sistemlere eklenen SESAM sayesinde lazerlerin Q-anahtarlamalı rejimde çalışması sağlanmıştır. Elde edilen sonuçlar Tablo 4’te sunulmuş olup her bir sistemdeki grafiksel sonuç ise Şekil 183 - 222 arasında görülmektedir.

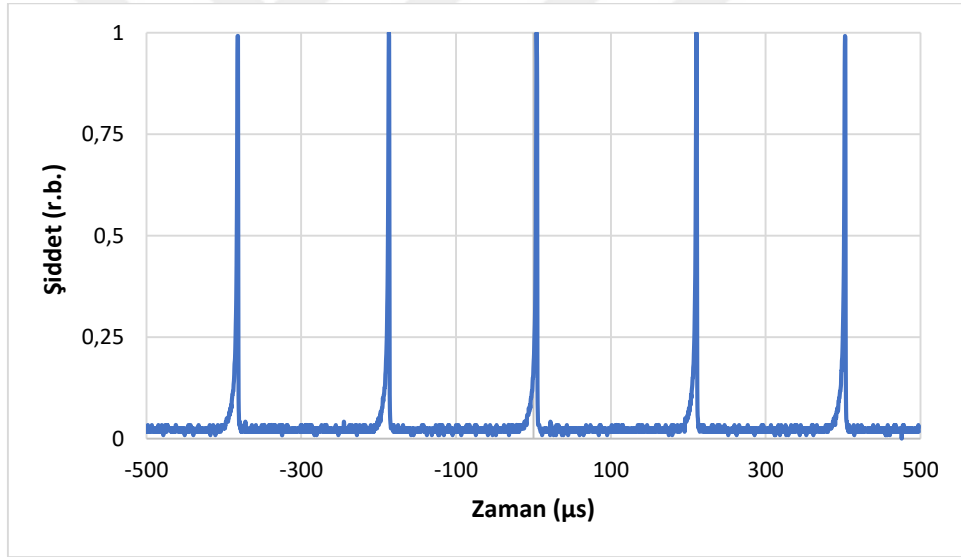
Tablo 4. 1,6 μm 'de uyarılan Q-anahtarlama Tm:YAG ve Tm:LuAG lazerlerinin sonuçları

Kristal	Katkı Oranı (%)	Uzunluk (mm)	Çıkış gücü (mW)	Genişlik (μs)	Frekans (kHz)	Tepe Gücü (mW)	Darbe Enerjisi (μJ)
Tm:YAG	1,5	9	20	1,31	12,88	1185	1,55
		7	17	1,09	7,68	2030	2,21
		5	27	3,15	12,82	668	2,11
		3	10	4,39	12,77	178	0,78
	3	7	12	1,69	9,12	778	1,32
		5	31	2,17	22,54	634	1,38
		3	10	3,61	15,50	179	0,64
		7	18	3,16	7,14	797	2,52
	6	5	25	2,66	18,71	502	1,34
		3	12	1,36	5,09	1731	2,35
Tm:LuAG	2	9	24	3,97	19,37	312	1,24
		7	15	2,26	27,46	242	0,55
		5	10	3,11	13,32	241	0,75
		3	4	15,24	23,10	11,36	0,17
	4	7	8	1,99	7,12	564	1,12
		5	20	5,42	16,28	226	1,22
		3	8	4,03	13,39	166	0,67
		7	17	3,04	15,73	355	1,08
	6	5	12	3,93	8,44	362	1,42
		3	11	5,54	10,74	184	1,02

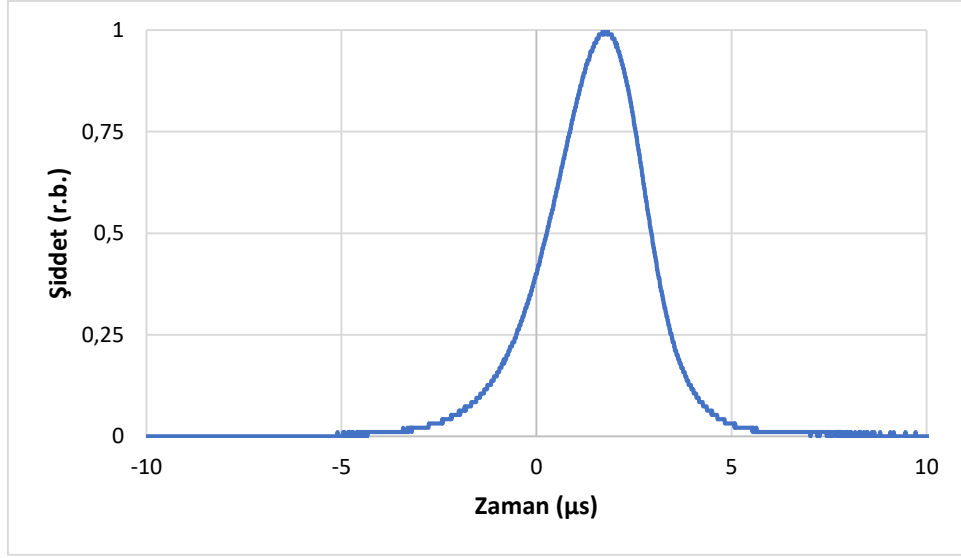
Tablo incelendiğinde, Tm:YAG kristali ortalama daha yüksek çıkış gücü sunarken, Tm:LuAG kristali daha düşük çıkış gücüne sahiptir. Tm:YAG için en yüksek çıkış gücü, %3 katkı oranında ve 5-mm uzunluğunda (31 mW) elde edilmiştir. Tm:LuAG kristalinde ise en yüksek çıkış gücü, %2 katkı oranında ve 9-mm uzunluğunda (24 mW) gözlenmiştir. Darbe genişliği açısından değerlendirildiğinde, Tm:YAG kristali, düşük katkı oranında (%1,5) düşük genişlikte darbe üretmiştir. Tm:YAG kristali genellikle daha kısa darbe genişlikleri içerir.



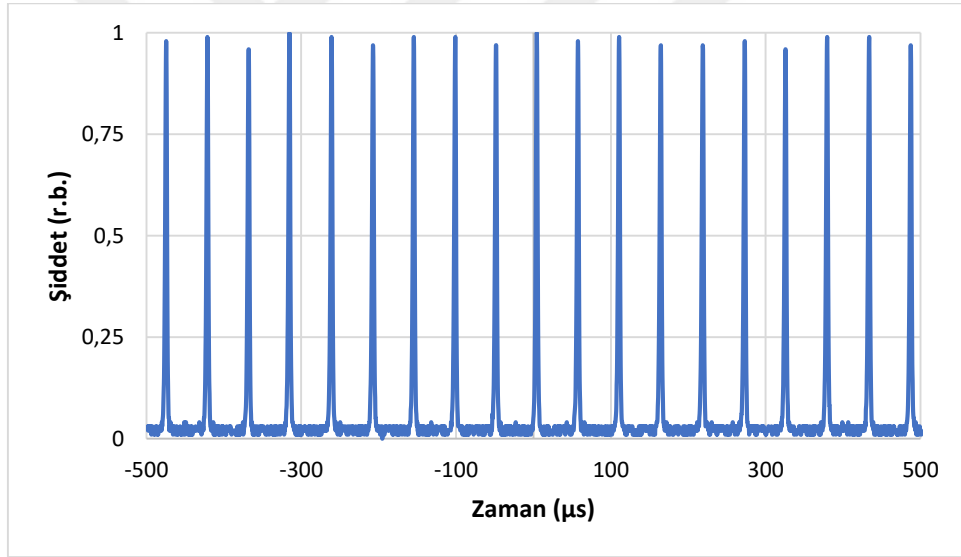
Şekil 183. %6 katkılı 3-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminde elde edilen Q-anahtarlama darbelerinin genişliği



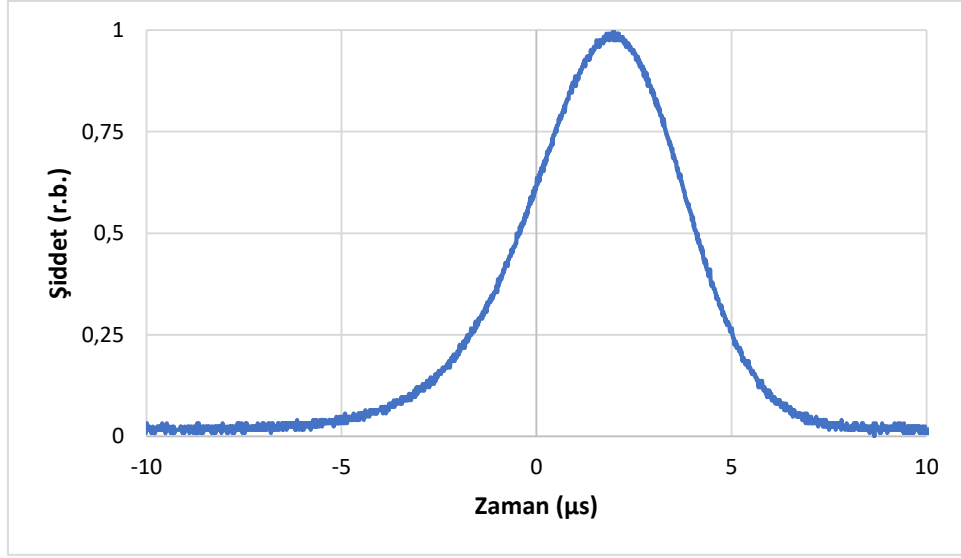
Şekil 184. %6 katkılı 3-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminde elde edilen Q-anahtarlama darbelerinin periyodu



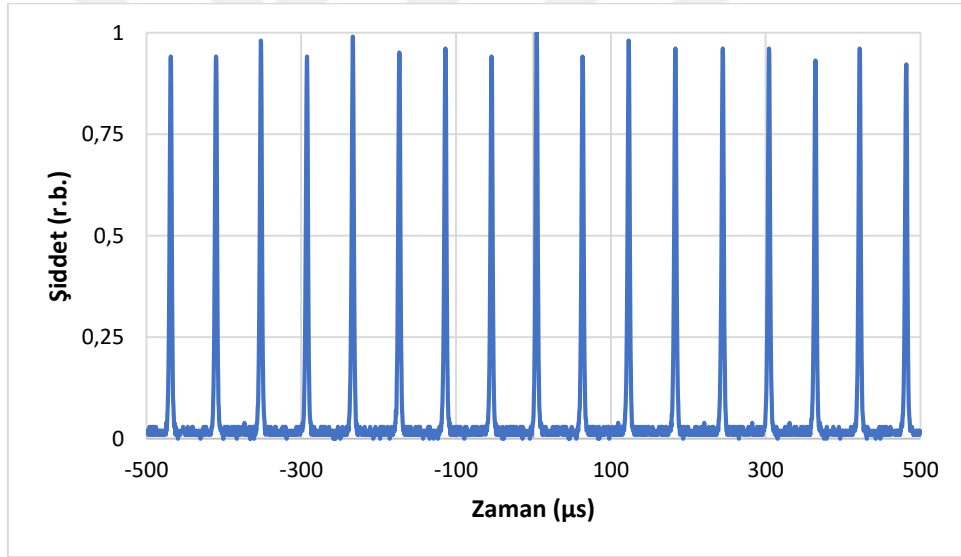
Şekil 185. %6 katkılı 5-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminde elde edilen Q-anahtarlama darbelerin genişliği



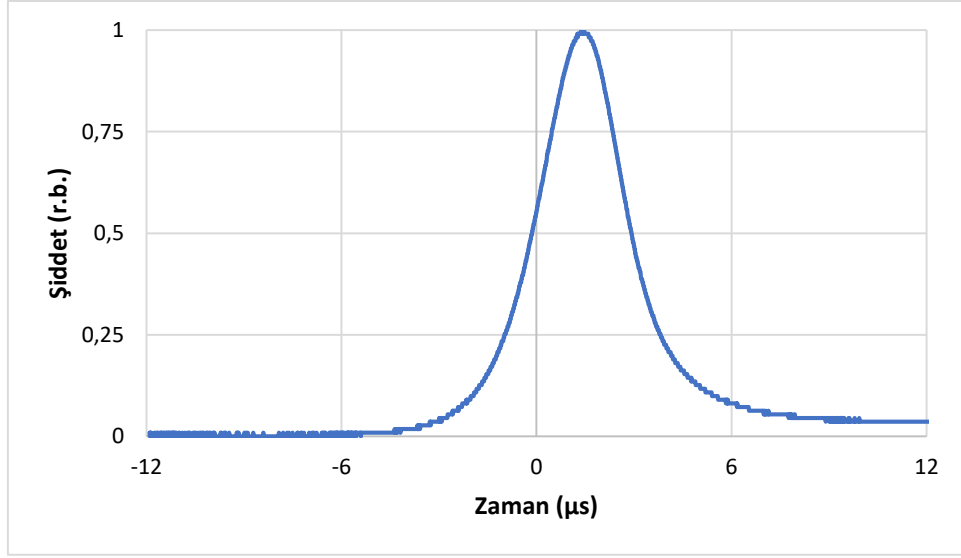
Şekil 186. %6 katkılı 5-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminde elde edilen Q-anahtarlama darbelerin



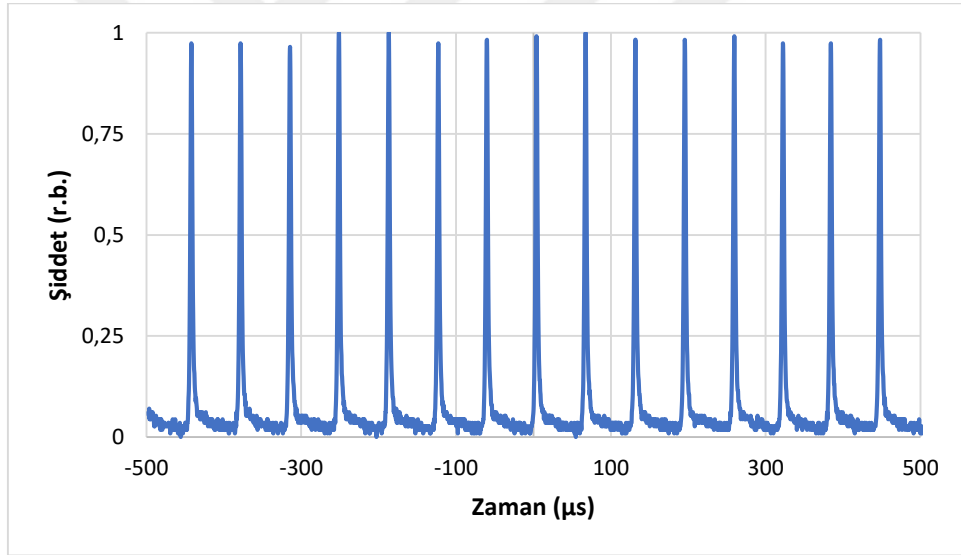
Şekil 187. %6 katkılı 7-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminde elde edilen Q-anahtarlama darbelerinin genişliği



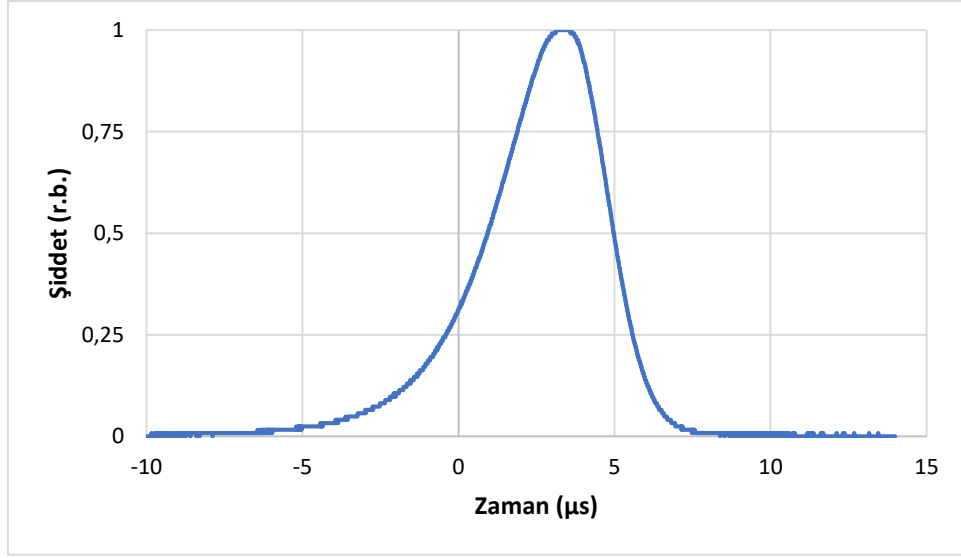
Şekil 188. %6 katkılı 7-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminde elde edilen Q-anahtarlama darbelerinin periyodu



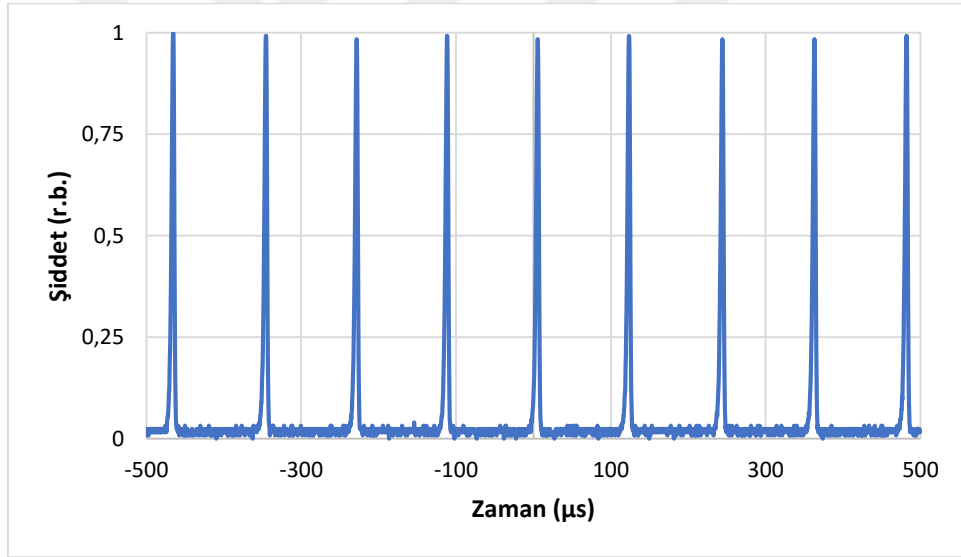
Şekil 189. %6 katkılı 7-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminde elde edilen Q-anahtarlama darbelerinin genişliği



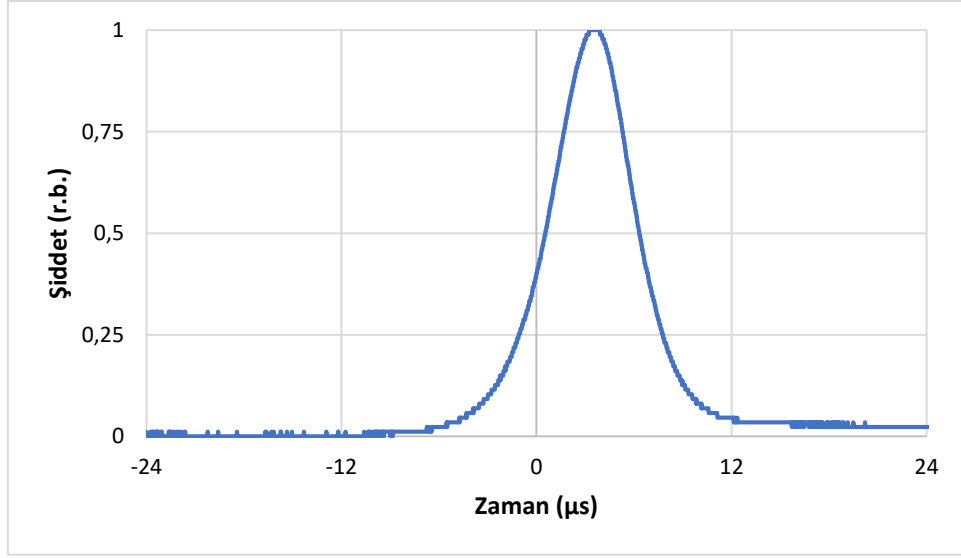
Şekil 190. %6 katkılı 7-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminde elde edilen Q-anahtarlama darbelerinin periyodu



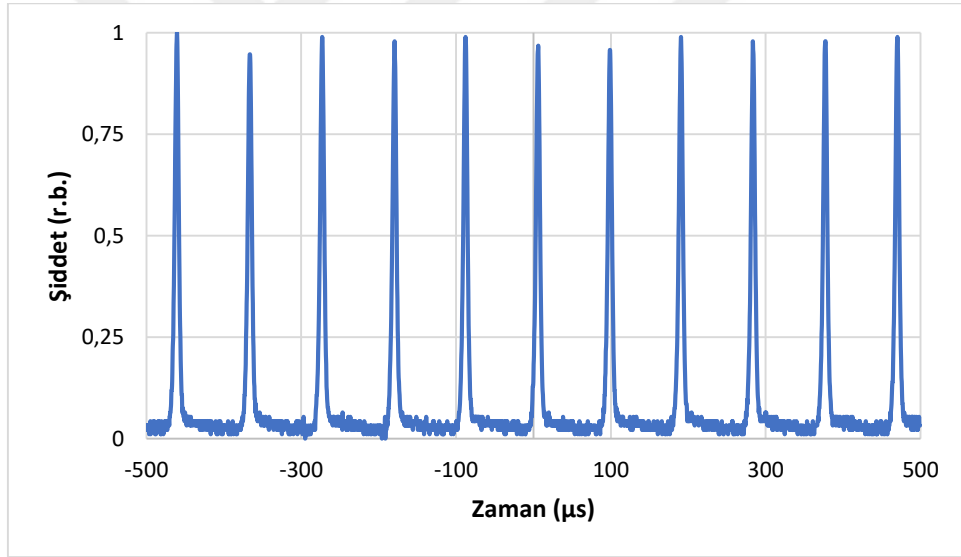
Şekil 191. %6 katkılı 5-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminde elde edilen Q-anahtarlama darbelerinin genişliği



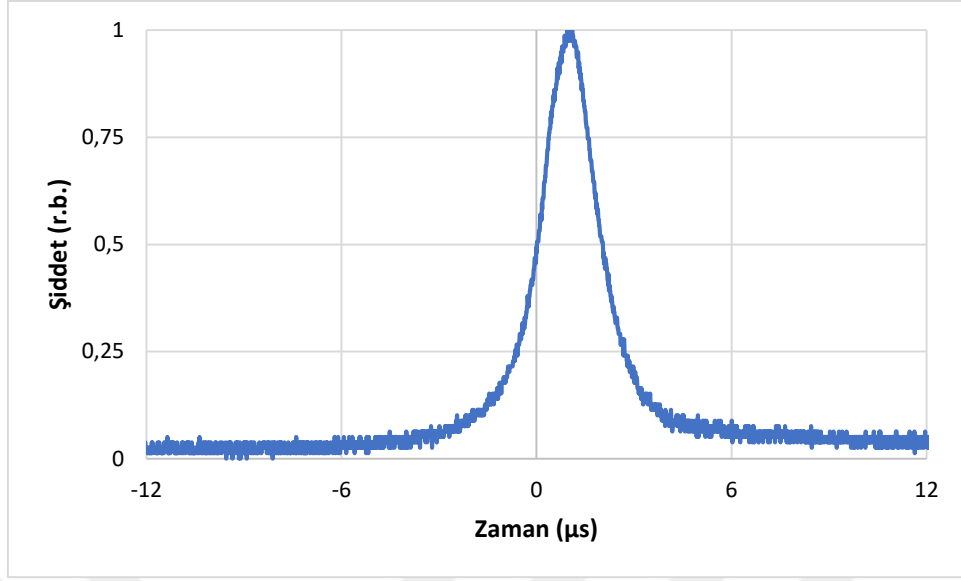
Şekil 192. %6 katkılı 5-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminde elde edilen Q-anahtarlama darbelerinin periyodu



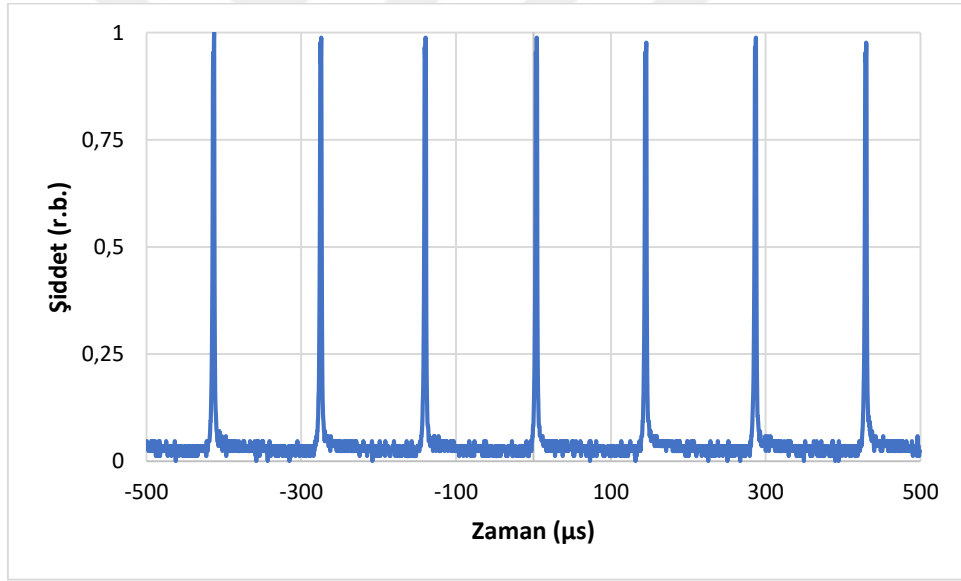
Şekil 193. %6 katkılı 3-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminde elde edilen Q-anahtarlama darbelerinin genişliği



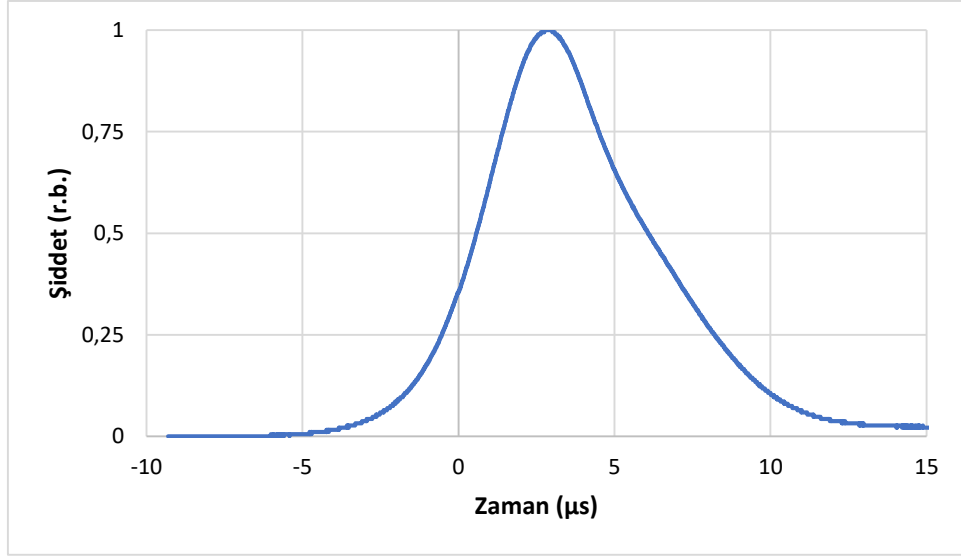
Şekil 194. %6 katkılı 3-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminde elde edilen Q-anahtarlama darbelerinin periyodu



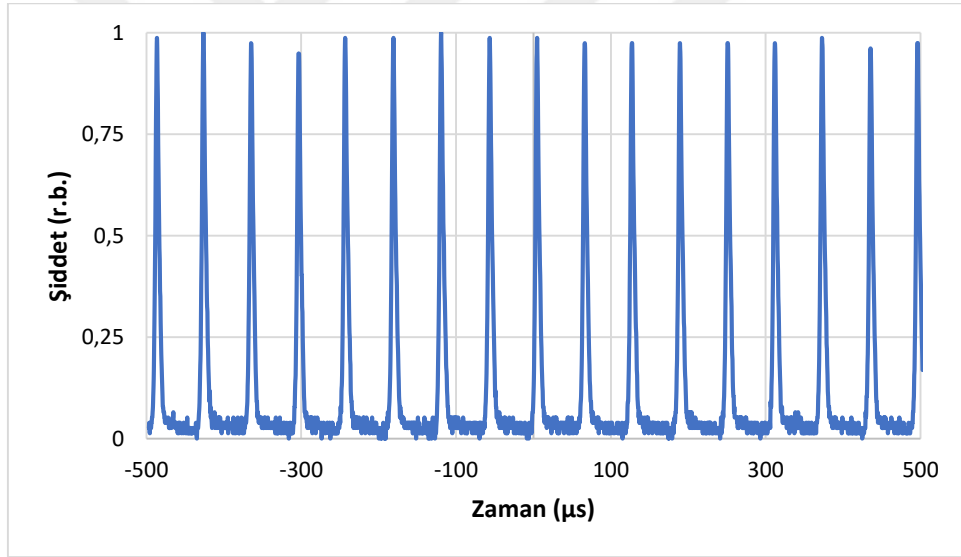
Şekil 195. %4 katkılı 7-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminde elde edilen Q-anahtarlama darbelerinin genişliği



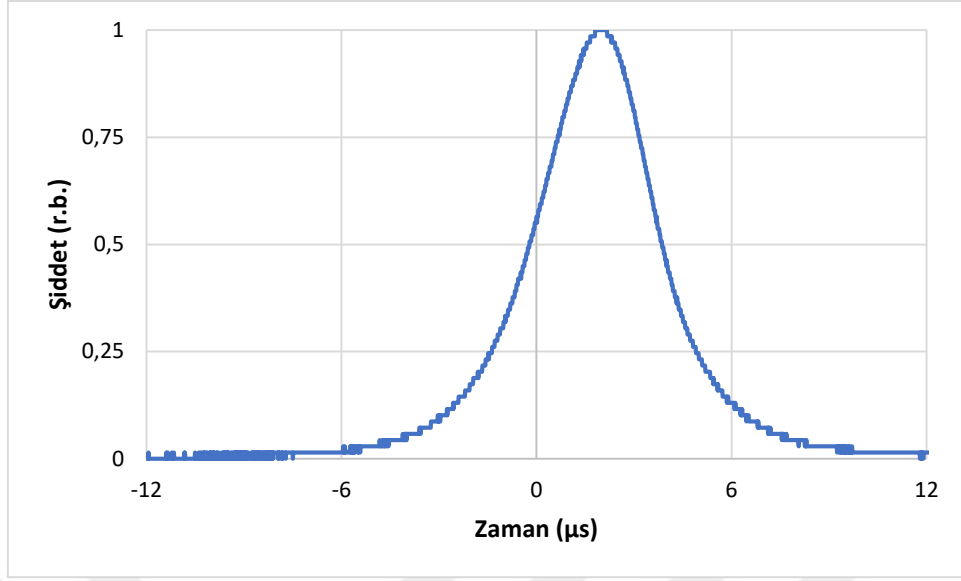
Şekil 196. %4 katkılı 7-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminde elde edilen Q-anahtarlama darbelerinin periyodu



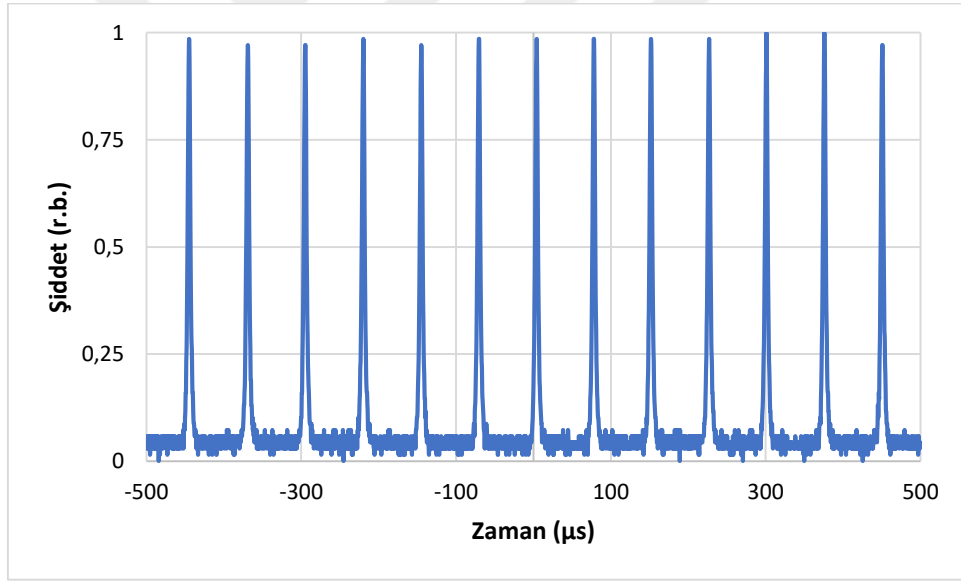
Şekil 197. %4 katkılı 5-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminde elde edilen Q-anahtarlama darbelerinin genişliği



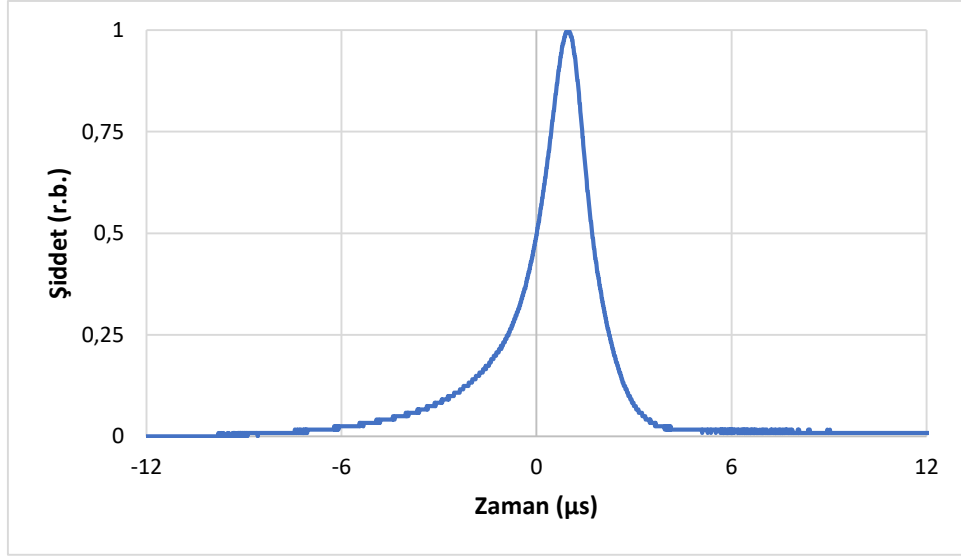
Şekil 198. %4 katkılı 5-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminde elde edilen Q-anahtarlama darbelerinin periyodu



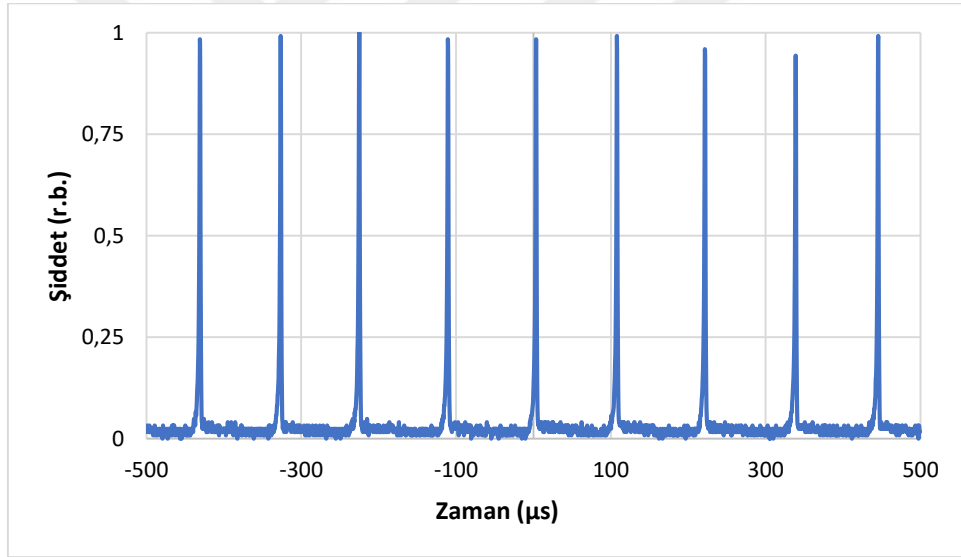
Şekil 199. %4 katkılı 3-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminde elde edilen Q-anahtarlama darbelerinin genişliği



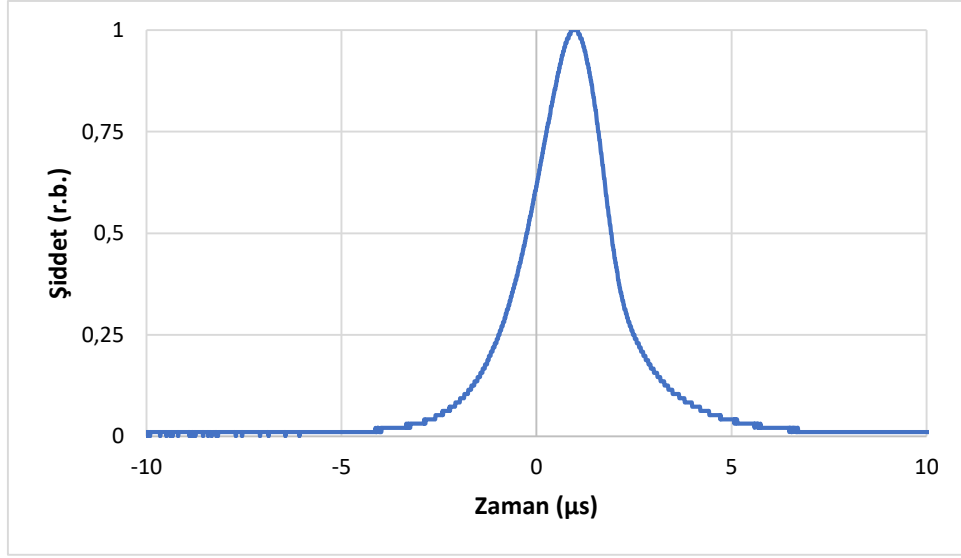
Şekil 200. %4 katkılı 3-mm uzunluğundaki Tm:LuAG lazer sisteminde elde edilen Q-anahtarlama darbelerinin periyodu



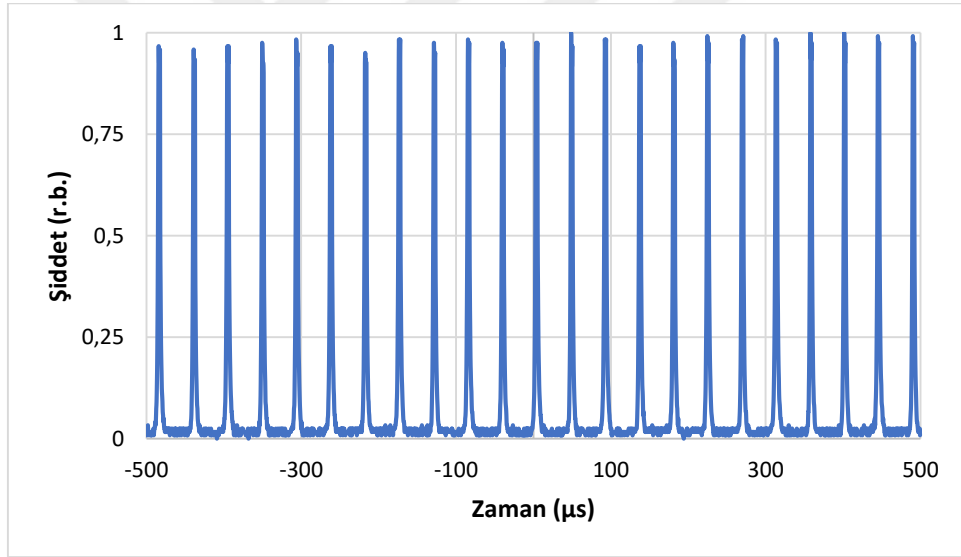
Şekil 201. %3 katkılı 7-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminde elde edilen Q-anahtarlama darbelerinin genişliği



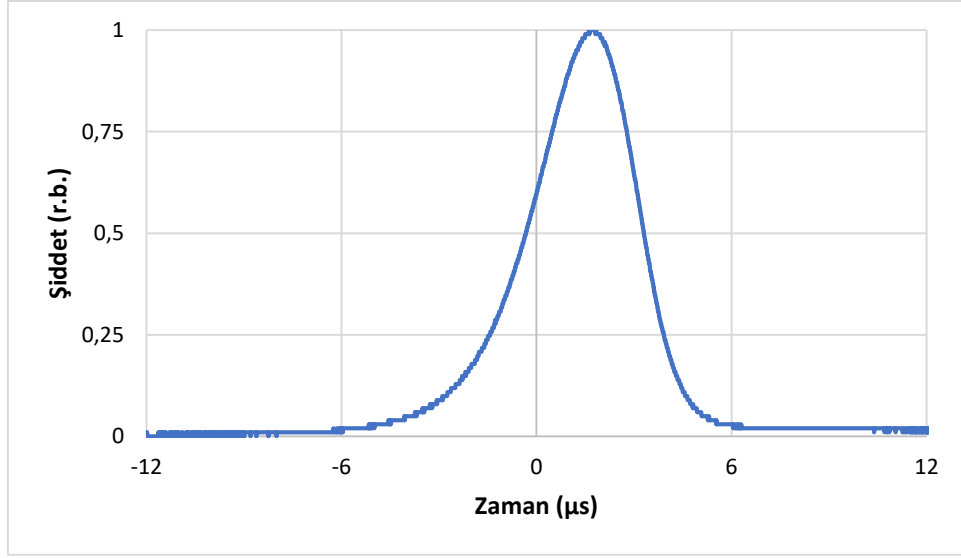
Şekil 202. %3 katkılı 7-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminde elde edilen Q-anahtarlama darbelerinin periyodu



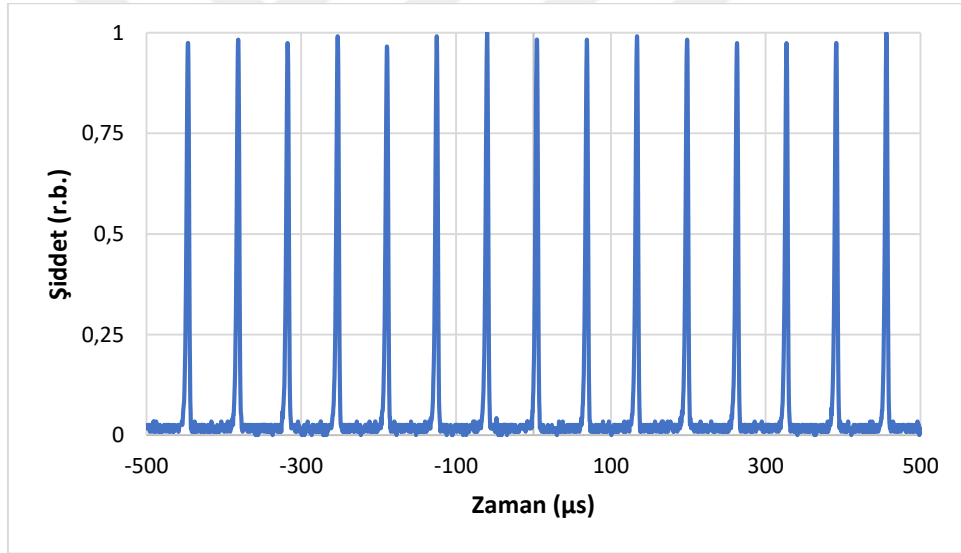
Şekil 203. %3 katkılı 5-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminde elde edilen Q-anahtarlama darbelerinin genişliği



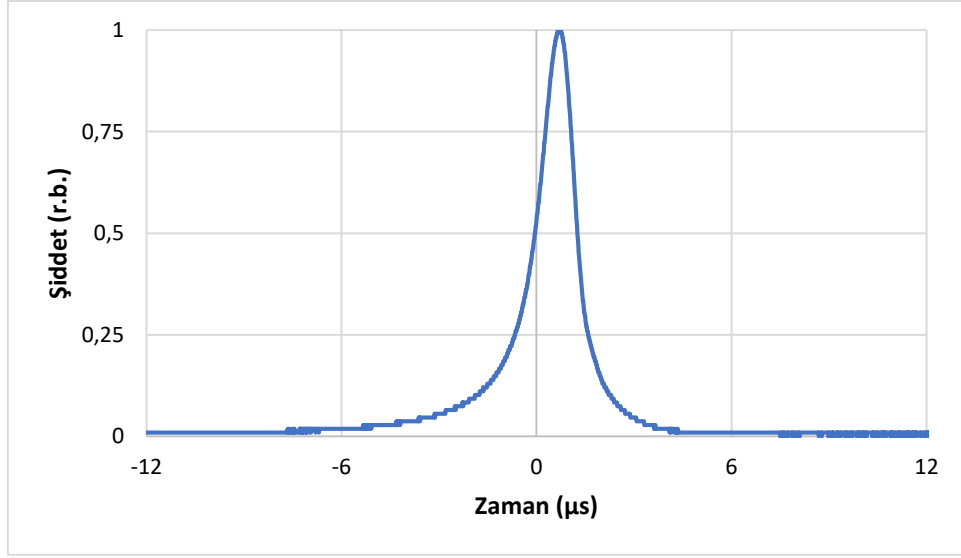
Şekil 204. %3 katkılı 5-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminde elde edilen Q-anahtarlama darbelerinin periyodu



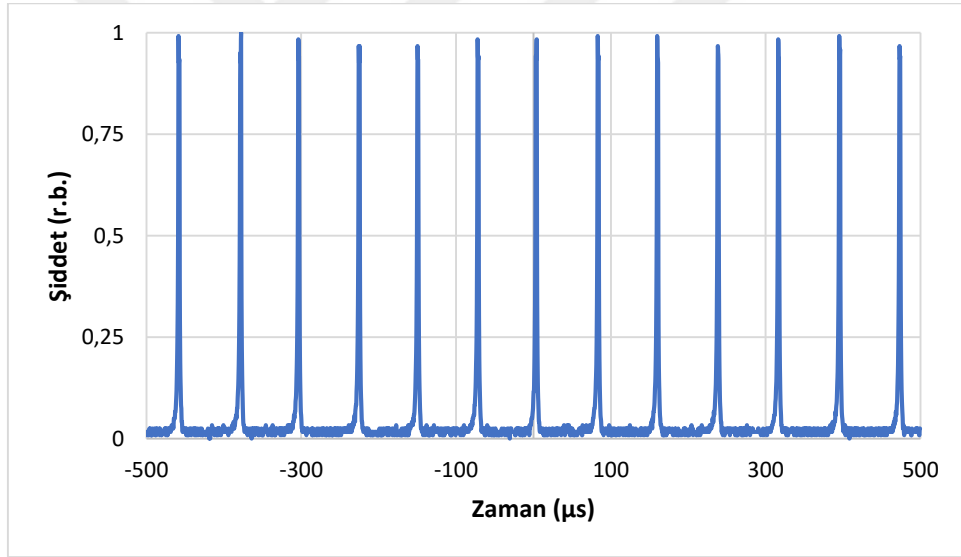
Şekil 205. %3 katkılı 3-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminde elde edilen Q-anahtarlama darbelerinin genişliği



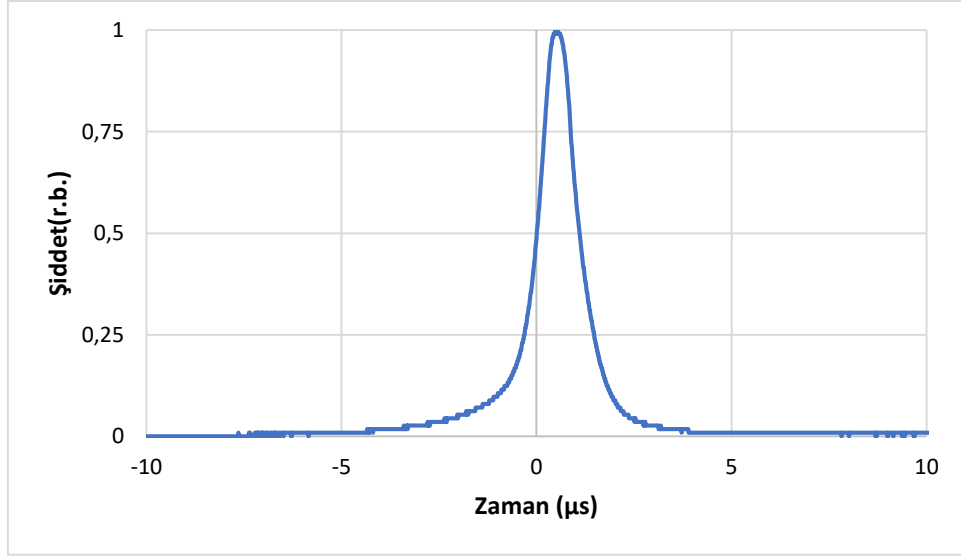
Şekil 206. %3 katkılı 3-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminde elde edilen Q-anahtarlama darbelerinin periyodu



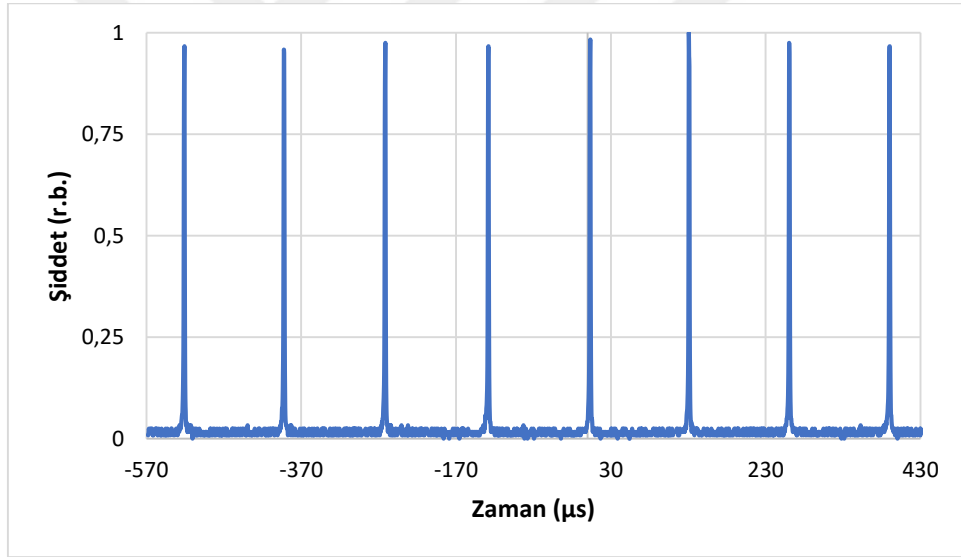
Şekil 207. %1,5 katkılı 9-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminde elde edilen Q-anahtarlama darbelerinin genişliği



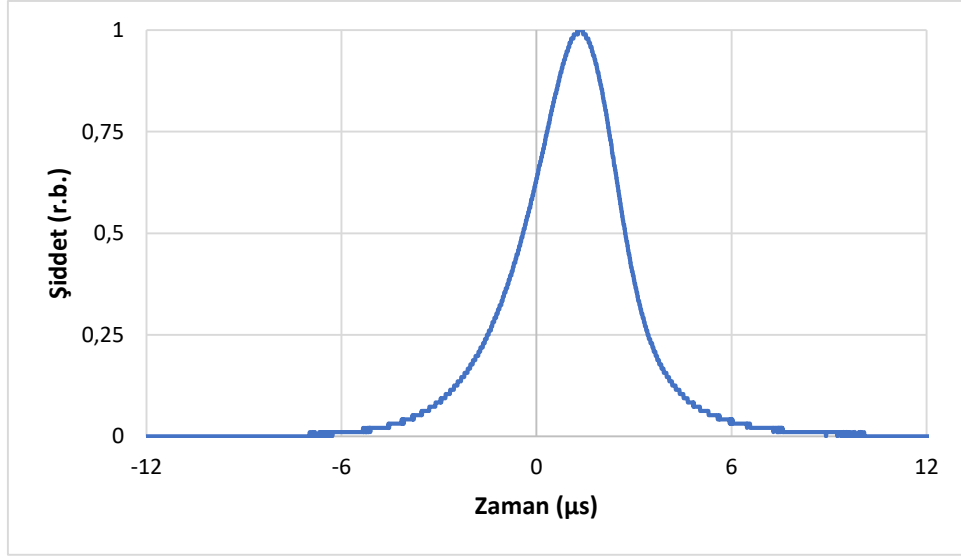
Şekil 208. %1,5 katkılı 9-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminde elde edilen Q-anahtarlama darbelerinin periyodu



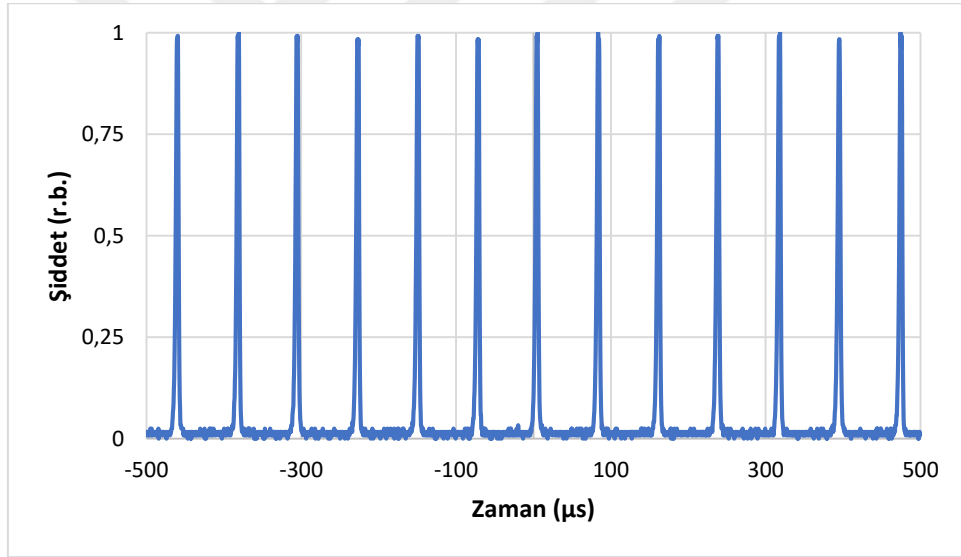
Şekil 209. %1,5 katkılı 7-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminde elde edilen Q-anahtarlama darbelerinin genişliği



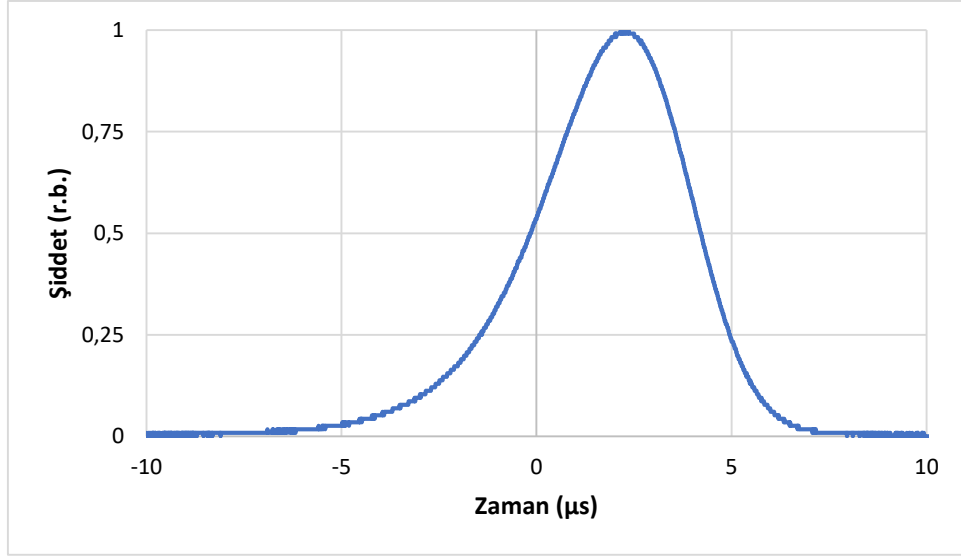
Şekil 210. %1,5 katkılı 7-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminde elde edilen Q-anahtarlama darbelerinin periyodu



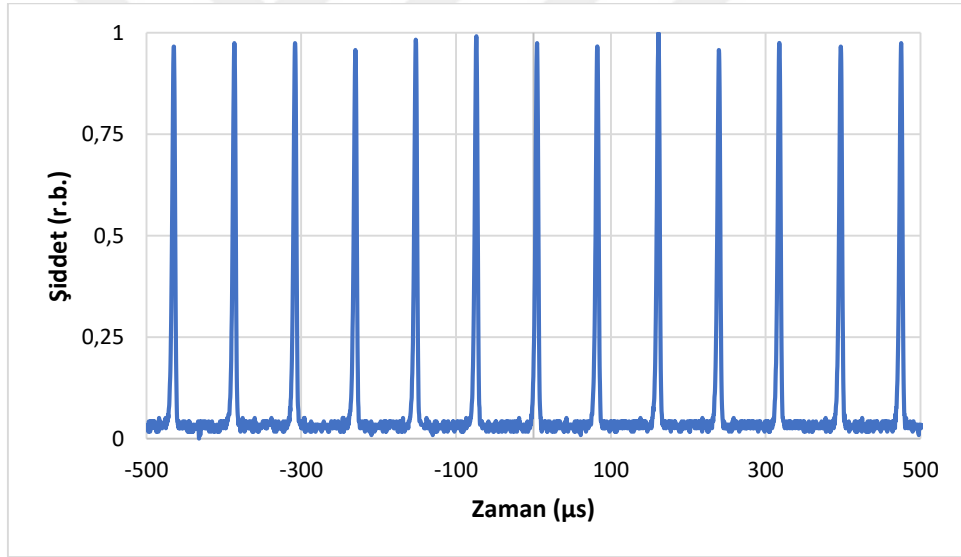
Şekil 211. %1,5 katkılı 5-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminde elde edilen Q-anahtarlama darbelerinin genişliği



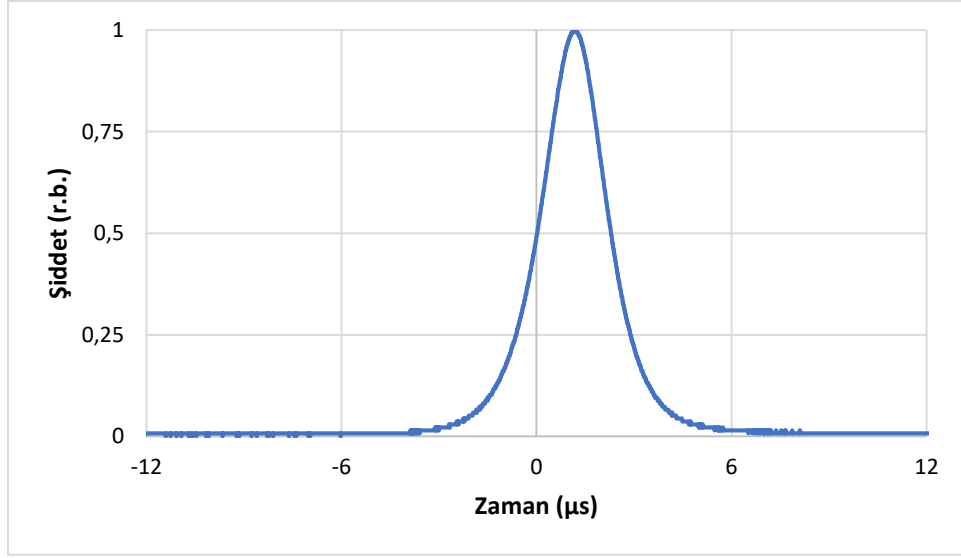
Şekil 212. %1,5 katkılı 5-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminde elde edilen Q-anahtarlama darbelerinin periyodu



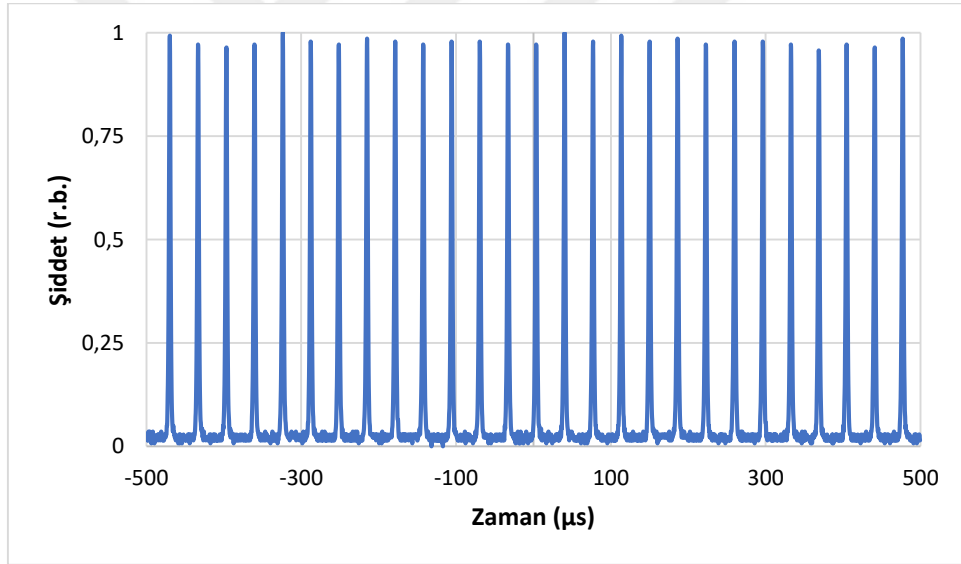
Şekil 213. %1,5 katkılı 3-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminde elde edilen Q-anahtarlama darbelerinin genişliği



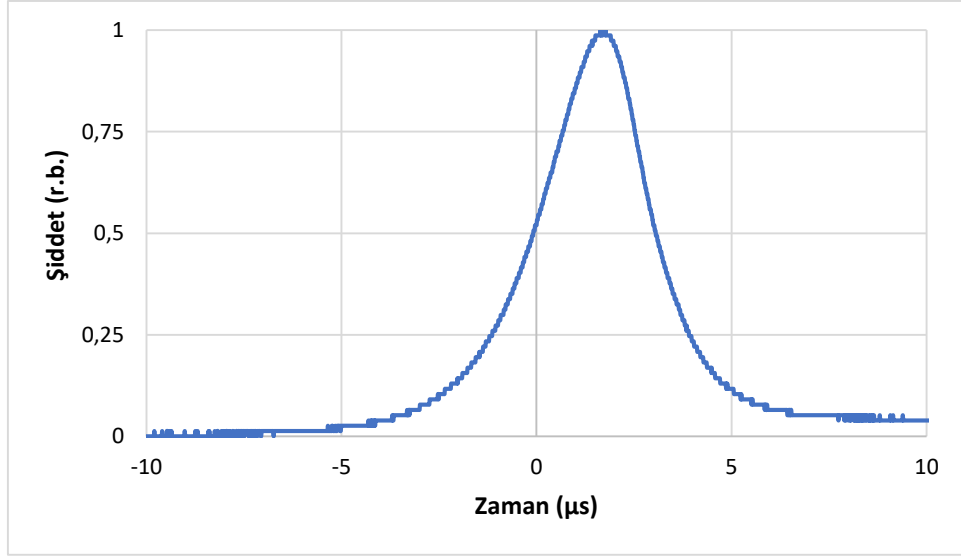
Şekil 214. %1,5 katkılı 3-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminde elde edilen Q-anahtarlama darbelerinin periyodu



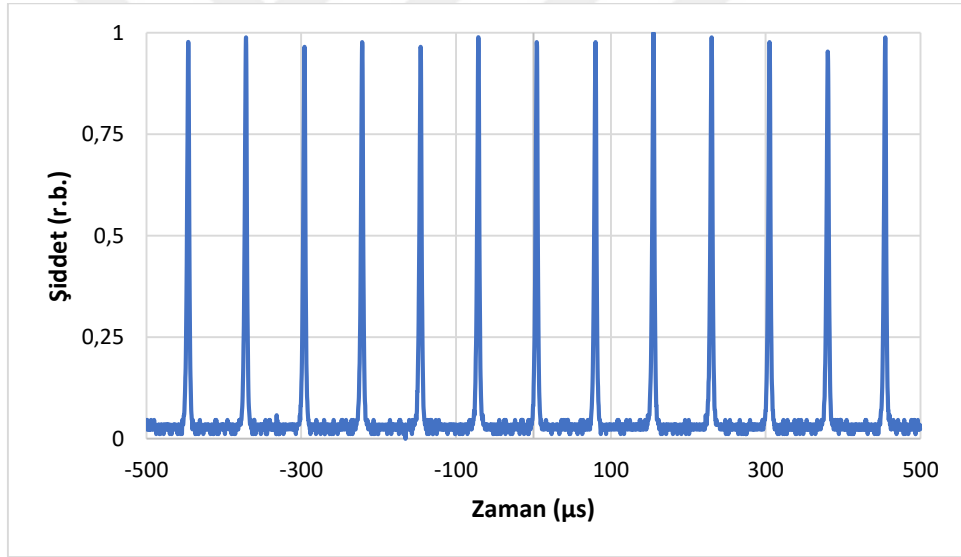
Şekil 215. %2 katkılı 7-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminde elde edilen Q-anahtarlama darbelerinin genişliği



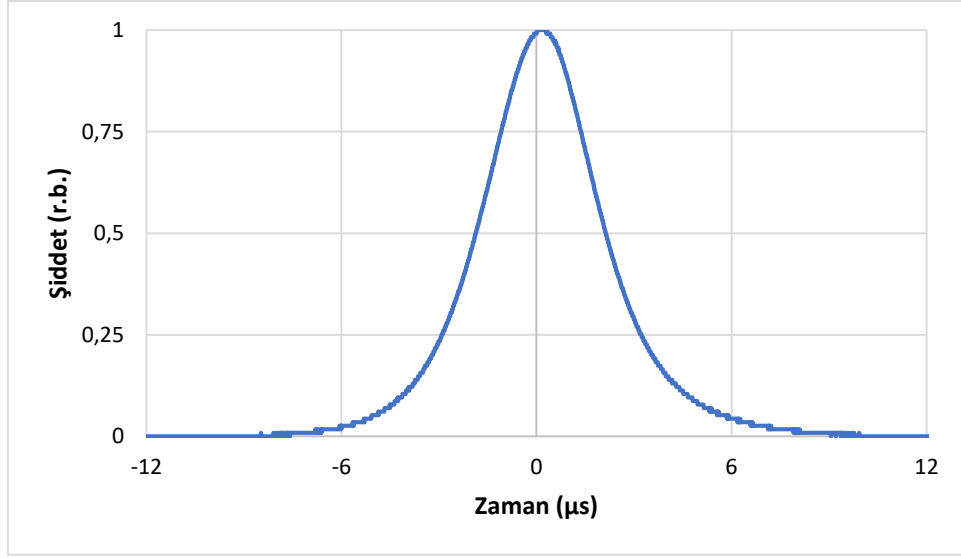
Şekil 216. %2 katkılı 7-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminde elde edilen Q-anahtarlama darbelerinin periyodu



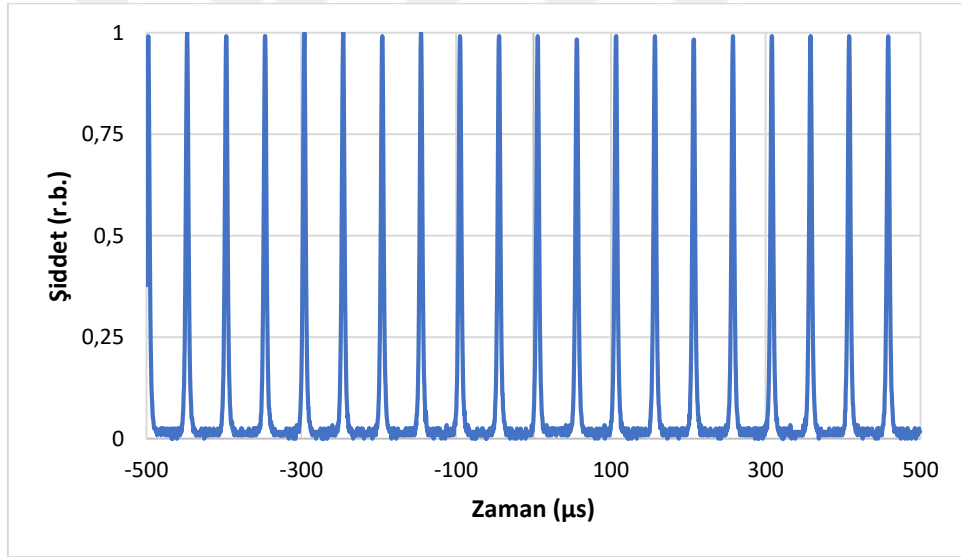
Şekil 217. %2 katkılı 5-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminde elde edilen Q-anahtarlama darbelerinin genişliği



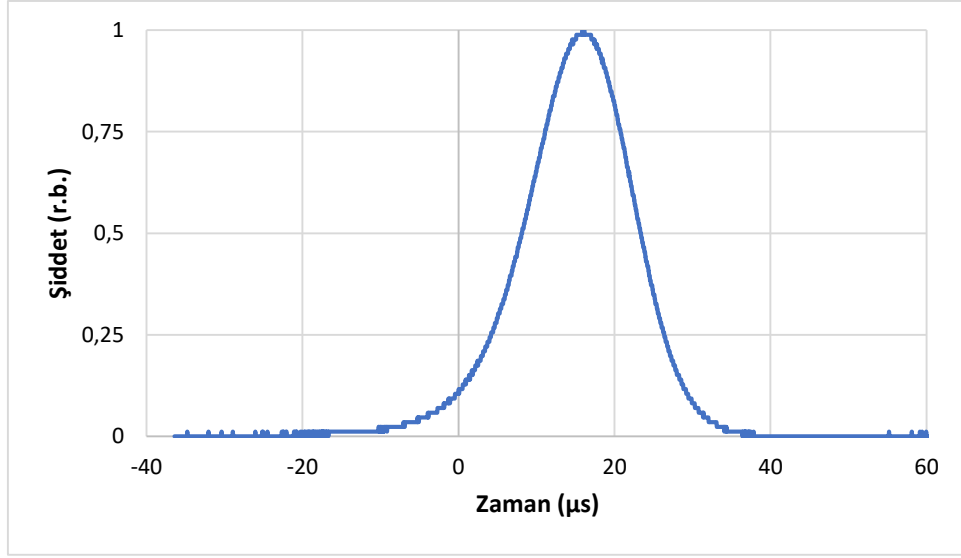
Şekil 218. %2 katkılı 5-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminde elde edilen Q-anahtarlama darbelerinin periyodu



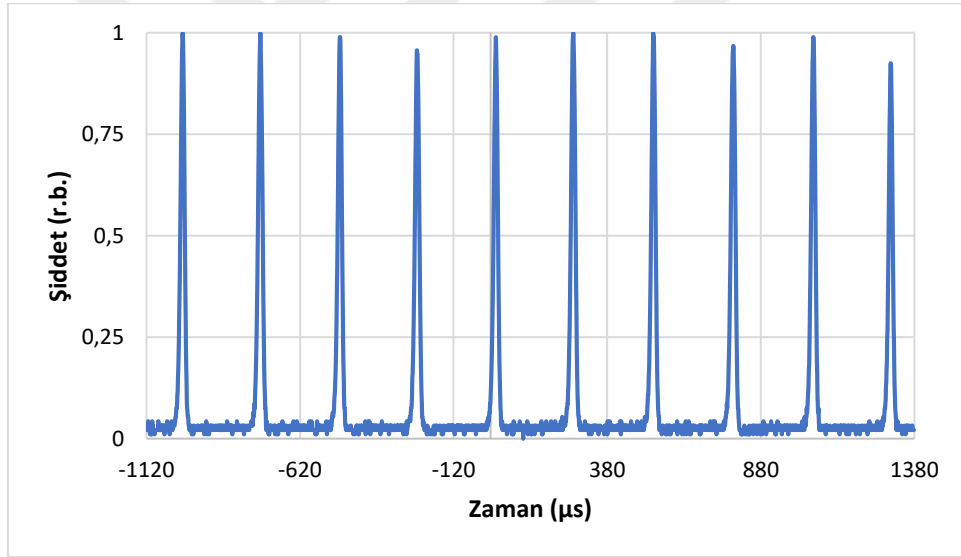
Şekil 219. %2 katkılı 9-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminde elde edilen Q-anahtarlama darbelerinin genişliği



Şekil 220. %2 katkılı 9-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminde elde edilen Q-anahtarlama darbelerinin periyodu



Şekil 221. %2 katkılı 3-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminde elde edilen Q-anahtarlama darbelerinin genişliği



Şekil 222. %2 katkılı 3-mm uzunluğundaki Tm:YAG lazer sisteminde elde edilen Q-anahtarlama darbelerinin periyodu

6. SONUÇ

Yapılan çalışmalar sonucunda 1,6 µm bölgesinde ışıma yapabilen lazer diyotları ile 10 farklı Tm:YAG lazeri ve 10 farklı Tm:LuAG lazeri çalıştırılmıştır. 1,6 µm’de uyarılan Tm:YAG lazerlerinden (1 W giriş gücü ile) 189 mW çıkış gücüne ve %63 verime kadar sonuçlar elde edilmiştir. Verim değerleri üzerinde modelleme çalışmaları yapılmış olup doğrusal, logaritmik ve 4.dereceye kadar polinom regresyon modelleri denenmiştir. Yapılan denemeler sonucunda en etkin sonuç %94 R² (verilerin anlamlandırılma oranı) değeri ile 2.dereceden polinom benzetmesi ile elde edilmiştir. Bu formül şu şekildedir:

$$\begin{aligned} \text{Verim} = & -1.0615 + 0.05216 * \text{Katkı Oranı} + 0.08958 * \text{Uzunluk} + 0.01222 \\ & * \text{Sıcaklık} - 0.01101 * \text{Katkı Oranı}^2 - 0.006191 * \text{Katkı Oranı} \\ & * \text{Uzunluk} + 0.0001455 * \text{Katkı Oranı} * \text{Sıcaklık} - 0.003707 \\ & * \text{Uzunluk}^2 - 0.00006755 * \text{Uzunluk} * \text{Sıcaklık} - 0.0000266 \\ & * \text{Sıcaklık}^2 \end{aligned} \quad (20)$$

Bu denklemde Katkı Oranı “%” olarak uzunluk “mm” olarak ve sıcaklık “Kelvin” olarak kullanılmış olup verim “%” olarak sonuç vermektedir.

1,6 µm ile uyarılan Tm:YAG lazerlerinin dalga boyu değişim aralığı çalışmalarında 204 nm’ye kadar 2 µm bölgesinde dalga boyu değişim aralığı (1871-2075 nm arası) gözlemlenmiştir. Ayrıca sistemlerin tamamında çift dalga boyu çalışma dinamiği gözlemlenmiştir. Sistemlere eklenen SESAM sayesinde sistemler Q-anahtalamalı rejimlerde çalışmış olup en kısa 1.09 µs genişliğinde, en sık 22.54 kHz tekrarlama frekansında darbeler elde edilmiştir. Elde edilen en yüksek darbe tepe gücü 2.03 W ve darbe enerjisi 2.35 µJ değerindedir. 1,6 µm’de uyarılan Tm:LuAG lazerlerinden (1 W giriş gücü ile) 147 mW çıkış gücüne ve %68 verime kadar sonuçlar elde edilmiştir. Verim değerleri üzerinde modelleme çalışmaları yapılmış olup doğrusal, logaritmik ve 4.dereceye kadar polinom regresyon modelleri denenmiştir. Yapılan denemeler sonucunda en etkin sonuç %74 R² (verilerin anlamlandırılma oranı) değeri ile 2.dereceden polinom benzetmesi ile elde edilmiştir. Bu formül şu şekildedir:

$$\begin{aligned}
\text{Verim} = & 1.988 + 0.1471 * \text{Katkı Oranı} + 0.005425 * \text{Uzunluk} - 0.008756 \\
& * \text{Sıcaklık} - 0.004144 * \text{Katkı Oranı}^2 - 0.01065 * \text{Katkı Oranı} \\
& * \text{Uzunluk} - 0.0002194 * \text{Katkı Oranı} * \text{Sıcaklık} - 0.0001127 \\
& * \text{Uzunluk}^2 - 0.0001208 * \text{Uzunluk} * \text{Sıcaklık} - 0.0000103 \\
& * \text{Sıcaklık}^2
\end{aligned} \tag{21}$$

1,6 µm ile uyarılan Tm:LuAG lazerlerinin dalga boyu değişim aralığı çalışmalarında 159 nm'ye kadar 2 µm bölgesinde dalga boyu değişim aralığı (1924-2083 nm arası) gözlemlenmiştir. Ayrıca sistemlerin tamamında çift dalga boyu çalışma dinamiği gözlemlenmiştir. Sistemlere eklenen SESAM sayesinde sistemler Q-anahtalamalı rejimlerde çalışmış olup en kısa 1.99 µs genişliğinde, en sık 27,46 kHz tekrarlama frekansında darbeler elde edilmiştir. Elde edilen en yüksek darbe tepe gücü 0,56 W ve darbe enerjisi 1,42 µJ değerindedir.

Yapılan bu çalışmalar (bilindiği kadarıyla) 1,6 µm bölgesinde uyarılan Tm⁺³ katkılı lazerler alanında günümüze kadar yapılmış en kapsamlı çalışmalardır. Elde edilen sonuçlar ve bu tekniklerle üretilecek Tm⁺³ katkılı katı hal lazer sistemlerinin büyük ilgi odağı olacağı düşünülmektedir. Özellikle 780 nm ile uyarılan sistemlere olan yüksek soğurma üstünlükleri düşünüldüğünde bu yöntemlerin yakın zamanda Tm⁺³ sistemlerini uyarmak için vazgeçilmez olacağı düşünülmektedir.

KAYNAKÇA

- Agrawal, G. P. (2021). *Fiber-Optic Communication Systems*. Wiley.
- Aho, A. T., Viheriälä, J., Virtanen, H., Uusitalo, T. ve Guina, M. (2018). High-Power 1.5- μ m broad area laser diodes wavelength stabilized by surface gratings. *IEEE Photonics Technology Letters*, 30(21), 1870–1873. doi:10.1109/LPT.2018.2870304
- Alping, A., Tell, R. ve Eng, S. T. (1986). Photodetection Properties of Semiconductor Laser Diode Detectors. *Journal of Lightwave Technology*, LT-4(11), 1662–1668. doi:10.1109/jlt.1986.1074669
- Asakura, T., Kamiya, T., Krausz, F., Monemar, B., Venghaus, H., Weber, H. ve Weinfurter, H. (2006). *Solid-State Laser Engineering*. *Solid-State Laser Engineering*. doi:10.1007/0-387-29338-8
- Ashby, D. E. T. F., Jephcott, D. F., Malein, A. ve Raynor, F. A. (1965). Performance of the He-Single Bond sign-Ne gas laser as an interferometer for measuring plasma density. *Journal of Applied Physics*, 36(1), 29–34. doi:10.1063/1.1713893
- Barnes, N. P., Jani, M. G. ve Hutcheson, R. L. (1995). Diode-pumped, room-temperature Tm:LuAG laser. *Applied Optics*, 34(21), 4290. doi:10.1364/ao.34.004290
- Beach, R. ve Deutsch, T. F. (2018). *Lasers for Surgery and Photodynamic Therapy*. Final Report CRADA No. TC-0437-93.
- Beyatlı, E. (2014). *Development of Energy Efficient Tunable Solid-State Lasers with Low Power Consumption*. Koç University.
- Beyatlı, E., Naghizadeh, S., Kurt, A. ve Sennaroglu, A. (2012). Low-cost low-threshold diode end-pumped Tm:YAG laser at 2.016 μ m. *Applied Physics B: Lasers and Optics*, 109(2), 221–225. doi:10.1007/s00340-012-5188-1
- Bilici, T., Mutlu, S., Kalaycioglu, H., Kurt, A., Sennaroglu, A. ve 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
- Bohler, C. L. ve Marton, B. I. (1994). Helium spectroscopy using an InGaAs laser diode. *Optics Letters*, 19(17), 1346. doi:10.1364/ol.19.001346
- Bridges, W. B. (1964). Laser oscillation in singly ionized argon in the visible spectrum. *Applied Physics Letters*, 4(7), 128–130. doi:10.1063/1.1753995
- Burroughes, J. H., Bradley, D. D. C., Brown, A. R., Marks, R. N., Mackay, K., Friend, R. H., ... Holmes, A. B. (2001). 2.5% efficient organic plastic solar cells. *Applied Physics Letters*, 78(6), 841. doi:10.1063/1.1345834
- Cornacchia, F., Di Lieto, A., Maroni, P., Minguzzi, P., Toncelli, A., Tonelli, M., ... Sorokina, I. (2001). A cw room-temperature Ho,Tm:YLF laser pumped at 1.682 μ m. *Applied Physics B: Lasers and Optics*, 73(3), 191–194.

doi:10.1007/s003400100640

- Cornacchia, F., Di Lieto, A. ve Tonelli, M. (2009). LiGdF₄:Tm³⁺: Spectroscopy and diode-pumped laser experiments. *Applied Physics B: Lasers and Optics*, 96(2–3), 363–368. doi:10.1007/s00340-009-3555-3
- Cornacchia, F., Parisi, D., Bernardini, C., Toncelli, A. ve Tonelli, M. (2004). Vibronic Laser. *Society*, 12(9), 1982–1989.
- Creeden, D., Johnson, B. R., Setzler, S. D. ve Chicklis, E. P. (2014). Resonantly pumped Tm-doped fiber laser with >90% slope efficiency. *Optics Letters*, 39(3), 470. doi:10.1364/ol.39.000470
- Csele, M. (2004). *Fundamentals of Light Sources and Lasers*. A Wiley-Interscience publication. Wiley. <https://books.google.com.tr/books?id=8Q003u9IfPYC> adresinden erişildi.
- Demchenko, A. P. (2009). Introduction to fluorescence sensing. *Introduction to Fluorescence Sensing*, 1–586. doi:10.1007/978-1-4020-9003-5
- Demirbas, U. (2010). Low-cost, highly efficient, and tunable ultrafast laser technology based on directly diode-pumped Cr:Colquiriites, 352 p. <http://dspace.mit.edu/handle/1721.1/60097> adresinden erişildi.
- Einstein, A. (1996). On the Quantum Theory of Radiation BT - The Collected Papers of Albert Einstein, Vol. 6: The Berlin Years: Writings, 1914-1917. R. Schulmann, A. J. Kox, M. Janssen ve J. Illy (Ed.), (ss. 220–233). Princeton, NJ: Princeton University Press. <https://einsteinpapers.press.princeton.edu/vol6-trans/100> adresinden erişildi.
- Emmett, J. L., Krupke, W. F. ve Trenholme, J. B. (1983). Future Development of High-Power Solid-State Laser Systems. *Soviet journal of quantum electronics*, 13(1), 1–23. doi:10.1070/QE1983v013n01ABEH004004
- Geusic, J. E., Marcos, H. M. ve Uitert, L. G. Van. (1964). LASER OSCILLATIONS IN NdDOPED YTTRIUM ALUMINUM , YTTRIUM GALLIUM AND GADOLINIUM GARNETS, 182, 13–16. doi:10.1063/1.1753928
- Gispert, J. R. (2008). *Coordination Chemistry*. Weinheim: Wiley-VCH. <https://www.wiley.com/en-us/Coordination+Chemistry-p-9783527318025> adresinden erişildi.
- Hal, R. N. (1962). Nov. 20, 1962 R. N. HAL.
- Hal, R. N. (1966). 3,245,002 STIMULATED EMISSION SEMICONDUCTOR DEVICES.
- Harder, C. S., Van Zeghbroeck, B. J., Kesler, M. P., Meier, H. P., Vettiger, P., Webb, D. J. ve Wolf, P. (1990). High-speed GaAs/AlGaAs optoelectronic devices for computer applications. *IBM Journal of Research and Development*, 34(4), 568–584. doi:10.1147/rd.344.0568
- Hemmati, H., Biswas, A. ve Djordjevic, I. B. (2011). Deep-space optical communications: Future perspectives and applications. *Proceedings of the IEEE*,

- 99(11), 2020–2039. doi:10.1109/JPROC.2011.2160609
- Hofmann, M. R. ve Koch, S. W. (2023). Semiconductor Lasers. *Springer Handbooks*, 851–864. doi:10.1007/978-3-030-79827-7_23
- Honea, E. C., Beach, R. J., Sutton, S. B., Speth, J. A., Mitchell, S. C., Skidmore, J. A., ... Payne, S. A. (1997). 115-W Tm: YAG diode-pumped solid-state laser. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 33(9), 1592–1600. doi:10.1109/3.622641
- Horiguchi, M. ve Osanai, H. (1976). Spectral losses of low-OH-content optical fibres. *Electronics Letters*, 12, 310–312. doi:10.1049/el:19760239
- Hulicius, E. ve Kubeček, V. (2013). Semiconductor lasers for medical applications. *Lasers for Medical Applications: Diagnostics, Therapy and Surgery*, (2004), 222–250. doi:10.1533/9780857097545.2.222
- Jafar, N., Jiang, J., Lu, H., Qasim, M. ve Zhang, H. (2023). Recent Research on Indium-Gallium-Nitride-Based Light-Emitting Diodes: Growth Conditions and External Quantum Efficiency. *Crystals*, 13(12). doi:10.3390/cryst13121623
- Javan, A., Bennett, W. R. ve Herriott, D. R. (1961). Population inversion and continuous optical maser oscillation in a gas discharge containing a He-Ne mixture. *Physical Review Letters*, 6(3), 106–110. doi:10.1103/PhysRevLett.6.106
- Jung, M., Riesbeck, T., Schmitz, J., Baumgärtel, T., Ludewigt, K. ve Graf, A. (2017). *High energy laser demonstrators for defense applications*. doi:10.1117/12.2254021
- Kalachev, Y. L., Mihailov, V. A., Podreshetnikov, V. V. ve Shcherbakov, I. A. (2011). The study of a Tm:YLF laser pumped by a Raman shifted Erbium fiber laser at 1678 nm. *Optics Communications*, 284(13), 3357–3360. doi:10.1016/j.optcom.2011.02.084
- Kalaycioglu, H., Sennaroglu, A., Kurt, A. ve Ozen, G. (2007). Spectroscopic analysis of Tm³⁺: LuAG. *Journal of Physics Condensed Matter*, 19(3). doi:10.1088/0953-8984/19/3/036208
- Kielioh, S., Lalaime, T. ve Martin, F. B. (1972). Cooperative Second-Harmonic Laser Light Scattering in Liquid Benzene and in Liquid Carbon Disulphide. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 8(6), 519–520. doi:10.1109/JQE.1972.1077012
- Kim, K. W., Park, M. H., Jung, K. W., Ryu, S. P., Cho, N. K., Lim, J. Y., ... Park, J. H. (2007). Thermal treatment for tuning the lasing wavelength of quantum dot laser diodes. *Nanophotonics, Nanostructure, and Nanometrology II*, 6831(March), 683117. doi:10.1117/12.757124
- Kopp, C. (2008). *High energy laser directed energy weapons*. Air Power Australia.
- Krainak, M. A., Sun, X., Yang, G. ve Lu, W. (2010). Comparison of linear-mode avalanche photodiode lidar receivers for use at one-micron wavelength. *Advanced Photon Counting Techniques IV*, 7681, 76810Y. doi:10.1117/12.852906

- La Rosa, G. (1988). *Spectroscopy of Tm^{3+} : YLF as a laser material for diode laser pumping*. <http://hdl.handle.net/1721.1/14385> adresinden erişildi.
- Lai, K. S., Phua, P. B., Wu, R. F., Lim, Y. L., Lau, E., Toh, S. W., ... Chng, A. (2000). 120-W continuous-wave diode-pumped Tm:YAG laser. *Optics Letters*, 25(21), 1591. doi:10.1364/ol.25.001591
- Li, Y. F., Wang, Y. Z. ve Ju, Y. L. (2008). Comparative study of LD-pumped Tm:YAG and Tm:LuAG lasers. *Laser Physics*, 18(6), 722–724. doi:10.1134/s1054660x08060042
- Lutgen, S., Dini, D., Pietzonka, I., Tautz, S., Breidenassel, A., Lell, A., ... Koch, S. (2011). Recent results of blue and green InGaN laser diodes for laser projection. *Novel In-Plane Semiconductor Lasers X*, 7953, 79530G. doi:10.1117/12.874757
- Maiman, T. H. (1960). Optical and microwave-optical experiments in ruby. *Physical Review Letters*, 4(11), 564–566. doi:10.1103/PhysRevLett.4.564
- Martinelli, R. U., Menna, R. J. ve Cooper, D. E. (1994). InGaAsP/InP distributed-feedback lasers for spectroscopic applications. *IEEE LEOS Annual Meeting - Proceedings*, 1, 95–96. doi:10.1109/leos.1994.586909
- Mateos, X., Petrov, V., Liu, J., Pujol, M. C., Griebner, U., Aguiló, M., ... Viera, G. (2006). Efficient 2- μ m continuous-wave laser oscillation of Tm^{3+} : KLu(WO₄)₂. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 42(10), 1008–1015. doi:10.1109/JQE.2006.881629
- Milonni, P. W. ve Eberly, J. H. (2010). *Laser Physics*. Wiley. <https://www.wiley.com/en-us/Laser+Physics-p-9780470409701> adresinden erişildi.
- Mollaei, M., Zhu, X., Zong, J., Wiersma, K., Chavez-Pirson, A., Norwood, R. ve Peyghambarian, N. (2018). Half-watt Tm^{3+} -Doped Fluoride Fiber Laser at 785 nm. *IEEE Photonics Technology Letters*, 30, 1. doi:10.1109/LPT.2018.2862248
- Moulton, P. F. (1986). Spectroscopic and laser characteristics of Ti:Al₂O₃. *Journal of the Optical Society of America B*, 3(1), 125. doi:10.1364/josab.3.000125
- Murari, K., Cankaya, H., Kroetz, P., Cirmi, G., Li, P., Ruehl, A., ... Kärtner, F. X. (2016). Intracavity gain shaping in millijoule-level, high gain Ho:YLF regenerative amplifiers. *Optics Letters*, 41(6), 1114. doi:10.1364/ol.41.001114
- Murty, M. V. R. K. ve Malacara-Hernandez, D. (1964). Some Applications of the Gas Laser as a Source of Light for the Testing of Optical Systems. *Japanese Journal of Applied Physics*, 3(S1), 106. doi:10.7567/jjaps.1s1.106
- Nouri, K. (2018). *Lasers in Dermatology and Medicine*. Springer. doi:10.1007/978-3-319-28259-1
- O Gilard, G Quadri, M Boutiller, D Veyrie, S. B. (2014). Optoelectronics in Space : Main Qualification Pitfalls and How To Avoid Them, (June).
- Olsen, G. ~H., Channin, D. ~J. ve Ettenberg, M. (1980). Fiber optical communications - Concepts, components and systems. *RCA Engineer*, 26, 42–53.

- Ott, M. (2001). Capabilities and Reliability of LEDs and Laser Diodes.
- Payne, S. A., Krupke, W. F., Smith, L. K., Kway, W. L., DeLoach, L. D. ve Tassano, J. B. (1992). 752 nm Wing-Pumped Cr: LiSAF Laser. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 28(4), 1188–1196. doi:10.1109/3.135246
- Ravindra, N. M. ve Srivastava, V. K. (1979). Temperature dependence of the energy gap in semiconductors. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 40(10), 791–793. doi:10.1016/0022-3697(79)90162-8
- Roelkens, G., Van Thourhout, D., Baets, R., Nötzel, R. ve Smit, M. (2006). Laser emission and photodetection in an InP/InGaAsP layer integrated on and coupled to a Silicon-on-Insulator waveguide circuit. *Optics Express*, 14(18), 8154. doi:10.1364/oe.14.008154
- Rosenkrantz, L. J. (1972). GaAs diode-pumped Nd: YAG laser. *Journal of Applied Physics*, 43(11), 4603–4605. doi:10.1063/1.1660973
- Rullière, C. (2005). *Femtosecond laser pulses: Principles and experiments*. Springer.
- Russell, J.P. (1965). Raman spectroscopy using a gas laser. *J. Phys. France*, 26(11), 620–626. doi:10.1051/jphys:019650026011062001
- Scholle, K., Lamrini, S., Koopmann, P. ve Fuhrberg, P. (2010). 2 μ m laser sources and their possible applications. doi:10.5772/39538
- Schumann, A. Y. (2012). Department of physics and astronomy. *Group*, 3–5.
- Sennaroglu, A. (2010). *Photonics and laser engineering: Principles, devices, and applications*. McGraw-Hill Education.
- Silfvast, W. T. (2004). *Laser Fundamentals*. Cambridge University Press. doi:10.1017/CBO9780511616735
- Sirohi, R. S. (2018). Laser Beams. *Introduction to OPTICAL METROLOGY*. doi:10.1201/9781315215228-2
- Slimi, S. (2024). Novel infrared solid-state lasers based on lanthanide-doped crystalline materials, (December).
- Smith, J., Rice, R. R., Douglas, M. ve Box, P. O. (1980). pumped Nd:YAG laser.
- Stoneman, R. C. ve Esterowitz, L. (1990). Efficient, broadly tunable, laser-pumped Tm:YAG and Tm:YSGG cw lasers. *Optics Letters*, 15(9), 486. doi:10.1364/ol.15.000486
- Suni, P. J. M. ve Henderson, S. W. (1991). 1-mJ/pulse Tm:YAG laser pumped by a 3-W diode laser. *Optics Letters*, 16(11), 817. doi:10.1364/ol.16.000817
- Suni, P. J. M., Phillips, M. W., Hale, C. P., Wagner, G. J., Henderson, S. W. ve Richmond, R. (1995). Diode-Pumped 2-Micron Laser Technology for Coherent Lidar Applications. *Coherent Laser Radar içinde*, Technical Digest Series (s. ThD2). Keystone, Colorado: Optica Publishing Group. doi:10.1364/CLR.1995.ThD2

- Talavera, D. V. ve Mejía, E. B. (2005). Blue up-conversion Tm³⁺-doped fiber laser pumped by a multiline Raman source. *Journal of Applied Physics*, 97(5). doi:10.1063/1.1850173
- Tang, Y. ve Xu, J. (2009). Self-induced pulsing in Tm³⁺-doped fiber lasers with different output couplings. *Proc SPIE*, 7276. doi:10.1117/12.822920
- Tang, Y. ve Xu, J. (2012). High-Power Pulsed 2- μ m Tm³⁺-Doped Fiber Laser. doi:10.5772/37000
- Thomas, J. T., Tonelli, M., Veronesi, S., Cavalli, E., Mateos, X., Petrov, V., ... Guo, J. (2013). Optical spectroscopy of Tm³⁺: YAG transparent ceramics. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 46(37), 375301. doi:10.1088/0022-3727/46/37/375301
- Tokurakawa, M., Fujita, E. ve Kränkel, C. (2017). Kerr-lens mode-locked Tm³⁺:Sc₂O₃ single-crystal laser in-band pumped by an Er:Yb fiber MOPA at 1611 nm. *Optics Letters*, 42(16), 3185. doi:10.1364/ol.42.003185
- Troshin, A. E., Kisel, V. E., Yasukevich, A. S., Kuleshov, N. V., Pavlyuk, A. A., Dunina, E. B. ve Kornienko, A. A. (2007). Spectroscopy and laser properties of Tm³⁺:KY(WO₄)₂ crystal. *Applied Physics B: Lasers and Optics*, 86(2), 287–292. doi:10.1007/s00340-006-2448-y
- Tsarev, D. V., Morugin, E. S. ve Alodjants, A. P. (2024). Random Lasing under Dissipative Tunneling Conditions in a Network Quantum Material. *JETP Letters*, 120(5), 315–321. doi:10.1134/S0021364024602549
- Uehara, S. (1990). Pump Sources for Erbium-Doped Fiber Amplifiers. *Optical Amplifiers and Their Applications* içinde (s. WA1). Optica Publishing Group. doi:10.1364/OAA.1990.WA1
- van der Ziel, J. P. (1989). Characteristics of 1.3- μ m InGaAsP lasers used as photodetectors. *Journal of Lightwave Technology*, 7(2), 347–352. doi:10.1109/50.17778
- Wallace, M. (2016). *Opto-electronic study of InGaN/GaN LEDs*. <https://stax.strath.ac.uk/concern/theses/nv935295j> adresinden erişildi.
- Walsh, B. M., Barnes, N. P. ve Di Bartolo, B. (1998). Branching ratios, cross sections, and radiative lifetimes of rare earth ions in solids: Application to Tm³⁺ and Ho³⁺ ions in LiYF₄. *Journal of Applied Physics*, 83(5), 2772–2787. doi:10.1063/1.367037
- Wang, C. A. ve Groves, S. H. (1992). New Materials for Diode Laser Pumping of Solid-State Lasers. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 28(4), 942–951. doi:10.1109/3.135213
- Wang, Y., Shen, D., Chen, H., Zhang, J., Qin, X., Tang, D., ... Zhao, T. (2011). Highly efficient Tm:YAG ceramic laser resonantly pumped at 1617 nm. *Optics Letters*, 36(23), 4485. doi:10.1364/ol.36.004485
- Weber, M. J. (2012). *Handbook of Optical Materials*. CRC Press.

- White, I. (2004). Laser diodes. *Handbook of Laser Technology and Applications*. doi:10.1887/0750306076/b1388v2c10
- Wu, F., Yao, W., Xia, H., Liu, Q., Ding, M., Zhao, Y., ... Shen, D. (2017). Highly efficient continuous-wave and Q-switched Tm:CaGdAlO₄ laser at 2 μ m. *Optical Materials Express*, 7(4), 1289. doi:10.1364/ome.7.001289
- Xie, X., Xu, Q., Hu, W., Zhang, W., Dai, Q., Chen, J., ... Wang, S.-X. (2020). A Brief Review of 2 μ m Laser Scalpel. *2020 IEEE 5th Optoelectronics Global Conference (OGC)* içinde (ss. 63–67). doi:10.1109/OGC50007.2020.9260447
- Xu, H. Y., Chen, X. F., Peng, Y., Xu, M. S., Shen, Y., Hu, X. B. ve Xu, X. G. (2015). Progress in research of GaN-based LEDs fabricated on SiC substrate. *Chinese Physics B*, 24(6), 1–9. doi:10.1088/1674-1056/24/6/067305
- Yang, Q., Zhao, L., Ren, T., Wu, C. ve Yu, Y. (2024). 1.06 J pulsed LD end-pumped MSMC Tm: YAG laser. *Optics Communications*. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:272375465> adresinden erişildi.
- Yu, H., Petrov, V., Griebner, U., Parisi, D., Veronesi, S. ve Tonelli, M. (2012). Compact passively Q-switched diode-pumped Tm:LiLuF₄ laser with 126 mJ output energy. *Optics Letters*, 37(13), 2544. doi:10.1364/ol.37.002544