

Düşük maliyetli ve özel tasarım çift ışınlı optik cımbızın performans özellikleri

The performance characteristics of low-cost and custom-designed dual beam optical tweezers

Nur ÇOBANOĞLU*¹ , Aziz KOLKIRAN² 

¹İzmir Kâtip Çelebi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Nanobilim ve Nanoteknoloji Anabilim Dalı, 35620, İzmir

²İzmir Kâtip Çelebi Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Mühendislik Bilimleri Bölümü, 35620, İzmir

• Geliş tarihi / Received: 02.11.2023

• Kabul tarihi / Accepted: 11.06.2024

Öz

Bu çalışmada, mikron boyutundaki partikülleri yakalamak ve manipüle etmek için paralel olarak konumlandırılmış iki adet He-Ne lazer ($\lambda=632.8$ nm) kullanan düşük bütçeli ve özel tasarlanmış bir optik cımbız geliştirilmiştir. Bu kapsamda örnek olarak sudaki polistiren boncuklar ve yoğurt kültüründeki maya hücreleri kullanılmıştır. Bu optik cımbızın özelliklerini belirlemek için sertlik ve yakalama kuvveti, Lazer 1, Lazer 2 ve her iki lazerin aynı anda kullanıldığı durum için Brownian Hareketi yöntemi kullanılarak belirlenmiştir. Optik bileşenlerde yapılan küçük ayarlamalar yakalama kuvvetini etkileyerek Lazer 2'nin yakalama kuvvetinin daha düşük olmasına neden olmuştur. Ek olarak, saçılma ortamının viskozitesinin yakalama kuvveti üzerinde önemli bir etkisi vardır; yoğurt kültürünün daha yüksek viskozitesi, maya hücrelerinin her iki lazerin aynı anda kullanılmasıyla yakalanmasını önlemektedir. İki lazerin paralel olarak kullanılması, bir lazerin parçacıkları yakalamak ve hareket ettirmek için kullanılırken diğerinin birden fazla parçacığı yakalamak için kullanılmasını sağlamaktadır. Farklı çalışma ortamlarında performansı incelenen bu özel tasarım optik cımbız, viskozite ölçümleri, hücre içi incelemeler, gıda mühendisliği ve ilaç dağıtım sistemleri gibi yaşambilim alanlarında uygulanma potansiyeline sahiptir.

Anahtar kelimeler: He-Ne lazer, Optik cımbız, Optik yakalama

Abstract

In this work is a low-cost and custom-designed optical tweezers using two He-Ne lasers ($\lambda=632.8$ nm) positioned in parallel is developed to trap and manipulate micron-sized particles. Polystyrene beads in water and yeast cells in yogurt culture were used as samples. To determine the characteristics of these optical tweezers, the stiffness and trapping force were determined using the Brownian Motion method for Laser 1, Laser 2 and the case where both lasers were used simultaneously. Small adjustments of the optical components affected the trapping force, resulting in a lower trapping force for Laser 2. In addition, the viscosity of the scattering medium has a significant effect on the trapping force; the higher viscosity of the yogurt culture prevents the capture of yeast cells with the simultaneous use of both lasers. The use of two lasers in parallel allows one laser to be used to capture and move particles while the other is used to capture multiple particles. This custom-designed optical tweezer, whose performance was investigated for different samples, has the potential to be applied in life science fields such as viscosity measurements, intracellular investigations, food engineering and drug delivery systems.

Keywords: He-Ne laser, Optical tweezer, Optical trapping

* Nur ÇOBANOĞLU; dr.nurcobanoglu@gmail.com

1. Giriş

1.1. Introduction

Nesnelerin temassız olarak yakalanması, hareket ettirilmesi ve düzenlenmesi, optik cımbızları çok çeşitli araştırma alanlarında benzersiz bir araç haline getirmiştir. Optik cımbızlar, en basit haliyle, odak noktası içinde nanometre boyutundaki parçacıklar kadar küçük nesnelere yakalamak için yoğun şekilde odaklanmış bir lazer ışını kullanılarak oluşturulmaktadır (Polimeno vd., 2018). Momentum ve enerji transferi ve değişimi yoluyla ışığın madde ile etkileşimi optik cımbızların ana prensibidir (J. Liu & Li, 2018).

Optik cımbız terimi, bu buluşu nedeniyle 2018 Nobel Fizik Ödülü'ne (Donna Strickland ve Gérard Mourou ile birlikte) layık görülen Arthur Ashkin tarafından ortaya atılmıştır. 1970 yılında Arthur Ashkin, parçacıkların odaklanmış bir lazer ışını tarafından uygulanan ışınım basıncı ile hızlandırıldığını ve hatta yakalandığını belirtmiştir (Ashkin, 1970). 1986'da Ashkin ve meslektaşları dielektrik parçacıkların yakalanmasıyla optik cımbızı tanıtmışlardır (Ashkin vd., 1986). Ashkin ve Dziedzic'in 1987'de yeşil lazer kullanarak bakteri ve virüsleri hapsedmesinden bu yana (Ashkin & Dziedzic, 1987), optik cımbızlar çok çeşitli biyolojik uygulamalarda kullanılmaktadır (Ashok & Dholakia, 2012; Choudhary vd., 2019; Difato vd., 2013; Favre-Bulle vd., 2019; Lenton vd., 2020; Molloy & Padgett, 2002; Zhu vd., 2020). Ayrıca, optik cımbızlar konfokal prob olarak mikroskopik viskozite ölçümü için kullanılabilir (Nemet & Cronin-Golomb, 2003) ve reolojik uygulamalar kapsamında akışkan akışını haritalamak ve viskoziteyi ölçmek için optik mikroskopi ile birlikte kullanılabilir (Eom vd., 2014; Statsenko vd., 2017).

Tuzaklama mekanizması, tuzaklayan ışık ile tuzaklanan parçacık arasındaki momentum değişiminin bir sonucudur ve parçacık boyutuna bağlı bir kuvvetle sonuçlanmaktadır. Parçacık üzerindeki net kuvvet, saçılma ve gradyan kuvvetlerinden oluşmaktadır. Saçılma kuvveti parçacığı ışının yayılma yönüne doğru yönlendirirken, gradyan kuvveti parçacığı daha yüksek yoğunluğa sahip bölgelere doğru çekmektedir. Gradyan kuvveti saçılma kuvvetini aştığında stabil yakalama elde edilmektedir (Kappel & Lind, 2014; Mas Soler, 2008).

Saçılma ortamının derinliklerinde daha iyi tuzaklama elde etmek için yardımcı adaptif optikler veya görüntüleme teknikleri kullanılabilir (Hofmeister vd., 2020; Wang vd., 2015). Alternatif olarak, geleneksel optik cımbızlar, fiber optik cımbız olarak adlandırılan tek modlu optik fiber kullanılarak geliştirilebilir (Constable vd., 1993; Y. Liu & Yu, 2017). Ayrıca, geleneksel tek lazer ışınli optik cımbız, ışını ışın bölücülerle bölerek ve ardından akusto-optik saptırıcılar kullanarak zaman paylaşımli tuzaklar oluşturmuş ve hızla çok ışınli optik cımbızlara dönüşmüştür (Volpe vd., 2023). Uzamsal ışık modülatörleri gibi gelişmiş cihazların geliştirilmesi, araştırmacıların basit yakalama ve manipülasyonun çok ötesinde farklı yönleri takip etmelerine olanak sağlamıştır. Çoklu tuzaklama, optik kafesler ve elekler kullanılmasıyla da bu tekniğin birçok uygulama alanındaki potansiyeli geliştirilmiştir.

Kullanım kolaylığı ve maliyet (Firby vd., 2016) açısından geleneksel çok ışınli optik cımbız tasarımlarında sıklıkla kullanılan ışın bölücülerin aksine, ek bağımsız bir lazer kaynağı kullanılması tuzaklanması hedeflenen parçacıkların bağımsız bir şekilde kontrol edilmesi, parçacık ve parçacığın bulunduğu ortamın hassasiyetine bağlı olarak ek lazerin dalga boyu seçimindeki esneklik (Zhang & Liu, 2008), çoklu parçacık tuzaklanabilirliği ve güç yönetimi açısından daha avantajlıdır. Bu çalışma, mikron boyutundaki parçacıkları yakalamak ve manipüle etmek için iki paralel He-Ne lazer ($\lambda=632,8$ nm) kullanan özel tasarlanmış ve düşük bütçeli bir çift ışınli optik cımbız oluşturmayı amaçlamaktadır. Ek bir lazer kaynağından çıkan ışın demetinin kullanılması mikron boyutundaki parçacıkların tuzaklanarak manipülasyonuna ve diğer lazer tarafından birden fazla parçacığın halihazırda tuzaklanmış olduğu tuzak bölgesine taşınmasına izin vermektedir. Çalışma kapsamında kullanılan her bir optik parça kolaylıkla ulaşılabilir ve geliştirilebilir olduğundan önerilen sistem birçok uygulama için değiştirilerek kullanılabilir. Önerilen çoklu optik cımbızın özellikleri, çalışma kapsamında su ortamındaki polistiren boncukların ve yoğurt kültüründeki maya hücrelerinin Brownian hareketi için belirlenmiştir. Çalışma kapsamında önerilen sistemin farklı ortamlarda kullanılabilirliğinin araştırılmasının yanı sıra, güncel literatürden (Castelain vd., 2007; Castelain vd., 2008; Castelain vd., 2012; Pilát vd., 2017; Keloth vd., 2018; Zou vd., 2020) farklı olarak maya hücrelerini yoğurt kültürü içerisinde in-situ tuzaklayabiliyor olması sistemin özellikle gıda mühendisliği ve mikrobiyoloji alanlarında potansiyelini göstererek çalışmanın özgün değerini arttırmaktadır.

2. Materyal ve metod

2. Material and method

2.1. Deney düzeneği

2.1. Experimental setup

Optik cımbız sistemi, nesnelere yakalamak için odaklanmış iki lazer ışını, bir numune manipülasyon sistemi ve deneyi görüntülemek için bir görüntü cihazından oluşmaktadır. Lazer ışınlarının hizalanması, verimli bir optik cımbız kurulumu oluşturmak için çok önemlidir. İlk olarak, ışınlar taşıyıcı direklere ve raylara bağlı diyaframlarla hizalanmıştır. Daha sonra aynalar, dikey ve yatay açıların ayarlanabilmesi için kinematik ayna bağlantılarına dikkatlice yerleştirilmiştir. Optik cımbızlar, mercekleri monte etmek için direkleri ve taşıyıcıları olan bir ray düzeneği kullanmıştır. Lazer ışınlarının geçmesine izin vermek için merceklerin yüksekliği ayarlanmalıdır. Hizalama tamamlandığında diyaframlar raydan çıkartılmıştır. Maksimum yakalama kuvveti, lense giren ışının çapı lensin çapıyla eşleştğinde elde edilmiştir.

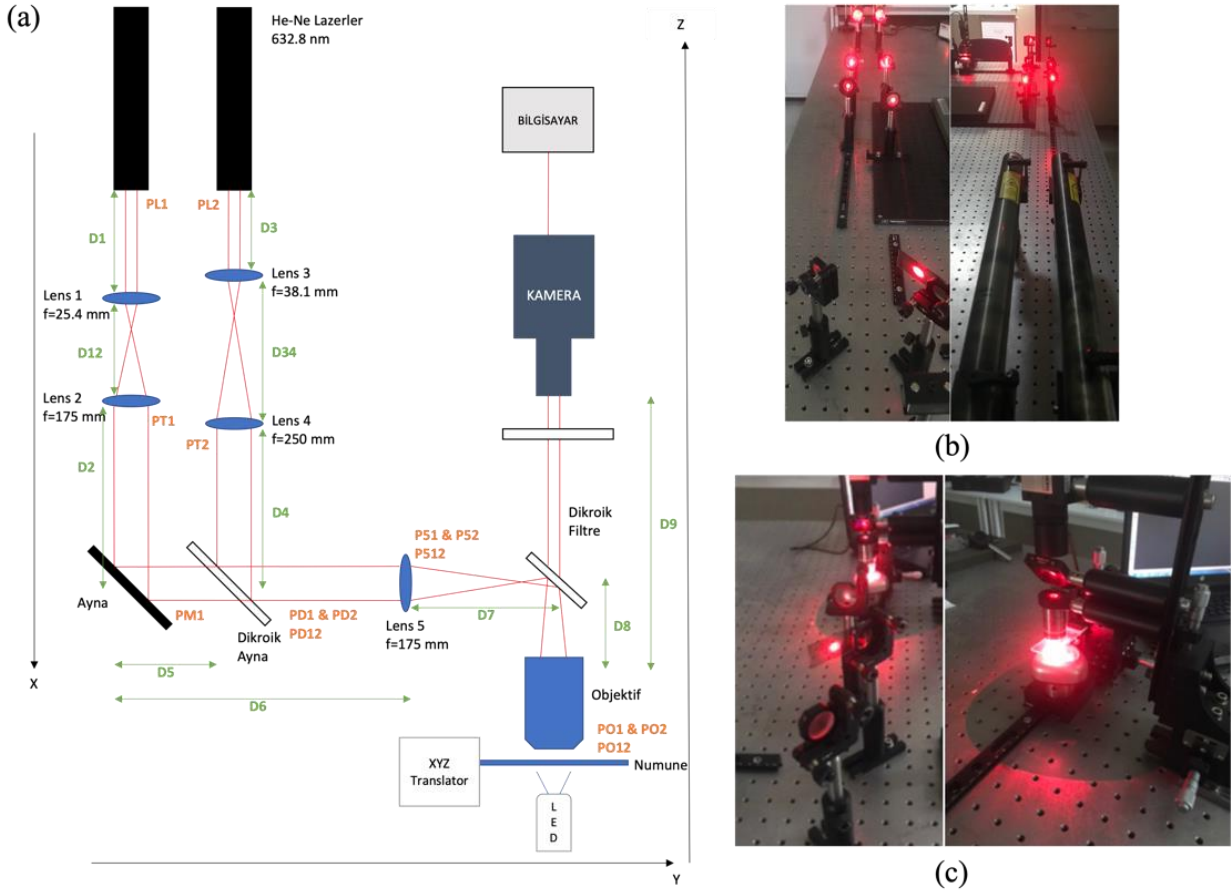
Bu araştırmada, özel olarak tasarlanmış optik cımbız sistemi 632,8 nm dalga boyuna sahip He-Ne lazerler kullanılmaktadır. Teleskop 1 (T1) olarak adlandırılan 1 ve 2 numaralı mercekler (odak uzunlukları sırasıyla 25.4 ve 175 mm) tarafından bir teleskop oluşturulurken, 3 ve 4 numaralı mercekler (odak uzunlukları sırasıyla 38.1 ve 250 mm) teleskop 2'yi (T2) oluşturmaktadır. Tüm teleskop mercekleri çift dışbükeydir. Teleskoplar, çap düzeltme ve kolimasyon için ışınları büyütme amacıyla kullanılmaktadır. Gelen ışının sapmasını azaltmak için teleskoplar lazerlerin yakınına yerleştirilmelidir. Optik bileşenler arasındaki kesin mesafeler Gauss ışın optiği kullanılarak hesaplanmış ve Tablo 1'de verilmiştir. Teleskop sistemi sonrası ışın belleri lazer 1 ve lazer 2 için sırasıyla 4,82 mm ve 4,60 mm olarak belirlenmiştir.

Işın, teleskoptan sonra aynalar ve 175 mm odak uzaklığına sahip bir lens tarafından objektife yönlendirilmektedir. İlk teleskop T1'den çıkan toplanmış ışın aynadan geçer ve ışın çapını objektifin çapına eşit hale getiren lens 5 tarafından yansıtılmaktadır. Lazer 2 ışını ise ilk lazer ışınının geçmesine izin veren dikroik aynadan geçer ve lens 5'in eğrilğine yansıtılmaktadır. Lens 5'ten sonra ışın beli lazer 1 ve lazer 2 için sırasıyla 1,732 mm ve 1,652 mm olarak hesaplanmıştır. Lens 5'ten sonra lazer ışınları, ışığı ortalamak ve objektife dik hale getirmek için ayarlanabilir düzenekteki dikroik filtre tarafından yansıtılmaktadır.

Çalışmada önerilen sistem özelinde her iki lazer ışın demetini birleştirmek için kullanılan dikroik ayna güç kaybına neden olmuştur. Dikroik ayna 45° olarak konumlandırıldığı için gelen ışının bir kısmı ayna içerisinden geçerken bir kısmı yansıyarak kaybolmaktadır. PL1 olarak isimlendirilen lazerden gelen ışın demetinin bir kısmı dikroik aynadan geçerken, PL2 lazerinden gelen ışının bir kısmı dikroik aynadan yansıyarak objektife yönelmektedir. Gelen ışının tümüyle yansıtılamaması lazerin çıkış demet gücüne göre güç kaybına neden olmuştur. Her optik bileşen çıkışındaki güç değerleri çalışma içerisinde Tablo 2'de sunulmuştur.

Mikroskop objektifi ile lamel arasında yağ kullanılması gerektiren yakalama objektifi (RMS100X-O, 100X Olympus Plan Achromat Oil Immersion Objective, 1.25 NA, 0.150mm WD) kullanılmıştır. Görüntüleme ışığı bir LED olarak seçilmiştir. Bunun nedeni hem yakalama ışığının hem de görüntüleme ışığının aynı objektiften geçmesidir. Yakalanan parçacığı görüntülemek için bir CCD kamera (DCU223M CCD Kamera. 1024 x 768 çözünürlük, monokrom) kullanılmıştır. Görüntüleme ışığının geçmesine ve yakalama ışığının yansıtılmasına izin verdiği için dikroik ışın ayırıcı olarak yeşil bir dikroik filtre seçilmiştir. İki ışın objektif ve CCD arasında hareket etmektedir, ancak yalnızca görüntüleme ışığı tuzaklanmış parçacığı görüntülemek için görüntüleyicilere ulaşmaktadır.

Nesnelere sıvı bir ortamda hapsetmek için standart mikroskop lamaları ve lamelleri kullanılmıştır. Numuneyi mikro ölçekte hareket ettirmek için bir translator kullanılmıştır. Buna ek olarak, objektifteki lazerin yönünün değiştirilmesi, tuzaklanmış parçacıkların konumunda çok ince değişikliklere neden olmaktadır.



Şekil 1. Optik cımbız düzeneği, boyutları ve güçleri ile birlikte şu şekilde gösterilmektedir: (a) optik cımbızın şeması, (b) düzenekte kullanılan teleskopların ve lazerlerin görüntüleri ve (c) düzenekte kullanılan aynaların ve objektifin görüntüleri.

Figure 1. The optical tweezer setup including its dimensions and powers is presented through: (a) a schematic of the optical tweezer, (b) views of telescopes and lasers used in the setup and (c) views of the mirrors and objective employed in the setup.

Tablo 1. Optik bileşenler arasındaki mesafeler
Table 1. Distances between optical components

	Uzaklık
D1	690 mm
D12	205 mm
D2	580 mm
D3	675 mm
D34	300 mm
D4	500 mm
D5	115 mm
D6	215 mm
D7	280 mm
D8	20 mm
D9	20 mm

Tablo 2. Optik bileşenlerden sonra ışın gücü**Table 2.** Power of the beam after optical components

	LAZER 1	LAZER 2	LAZER 1&2
Lazerin çıkışı	PL1=25.45 mW	PL2=24.43 mW	-
Teleskop çıkışı	PT1=19.28 mW	PT2=19.23 mW	-
Aynadan sonra	PM1=15.70 mW	-	-
Dikroik aynadan sonra	PD1= 5.98 mW	PD2= 7.13 mW	PD12= 12.55 mW
Lens 5'ten sonra	P51= 5.33 mW	P52= 6.68 mW	P512=11.62 mW
Objektif çıkışı	PO1= 1.33 mW	PO2= 1.69 mW	PO12= 2.36 mW

2.2. Optik cımbızın özellikleri

2.2. The characteristics of the optical tweezer

Brownian hareketi yöntemi kullanılarak optik cımbızların sertliği ve yakalama kuvveti hesaplanmıştır. Bu yöntemde, yakalama kuvveti Boltzmann sabiti, mutlak sıcaklık ve parçacığın konum verileri ile hesaplanmaktadır. Deneyler sırasında mutlak sıcaklık 23°C ölçülmüştür. Belirsizlikler, $\pm 1,15^\circ\text{C}$ olan lazerden kaynaklanan sıcaklık değişimi ve $\pm 0,005 \mu\text{m}$ olan yer değiştirme ile sınırlanmıştır.

Brownian hareket yöntemi, tuzağın sertliğini (k) ölçmek için mutlak sıcaklığı kullanarak tuzağa düşen parçacığın ısı dalgalanmasını kullanmaktadır. Cımbızların sertliği, harmonik bir potansiyel içinde dalgalanan bir parçacık için eş dağılım teoreminden hesaplanmaktadır (Baek vd., 2007; Rice & Fischer, y.y.). Eş dağılım teoreminde, ısı dengedeki bir molekülün her bir serbestlik derecesi $\langle H \rangle$ için bir kinetik enerjisi vardır. Tuzaklanmış parçacığın hareketinin sadece termal dalgalanmalardan kaynaklandığı varsayıldığında, kinetik enerji tuzağın potansiyel enerjisine eşittir:

$$\langle H \rangle = \frac{1}{2} k_b T = \frac{1}{2} k \langle x^2 \rangle \quad (1)$$

Burada k_b Boltzmann sabitidir ve $k_b = 1.3807 \times 10^{-23} \text{ J/K}$ 'dir. T mutlak sıcaklıktır. $\langle x^2 \rangle$, numunenin tuzağın merkezinden yatay olarak yer değiştirmesinin zaman ortalamalı karesidir. Bu yöntem sertliği hesaplamak için parçacık geometrisi ya da sıvı viskozitesi gerektirmemektedir. Sıcaklık rastgele titreşime neden olur ve tuzak kuvveti tuzak merkezinden harekete direnç göstermektedir (Rice & Fischer, y.y.).

Her bir yön için, (2) ve (3) denklemlerindeki $\langle x^2 \rangle$ ve $\langle y^2 \rangle$ değerlerini hesaplamak için yakalanan numunenin yer değiştirmeleri ölçülmüştür (Jia vd., 2007). Brownian Hareketi altında yakalanan numunenin yer değiştirmeleri ImageJ (Schindelin vd., 2012) kullanılarak belirlenmiştir. μm aralığındaki yer değiştirmeleri belirlemek için, numunenin çapı ölçülerek pikseller $\mu\text{m}'ye$ dönüştürülmüştür. 1 μm 48,11 piksele karşılık gelmektedir.

$$\langle x^2 \rangle = \frac{\sum_{n=1}^N x_n^2}{N} \quad (2)$$

$$\langle y^2 \rangle = \frac{\sum_{n=1}^N y_n^2}{N} \quad (3)$$

Yer değiştirmeler bulunduktan sonra, her iki eksendeki sertlikler denklem (4) ve (5) kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\frac{1}{2} k_b T = \frac{1}{2} k \langle x^2 \rangle \quad (4)$$

$$\frac{1}{2} k_b T = \frac{1}{2} k \langle y^2 \rangle \quad (5)$$

Yakalama kuvveti, sertlik (k) ile numunenin merkezinden tuzağın merkezine olan mesafe (d_T) kullanılarak belirlenmiştir.

$$F_T = kd_T \quad (6)$$

3. Bulgular ve tartışma

3. Results and discussion

Sertlik ve yakalama kuvveti, optik cımbızların özelliklerinin tanımlanmasında önemlidir. Burada, her bir durum için cımbızların sertliğini belirlemek üzere Brownian hareket yöntemi kullanılmıştır. Örnek olarak su içinde yaklaşık $1 \mu\text{m}$ 'lik polistiren boncuklar (PB) ve yoğurt kültüründeki maya hücreleri (YC) kullanılmıştır. Optik cımbızların x ve y eksenleri için sertliğini ve yakalama kuvvetlerini hesaplamak için numuneler lazer 1, lazer 2 ve her iki lazer kullanılarak aynı anda yakalanmışlardır. Yakalanan ve manipüle edilen parçacıkları net bir şekilde göstermek için, çekilen görüntüler kontrastı artırılarak işlenmiştir. Deneyler sırasında parçacık yakalama ve manipülasyonu kaydedilmiş ve videolar tüm hesaplamaları gerçekleştirmek için çok kareli görüntülere dönüştürülmüştür. Tablo 3, her durumda her bir örnek için video süresini ve kare sayısını göstermektedir.

Tablo 3. Her durum için kayıt süresi ve kare sayısı

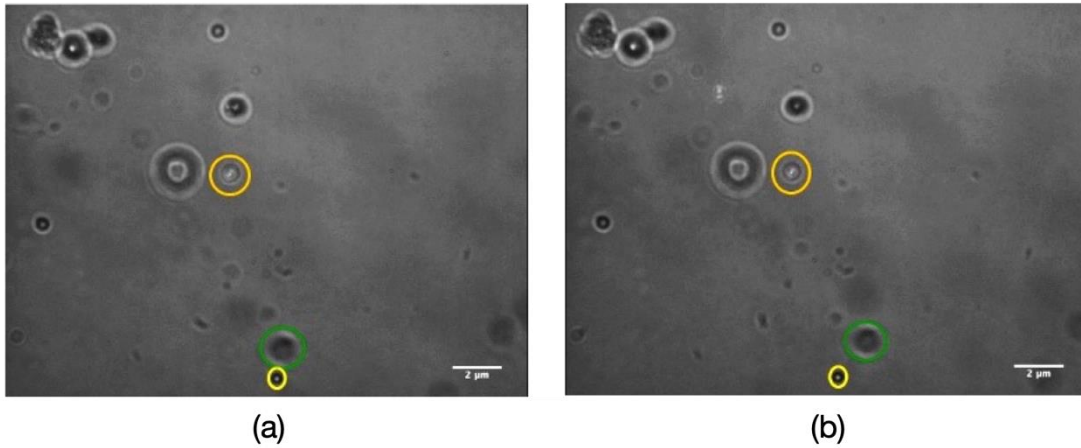
Table 3. Recording duration and number of frames for each case

Durum	Video süresi [s]	Kare sayısı, N
PB – Lazer 1	3	32
PB – Lazer 2	1.8	20
PB – Her iki lazer	1.25	15
YC – Lazer 1	3	30
YC – Lazer 2	1.9	21

3.1. Tek lazer ile optik yakalama

3.1. Optical trapping by single laser

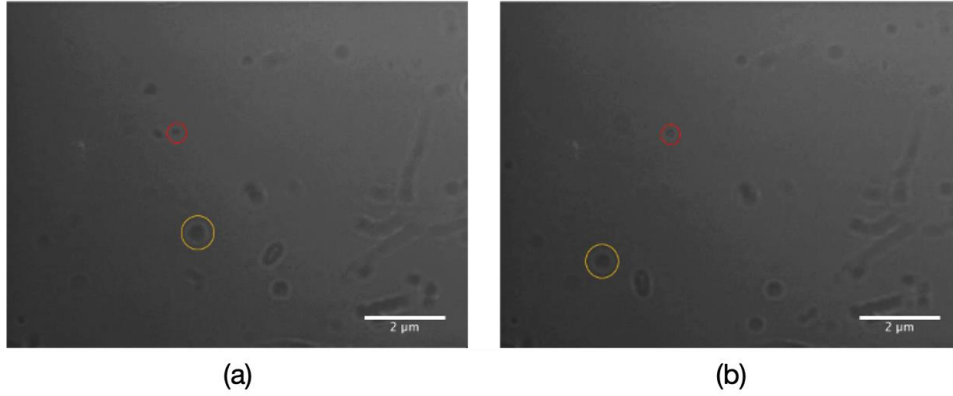
Numune yakalama işlemi her iki lazer kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu bölümde çekilen görüntülerle yakalama işlemi gösterilmektedir. Şekil 2'de, görseller turuncu daire içindeki tuzaklanmış PB'yi göstermektedir. Yeşil daire içindeki parçacığın hareket ettiği gözlenirken, sarı daire içindeki boncuk belirli bir zamanda hareketsiz kalmıştır. Şekil 2.a ve 2.b sırasıyla deneyin başlangıcını ve bitişini göstermektedir.



Şekil 2. PB'nin Lazer 1 ile yakalanması

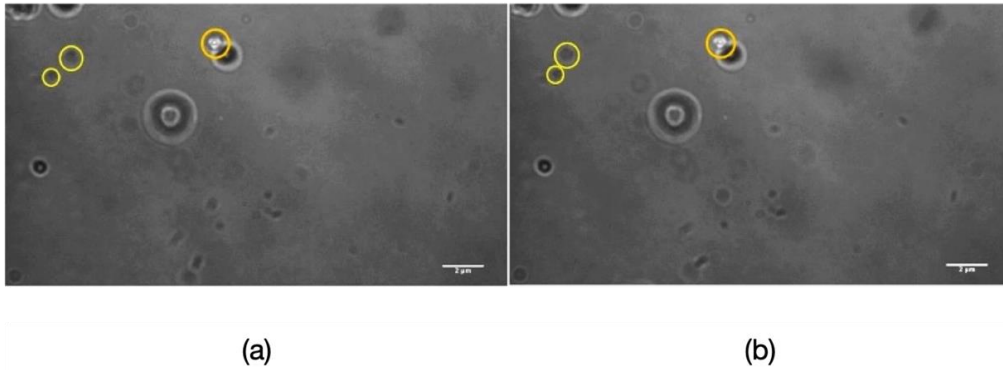
Figure 2. Trapping of PB by Laser 1.

Yakalanan YC Şekil 3'te görülmektedir. Sarı daire içinde yer alan hücre hareket halindeyken kırmızı daire içinde yer alan YC yakalanmıştır. Yakalama olayının başlangıcı Şekil 3.a'da, üç saniye geçtikten sonraki sonucu ise Şekil 3.b'de gösterilmektedir.

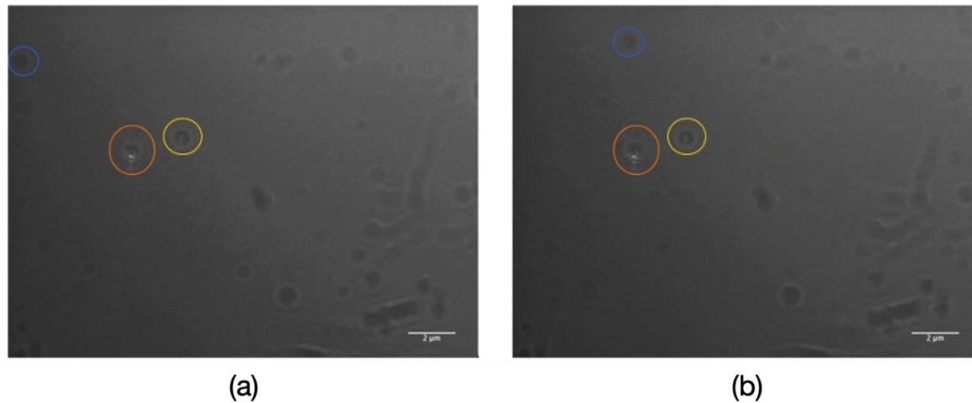


Şekil 3. YC'nin Lazer 1 ile yakalanması
Figure 3. Trapping of YC by Laser 1.

Şekil 4, turuncu daire içinde sıkışan PB parçacığını göstermektedir. Sarı daire içerisine yerleştirilen parçacıkların, gösterildiği gibi akışkan akışı nedeniyle hareket ettiği gözlemlenmiştir. Şekil 4.a tuzaklamanın başlangıç aşamasını, Şekil 4.b ise 1,8 saniye sonraki sonunu göstermektedir. Ayrıca, Şekil 5'te, lazer 2 tarafından tuzağa düşürülen YC turuncu daire içinde gösterilirken, lazer 1 tarafından tuzağa düşürülen YC sarı daire içinde gösterilmektedir. Mavi daire içinde yer alan hücre hareket ederken, diğerleri tuzaklanmış olarak kalmıştır. Son olarak, Şekil 5.a tuzaklamanın başlangıç noktasını, Şekil 5.b ise 1,9 saniye sonra sürecin sonunu göstermektedir.



Şekil 4. PB'nin Lazer 2 ile yakalanması
Figure 4. Trapping of PB by Laser 2.

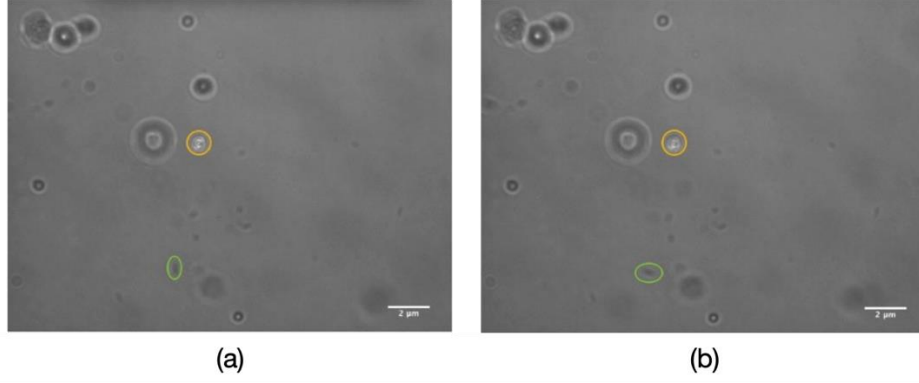


Şekil 5. YC'nin Lazer 2 ile yakalanması
Figure 5. Trapping of YC by Laser 2.

3.2. Çoklu optik cımbız

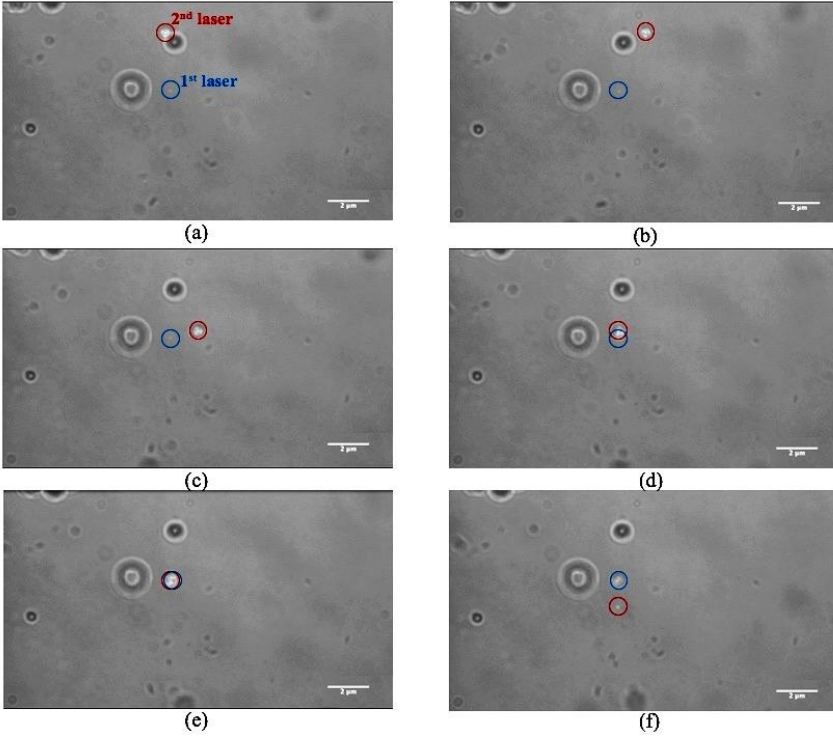
3.2. Multiple optical tweezer

Şekil 6, turuncu daire ile gösterildiği gibi PB'yi aynı anda hapseden iki lazeri göstermektedir. Belirli bir zamanda, yeşil daire parçacığın nasıl döndürüldüğünü göstermektedir. 6.a'da sunulan veriler tuzaklamanın başlangıç aşamasını gösterirken 6.b'de 1,25 saniyelik zaman diliminin sonu gösterilmektedir. Her iki lazer de PB'yi yerinde tutabilmesine rağmen, YC bir seferde birden fazla optik cımbız tarafından yakalanmamaktadır. Bunun başlıca nedeni akışkan ortamın viskozitesidir.

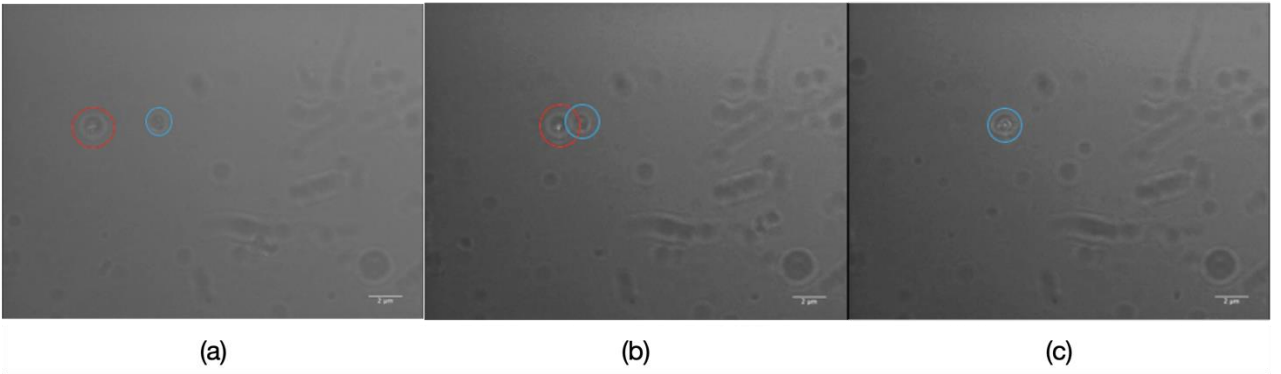


Şekil 6. PB'nin her iki lazer ile aynı anda yakalanması
Figure 6. Trapping of PB by both lasers simultaneously

Her iki lazerin eşzamanlı kullanımı hem PB hem de YC'nin yakalanmasını ve yer değiştirmesini kolaylaştırmıştır. Lazer 2, PB ve YC'yi yakalayıp Lazer 1'in optik yakalama alanına taşıyabilmektedir. Boncuk daha sonra daha güçlü bir yakalama kuvvetine sahip olan Lazer 1'in optik yakalama bölgesinde yakalanmıştır. Şekil 7, kırmızı bir daire olarak gösterilen Lazer 2 aracılığıyla tuzaklanmış PB'yi göstermektedir. Şekil 7.a'daki grafik tuzaklamanın ilk aşamasını göstermektedir. Şekil 7.b ve 7.c tuzağın hareketini, Şekil 7.d ise lazer 1 tuzak bölgesindeki yerleşimini göstermektedir. Şekil 7.e iki lazerin aynı anda boncuğu yakaladığını gösterirken Şekil 7.f'de sadece Lazer 1 boncuğu 2. saniyede yakalamıştır. PB'ye benzer şekilde Şekil 8 YC'nin Lazer 2 üzerinden Lazer 1'in optik yakalama bölgesine doğru hareketini göstermektedir. Kırmızı daire içine hapsedilmiş bir maya hücresi (a-b)'de ve (c)'de Lazer 1 tarafından hapsedilmiş maya hücreleri gösterilmektedir.

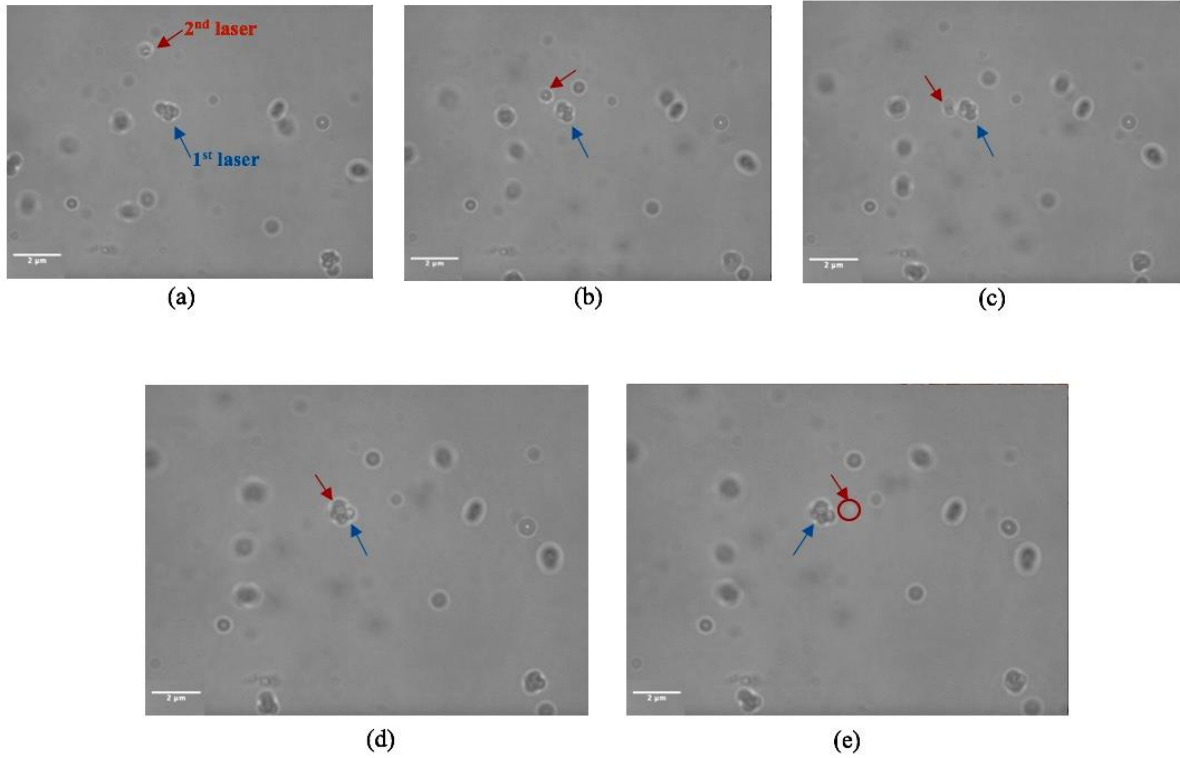


Şekil 7. PB'nin optik cımbızla hareket ettirilmesi
Figure 7. Moving the PB with optical tweezers



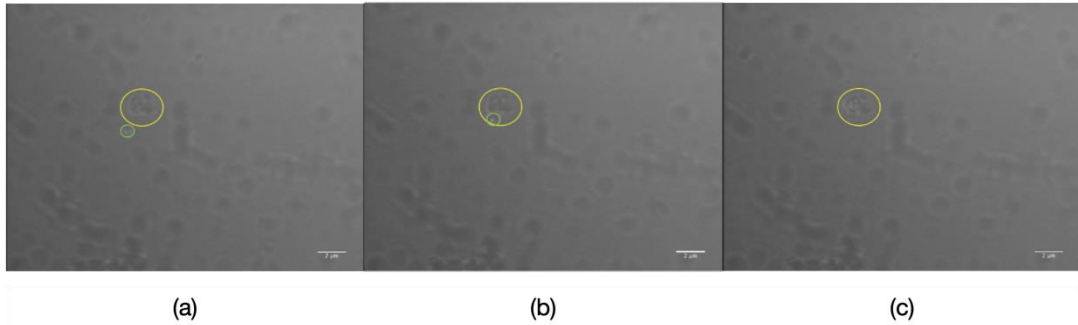
Şekil 8. YC'nin optik cımbızla hareket ettirilmesi
Figure 8. Moving the YC with optical tweezers

Lazer 1 başlangıçta birden fazla parçacığı yakalamış olsa da, Lazer 2 tarafından getirilen bir numuneyi de yakalayabilir. Şekil 9 bu süreci göstermektedir. Polistiren boncuk ilk olarak Lazer 2 tarafından yakalanmakta ve daha sonra Şekil 9.a-c'de gösterildiği gibi Lazer 1'e doğru hareket etmektedir. Şekil 9d'de Lazer 2, Şekil 9e'de gösterildiği gibi yakalama bölgesinden ayrılmadan önce boncuktan uzaklaşarak Lazer 1'e doğru hareket etmektedir.



Şekil 9. Optik cımbız ile birden fazla parçacığın yakalanması
Figure 9. Trapping multiple particles with optical tweezers

Şekil 10.a'daki sarı daire Lazer 1 tarafından tutulan birden fazla YC'yi, Şekil 10.b'deki yeşil daire ise Lazer 2 tarafından tutulan ve hareket ettirilen YC'yi göstermektedir. Şekil 10.a ve 10.b, Lazer 2'nin kapana kısılmış YC'nin yer değiştirmesine neden olduğunu göstermektedir. Şekil 10.c, her iki lazerin aynı anda kullanılmasıyla birden fazla hücrenin hapsedildiğine dair kanıtlar sunmaktadır.



Şekil 10. Optik cımbız ile birden fazla YC yakalanması
Figure 10. Trapping multiple YC with optical tweezers

3.3. Çoklu optik cımbızın genel performansı

3.3. Overall performance of multiple optical tweezer

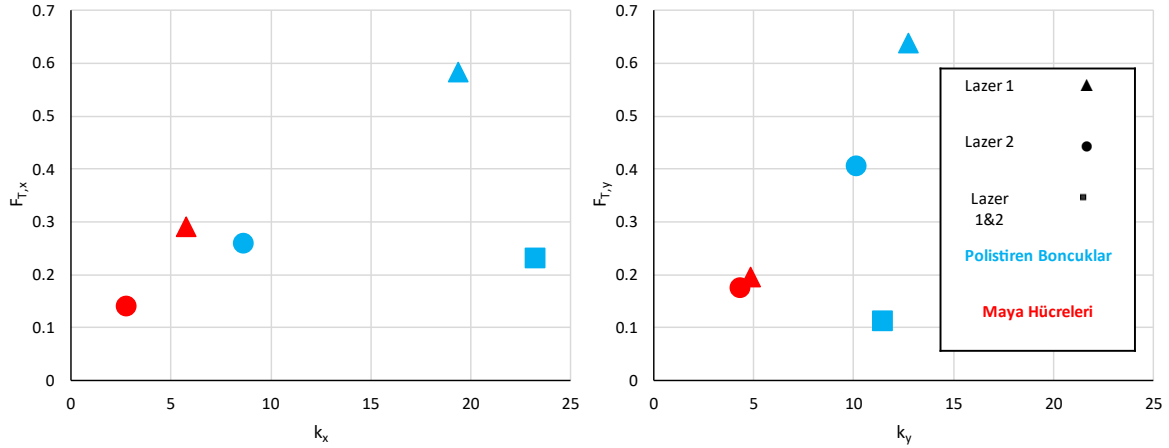
Sertlik ve yakalama kuvveti optik cımbızların iki temel özelliğidir. Cımbızların sertliği Brownian hareket yöntemi kullanılarak belirlenmiştir. Sertliği ve yakalama kuvvetini hesaplamak için Denklemler (2-6), Brown hareketi altında yakalanan numunenin yer değiştirmelerinin yanı sıra yakalama merkezi ile numune merkezi arasındaki mesafeleri gerektirir. Tablo 4'te bu hesaplamalarda kullanılan parametreler verilmiştir.

Tablo 4. Brown hareketi altında tuzaklanmış boncukların yer değiştirmeleri ($\langle x \rangle$ ve $\langle y \rangle$) ve tuzak merkezi ile numune merkezi arasındaki mesafeler ($d_{T,x}$ and $d_{T,y}$)

Table 4. The displacements of the trapped beads under Brownian motion ($\langle x \rangle$ and $\langle y \rangle$) and the distances between the trap centre and the sample centre ($d_{T,x}$ and $d_{T,y}$)

Durum	$\langle x \rangle$ [μm]	$\langle y \rangle$ [μm]	$d_{T,x}$ [μm]	$d_{T,y}$ [μm]
PB – Lazer 1	0,015	0,018	0,03	0,05
PB – Lazer 2	0,022	0,020	0,03	0,04
PB – Lazer 1&2	0,013	0,019	0,01	0,01
YC – Lazer 1	0,027	0,029	0,05	0,04
YC – Lazer 2	0,038	0,031	0,05	0,04

Lazer 1 her yönde daha yüksek sertlik ve yakalama kuvveti değerleri sergileyerek her numunede birden fazla partikülün aynı anda yakalanmasına olanak sağlamıştır (Şekil 11). Buna karşılık, Lazer 2 yalnızca hareket uygulamaları için uygundur. Her iki lazer de aynı olmasına ve optimum yakalama kuvvetleri elde etmek için mesafeler hesaplanmasına rağmen, dikroik ayna nedeniyle gözlemlenen güç kaybı tuzaklama kuvvetinde değişikliklere neden olabilir. Ayrıca, Şekil 11'de gösterildiği gibi, YC'ler için yakalama kuvvetleri PB'ye kıyasla daha küçüktür. Bunun nedeni, benzer kırılma indisi değerlerine (su için 1,33 ve yoğurt kültürü için 1,3524 (Torres vd., 2010)) sahip olmalarına rağmen yoğurt kültürü ortamının su ortamına (0,001002 kg/(m-s)) kıyasla daha yüksek viskozite değerleri (0,038 kg/(m-s) (Ertugay vd., 2012)) olabilir. Sonuç olarak, YC için her iki lazer tarafından optik yakalama engellenmiştir.

**Şekil 11.** Tüm durumlar için her ekseninde sertlik (k) ve yakalama kuvveti (FT) değişimi
Figure 11. Variation of stiffness (k) and trapping force (FT) at each axis for all cases

5. Sonuçlar

5. Conclusions

Bu çalışmanın amacı, sudaki polistiren boncuklar ve yoğurt kültüründeki maya hücreleri gibi mikron boyutundaki parçacıkları yakalamak ve manipüle etmek için iki paralel He-Ne lazer ($\lambda=632.8$ nm) kullanan düşük bütçeli ve özel tasarlanmış çoklu bir optik cımbız geliştirmektir. Optik cımbızın sertlik ve yakalama kuvveti gibi karakteristik özellikleri, tüm durumlar için (Lazer 1, Lazer 2 ve her iki lazer aynı anda) Brownian Hareketi yöntemi kullanılarak tanımlanmıştır. Her bir optik bileşen arasındaki mesafeler Gauss ışın optiği kullanılarak hesaplanmıştır. Bununla birlikte, dikroik ayna kullanımı sebebiyle oluşan güç kaybı Lazer 2'nin daha düşük yakalama kuvvetlerine sahip olmasına neden olmuştur. Nesnelere yakalamak ve manipüle etmek için tek bir lazer ışını (Lazer 2) kullanan geleneksel optik cımbızların aksine, ek bir lazerin kullanılması mikron

boyutundaki parçacıkların manipülasyonuna ve birden fazla partikülün halihazırda tuzaklanmış olduğu Lazer 1'in tuzak bölgesine taşınmasına izin vermektedir. Bu çalışma, her iki lazerin eşzamanlı kullanımı yoluyla stabil tuzaklama elde edilmesinde saçılma ortamının viskozitesinin önemini vurgulamaktadır.

Çalışmanın amacı doğrultusunda sistemi oluştururken düşük bütçeli optik bileşenler kullanılmıştır. Özel kaplamalı lensler ve dikroik ayna tercih edilmesiyle sistemdeki güç kaybı azaltılabilir ve sistemde kullanılan lazerleri değiştirmeden daha yüksek güçler ile yakalama ve manipülasyon işlemleri gerçekleştirilebilmektedir. Objektif hizasına eklenen özel detektörler ile tuzaklanan parçacıkların salınımları takip edilerek optik cımbızın sertliği ve dolayısıyla yakalama kuvveti daha hassas şekilde belirlenebilmektedir. Aynı zamanda kullanılan lazerin tamamen değiştirilmesi, farklı ışın dalga boylarına sahip lazerlerin kullanılabilmesi ya da lazer sayısının da arttırılabilmesiyle önerilen sistem, hücre sıralama ve manipülasyonu için biyoloji ve viskozite ölçümü için reoloji gibi çok çeşitli araştırma alanlarında kullanılma potansiyeline sahiptir.

Teşekkür

Acknowledgements

Bu çalışma İzmir Kâtip Çelebi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Nanobilim ve Nanoteknoloji Anabilim Dalı Yüksek Lisans Programı'nda, Dr. Öğr. Üyesi Aziz KOLKIRAN danışmanlığında Nur ÇOBANOĞLU'nun yüksek lisans tezinden üretilmiştir.

Yazar katkısı

Author contribution

Nur ÇOBANOĞLU deneylerin yürütülmesi, sonuçların analiz edilmesi, makalenin ilk taslağının hazırlanması konularında katkı sağlamıştır. Aziz KOLKIRAN ise deney düzeneğinin kavramsallaştırılması, sonuçların değerlendirilmesi, makalenin gözden geçirilmesi ve düzenlenmesi konularında katkıda bulunmuştur.

Etik beyanı

Declaration of ethical code

Bu makalenin yazarları, bu çalışmada kullanılan materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve / veya yasal-özel izin gerektirmediğini beyan etmektedir.

Çıkar çatışması beyanı

Conflicts of interest

Yazarlar herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan eder.

Kaynaklar

References

- Ashkin, A. (1970). Acceleration and Trapping of Particles by Radiation Pressure. *Physical Review Letters*, 24(4), 156–159. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.24.156>
- Ashkin, A., & Dziedzic, J. M. (1987). Optical trapping and manipulation of viruses and bacteria. *Science*, 235(1984), 1517–1520. <https://doi.org/10.1126/science.3547653>
- Ashkin, A., Dziedzic, J. M., Bjorkholm, J. E., & Chu, S. (1986). Observation of a single-beam gradient force optical trap for dielectric particles. *Optics Letters*, 11(5), 288. <https://doi.org/10.1364/OL.11.000288>
- Ashok, P. C., & Dholakia, K. (2012). Optical trapping for analytical biotechnology. *Current opinion in biotechnology*, 23(1), 16–21.
- Baek, J.-H., Hwang, S.-U., & Lee, Y.-G. (2007). Trap stiffness in optical tweezers. *Asian Symposium for Precision Engineering and Nanotechnology 2007*, 6.
- Castelain, M., Pignon, F., Piau, J. M., Magnin, A., Mercier-Bonin, M., & Schmitz, P. (2007). Removal forces and adhesion

- properties of *Saccharomyces cerevisiae* on glass substrates probed by optical tweezer. *The Journal of chemical physics*, 127(13).
- Castelain, M., Pignon, F., Piau, J. M., & Magnin, A. (2008). The initial single yeast cell adhesion on glass via optical trapping and Derjaguin–Landau–Verwey–Overbeek predictions. *The Journal of chemical physics*, 128(13).
- Castelain, M., Rouxhet, P. G., Pignon, F., Magnin, A., & Piau, J. M. (2012). Single-cell adhesion probed in-situ using optical tweezers: A case study with *Saccharomyces cerevisiae*. *Journal of Applied Physics*, 111(11).
- Choudhary, D., Mossa, A., Jadhav, M., & Cecconi, C. (2019). Bio-molecular applications of recent developments in optical tweezers. *Biomolecules*, 9(1), 23.
- Constable, A., Kim, J., Mervis, J., Zarinetchi, F., & Prentiss, M. (1993). Demonstration of a fiber-optical light-force trap. *Optics letters*, 18(21), 1867–1869.
- Difato, F., Pinato, G., & Cojoc, D. (2013). Cell signaling experiments driven by optical manipulation. *International Journal of Molecular Sciences*, 14(5), 8963–8984.
- Eom, N., Stevens, V., Wedding, A. B., Sedev, R., & Connor, J. N. (2014). Probing fluid flow using the force measurement capability of optical trapping. *Advanced Powder Technology*, 25(4), 1249–1253.
- Ertugay, M. F., Baslar, M., Sengul, M., & Sallan, S. (2012). The effect of acoustic energy on viscosity and serum separation of traditional ayran, a Turkish yogurt drink. *Gida*, 37, 253–257.
- Favre-Bulle, I. A., Stilgoe, A. B., Scott, E. K., & Rubinsztein-Dunlop, H. (2019). Optical trapping in vivo: theory, practice, and applications. *Nanophotonics*, 8(6), 1023–1040.
- Firby, C. J., Smith, K. N., Gilroy, S. R., Porisky, A., & Elezzabi, A. Y. (2016). Design of a simple, low-cost, computer-controlled, dual-beam optical tweezer system. *Optik*, 127(1), 440–446.
- Hofmeister, A., Thalhammer, G., Ritsch-Marte, M., & Jesacher, A. (2020). Adaptive illumination for optimal image quality in phase contrast microscopy. *Optics Communications*, 459, 124972.
- Jia, D., Hamilton, J., Zaman, L. M., & Goonewardene, A. (2007). The time, size, viscosity, and temperature dependence of the Brownian motion of polystyrene microspheres. *American Journal of Physics*, 75(2), 111–115.
- Kappel, K., & Lind, C. H. (2014). *Trapping Polystyrene Beads with Optical Tweezers*.
- Keloth, A., Anderson, O., Risbridger, D., & Paterson, L. (2018). Single cell isolation using optical tweezers. *Micromachines*, 9(9), 434.
- Lenton, I. C. D., Scott, E. K., Rubinsztein-Dunlop, H., & Favre-Bulle, I. A. (2020). Optical Tweezers Exploring Neuroscience. İçinde *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology* (C. 8). <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fbioe.2020.602797>
- Liu, J., & Li, Z. (2018). Controlled mechanical motions of microparticles in optical tweezers. *Micromachines*, 9(5), 232.
- Liu, Y., & Yu, M. (2017). Fiber optical tweezers for manipulation and sensing of bioparticles. İçinde *Handbook of Photonics for Biomedical Engineering* (ss. 683–715). Springer.
- Mas Soler, J. (2008). *Force calibration of optical traps by video-based methods*. Universitat Politècnica de Catalunya.
- Molloy, J. E., & Padgett, M. J. (2002). Lights, action: optical tweezers. *Contemporary physics*, 43(4), 241–258.
- Nemet, B. A., & Cronin-Golomb, M. (2003). Measuring microscopic viscosity with optical tweezers as a confocal probe. *Applied optics*, 42(10), 1820–1832.
- Pilát, Z., Jonáš, A., Ježek, J., & Zemánek, P. (2017). Effects of infrared optical trapping on *saccharomyces cerevisiae* in a microfluidic system. *Sensors*, 17(11), 2640.
- Polimeno, P., Magazzu, A., Iati, M. A., Patti, F., Saija, R., Boschi, C. D. E., Donato, M. G., Gucciardi, P. G., Jones, P. H., & Volpe, G. (2018). Optical tweezers and their applications. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 218, 131–150.

- Rice, A., & Fischer, R. (y.y.). *Calibration Of Optical Tweezers*.
- Schindelin, J., Arganda-Carreras, I., Frise, E., Kaynig, V., Longair, M., Pietzsch, T., Preibisch, S., Rueden, C., Saalfeld, S., & Schmid, B. (2012). Fiji: an open-source platform for biological-image analysis. *Nature methods*, 9(7), 676. <https://doi.org/https://doi.org/10.1038/nmeth.2019>
- Statsenko, A., Inami, W., & Kawata, Y. (2017). Measurement of viscosity of liquids using optical tweezers. *Optics Communications*, 402, 9–13.
- Torres, J. D., Tárrega, A., & Costell, E. (2010). Storage stability of starch-based dairy desserts containing long-chain inulin: Rheology and particle size distribution. *International Dairy Journal*, 20(1), 46–52. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2009.08.001>
- Volpe, G., Maragò, O. M., Rubinsztein-Dunlop, H., Pesce, G., Stilgoe, A. B., Volpe, G., Tkachenko, G., Truong, V. G., Chormaic, S. N., & Kalantarifard, F. (2023). Roadmap for optical tweezers. *Journal of Physics: Photonics*, 5(2), 22501.
- Wang, D., Zhou, E. H., Brake, J., Ruan, H., Jang, M., & Yang, C. (2015). Focusing through dynamic tissue with millisecond digital optical phase conjugation. *Optica*, 2(8), 728–735.
- Zhang, H., & Liu, K. K. (2008). Optical tweezers for single cells. *Journal of the Royal Society interface*, 5(24), 671-690.
- Zhu, R., Avsievich, T., Popov, A., & Meglinski, I. (2020). Optical Tweezers in Studies of Red Blood Cells. İçinde *Cells* (C. 9, Sayı 3). <https://doi.org/10.3390/cells9030545>
- Zou, X., Zheng, Q., Wu, D., & Lei, H. (2020). Controllable cellular micromotors based on optical tweezers. *Advanced Functional Materials*, 30(27), 2002081.