

FEMTOSANIYE LASER Z-SCAN TEKNİĞİ İLE MALZEMELERİN NONLİNEER OPTİK KARAKTERİZASYONU

Hamdi Şükür KILIÇ^{1,2}, Yasemin GÜNDOĞDU¹, Abdullah KEPCEOĞLU¹, Haziret
DURMUŞ¹

¹Selçuk Üniversitesi, Fen Fakültesi, Fizik Bölümü, Konya Türkiye

²Selçuk Üniversitesi, İleri Teknoloji Araştırma ve Uygulama Merkezi, Konya Türkiye

hamdisukurkiloc@selcuk.edu.tr, ysmngndgd23@gmail.com,

abdullahkepceoğlu@gmail.com, hdurmus@selcuk.edu.tr

Özet

Farklı yapıdaki sıvı kristallerin, organik malzemelerin ve saydam optik malzemelerin; lineer olmayan soğurma (NLA) ve lineer olmayan kırılma (NLR) gibi optik özelliklerinin belirlenmesi amacıyla geniş çaplı uygulamalar ve güvenilir yöntemler geliştirilmiştir. Z-tarama metodu, yoğunlaşmış ışık demeti boyunca incelenecek malzemeyi yatay bir düzlemde (optik eksen boyunca) ve odak noktasından geçecek şekilde hareket ettirerek farklı şiddetlerle etkileşmesi üzerine dayanan bir tarama yöntemidir. Z-tarama tekniği puls laserler kullanılarak da malzemenin optiksel lineer olmayan özelliklerinin belirlenmesinde kullanılmaktadır. Bu yöntem ile lineer olmayan soğurma katsayısı ve lineer olmayan kırılma indisi bağıntıları belirlenerek malzeme için ayırt edici bazı özellikleri yapılan hesaplamalar ile saptanabilmektedir. Bu çalışma kapsamında z-tarama sistemi femtosaniye (fs) laser ile birlikte kullanılarak sıvı içerisinde puls laser ablasyon ile elde edilmiş olan PMMA, altın (Au) ve bakır (Cu) nanoparçacıkların lineer olmayan optik parametreleri elde edilmiştir. Aynı zamanda z-tarama deney düzeneğinde referans çalışması olarak CS₂ molekülünün analizleri de yapılmıştır ve sonuçların literatür ile uyumlu olduğu gösterilmektedir.

Anahtar Kelimeler: Laserler, Femtosaniye Laser, Z-tarama, Lineer Olmayan Optik

THE OPTICAL CHARACTERIZATION OF THE MATERIALS WITH FEMTOSECOND LASER Z-SCAN TECHNIQUE

Abstract

A wide range of applications and reliable methods have been developed to determine the optical properties such as nonlinear absorption (NLA) and nonlinear refraction (NLR) of the different types of liquid crystals, organic materials and optically transparent materials. The z-scan method is accepted as a method based on material interaction with different laser intensity by moving in a horizontal plane along the intensive laser beam. The z-scan technique with femtosecond lasers is used to determine the nonlinear optical properties of the material. With this method, the nonlinear absorption coefficient and nonlinear refractive index can be calculated to determine the distinguishing feature of the materials. In this study, a z-scan system used with femtosecond laser system which has been obtained nonlinear optical parameters rhenium, gold and copper nanoparticles achieved by pulse laser ablation method and also z-scan experimental setup was performed for CS₂ molecule as a reference study and results have been shown to be consistent with the literature.

Keywords: Lasers, Femtosecond Laser, Z-scan, Nonlinear Optic

1. Giriş

Z-tarama tekniği, Gaussyen demet profiline sahip bir laser demeti üreten nanosaniye (ns) ve femtosaniye (fs) laserler ile birlikte kullanılarak malzemenin lineer olmayan kırılma indisi ve lineer olmayan soğurma katsayısının hesaplanmasında kullanılmaktadır [1, 2]. Malzemelerin karakteri ile teknolojideki kullanımı arasındaki ilişkileri ortaya koyabilmek için lineer olmayan optik özelliklerin belirlenmesi oldukça önemli bir süreçtir.

Yüksek yoğunlukta laser demeti malzeme boyunca yayıldığı zaman lineer olmayan bir etkiye sebep olur. Yoğun laser demeti cam, kristal ya da gaz bir ortamda ilerlerken meydana gelen bu lineer olmayan etki Kerr Etkisi olarak bilinir ve bu durum ortamda meydana gelen kırılma indisi değişimidir. Z-tarama tekniği ilk olarak 1985 yılında Eric Van Stryland ve ark. tarafından ortaya konulmuştur. Teknik temel olarak lineer olmayan optik özellikleri incelenecek olan malzemeyi yatay bir düzlemde yoğunlaşmış ışık demeti boyunca hareket ettirerek farklı spot hacmine bağlı oluşan şiddetle etkileşmesinin sonuçlarına dayalı olarak inceleme yapan bir analiz yöntemidir [3, 4].

Deney-teori karşılaştırmalarına olanak sağlayan z-tarama tekniğinde, laser demetinin odağı boyunca hareket ettirilen örnek, hareket pozisyonunun fonksiyonu olarak bazı noktalarda demet diverjansını belirlemek için laser demetinin yarıçap ölçümleri alınır buradaki lineer olmayan kırılma indisi pozitif değerli olarak elde edilmektedir ve örnek odak noktasının gerisine yerleştirilmiş ise kendinden odaklama (self focusing) sonucu demet diverjansı azalır ve böylece dedektörde okunan sinyalin şiddetini artırır. Örnek pozisyonuna bağlı olarak detektörden alınan sinyalden kırılma indisi büyüklüğü hesaplanmaktadır [5, 6].

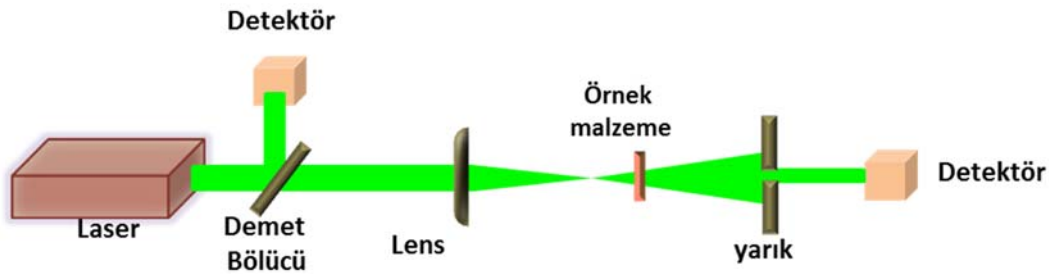
Literatürde pek çok organik, organometalik ve polimerik malzemeye ait NLO (Nonlinear Optic) hesaplamalar gerçekleştirilmiştir. Teorik olarak geliştirilen z-tarama yöntemi ile lineer ve lineer olmama durumu için n_2 kırılma indisini, α ve β soğurma katsayılarını hesaplamak mümkündür. Genel olarak z-tarama teorisi lineer olmayan paraksial dalga denkleminin çözülmesine dayanan bir yöntemdir. Bu teori soğurma katsayısı ve lineer olmayan kırılma indisinin hesaplanması durumları için de geçerlidir [7, 8].

Gausyen bir demet şekline sahip olan laser demetinin kesitine bakıldığında en fazla şiddetin olduğu bölge demet merkezidir. Demetin şiddeti merkezden kenarlara doğru üstel olarak azalmaktadır. Bu durumda malzemenin göstereceği tepki de şiddete bağlı olarak değişmekte ve bundan dolayı kırılma indisi farklı noktalarda farklı değerlere sahip olmaktadır. Malzemenin şiddete bağlı kırılma indisindeki değişimi pozitif ($n_2 > 0$) ise, demetin merkezindeki kırılma indisi kenarlarına göre daha büyük olmaktadır ve ortam ince kenarlı mercek gibi davranmakta ve dolayısıyla demet odaklanmaya başlamaktadır bu durum ise kendinden odaklanma olarak bilinen *self focusing* olayıdır. Eğer malzemenin şiddete bağlı kırılma indisindeki değişim negatif ($n_2 < 0$) ise merkezdeki kırılma indisi kenarlara göre daha küçüktür ve bu durumda malzeme kendinden saçılma olarak bilinen *self defocusing* davranışını sergileyecektir [9].

Keyfi lineer olmayan faz değişimi, kayıpsız bir ortam ve sınırlı uzunluk durumunda lineer olmayan kırılma indisi n_2 'yi elde etmek için geliştirilen hesaplama metodunda eğer termo-optik etkiler varsa z-tarama teorisinde değişiklikler yapılması gerekmektedir. Teorik olarak geliştirilen bu yöntem kullanılarak lineer ve lineer

olmama durumları için n_2 kırılma indisi ile birlikte α ve β soğurma katsayılarını hesaplamak mümkündür [7].

Z-tarama yönteminde laser demeti lens yardımıyla odaklanır. Belirlenen örnek, laser demeti boyunca hareket kontrollü bir sistem tarafından (linear stage) lensin odak noktasından geçecek şekilde optik eksen boyunca hareket ettirilerek farklı laser şiddetleri etkileşmesi sağlanır. Özellikle femtosaniye laser sisteminin kullanılması durumunda, filament oluşum sınırı $10\text{GW}/\text{cm}^2$ olduğu için Kerr etkisinin daha baskın olduğu vurgulanmaktadır [10]. Örnek hareket ederken örnekten geçen laser demeti bir demet bölücü ile iki kola ayrılır. Ayrılan kollardan birincisi açık yarıklı diğeri ise kapalı yarıklı olarak tanımlanmaktadır. Bunlardan açık yarıklı yapılan ölçümde malzemenin iki foton soğurma katsayısı β , kapalı yarıklı yapılan ölçümde ise çizgisel olmayan kırılma indisi n_2 elde edilir. Böylece, bir deney düzeneğinde demet bölücü ile ayrılan laser demet yardımıyla malzemenin soğurma katsayısı ve kırılma indisi aynı anda belirlenebilmektedir [11]. Ayrıca, olası demet dalgalanmalarını izlemek ve normalize etmek için laser demet çıkışına (odak lensinden önce) bir demet bölücü ile referans bir detektör yerleştirilebilmektedir. Böylece, sistem için en uygun optik tasarım gerçekleştirilebilmektedir [4].



Şekil 1. Z-tarama ölçüm tekniğinin genel şematik gösterimi

Z-tarama tekniğinin en büyük avantajı karmaşık olmayan optik tasarım ile incelenen malzemenin üçüncü dereceden ($\chi^{(3)}$) optik alınganlığı yüksek hassasiyetle çeşitli hesaplamalar yapılarak elde edilmesine imkân vermesidir. Gausyen şeklindeki laser demeti bir lens yardımıyla Şekil 1'de gösterildiği gibi odaklanarak, örnek malzeme lens ile detektör arasında hareket etmesi sağlanırken detektör yardımıyla yarıktan geçen demet şiddetinin grafiği elde edilir. Bu grafiğin şekli ve genliğine bakılarak optik alınganlığın ($\chi^{(3)}$) işareti ve reel kısmı hesaplanabilir. Yarıklı kaldırılıp laser demeti lensle odaklanarak tüm demetin detektöre gelmesi sağlanırsa, optik alınganlığın ($\chi^{(3)}$)

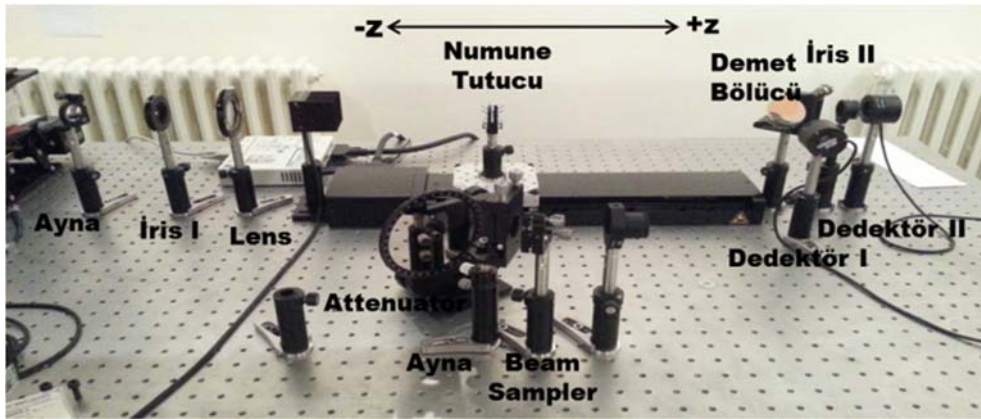
sanal kısmı hesaplanır. Buradaki amaç malzemenin optik özellikleri hakkında bilgi edinmektir. Gausyen demetinin son derece kaliteli olmasının gerekliliği ise z-tarama tekniğinin dezavantajlarından birisidir [12].

2. Materyal ve Metot

2.1 Z-Tarama Tekniği

Z-tarama ölçüm tekniği kullanım amacı itibari ile aşağıda belirtilen temel noktalarda özetlenebilmektedir;

Z-tarama tekniği, lineer olmayan optik malzemelerin karakterizasyonunu ortaya koymak için tasarlanmış metotlardan birisidir. Teknik, malzemenin lineer olmayan kırılma indisi n_2 ve lineer olmayan soğurma katsayısı β değerlerinin belirlenmesinde rutin çalışmalar için yaygın bir şekilde kullanılmaktadır.



Şekil 2. Bu çalışmada kullanılan z-tarama ölçüm tekniğine ait deneysel düzenek

Z-tarama ölçüm tekniğinin fs laser ile birlikte kullanıldığı deney düzeneği Şekil 2 ile gösterilmektedir. Lineer olmayan optiksel yoğunluk dağılımı, malzemede soğurma bağıntısı ve kırılma indisinde değişime sebep olmaktadır ve bu durum demet dağılımının değişimi olarak gözlenmektedir. Sonuç olarak; örnek arkasında belirli bir düzlemde yoğunluk dağılımı örnek pozisyonuyla değişmekte ve böylece malzemenin lineer olmayan parametreleri kapalı yarık ve açık yarık olarak iki şekilde ölçülen z-tarama eğrileri teorik olarak hesaplanarak belirlenebilmektedir.

2.1.1.Kapalı Yarık Z-tarama

Kapalı yarık z-tarama deneyinde, numune eksen boyunca odak noktasından geçecek şekilde (linear stage) ile hareket ettirilir, örnek malzemenin geçen laser demeti bir yarıktan geçirilmekte ve detektöre gelen sinyal ölçülerek kaydedilmektedir.

Malzemenin, lineer olmayan kırılma indisi negatif ve odaklanan laser demetinin kırınım uzunluğundan ($z_0=kw_0^2/2$; k:dalga vektörü, w_0 : laser demetinin yarıçapı) daha küçük kalınlığa sahip bir malzeme incelenirse, bu durumda malzeme odaktan uzak mesafedeyken, yani harekete başlandığında, demetin şiddeti az olduğu için lineer olmayan kırılma etkisi gözlenmeyecektir. Yani, numune içerisinden geçen laser demetinde (genişleme) veya (odaklanma) görülmez, geçirgenlik sabit kalır.

Şekil 1 ve 2’de görüldüğü gibi malzeme odak yakınına geldiğinde laser demetinin şiddeti daha fazla olacağı için malzemenin içinde kendiliğinden odaklanma (self-defocusing) etkisi gözlemlenir. Odaktan önce kendiliğinden odaklama sonucu laser demeti odaklanarak yarık üzerine düşen laser demetinin daralmasına neden olur. Böylece, detektörde ölçülen laser geçirgenliği artar. Malzeme motor kontrollü sistem ile odak düzleminin pozitif kısmına geçtiğinde kendiliğinden genişleme etkisi, laser demetinin genişlemesine sebep olur. Böylece detektörde ölçülen laser geçirgenliği azalır. Malzeme odak noktasından uzaklaştıkça demetin şiddeti azalır ve lineer olmayan kırılma ihmal edilebilir hale geldiğinde tarama tamamlanır. Odak noktasından önce oluşan maksimum laser geçirgenliği odak noktasından sonra bir minimum geçirgenlik takip eder. Bu nedenle lineer olmayan kırılmanın işareti negatiftir. Benzer şekilde pozitif çizgisel olmayan kırılmada da maksimumu bir minimum geçirgenlik takip eder. Elde edilen verilerden malzemenin çizgisel olmayan kırılma indisi belirlenmiş olur [4, 5]. Genel olarak Z-tarama teorisi lineer olmayan paraksiyel dalga denkleminin çözülmesine dayanan bir yöntemdir. Bu teori soğurma ve lineer olmayan kırılma indisi içeren kalın örnekler ve büyük lineer olmama durumları için geçerlidir [8].

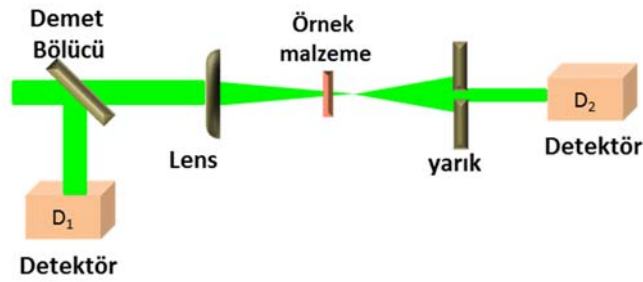
Tablo 1. Kapalı yarık z-tarama deneyinde kullanılan önemli parametreler

ΔT_{p-v}	Vadi ve tepe noktası arasındaki geçirgenlik değeri
S	Yarıktan geçen ışının çapının gelen ışın demet çapına oranı
$\Delta\phi_0$	Odak noktasında faz değişimi
I_0	Odak noktasındaki laser yoğunluğu
L_{eff}	$(1-e^{-\alpha L})$, L örnek uzunluğu, α lineer soğurma katsayısı
$\Delta T_{p-v} \cong 0,406(1 - S)^{0,25} \Delta\phi_0 $ (1)	

$$\Delta\phi_0 = \frac{2\pi}{\lambda} n_2 I_0 L_{eff} \quad (2)$$

$$T(Z, \Delta\phi_0) = 1 + \frac{4\Delta\phi_0 x}{(x^2+9)(x^2+1)} \quad (3)$$

Kapalı yarık z-tarama için kullanılan önemli parametreler Tablo 1’de gösterilmektedir ve eşitlik (1) kullanılarak $\Delta\phi_0$ faz değişimi hesaplanmakta ve eşitlik (2) kullanılarak n_2 nonlineer kırılma indisi değeri belirlenebilmektedir. Deneysel sonuçlar bazı matematiksel paket programlar kullanılarak eşitlik (3)’e göre fit (deneysel verilere eğri uydurma işlemi) edilmektedir. Fit işlemi normalize edilen verilere uygulanarak gerçekleştirilmektedir.



Şekil 3. Kapalı yarık z-tarama deney düzeneği

Şekil 3’de gösterilen kapalı yarık z-tarama tekniğinde Sheik-Bahae ve arkadaşları z-tarama teorisini tanımlarken lineer olmayan kırılma göz önünde bulundurulmuştur ve lineer olmayan soğurmanın olmadığı varsayılmıştır [5, 6].

Önemli parametrelerden olan malzemenin kırılma indisi bağıntısını ortaya koymak için Şekil 3’de verilen deney sisteminden elde edilen verilerin analizi teorik ifadelerden yararlanılarak üçüncü mertebeden çizgisel olmama özelliğinin belirlenebilmesi için n kırılma indisi, lineer olmayan kırılma indisi n_2 ve lineer kırılma indisi n_0 ile ilişkili eşitlik (4) ile ifade edilir.

$$n = n_0 + \frac{n_2}{2} |E|^2 = n_0 + \Delta n \quad (4)$$

Eşitlik (4)’te E , elektrik alanının genliğidir.

Demet yarıçapı w_0 olan Gausyen biçimli bir demet için λ dalga boyu olmak üzere $k=2\pi/\lambda$ dalga vektörü, z eksenini boyunca $w^2(z) = w_0^2(1 + z^2/z_0^2)$ demet yarıçapı ifadeleri olarak tanımlandığında, E ifadesi;

$$|E(r, z, t)| = |E_0(t)| \frac{w_0}{w(z)} \exp\left(-\frac{r^2}{w^2(z)}\right) \quad (5)$$

Eşitlik (5) ile tanımlanır ve burada $E_0(t)$ ifadesi odaklanmış demetin elektrik alanının ifadesine eşittir. Burada örnek numune uzunluğu yeteri kadar küçük olduğunda kırınım ya da lineer olmayan kırılmadan dolayı örnek içindeki demet çapındaki değişim ihmal edilebilir. Böylece ortam “ince” olarak adlandırılır [5, 6].

Lineer olmayan faz değişimi $\Delta\phi$ ve elektrik alanının genliğindeki değişim;

$$\frac{d\Delta\phi}{dz} = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta n \quad \text{ve} \quad \frac{d|E|}{dz} = -\frac{\alpha}{2} |E| \quad (6)$$

Eşitlik (6) ifadeleri ile verilir ve bu denklemler çözümlenerek örnek numunenin çıkış yüzeyindeki faz değişimi ifadesi elde edilmektedir. Burada α , soğurma katsayısına eşittir ve $L_{eff} = (1 - e^{-\alpha L})/\alpha$ ifadesinde L örnek numunenin uzunluğunu tanımlamaktadır.

Tanımlanan denklemlerden hareketle z-tarama geçirgenliği (transmittance) ifadesi olan

$$T(z, t) = \frac{\int_0^r |E_\alpha(\Delta\theta_{0,r,z,t})|^2 r dr}{S \int_0^\infty |E_\alpha(0,r,z,t)|^2 r dr} \quad (7)$$

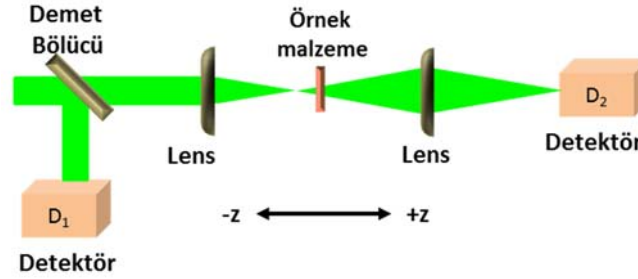
Eşitlik (7) elde edilir ve burada r yarığın yarıçapıdır. S ise yarığın çizgisel geçirgenliğini ifade etmektedir. Z-tarama eğrisinden hareketle elde edilen veriler eşitlik (7) ile yorumlanarak, kapalı yarığın için malzemenin çizgisel olmayan kırılma indisinin hesaplanması yapılır ve malzeme hakkında amaçlanan bilgi edinilmiş olur.

2.1.2. Açık Yarığın Z-tarama

Açık yarığın z-tarama deneyinde kapalı yarığın farklı olarak detektörün önündeki yarığın kaldırılır. Detektörün önüne lens yerleştirilir ve malzemedeki geçen demet toplanarak detektöre gelmesi sağlanır. Malzeme odak noktasından uzakta iken laser demetinin şiddeti az olduğu için sadece lineer soğurma gerçekleşir, ancak malzeme odak noktasına yaklaştığında ise lineer soğurmanın yanında lineer olmayan soğurma da meydana gelebilmektedir.

Malzeme odak noktasına yaklaştığında detektörde gözlenen şiddet azalmaktadır ve tam odak noktasında bir minimum gözlenebilmektedir. Odak noktasını geçip odak noktasından uzağa-diğer yöne doğru ilerledikçe şiddet azalacağından, lineer olmayan soğurma da azalmaktadır. Odak noktasından uzaklaşan örnekte sadece lineer soğurma gerçekleşeceğinden tarama işlemi burada sonlandırılmaktadır. Konuma bağlı şiddet değişim grafiği alınan verilerden oluşturulur ve açık yarığın z-tarama deneyinden elde

edilen verilerden soğurma katsayısı β ve γ değerleri bulunarak malzemenin üçüncü derece alınganlığının sanal bileşeni elde edilir [5, 6].



Şekil 4. Açık yarıklı z-tarama deney düzeneği

Şekil 4 ile verilen deney düzeneği kullanılarak malzemenin lineer olmayan soğurma katsayısı ifadesi z-tarama eğrisinden hareketle elde edilir. Çizgisel olmayan soğurma katsayısı, z-ekseni boyunca, artı ve eksi z doğrultusunda hareket eden örnek numune laser demetinin odak noktasına olan uzaklığına, yani laser demetinin yoğunluğuna bağlı olarak belirlenmektedir. Malzemelerde elde edilebilecek büyük lineer olmayan kırılma tek veya çok fotonlu rezonans geçişleri ile ilişkilendirilmektedir.

Lineer olmayan optiksel alınganlık ifadesi;

$$\chi^3 = \chi_R^{(3)} + i\chi_I^{(3)} \quad (8)$$

Eşitlik (8) ile verildiği gibi reel ve sanal kısımlardan oluşmaktadır. Sanal kısım soğurma katsayısı β ile ilişkilidir ve buradan hareketle açık yarıklı için lineer olmayan geçirgenlik ifadesi

$$\Delta T(Z) = \frac{\beta I_0 L_{eff}}{2\sqrt{2}} \frac{1}{(1+Z^2/Z_0^2)} \quad (9)$$

ile verilmektedir.

Tablo 2. Açık yarıklı z-tarama deneyinde kullanılan önemli parametreler

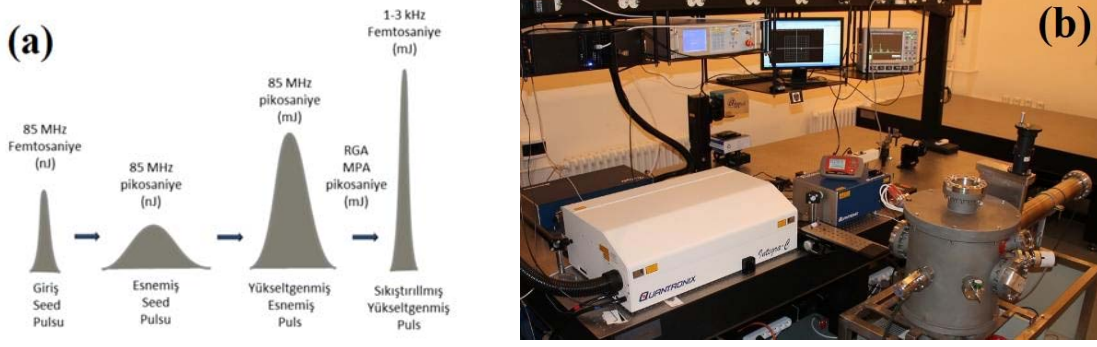
$\Delta T(Z)$	Z noktasındaki örneğin normalize geçirgenliği
Z_0	$(\pi\omega_0^2/\lambda)$, Rayleigh Range
$\Delta\phi_0$	Odak noktasında faz değişimi
I_0	Odak noktasındaki laser yoğunluğu
L_{eff}	$(1-e^{-\alpha L})$, L örnek uzunluğu, α lineer soğurma katsayısı
β	İki foton soğurma katsayısı

Kapalı yarıktaki olduğu gibi açık yarıktaki da elde edilen deney sonuçları, bilgisayar ortamında paket programlar kullanılarak fit işlemi, eşitlik (9) ifadesi kullanılarak gerçekleştirilebilmektedir. Laser gücüne bağlı olarak alınacak olan β verisi ile aynı mertebeden foton soğurma tesir kesiti hesaplanabilmektedir [13].

2.2. Femtosaniye (fs) Laser Sistemi

Femtoseküler (fs) laser sistemi bir femtoseküler pompa laser (Ti-Light, Quantronix, NY, USA) tarafından pompalanan, bir amplifikatör (Integra-C, Quantronix, NY, USA) laserin çıkışında 800 nm dalga boyunda 1kHz tekrarlama oranına sahip laser pulsları üretmektedir. Üretilen laser pulsları 90 fs genişliğine ve puls başına 3,5 mJ enerjiye sahiptir. Şekil 5a ile gösterildiği gibi, Ti-light laser tarafından üretilen 85 MHz seed puls laser demeti nJ mertebesinde enerji değerine sahiptir. Bu Ti:Light laser çıkışı amplifikatör laser girişine gönderilmektedir ve demet temelde üç uygulamaya tabi tutulmaktadır. Bu uygulamalar, puls genişletme (stretching), enerji yükseltme (RGA (regenerative amplifier) ve MPA (Multipass amplifier) ve en son olarak puls sıkıştırma (compression) işlemidir. Puls genişletme sürecinde seed pulsu genişletilerek pikoseküler puls süresinde 85MHz ve nJ puls enerjisine sahip iken, Integra-C’de RGA ve MPA’ı geçen laser demeti çıkışta 1-3 kHz tekrarlama oranıyla tekrar 90 fs puls süresine sıkıştırılmak sureti ile mJ mertebesinde puls enerji değerlerine sahip olmaktadır.

Selçuk Üniversitesi Hızlı Laser Sistemi Laboratuvarı’nda sahip olduğumuz fs laser sistemi Şekil 5(b) ile gösterilmektedir. Fs laser sisteminin çıkışında sahip olabildiğimiz maksimum güç 3,5 mJ değerine sahiptir ve 90 fs laser pulsları için odaklama şartlarına bağlı olarak Terawatt ($10^{15}W/cm^2$) mertebesinde laser güç yoğunluğu üretilebilmektedir. Dolayısıyla, laserin çıkış gücü uygulama biçimi ve türüne göre kontrol edilmek zorundadır. Bu nedenle, laser puls enerjisi bir enerji düşürücü kullanılarak çıkışında puls başına 0-3,5 mJ aralığında değiştirilebilmekte ve laser çıkış gücü/enerjisi, bir güç ölçer ve Gentec marka UP19K-30H-W5-D0 serisi bir güç detektörü ile ölçülmektedir. Sistem kurulumunda yüksek güç laser demeti durumuna uygun optikler (lens, ayna) kullanılmaktadır.



Şekil 5. (a) Puls enerjisi yükseltme aşamaları (b) Femtosaniye laser sistemi

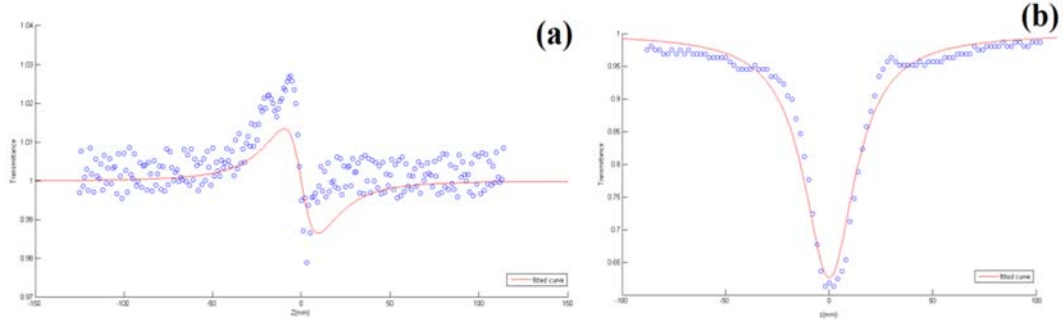
3. Sonuçlar ve Tartışma

Bu çalışma kapsamında z-tarama deney sisteminin referans çalışmaları için CS₂ molekülü kullanılarak sistem kalibre edilmiştir. CS₂ molekülü literatürde z-tarama deney sistemlerinde referans çalışmalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Dolayısıyla, elde ettiğimiz sonuçların literatürle uyumlu olup olmadığı kontrol edilmiş ve uygunluğu ortaya konmuştur elde edilen deney sonuçları Şekil 6 ile gösterilmektedir. Aynı zamanda deney sisteminin detayları literatürde yer almaktadır [14].

Gerçekleştirilen bu referans çalışmasından sonra, PMMA, puls laser ablasyon ile saf su içerisinde üretilen altın (Au) ve bakır (Cu) nanoparçacıkların z-tarama tekniği ile lineer olmayan karakteristik özellikleri ortaya konulmuştur.

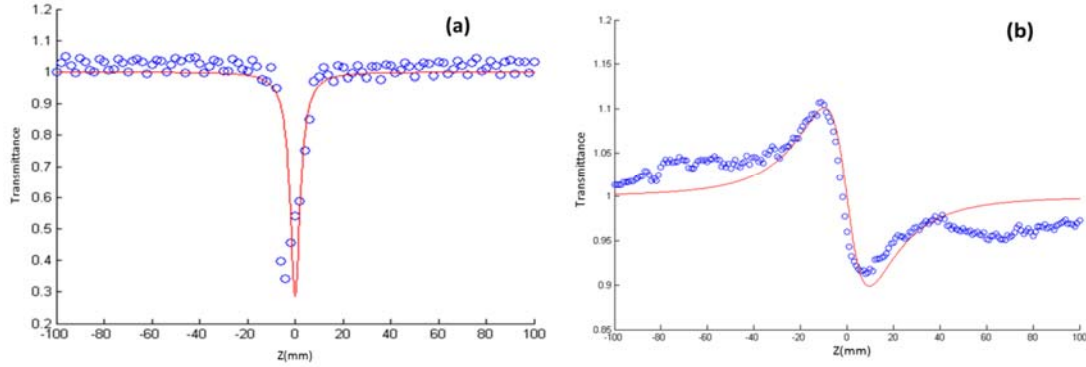
CS₂ molekülü kullanılarak elde edilen deney sonuçlarında kapalı yarık z-tarama deneyi sonucunda elde edilen odak noktasındaki faz değişimi ifadesi $\Delta\phi_0$ değeri 0,06619 olarak belirlenmiştir. $I_0=9,5 \times 10^{13} \text{ W/cm}^2$ laser demet şiddetinde alınan ölçümler sonucunda eşitlik (2) ifadesi kullanılarak lineer olmayan kırılma indisi $n_2 = 3,17 \times 10^{-16} \text{ cm}^2/\text{W}$ değeri elde edilmiştir. Lineer olmayan kırılma indisi ifadesinin bulunan değeri literatür ile uyumluluk göstermektedir. Açık yarık z-tarama deneyi sonucunda $\beta = 1.879 \times 10^{-16} \text{ cm/W}$ olarak hesaplanmıştır. Aynı şekilde deney sonucunda bulunan β soğurma katsayısı değeri de literatür ile uyumludur.

CS₂ molekülü kullanılarak fs laser ile elde edilen z-tarama deney sonuçlarından açık yarık z-tarama sonucu Şekil 6a ile ve kapalı yarık z-tarama sonucu Şekil 6(b) ile gösterilmektedir. Çalışmada 2 mm kuvars küvet kullanılmıştır. Kullanılan CS₂ molekülü Merck firmasından ticari olarak temin edilmiştir.



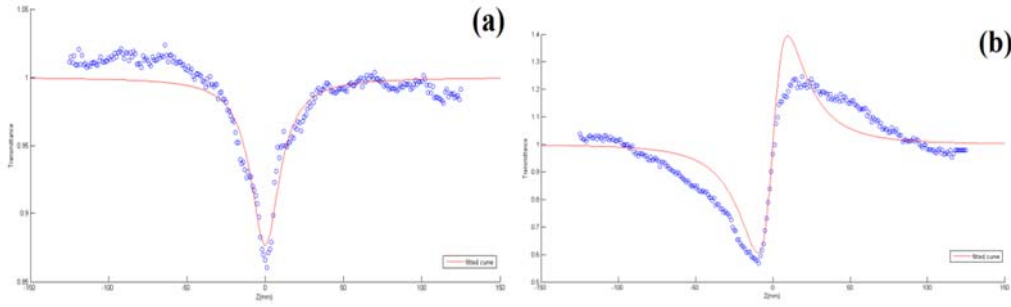
Şekil 6. CS₂ z-tarama deney sonucu (a) kapalı yarık (b) açık yarık

PMMA (Poly(methyl methacrylate)) levhasına ait z-tarama ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Kullanılan laser demet gücü 295 mW ve dalgaboyu 800nm olup efektif uzunluk $L_{eff} = 1$ cm, odak noktasında laser demet şiddeti ise $I_0 = 3,24 \times 10^8$ W/cm^2 değerindedir. Bu değerler kullanılarak PMMA için elde edilen açık yarık deney sonucunda soğurma katsayısı ifadesi $\beta = -3,1 \times 10^{-12}$ cm/W olarak belirlenmiştir. Kapalı yarık z-tarama deneyi sonucunda $\Delta\phi_0 = -0,4985$ olarak bulunmuştur. $I_0 = 3,24 \times 10^8$ W/cm^2 laser demet şiddetinde alınan ölçümler sonucunda eşitlik (2) ifadesi kullanılarak $n_2 = 7,016 \times 10^{-14}$ cm^2/W sonucu elde edilmiştir.



Şekil 7. PMMA z-tarama deney sonucu (a) açık yarık (b) kapalı yarık deney sonuçları.

PLAL ile üretilmiş olan altın nanoparçacıklara ait z-tarama deney sonuçlarından açık yarık z-tarama deney sonucu Şekil 8a ile ve kapalı yarık z-tarama deney sonucu Şekil 8b ile verilmektedir. Gösterilen sonuçlarda saf suya ait z-tarama sonuçları su içinde üretilen Au nano-parçacıklardan alınan sonuçlardan çıkartılarak kaydedilmiştir.

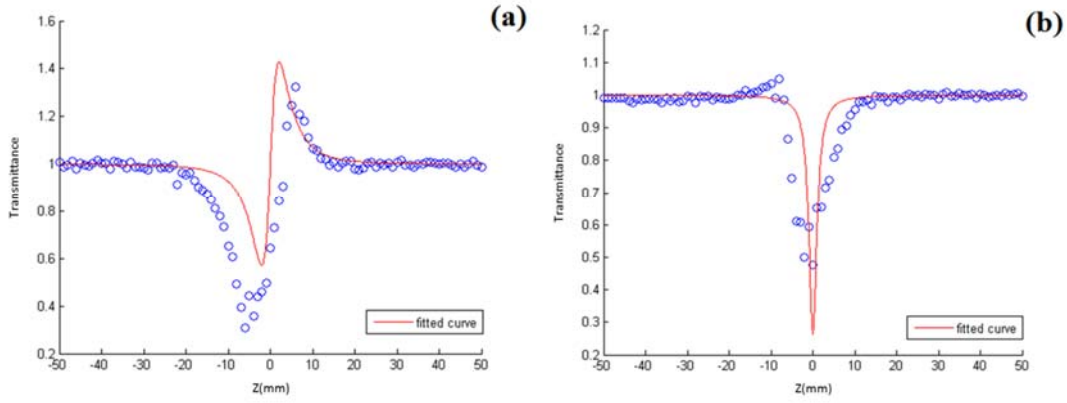


Şekil 8. Altın nanoparçacıklar için (a) açık yarık (b) kapalı yarık z-tarama deney sonuçları.

DeneySEL çalışmalar 800 nm dalgaboylu laser demeti kullanılarak, $I_0=1,141 \times 10^8$ W/cm^2 laser demet şiddetinde açık yarık z-tarama ölçümleri sonucunda $\beta = -0,001529$ cm/W bulunmuştur. Kapalı yarık z-tarama deneyi sonucunda faz değişimi ifadesi eşitlik (2) ile verilen ifade kullanılmış $\Delta\phi_0 = 1,94$ değeri elde edilmiştir. $I_0 = 1,141 \times 10^8$ W/cm^2 laser demet şiddetinde alınan ölçümler sonucunda $n_2 = 9,19 \times 10^{-12}$ cm^2/W lineer olmayan kırılma indisi değeri elde edilmiştir.

Bakır nanoparçacık kullanılarak alınan kapalı ve açık yarık z-tarama sonuçları sırasıyla Şekil 9a ve Şekil 9b ile verilmektedir. Açık yarık deneyi ile $\beta = -4,38 \times 10^{-13}$ cm/W değeri elde edilmiştir. Kapalı yarık ölçümleri sonucunda $\Delta\phi_0 = 2,11$ olarak hesaplanmış ve buna karşılık gelen lineer olmayan kırılma indisi değeri ise $n_2 = 2,37 \times 10^{-11}$ cm^2/W olarak elde edilmiştir.

Deneyler sırasında kullanılan laser kaynağının 85MHz olması dolayısıyla, bazı numunelerde ısıl etkiler oluşmakta ve grafiklerde konuma (aynı zamanda *uygulama zamanına*) bağlı olarak bir eğim gözlemlenmektedir. Bu eğimin düzeltilmesi için öncelikle laser ile ışınlanan (yani tam bir ölçüm alınan) numunenin işlem öncesi ve sonrasında UV-VIS soğurma spektrumunun kaydedilmesi ve ısıl etkinin oluşup oluşmadığının doğrulanması gerekmektedir.



Şekil 9. Bakır nanoparçacıklar için (a) kapalı yarık (b) açık yarık z-tarama deney sonuçları.

Isıl etki oluştuğunun belli olması durumunda deney düzeneğinde kullanılan lens daha küçük odak uzunluğuna sahip bir lens ile ($EFL \leq 10$ cm olabilir) değiştirilerek işlemin hızlı bir şekilde tekrarlanması mümkündür.

Bahsi geçen ısıl etkiler 1kHz tekrarlama oranına sahip Integra-C laser yükselteç çıkışından elde edilen laser demeti ile gözlenmemiş olmasına rağmen bu demetler ile elde edilen laser şiddetlerinin çok yüksek olması dolayısıyla malzeme odak noktasında WLC (White Light Continuum), filamentation ve malzemede erime benzeri lineer olmayan-olumsuz etkiler gözlenmiştir. Bunun sonucu olarak, ince film ve bulk malzemelerde zarar meydana gelmiş ve z-tarama ölçümleri sağlıklı alınamamış olup sıvı içerisinde diperse olmuş nanoparçacıklar için bu tür olumsuz etkiler gözlenmemiştir.

Alınan verilerin işlenmesi (fit edilmesi) sırasında malzeme kalınlığı veya parçacık boyutu (NP için) bilgileri oldukça önemli ve gerekmektedir. XRD kullanılarak nanoparçacıkların boyutları belirlenmektedir. Ayrıca elde edilen UV-VIS spektrumlarında gözlenen SPR (Surface Plasmon Resonance) pikleri de parçacık boyutlarını doğru ölçtüğümüzün bir göstergesi durumundadır. Bunun yanı sıra bir diğer gerekli parametre ise malzemenin lineer soğurma katsayısıdır ve bu parametre için literatürden elde edilen veriler kullanılmıştır. Sistemin daha doğru ve hassas kullanılabilmesi amacıyla on-line olarak, kullanılan sisteme kurulacak olan bir absorban ölçecek düzenek faydalı olacaktır. Bahsi geçen sorunlara çözüm olarak “bölünmüş z-tarama (divided z-scan)” olarak adlandırılan yöntem de kullanılabilir [15-17].

Nonlineer optik özellik gösteren malzemelerin optik sensör, anahtarlama, sınırlama gibi teknolojik önemi yüksek uygulamaları olduğundan, ürüne yönelik

araştırmalarda özellikle multidisipliner çalışma grupları tarafından kurduğumuz altyapı kullanılabilir. Organik malzemeler, yarıiletkenler, polimer tabanlı malzemeler, nanotüpler, nanoparçacıklar gibi çok geniş bir malzeme grubu çizgisel olmayan optik özellikler göstermektedir. Bundan dolayı, gerek fizik ve kimya gibi temel bilimlerde araştırma yapan gruplar arasında gerek malzeme, makine ve kimya mühendisliği gibi bölümlere bağlı araştırma grupları arasında bu işbirliklerinin artma ve gelişme potansiyeli çok yüksektir.

Teşekkür

Araştırmacılar, Türkiye Cumhuriyeti Selçuk Üniversitesi, Fen Fakültesi, Fizik Bölümü ve Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) Koordinatörlüğüne sağladıkları altyapı ve 13301022 numaralı proje ile sağladıkları destekten dolayı teşekkür ederler.

Kaynaklar

- [1] Kumar RSS, Rao SV, Giribabu L, Rao DN. Femtosecond and nanosecond nonlinear optical properties of alkyl phthalocyanines studied using Z-scan technique. *Chem Phys Lett.* 2007;447:274-8.
- [2] Yiğit Gezgin S. K, A., Gündoğdu, Y., Gündoğdu And Kiliç, H.S.,. SPR Effects Observed On The Gold Thin Film Produced By The Pulsed Laser Deposition: Simulation And Experimental Study. (To be Published). 2016.
- [3] Van Stryland EW, Woodall M, Vanherzeele H, Soileau M. Energy band-gap dependence of two-photon absorption. *Opt Lett.* 1985;10:490-2.
- [4] Van Stryland EW, Sheik-Bahae M. Z-scan measurements of optical nonlinearities. *Marcel Dekker;* 1998. p. 655-92.
- [5] Sheik-Bahae M, Hagan D, Van Stryland E. Dispersion and band-gap scaling of the electronic Kerr effect in solids associated with two-photon absorption. *Physical review letters.* 1990;65:96.
- [6] Sheik-Bahae M, Said A, Wei T-H, Hagan DJ, Van Stryland EW. Sensitive measurement of optical nonlinearities using a single beam. *Quantum Electronics, IEEE Journal of.* 1990;26:760-9.
- [7] Palfalvi L, Hebling J. Z-scan study of the thermo-optical effect. *Applied Physics B.* 2004;78:775-80.

- [8] Pálfalvi L, Tóth BC, Almási G, Fülöp JA, Hebling J. A general Z-scan theory. *Applied Physics B*. 2009;97:679-85.
- [9] Manakov SV. On the theory of two-dimensional stationary self-focusing of electromagnetic waves. *Soviet Physics-JETP*. 1974;38:248-53.
- [10] Yüksek M, Ceyhan T, Bağcı F, Yağlıoğlu HG, Elmali A, Bekaroğlu Ö. The nonlinear refraction and absorption dependence on the thermal effect for 4ns pulse duration in binuclear Zn (II) phthalocyanine solution. *Opt Commun*. 2008;281:3897-901.
- [11] Bridges RE, Fischer GL, Boyd RW. Z-scan measurement technique for non-Gaussian beams and arbitrary sample thicknesses. *Opt Lett*. 1995;20:1821-3.
- [12] Sutherland RL. *Handbook of nonlinear optics*: CRC press; 2003.
- [13] Henari FZ, Blau WJ, Milgrom LR, Yahioğlu G, Phillips D, Lacey JA. Third-order optical non-linearity in Zn (II) complexes of 5, 10, 15, 20-tetraarylethynyl-substituted porphyrins. *Chem Phys Lett*. 1997;267:229-33.
- [14] Newport. *Application Note Z-Scan For the Characterization Of Transparent Optical Materials*. Technology And Application Center Newport Corporation 2007.
- [15] Gnoli A, Razzari L, Righini M. Z-scan measurements using high repetition rate lasers: how to manage thermal effects. *Opt Express*. 2005;13:7976-81.
- [16] Falconieri M. Thermo-optical effects in Z-scan measurements using high-repetition-rate lasers. *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics*. 1999;1:662.
- [17] Koulouklidis A, Cohen S, Kalef-Ezra J. Thermochromic phase-transitions of GafChromic films studied by z-scan and temperature-dependent absorbance measurements. *Med Phys*. 2013;40:112701.