



POLİTEKNİK DERGİSİ

*JOURNAL of POLYTECHNIC*

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.org.tr/politeknik>



# NiO kompozit filmlerin geliştirilmiş optik sınırlama davranışı

## *Enhanced optical limiting behavior of the NiO composite films*

Yazar(lar) (Author(s)): Yasemin PEPE<sup>1</sup>

ORCID<sup>1</sup>: 0000-0002-5384-2039

ERKEN GÖRÜNÜM

**To cite to this article:** Pepe Y., “NiO kompozit filmlerin geliştirilmiş optik sınırlama davranışı”, *Journal of Polytechnic*, \*(\*) : \*, (\*).

**Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz:** Pepe Y., “NiO kompozit filmlerin geliştirilmiş optik sınırlama davranışı”, *Politeknik Dergisi*, \*(\*) : \*, (\*).

**Erişim linki (To link to this article):** <http://dergipark.org.tr/politeknik/archive>

**DOI:** 10.2339/politeknik.1515248

# NiO kompozit filmlerin geliştirilmiş optik sınırlama davranışı

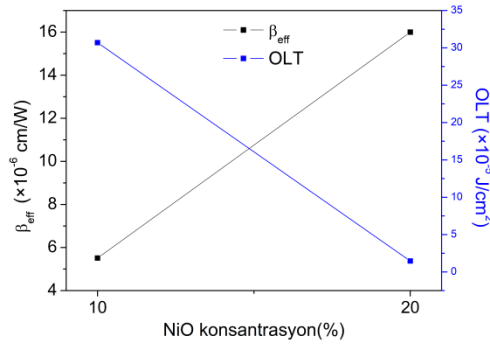
## Enhanced optical limiting behavior of the NiO composite films

### Önemli noktalar (Highlights)

- ❖ Katkılama ile doğrusal olmayan soğurmanın değişimi/ Variation of nonlinear absorption with doping
- ❖ Katkılamının optik sınırlamaya etkisi/ The effect of doping on optical limiting

### Grafik Özet (Graphical Abstract)

NiO konsantrasyonu ile değişen doğrusal olmayan soğurma katsayısı ve optik sınırlama eşik şiddeti. (Nonlinear absorption coefficient and optical limiting threshold varying with NiO concentration.)



**Şekil.** NiO konsantrasyonuna göre doğrusal olmayan soğurma katsayısı ve optik sınırlama eşik şiddeti /**Figure.** Nonlinear absorption coefficient and optical limiting threshold with respect to doping concentration

### Amaç (Aim)

NiO konsantrasyonunun ve uyarma şiddetinin NiO kompozit filmlerin optik sınırlama davranışına etkisinin araştırılması. /Investigation of the impacts of NiO concentration on the optical limiting behavior of the NiO composite films.

### Tasarım ve Yöntem (Design & Methodology)

Doğrusal olmayan optik özelliklerin belirlenmesinde açık yarıç Z-tarama tekniği kullanılmıştır. / Nonlinear optical features was revealed by open aperture Z-scan technique.

### Özgünlük (Originality)

NiO kompozit filmlerde katkılama konsantrasyonunun ve uyarma şiddetinin optik sınırlama davranışına etkisini inceleyen ilk çalışmadır. /This study reported, for the first time, on the influence of doping concentrations and input intensity on the optical limiting characteristics of NiO composite films.

### Bulgular (Findings)

Doğrusal olmayan soğurma ve optik sınırlama davranışının artan NiO konsantrasyonu ve uyarma şiddeti ile güçlendiği gözlenmiştir. / Nonlinear absorption and optical limiting features became stronger with increase of NiO concentration and input intensity.

### Sonuç (Conclusion)

En büyük konsantrasyonlu kompozit film en yüksek uyarma şiddetinde en güçlü doğrusal olmayan soğurma ve optik sınırlama davranışı göstermiştir. / The stronger nonlinear absorption and optical limiting feature was obtained for highest concentration of NiO and input intensity.

### Etik Standartların Beyanı (Declaration of Ethical Standards)

Bu makalenin yazar(lar)ı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler. / The author(s) of this article declare that the materials and methods used in this study do not require ethical committee permission and/or legal-special permission.

# NiO kompozit filmlerin geliştirilmiş optik sınırlama davranışı

*Araştırma Makalesi / Research Article*

Yasemin PEPE<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup> Ankara Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Fizik Mühendisliği Bölümü, 06100 Ankara, Türkiye  
(Geliş/Received : 12.07.2024 ; Kabul/Accepted : 15.11.2024 ; Erken Görünüm/Early View : 23.11.2024)

## ÖZ

Nikel oksit (NiO) kompozit filmlerin doğrusal olmayan soğurma (NA) ve optik sınırlama davranışına NiO konsantrasyonun ve giriş ışık şiddetinin etkisi araştırılmıştır. Doğrusal optik ölçüm sonuçları NiO konsantrasyonu arttıkça bant aralığı içerisindeki yerleşmiş kusur seviyelerinin arttığını ortaya çıkarmıştır. Kompozit filmlerin NA ve optik sınırlama davranışlarını ortaya çıkarmak için açık yarık Z-tarama deneyleri 532 nm dalga boylu lazer ışığı kullanılarak farklı giriş ışık şiddetleri altında gerçekleştirilmiştir. Yüksek NiO konsantrasyonuna sahip olan kompozit film en güçlü NA davranışı göstermekle birlikte artan giriş ışık şiddeti ile NA davranışı daha da güçlenmiştir. En güçlü NA davranışının en yüksek katkılama konsantrasyonunda elde edilmesi katkılamanın artmasıyla artan kusur seviyelerinin NA'ya katkıda bulunan NA mekanizmalarını desteklemesine atfedilmiştir. En küçük optik sınırlama eşik şiddet değerli en güçlü optik sınırlama davranışı en yüksek NiO konsantrasyonlu kompozit film için elde edilmiştir. Yüksek doğrusal geçirgenlik, güçlü NA ve düşük optik sınırlama eşik şiddet değerine sahip olan NiO\_20% kompozit filmler görünür bölgede etkin optik sınırlayıcı olarak kullanılmaya aday olabilirler.

**Anahtar Kelimeler:** Nikel oksit, optik sınırlama, doğrusal olmayan soğurma.

## Enhanced optical limiting behavior of the NiO composite films

### ABSTRACT

This study focused on examining the influence of varying the concentration of nickel oxide (NiO) and the intensity of input on the nonlinear absorption (NA) and optical limiting features of composite films. Linear optical measurements revealed the localized defect states increased with increasing NiO concentration. Nonlinear optical measurements revealed that the stronger NA feature was observed for the highest NiO concentration and it was enhanced with increase of the input intensity. This result was attributed to increase of defect states with higher concentrations of NiO, which favor NA mechanisms contributing to the overall NA. The strongest optical limiting with the lower optical limiting threshold value was determined for NiO\_20% composite films. with Due to the high linear transmittance, strong NA with strong optical limiting, NiO\_20% composite film can be good candidates for use as an efficient optical limiter in the visible wavelength region.

**Keywords:** Nickel oxide, optical limiting, nonlinear absorption.

### 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Modern teknolojiye büyük ölçüde, şaşırtıcı elektron taşımacılığı, mükemmel mekanik özellikleri ve geniş yüzey alanı-hacim oranı nedeniyle ilgi toplayan metal ve karbon bazlı nanokompozitler kullanılmaktadır [1, 2]. Yüzey etkisi, kuantum boyut etkisi ve makroskopik kuantum tünel etkisi açısından nanoparçacıklar, katı halden büyük ölçüde farklı benzersiz özelliklere sahiptirler [3, 4]. Geniş bant aralığı enerjisine (3.6-4.0 eV), büyük p tipi taşıyıcı konsantrasyonuna ve yüksek elektron hareketliliğine sahip NiO, diğer geçiş metal oksitleri arasında en önde gelenidir [5, 6]. Benzersiz optik, elektronik, manyetik, termal ve mekanik özellikleri sayesinde katalizörler, gaz sensörleri, pil elektrotları, elektrokimyasal filmler, foto - elektronik cihazlar manyetik depolama cihazları, fotovoltaiik hücreler, optik anahtarlama, optik doyurulabilir soğurucu ve optik sınırlama gibi teknolojik uygulamalar için NiO

araştırmacıların ilgisini çekmektedir [7-14]. NiO nanoparçacıkların sentezi için mikrodalga ışınlama, yakma, termal ayrıştırma, kimyasal çökeltme, sol-jel, solvotermal, mikro emülsiyon ve hidrotermal gibi farklı teknikler kullanılmaktadır [15-21]. NiO' nun optik, elektriksel ve manyetik özellikleri, katkılama işlemi ile değiştirilebilir. Bu amaçla NiO, Co, Fe, Mn, Sn ve In gibi çeşitli metallerle katkılanmıştır [22-25]. Kompozit yapılar gibi nanoparçacıklar ve polimerlerin birleşiminden oluşan yapılar, nanoparçacıkların termal, elektriksel ve optik gibi benzersiz özelliklerine ve şeffaflık, işlenebilirlik ve esneklik gibi polimerin avantajlarına sahiptirler [26, 27]. Benzersiz özelliklerin birleşimi sayesinde nanokompozitler ilgi çekmiş ve optik sınırlama, optik anahtarlama ve ışık kontrollü faz gibi potansiyel uygulamaları için kapsamlı bir şekilde araştırılmıştır [28-34].

\*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)  
e-posta : ypepe@ankara.edu.tr

NiO nanoparçacıklarının doğrusal olmayan optik özellikleriyle ilgili az sayıda çalışma bulunmaktadır [35-39]. Son yıllarda lazerler, yüksek güç, tutarlılık ve parlaklık gibi özellikleri sayesinde işleme endüstrisi, bilimsel araştırma, tıp ve savunma alanları da dâhil olmak üzere çeşitli sektörlerde geniş bir uygulama alanı bulmuştur. Lazer kullanımında ortaya çıkan problem sensörler, fotodetektörler ve fotoelektrik cihazlar gibi hassas bileşenlerin korunmasıyla ilgilidir. Bunun için, ani lazer maruziyet hasarını önlemek için yüksek enerjili ışınları bloke eden optik sınırlayıcılara ihtiyaç vardır. Bu çalışma, üretilen NiO kompozit filmlerin etkili optik sınırlayıcı olarak kullanılabilmesi için doğrusal olmayan soğurmaya etkisi olan parametreleri (NiO konsantrasyonu ve uyarma şiddeti) sistematik olarak inceleyen ilk çalışmadır. Bu çalışmada NiO nanoparçacıkların farklı konsantrasyonlarda polivinylpyrrolidone (PVP) içerisinde kompozit filmleri spin kaplama yöntemiyle üretilmiştir. Daldırma kaplama, spin kaplama, damla döküm veya buhar biriktirme gibi farklı tekniklerle NiO filmleri üretilebilir. Bu yöntemler arasında spin kaplama, alt tabaka üzerinde ince ve düzgün bir kaplama sağlar. Bununla birlikte, döndürme hızının değiştirilmesi ile farklı kalınlıklarda (nanometreden mikrometreye kadar) filmler elde edilebilir. Katkılama konsantrasyonu ve ışık şiddetinin NiO kompozit filmlerin NA ve optik sınırlama davranışlarına etkisi açık yarık (OA) Z-tarama deneyleri ile incelenmiştir.

## 2. MATERYAL VE METOD (MATERIAL and METHOD)

NiO nanoparçacıkları Sigma Aldrich'ten temin edilmiştir. Bu nanoparçacıkların nanokompozit filmlerinin elde etmek için polimer matris olarak PVP kullanılmıştır. PVP, tetrahidrofur (THF) içerisinde 1g/10 ml oranında manyetik karıştırıcı kullanılarak 12 saat boyunca çözdürüldü. Nanoparçacıklar elde edilen PVP çözeltisine ağırlıkça %10 ve %20 konsantrasyonlarında NiO eklendi ve manyetik karıştırıcı kullanılarak oda sıcaklığında 12 saat boyunca karıştırılarak PVP içerisinde dağılımları sağlandı. Kompozit filmler fused silika alttaşı üzerine spin kaplama yöntemi ile (1500 rpm hızda 1 dakika boyunca döndürme) elde edilmiştir. Elde edilen kompozit filmler NiO\_10% ve NiO\_20% olarak etiketlendi.

Filmlerin kalınlıklarını ölçmek için spektroskopik elipsometre (Woollam,-M2000V) kullanılmıştır. Tüm filmlerin kalınlıkları 2µm civarında bulunmuştur. Doğrusal optik ölçümleri UV-vis spektrometre (Shimadzu UV-1800) ile gerçekleştirilmiştir. OA Z-tarama deneyleri 10 Hz tekrarlama hızına sahip 4 ns darbe süreli 532 nm dalga boylu Q-anahtarlı Nd:YAG (Quantel Birillant) lazer ile gerçekleştirilmiştir. OA Z-tarama deneyleri, 200 mm odak uzaklığına sahip bir lens kullanılarak lazer ışınının numunelere z ekseninde odaklanmasıyla gerçekleştirilmiştir.

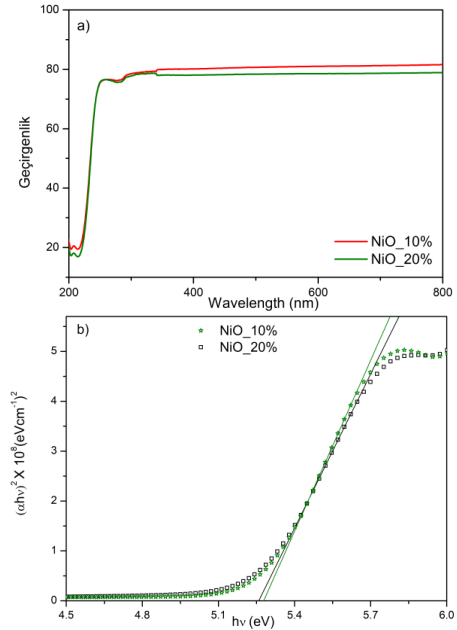
## 3. SONUÇLAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

### 3.1. Doğrusal Optik Analiz (Linear Optical Analysis)

Şekil 1'de NiO kompozit filmlerin geçirgenlik spektrumları verilmiştir. Üretilen kompozit filmler mor ötesi dalga boyu bölgesinde düşük geçirgenliğe sahipken görünür ve yakın kızılötesi dalga boyu bölgesinde yüksek geçirgenliğe sahip oldukları Şekil 1a'da görülmektedir. Bant boşluğu enerjisinin karakterizasyonu, bant boşluğu içindeki kusur durumlarının yoğunluğu ve dağılımının yanı sıra, malzemenin doğrusal olmayan optik özelliğine etki eden doğrusal olmayan soğurma mekanizmalarının aydınlatılmasında önemlidir. Kompozit filmlerin bant aralığını ortaya çıkarmak için aşağıdaki ifade kullanılmıştır [40].

$$\alpha hv = A(hv - E_g)^n \quad (1)$$

Eşitlik 1'de  $\alpha$ ,  $hv$  ve  $E_g$  sırasıyla doğrusal soğurma katsayısı, malzemeye gelen foton enerjisini ve yasak enerji bant aralığını temsil etmektedir. Eşitlikteki  $n$  değeri malzemenin valans bandı maksimumu ile iletkenlik bandı minimumu arasındaki izinli/izinsiz ve doğrudan/dolaylı olmasına göre seçilmektedir. Çalışılan malzeme izinli doğrudan geçişli olmasından dolayı  $n=1/2$  olarak alınmıştır. Bu nedenle, kompozit filmlerin yasak enerji bant aralığı değerleri, Şekil 1b'de verilen  $h\nu$ 'nin 0'a eşit olduğu  $h\nu$  grafiğine karşı  $(\alpha hv)^2$  (Tauc grafiği) ekstrapolasyonunun doğrusal bölgesinden belirlenmiştir. Yasak enerji bant aralığı değerleri NiO\_10% ve NiO\_20% kompozit filmleri için sırasıyla 5.27 eV ve 5.25 eV olarak bulunmuştur. Bu sonuca göre NiO kompozit filmin yasak enerji bant aralığı değeri PVP içerisindeki NiO konsantrasyonunun artmasıyla çok az artmıştır.

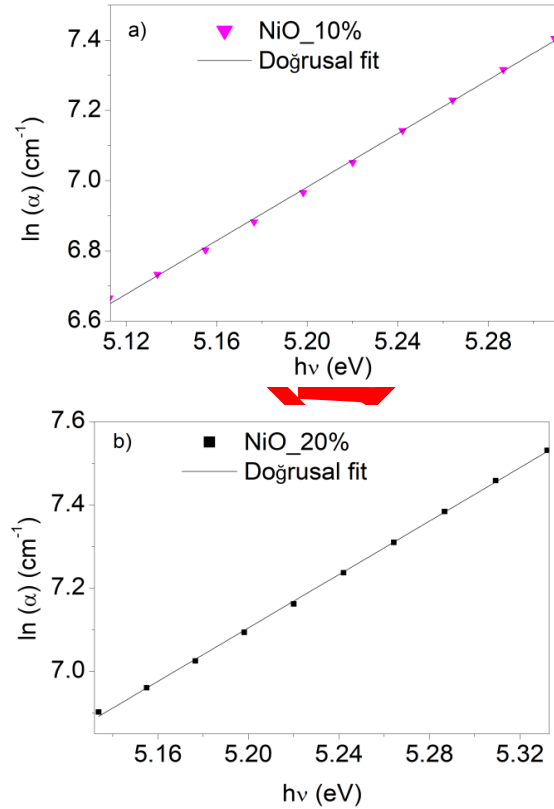


Şekil 1. NiO kompozit filmlerin a) geçirgenlik spektrumları ve b)  $(\alpha hv)^2$  karşı  $h\nu$  grafikleri (a) Transmittance spectra and b)  $(\alpha hv)^2$  vs.  $h\nu$  graphs of NiO composite films).

Enerji bant aralığı değerinin yanı sıra kusur seviyelerinin yoğunluğu ve bunların bant aralığı içindeki dağılımı, doğrusal olmayan optik özelliklerin açıklanmasında kritik öneme sahiptir. Urbach kuyruğu olarak adlandırılan soğurma bandının kuyruk kenarının genişliği, malzemenin Urbach enerjisini belirler ve yasak enerji bant boşluğu içindeki yerleşmiş kusur seviyeleri hakkında bilgi verir. Malzemelerin Urbach enerjileri aşağıdaki ifade kullanılarak soğurma bant kenarı kuyruk genişliğinden bulunmuştur [41].

$$\alpha = \alpha_0 \exp\left(\frac{hv}{E_U}\right) \quad (2)$$

Eşitlik 2'de  $\alpha$  soğurma katsayısı,  $\alpha_0$  bir sabit ve  $E_U$  Urbach enerjisidir. Kompozit filmlerin Urbach enerjileri, Şekil 2'de verilen  $\ln(\alpha)$ 'ya karşı  $hv$  grafiğindeki doğrusal bölgenin ters eğiminden elde edilmiştir. Kompozit filmlerin Urbach enerjileri NiO\_10% ve NiO\_20% için sırasıyla 0.26 eV ve 0.33 eV olarak bulunmuştur. Elde edilen sonuçlara göre PVP içerisindeki NiO konsantrasyonu artırıldığında kompozit filmlerin yasak enerji bant aralığı içerisindeki yerleşmiş kusur seviyelerinde artış meydana gelmiştir. Literatürde artan nanoparçacık konsantrasyonu ile kusur seviyelerinin arttığı rapor edilmiştir [42, 43]. Bu nedenle NiO kompozit filmleri arasında NiO\_20% kompozit filminin NiO\_10% kompozit filminden daha fazla yerleşmiş kusur seviyelerine sahip olduğunu söyleyebiliriz.

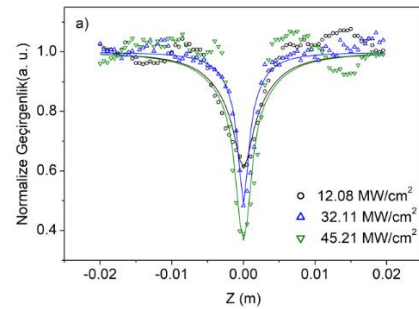


Şekil 2. a) NiO\_10% ve b) NiO\_20% kompozit filmlerin  $\ln(\alpha)$  karşı  $hv$  grafikleri ( $\ln(\alpha)$  versus  $hv$  graphs of a) NiO\_10% ve b) NiO\_20% composite films).

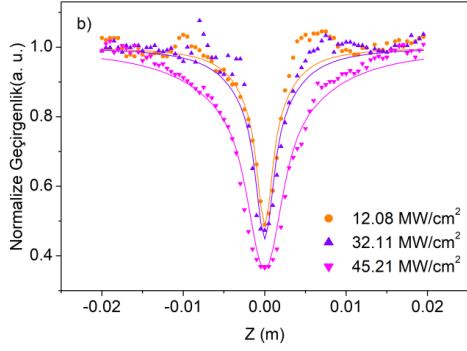
### 3.2. Doğrusal Olmayan Optik Analiz (Nonlinear Optical Analysis)

OA Z-tarama ölçümleri NiO konsantrasyonunun kompozit filmlerin NA davranışına etkilerini ortaya çıkarmak için 12.08, 32.11 ve 45.21 MW/cm<sup>2</sup> giriş şiddetlerinde 532 nm uyarma dalga boyunda gerçekleştirilmiştir. Farklı şiddetlerde NiO konsantrasyonuna bağlı olarak kompozit filmlerin elde edilen OA Z-tarama eğrileri Şekil 3'de verilmiştir. Üretilen tüm kompozit filmler doğrusal olmayan soğurma davranışı göstermiştir. Şekil 3a ve 3b'de görüldüğü gibi kompozit filmlerin üzerine düşürülen ışık şiddeti artırıldığında her iki kompozit filminin NA davranışı güçlenmiştir. Bununla birlikte NiO\_20% kompozit filminin OA Z-tarama eğrilerinin genişliğinin NiO\_10% kompozit filminin sahip olduğundan daha fazla olduğu da bu şekilde görülmektedir. Bu durum tek foton soğurmasının (OPA) NiO\_20% kompozit filminin NA davranışına NiO\_10% kompozit filminden farklı olarak etkili olduğunu göstermektedir. Şekil 4'de aynı giriş ışık şiddeti altında NiO konsantrasyonunun kompozit filmlerin NA davranışına etkisi görülmektedir.

Bu şekilde görüldüğü gibi PVP içerisindeki NiO konsantrasyonu artırıldığında, aynı giriş ışık şiddeti altında NiO\_20% kompozit filminin NA'sı NiO\_10% kompozit filmin NA'sından daha büyüktür. PVP içerisindeki artan NiO konsantrasyonu ile band aralığı içerisinde artan yerleşmiş kusur seviyeleri NA'ya katkıda bulunan NA mekanizmalarını desteklemektedir. Artmış olan kusur seviyeleri elektronun değerlik bandından foton soğurarak çıkabileceği daha fazla tuzak seviyeler olduğu anlamına gelir ve bu tuzak seviyelerinden olan soğurmalar NA'ya katkıda bulunarak artmasına neden olmuştur. Artan giriş ışık şiddeti bu tuzak seviyelerine daha fazla elektronun uyarılmasına neden olur ve NA mekanizmalarını destekler ve bu NA'nın artmasına sağlamaktadır. Bunun sonucu olarak NiO\_20% kompozit filminin NA'sı en büyük giriş ışık şiddetinde daha büyüktür. Literatürde artan kusur seviyeleri [44-50] ve artan giriş şiddeti [51-53] ile doğrusal olmayan soğurmanın güçlendiğini gösteren raporlar bulunmaktadır. NiO kompozit filmlerin yasak enerji bant aralığı değerleri ve Urbach enerjileri dikkate alındığında, temel doğrusal olmayan soğurma mekanizmaları iki foton soğurmadır.



Şekil 3. a) NiO\_10% ve NiO kompozit filmlerin farklı uyarma şiddetleri altında normalize geçirgenlik spektrumları a) Normalized transmittance of NiO\_10% composite films at various input intensities).



**Şekil 3. (devam)** b) NiO\_20% NiO kompozit filmlerin farklı uyarma şiddetleri altında normalize geçirgenlik spektrumları. b) Normalized transmittance of NiO\_20% composite films at various input intensities).

NiO kompozit filmlerin NA parametrelerinden NA katsayısı ( $\beta_{eff}$ ) ve saturasyon eşik şiddet ( $I_{SAT}$ ) değerlerini belirlemek NA'ya katkıda bulunan OPA, iki-foton soğurma (TPA) ve serbest taşıyıcı soğurması (FCA) katkılarını hesaba katan teorik bir model (Eşitlik (3)) kullanılmıştır [54].

$$\frac{dI}{dz} = \frac{\alpha I}{1+I/I_{SAT}} - \frac{\beta I^2}{1+I^2/I_{SAT}^2} - \frac{\sigma_0 \Delta N(I) I}{1+I^2/I_{SAT}^2} \quad (3)$$

$$\Delta N = \frac{\alpha I}{\hbar \omega} \tau_0 \quad (4)$$

$$\beta_{eff} = \beta + (\sigma_0 \alpha \tau_0 / \hbar \omega) \quad (5)$$

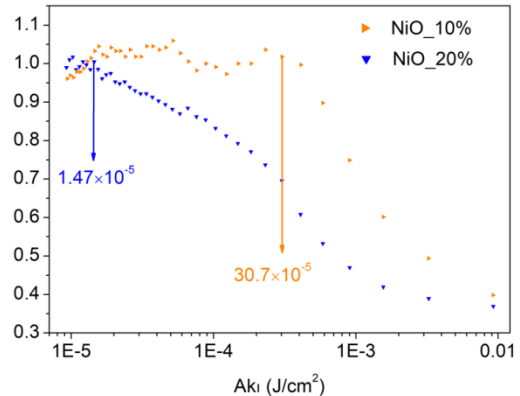
Bu eşitlikte  $\Delta N(I)$  serbest taşıyıcı yoğunluğu,  $\sigma_0$  serbest taşıyıcı soğurma tesir kesiti,  $\alpha$  doğrusal soğurma katsayısı,  $I_{SAT}$  saturasyon eşik şiddeti,  $\beta$  iki foton soğurma katsayısı,  $\tau_0$  lazer atma süresi ve  $\omega$  odaktaki ışığın yarıçapını temsil etmektedir. Eşitlik (4) ve Eşitlik (5), Eşitlik (3)'te yerine yazılarak aşağıdaki eşitlik elde edilir.

$$\frac{dI}{dz'} = -\frac{\alpha I}{1+I/I_{SAT}} - \frac{\beta_{eff} I^2}{1+I^2/I_{SAT}^2} \quad (6)$$

OA Z-tarama deneysel verilerinin teorik fit sonucu elde edilen  $\beta_{eff}$  ve  $I_{SAT}$  değerleri Çizelge 1'de listelenmiştir. NiO\_10% kompozit filminin  $\beta_{eff}$  değeri  $3.46 \times 10^{-6}$  cm/W olarak bulunmuş ve uyarma şiddetinin arttırılmasıyla  $5.51 \times 10^{-6}$  cm/W değerine yükselmiştir. NiO\_20% kompozit filminin  $\beta_{eff}$  değeri ise  $5.20 \times 10^{-6}$  cm/W olarak bulunmuş ve uyarma şiddetinin arttırılmasıyla  $16.0 \times 10^{-6}$  cm/W değerine yükselmiştir. Artan uyarma şiddeti ile valans bandından yüksek enerjili seviyelere uyarılan elektron sayısı artmasından dolayı doğrusal olmayan soğurma güçlenmiştir. En büyük  $\beta_{eff}$  değeri 45.21 MW/cm<sup>2</sup> uyarma şiddeti altında NiO\_20% kompozit filmi için bulunmuştur. NiO\_10% kompozit filmi ile karşılaştırıldığında, NiO\_20% kompozit filmindeki daha fazla olan yerleşmiş kusur seviyelerinin doğrusal olmayan soğurma mekanizmalarını desteklemesi sonucu  $\beta_{eff}$  değeri daha büyük elde edilmiştir. Elde edilen bu sonuçlara göre NiO\_20% kompozit filmi NiO\_10%

kompozit filminden daha büyük NA katsayısına sahiptir.  $I_{SAT}$  değeri malzemenin doyurulabilir soğurma davranışı göstermesi için gerekli eşik şiddet değeridir. Çizelge 1'de görüldüğü gibi PVP içerisinde artan NiO konsantrasyonu ile artan  $\beta_{eff}$  değerine karşılık  $I_{SAT}$  değerleri de artmıştır. Elde edilen bu sonuç çalışılan filmlerin NA davranışını gösterdiğini desteklemektedir. Çizelge 2'de literatürde rapor edilmiş çalışmalara ait sonuçlar NiO kompozit film sonuçları ile karşılaştırma yapmak için listelenmiştir. Çizelge 2'de listelenen bu çalışmalardan PVA/CMC/LaDyAlO<sub>3</sub> composite filmi dışındaki tüm çalışmaların NA katsayısı ve OLT değerleri ile çalışılan NiO kompozit filmlerin değerlerinin aynı mertebede olduğu görülmektedir.

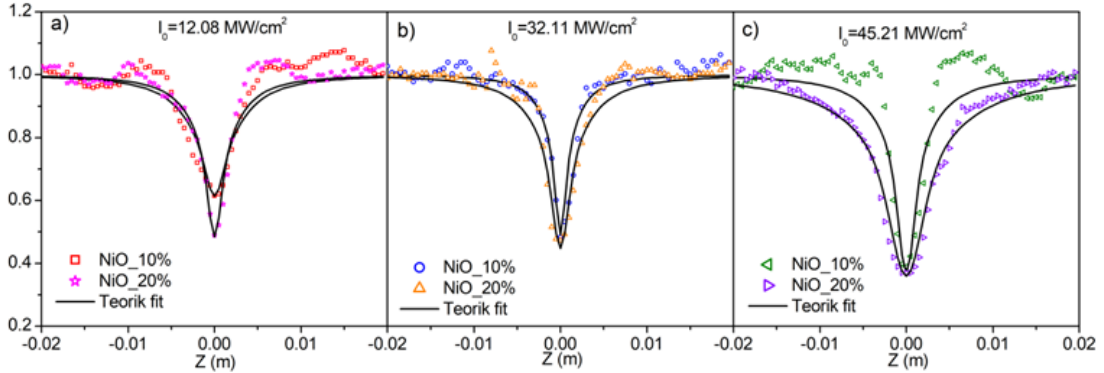
Doğrusal olmayan soğurucu davranış gösteren malzemeler tipik olarak kendinden ayarlanmalı optik sınırlayıcılar için en iyi adaylardır çünkü yüksek enerjili ışığın geçişini engellerken düşük enerjili ışığın geçişine izin verirler. NiO kompozit filmlerin optik sınırlama eşliğini (OLT) ortaya çıkarmak için, örnekler üzerindeki z eksenini boyunca akılar hesaplanmış ve optik sınırlama eğrileri Şekil 5'de verilmiştir. Normalize geçirgenliğin akıya göre azalmaya başladığı akı değeri OLT olarak belirlenmiştir. Verimli optik sınırlayıcılar için düşük OLT değeri gereklidir. NA malzemelerin optik sınırlama davranışıyla doğrudan bağlantılıdır. NA'nın artması optik sınırlamayı desteklemektedir. Bu nedenle üretilen NiO kompozit filmlerin OLT değerleri en yüksek NA davranışı gösterdikleri 45.21 MW/cm<sup>2</sup> uyarma şiddetindeki açık yarık Z tarama verilerinden elde edilmiştir. OLT değeri NiO\_10% kompozit filmi için  $30.7 \times 10^{-5}$  J/cm<sup>2</sup> ve NiO\_20% kompozit filmi için  $1.47 \times 10^{-5}$  J/cm<sup>2</sup> olarak elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre PVP içerisindeki NiO konsantrasyonu arttırıldığında optik sınırlama eşığının azalarak daha güçlü optik sınırlama davranışına neden olmuştur. Bu davranış artan NiO konsantrasyonu ile artan NA davranışıyla doğrudan ilişkilidir.



**Şekil 5.** NiO konsantrasyonuna bağlı olarak kompozit filmlerin optik sınırlama eğrileri (Optical limiting curves of composite films depending on NiO concentration).

**Çizelge 1.** NiO kompozit filmlerin NA katsayıları ( $\beta_{\text{eff}}$ ) ve saturasyon eşik şiddetleri ( $I_{\text{SAT}}$ ) (NA coefficient ( $\beta_{\text{eff}}$ ) and saturation intensity threshold ( $I_{\text{SAT}}$ ) of NiO composite films).

Uyarma şiddeti MW/cm <sup>2</sup>	Örnekler	$\beta_{\text{eff}}$ ( $\times 10^{-6}$ cm/W)	$I_{\text{SAT}}$ (GW/cm <sup>2</sup> )	OLT ( $\times 10^{-5}$ J/cm <sup>2</sup> )
12.08	NiO_10%	3.46	7.94	
	NiO_20%	5.20	8.10	
32.11	NiO_10%	4.06	8.38	
	NiO_20%	5.07	8.47	
45.21	NiO_10%	5.51	8.45	30.7
	NiO_20%	16.0	8.51	1.47



**Sekil 4.** a) NiO 10% ve b) NiO 20% NiO kompozit filmlerin farklı uyarma şiddetleri altında normalize geçirgenlik

**Çizelge 2.** Literatürdeki doğrusal olmayan optik malzemelerin NA katsayıları ( $\beta_{\text{eff}}$ ) ve optik sınırlama eşik şiddet değerleri (OLT) (NA coefficient ( $\beta_{\text{eff}}$ ) and optical limiting threshold intensity (OLT) of nonlinear optical materials in the literature).

Örnekler	$\beta_{\text{eff}}$ (cm/W)	OLT (J/cm <sup>2</sup> )	Ref.
LPA-PEO nanofibers (532 nm, 9 ns)	$0.50 \times 10^{-6}$	-	[44]
PVP/V <sub>2</sub> O <sub>5</sub> -10 nanofiber (532 nm, 4 ns)	$35.8 \pm 1.07 \times 10^{-6}$	$1.49 \times 10^{-5}$	[43]
ZnS/hydrochar nanocomposites (532 nm, 4 ns)	$9.88 \times 10^{-6}$	-	[47]
PVA/CMC/LaDyAlO <sub>3</sub> composite film (532 nm, 9 ns)	$1.23 \times 10^{-8}$	-	[50]

#### 4. SONUÇ (CONCLUSION)

Bu çalışmada farklı NiO konsantrasyonlarında spin kaplama yöntemi ile üretilmiş ve kompozit filmlerin NA ve optik sınırlama özelliklerine NiO konsantrasyonunun etkisi incelenmiştir. Kompozit filmlerde NiO konsantrasyonunun artırılmasıyla yasak enerji band aralığı 0.02 eV ve yerleşmiş kusur seviyeleri 0.07 eV artmıştır. NiO\_20% kompozit filmi NiO\_10% kompozit filminden daha kusurlu yapıya sahip olduğu ortaya çıkarılmıştır. Tüm çalışılan kompozit filmler NA davranışı göstermiştir. NiO\_10% kompozit filminin NA katsayısı uyarma ışık şiddetinin artmasıyla  $3.46 \times 10^{-6}$  değerinden  $5.51 \times 10^{-6}$  cm/W değerine, NiO\_20% kompozit filminin ise  $5.20 \times 10^{-6}$  değerinden  $16.0 \times 10^{-6}$  cm/W yükselmiştir. Bununla birlikte kompozit filmleri arasında en güçlü NA davranışı en büyük NiO konsantrasyonuna sahip kompozit filmi için elde edilmiştir. Kompozit filmlerin optik sınırlama eşik şiddet değerleri NA sonuçlarından elde edilmiştir. Bu sonuçlara göre en güçlü optik sınırlama ve en düşük optik sınırlama eşik şiddet değeri en büyük NiO konsantrasyonuna sahip kompozit filmi olan NiO\_20% için  $1.47 \times 10^{-5}$  J/cm<sup>2</sup> olarak bulunmuştur.

#### ETİK STANDARTLARIN BEYANI

##### (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Bu makalenin yazar(lar)ı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

#### YAZARLARIN KATKILARI (AUTHORS' CONTRIBUTIONS)

**Yasemin PEPE:** Deneilerin yapılması, sonuçların analiz edilmesi ve makalenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

#### ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Smith A.T., LaChance A.M., Zeng S., Liu B. & Sun L. "Synthesis, properties, and applications of graphene oxide/reduced graphene oxide and their nanocomposites", *Nano Materials Science*, 1: 31-47, (2019).

- [2] Fritea L., Banica F., Costea T.O., Moldovan L., Dobjanschi L., Muresan M., Cavalu S., "Metal nanoparticles and carbon-based nanomaterials for improved performances of electrochemical (Bio) sensors with biomedical applications", *Materials*, 14: 6319, (2021).
- [3] Gleiter H., "Nanocrystalline materials", *Progress in Materials Science*, 33: 223-315, (1989).
- [4] Wang Z.L., Liu Y. & Zhang Z., "Handbook of Nanophase and Nanostructured Materials: Materials systems and applications I, Vol. 3. (2003).
- [5] Chen H.-L., Lu Y.-M., Hwang W.-S., "Characterization of sputtered NiO thin films", *Surface and Coatings Technology*, 198: 138-142, (2005).
- [6] Yang H., Tao Q., Zhang X., Tang A., Ouyang J., "Solid-state synthesis and electrochemical property of SnO<sub>2</sub>/NiO nanomaterials", *Journal of Alloys and Compound*, 459: 98-102, (2008).
- [7] Baierl, S. Mentink J.H., Hohenleutner M., Braun L., Do T.-M., Lange C., Sell A., Fiebig M., Woltersdorf G., Kampfrath T., "Terahertz-driven nonlinear spin response of antiferromagnetic nickel oxide", *Physical review letters*, 117: 197201, (2016).
- [8] Fukui T., Ohara S., Okawa H., Hotta T., Naito M., "Properties of NiO cathode coated with lithiated Co and Ni solid solution oxide for MCFCs", *Journal of Power Sources*, 86: 340-346, (2000).
- [9] Hotovy I., Huran J., Spiess L., Hascik S., Rehacek V., "Preparation of nickel oxide thin films for gas sensors applications." *Sensors and Actuators B: Chemical*, 57: 147-152, (1999).
- [10] Manders J.R. Tsang S.W., Hartel M.J., Lai T.H., Chen S., Amb C.M., Reynolds J.R., So F., "Solution-processed nickel oxide hole transport layers in high efficiency polymer photovoltaic cells", *Advanced Functional Materials*, 23: 2993-3001, (2013).
- [11] Bi H., Li S., Zhang Y., Du Y., "Ferromagnetic-like behavior of ultrafine NiO nanocrystallites" *Journal of magnetism and magnetic materials*, 277: 363-367, (2004).
- [12] Rusdi M.F.M., Rosol A.H.A., Rahman M.F.A., Mahyuddin M.B.H., Latiff A.A., Ahmad H., Harun S.W., Yasin M., "Q-switched and mode-locked thulium doped fiber lasers with nickel oxide film saturable absorber", *Optics Communications*, 447: 6-12, (2019).
- [13] Karthikeyan, B., Hariharan S., Mangalaraja R., Pandiyarajan T., Udayabhaskar R., Sreekanth P., "Studies on NiO-PVA composite films for opto-electronics and optical limiters" *IEEE Photonics Technology Letters*, 30: 1539-1542, (2018).
- [14] de Melo R.P., da Silva B.J., dos Santos F.E.P., Azevedo A., de Araújo C.B., "Nonlinear refraction properties of nickel oxide thin films at 800 nm" *Journal Applied Physics*, 106(9), (2009).
- [15] Huang Y., Zhang Y., Lin S., Yan L., Cao R., Yang R., Liang X., Xiang W., "Sol-gel synthesis of NiO nanoparticles doped sodium borosilicate glass with third-order nonlinear optical properties", *Journal of Alloys and Compound*, 686: 564-570, (2016).
- [16] Hu, H., Chen G., Deng C., Qian Y., Wang M., Zheng Q., "Green microwave-assisted synthesis of hierarchical NiO architectures displaying a fast and high adsorption behavior for Congo red", *Materials Letters*, 170, 139-141, (2016).
- [17] Chen G., Guan H., Dong C., Xiao X., Wang Y., "Effect of calcination temperatures on the electrochemical performances of nickel oxide/reduction graphene oxide (NiO/RGO) composites synthesized by hydrothermal method", *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 98: 209-219, (2016).
- [18] Lee S., Park S., Kim C.-W., Lee D., Lee C., Jin C., "Defect-related photoluminescence properties of as-synthesized and annealed NiO nanostructures via hydrothermal method", *Thin Solid Films*, 598: 33-38, (2016).
- [19] Ponnusamy P., Agilan S., Muthukumarasamy N., Senthil T., Rajesh G., Venkatraman M., Velauthapillai D., "Structural, optical and magnetic properties of undoped NiO and Fe-doped NiO nanoparticles synthesized by wet-chemical process", *Materials Characterization*, 114: 166-171, (2016).
- [20] Krishnakanth R., Jayakumar G., Irudayaraj A.A., Raj A.D., "Structural and magnetic properties of NiO and Fe-doped NiO nanoparticles synthesized by chemical coprecipitation method", *Materials today: proceedings*, 3: 1370-1377, (2016).
- [21] Wang Y., Zhu J., Yang X., Lu L., Wang X., "Preparation of NiO nanoparticles and their catalytic activity in the thermal decomposition of ammonium perchlorate", *Thermochimica Acta*, 437: 106-109, (2005).
- [22] Diba A., Benramache S., Benhaoua B., "Transparent nanostructured Co doped NiO thin films deposited by sol-gel technique", *Optik*, 172: 832-839, (2018).
- [23] Feng C., Kou X., Chen B., Qian G., Sun Y., Lu G., "One-pot synthesis of In doped NiO nanofibers and their gas sensing properties", *Sensors and Actuators B: Chemical*, 253: 584-591, (2017).
- [24] Nair L.S., Chandran D., Anandakumar V., Babu K.R., "Structure and room-temperature ferromagnetism evolution of Sn and Mn-doped NiO synthesized by a sol-gel process", *Ceramics International*, 43: 11090-11096, (2017).
- [25] Patel K.N., Deshpande M., Gujarati V.P., Pandya S., Sathe V., Chaki S., "Structural and optical analysis of Fe doped NiO nanoparticles synthesized by chemical precipitation route", *Materials Research Bulletin*, 106: 187-196, (2018).
- [26] Dai Prè M., Martucci A., Martin D.J., Lavina S., Di Noto V., "Structural features, properties, and relaxations of PMMA-ZnO nanocomposite", *Journal of Materials Science*, 50: 2218-2228, (2015).
- [27] Johnson L.P., Matison J.G., "Investigation of the thermal and structural properties of single-molecule magnet/polymer nanocomposite films" *Journal of Materials Science*, 44: 2805-2813, (2009).
- [28] Yuwono A.H., Xue J., Wang J., Elim H.I., Ji W., Li Y., White T.J., "Transparent nanohybrids of nanocrystalline TiO<sub>2</sub> in PMMA with unique nonlinear optical behavior", *Journal of Materials Chemistry*, 13: 1475-1479, (2003).
- [29] Shen H., Cheng B., Lu G., Guan D., Chen Z., Yang G., "Picosecond nonlinear optical responses of Au/PVP composite films", *Journal of Physics D: Applied Physics*, 39: 233, (2005).



- [30] Cun-Xiu W., Shi-Shu F., Yu-Zong G., "Large third-order optical nonlinearity of cadmium sulphide nanoparticles embedded in polymer thin films", *Chinese Physics Letters*, 26: 097804, (2009).
- [31] Ning T., Zhou Y., Shen H., Lu H., Sun Z., Cao L., Guan D., Zhang D., Yang G., "Large third-order optical nonlinearity of periodic gold nanoparticle arrays coated with ZnO", *Journal of Physics D: Applied Physics*, 40: 6705, (2007).
- [32] Pepe Y., Akkoyun S., Asci N., Cevik E., Tutel Y., Karatay A., Unalan H.E., Elmali A., "Investigation of the Defect and Intensity-Dependent Optical Limiting Performance of MnO<sub>2</sub> Nanoparticle-Filled Polyvinylpyrrolidone Composite Nanofibers", *ACS omega*, 8: 47954-47963, (2023).
- [33] Ünlü B.A., Akkoyun S., Karatay A., Ates A., Elmali A., "Controlled plasmon-induced nonlinear absorption and optical limiting in Al/PVP composite nanofibers", *Nanoscale*, 15: 19229-19237, (2023).
- [34] Kurian P., Vijayan C., Sathiyamoorthy K., Suchand Sandeep C., Philip R., "Excitonic transitions and off-resonant optical limiting in CdS quantum dots stabilized in a synthetic glue matrix", *Nanoscale Research Letters*, 2: 561-568, (2007).
- [35] Shkir M., Ganesh V., AlFaify S., Yahia I., Zahran H., "Tailoring the linear and nonlinear optical properties of NiO thin films through Cr<sup>3+</sup> doping", *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 29: 6446-6457, (2018).
- [36] Usha V., Vettumperumal R., Kalyanaraman S., Thangavel R., "Analysis of linear and nonlinear optical properties of NiO nanoparticles by sol-gel method", *International Journal of Nanoscience*, 17: 1850003, (2018).
- [37] Pepe Y., Karatay A., Donar Y.O., Yildiz E.A., Sinag A., Unver H., Elmali A., "Enhanced nonlinear absorption coefficient and low optical limiting threshold of NiO nanocomposite films", *Optik*, 227: 165975, (2021).
- [38] Alrebdı T.A., Ahmed H.A., Alkallas F.H., Mwafy E.A., Trabelsi A.B.G., Mostafa A.M., "Structural, linear and nonlinear optical properties of NiO nanoparticles-multi-walled carbon nanotubes nanocomposite for optoelectronic applications", *Radiation Physics and Chemistry*, 195: 110088, (2022).
- [39] Shkir M., Arif M., Ganesh V., Singh A., Algarni H., Yahia I., AlFaify S., "An effect of Fe on physical properties of nanostructured NiO thin films for nonlinear optoelectronic applications", *Applied Physics A*, 126: 119, (2020).
- [40] Pankove J.A. "Optical processes in semiconductors", *Courier Corporation*, (1975).
- [41] Urbach F. "The long-wavelength edge of photographic sensitivity and of the electronic absorption of solids", *Physical review*, 92: 1324, (1953).
- [42] Pepe, Y., Akkoyun S., Bozkurt, B., Karatay, A., Ates, A., Elmali, A. "Investigation of the wavelength dependent nonlinear absorption mechanisms of polyvinylpyrrolidone and cadmium selenide hybrid nanofibers", *Optics and Laser Technology*, 164:109497, (2023).
- [43] Pepe, Y., Tutel, Y., Akkoyun S., Asci, N., Cevik, E., Karatay, A., Unalan, H. U., Elmali, A. "Visible-light optical limiting of vanadia-polyvinylpyrrolidone nanofibers", *Journal of Materials Science*, 59: 4102-4117, (2024).
- [44] Singh, A.K., Singh, A. K., Yogeswari, C., Pramod, A., Girisun, T.C. S., Manattayil, J. K., Nagalakshmi, R. "Second harmonic generation and two photon absorption assisted power limiting mechanism of L-Phenylalanine (LPA)-poly-ethylene-oxide (PEO) electrospun nanofibers", *Optical Materials*, 143: 114222, (2023).
- [45] Mostafa, A.M. "Preparation and study of nonlinear response of embedding ZnO nanoparticles in PVA thin film by pulsed laser ablation" *Journal of Molecular Structure*, 1223: 129007, (2021).
- [46] gamal El-Shamy, A. "The optical anatomy of new polyvinyl alcohol/zinc peroxide (PVA/ZnO<sub>2</sub>) nanocomposite films for promising optical limiting applications", *Progress in Organic Coatings*, 150: 105981, (2021).
- [47] Tekin, S., Karatay, A., Donar, Y. O., Bilge, S., Yildiz, E. A., Sinag, A., Elmali, A. "Tuning the linear and nonlinear optical absorption properties of ZnS/hydrochar nanocomposites by concentration of nanoparticles", *Optical Materials*, 113: 110849, (2021).
- [48] Boranna, M., Kampalapura, S. C., Neelamma B. G., Mahesh, S. S., Paul, P. S., Srikantaswamy, S., Ravikumar, H. B. "Studies on microstructural dependence of nonlinear optical properties in PSAN/CdS polymer nanocomposite", *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 34: 1683, (2023).
- [49] Boranna, M., Gummagol, N.B., Patil, P.S., Ravikumar, H. "Effect of free volume on nonlinear optical characteristics of P (St-co-MMA)/CuO and PSAN/CuO polymer nanocomposites", *Materials Science and Engineering: B*, 302: 117239, (2024).
- [50] Johnson, V., Gandhiraj, V. "Effect of rare earth doped perovskite on the structural, linear/nonlinear optical properties of the fabricated PVA/CMC polymeric blends for optical limiting applications", *Optical Materials*, 148: 114824, (2024).
- [51] Doğan, A. Pepe, Y., Bilgili, M. Y., Karatay, A., Ertap, H., Karabulut, M., Elmali A. "Effects of boron doping in InSe single crystals on optical limiting performance in the near-infrared region", *Physica Scripta*, 99: 045505, (2024).
- [52] Doğan, A. Karatay, A., Isik, M., Yildiz E., asanlı, N., Elmali, A. "Revealing the Effects of Defect States on the Nonlinear Absorption Properties of the TIInSe and TI<sub>2</sub>In<sub>2</sub>S<sub>3</sub>Se Crystals in Near-Infrared Optical Limiting Applications" *Crystal Growth & Design*, 24: 6981-6990, (2024).
- [53] Biswas, S., Kole, A., Tiwary, C., Kumbhakar, P. "Enhanced nonlinear optical properties of graphene oxide-silver nanocomposites measured by Z-scan technique" *RSC advances*, 6: 10319-10325, (2016).
- [54] Yüksek, M., Kürüm, U., Yaglioglu, H.G., Elmali, A., Ateş, A. "Nonlinear and saturable absorption characteristics of amorphous InSe thin films" *Journal Applied Physics*, 107: 033115, (2010).