

Kararlı Bir Optik Tuzaklama Düzeneginin Tasarımı ve Kurulumu

Sevinç Gündüz

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Fizik Anabilim Dalı

Ocak 2013

Design and Foundation of a Stable Optical Trap Setup

Sevinç Gündüz

MASTER OF SCIENCE THESIS

Department of Physics

Ocak 2013

Kararlı Bir Optik Tuzaklama Düzeneginin Tasarımı ve Kurulumu

Sevinç Gündüz

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Lisansüstü Yönetmeliği Uyarınca
Fizik Anabilim Dalı
Atom ve Molekül Fiziği Bilim Dalında
YÜKSEK LİSANS TEZİ
Olarak Hazırlanmıştır

Danışman: Yrd. Doç. Dr. Sertaç Eroğlu

Ocak 2013

ONAY

Fizik Anabilim Dalı Yüksek Lisans öğrencisi Sevinç Gündüz'ün YÜKSEK LİSANS tezi olarak hazırladığı “Kararlı Bir Optik Tuzaklama Düzeneginin Tasarımı ve Kurulumu” başlıklı bu çalışma, jürimizce lisansüstü yönetmeliğin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek kabul edilmiştir.

Danışman : Yrd. Doç. Dr. Sertaç Eroğlu

İkinci Danışman : ___

Yüksek Lisans Tez Savunma Jürisi:

Üye : Prof. Dr. Osman PARLAKTUNA

Üye : Prof. Dr. Emel ALĞIN

Üye : Doç. Dr. Ahmet ÇABUK

Üye : Yrd. Doç. Dr. Derya PEKER

Üye : Yrd. Doç. Dr. Sertaç EROĞLU

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun tarih ve
..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. Nimetullah BURNAK

Enstitü Müdürü

ÖZET

Optik tuzaklama, lazer ışını ile küçük parçacıkların yakalanmasına dayanan bir olaydır. Tuzaklama olayında lazer ışını, parçacıklar üzerine saçılma kuvveti ve gradyent kuvveti olmak üzere iki temel kuvvet uygular. Tek ışın kullanılarak tuzaklamanın oluşması için bu iki kuvvetin de aynı anda var olması gerekir. Ancak kararlı bir tuzaklama, gradyent kuvvetinin saçılma kuvvetinden büyük olması durumunda elde edilir. Kararlı bir optik tuzaklama düzeneğinin kurulumunun gerçekleştirilmesinde kurulumda kullanılan bileşenler kadar kurulum geometrisinin iyi bir şekilde planlanması ve ışın yönlendirmelerinin hassas bir şekilde ayarlanmasının etkisi de büyüktür. Bu tez çalışmasında kararlı bir optik tuzaklama düzeneğinin kurulumu çalışması; bileşenlerin seçimi ve yerleşimi, düzenek geometrisi ve ışın yolunun planlanması ve kurulumu, ışın yolu hassas ayarlamalarının yapılması aşamalarını içerecek şekilde detaylı olarak incelenmektedir.

Kurulumu hassas bir şekilde gerçekleştirilen ve kalibrasyonu yapılmış olan bir optik tuzaklama düzeneği kullanılarak; hücreler, organeller ve tek moleküller gibi biyolojik numuneler üzerine kontrollü kuvvet uygulanabilmesi ve bu moleküllerin uygulanan kuvvete gösterdikleri tepkinin ölçümü mümkün olabilmektedir. Dolayısıyla bu yüksek hassas deneysel yöntem, pek çok biyolojik ya da biyolojik olmayan numunenin mekanik özelliklerinin moleküler boyutlara kadar inebilen geniş bir uygulama spektrumunda incelenmesine olanak sağlayan bir yöntemdir.

Bu tez çalışması ile kararlı bir optik tuzaklama düzeneğinin kurulumu, gelecekte yapılması hedeflenen araştırma çalışmalarının yapılmasına imkân sağlayacak şekilde planlanmış ve gerçekleştirilmiştir. Aynı zamanda düzenek, zaman içerisinde yapılacak bazı eklentiler ile araştırma potansiyelinin arttırılmasına olanak sağlayacak esnekliğe de sahip olacak şekilde planlanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Optik tuzak, kararlı optik tuzak düzeneği kurulumu.

SUMMARY

Optical trapping is a phenomenon which is based on the capture of small particles by using a laser beam. In the trapping laser beam exerts two fundamental forces, scattering and gradient forces, on the particles. For the generation of an optical trap by using a single beam, these two forces should exist simultaneously. However, a stable trapping is obtained when the gradient force is greater than the scattering force. The planning of setup geometry and the fine alignment of the beam are as important as the selection of setup components during the establishment of a stable optical trap setup. In this dissertation, foundation of a stable optical trap setup is investigated comprehensively including the steps; selection and placement of setup components, planning setup geometry and beam path, and fine beam alignment.

By using a vigilantly established and well calibrated optical trapping setup, it is possible to conduct experiments such as application of forces on biological samples including cells, organelles and single molecules and measurement of the sample response caused by the applied force. Consequently this sensitive experimental technique makes it possible to investigate the mechanical properties of many biological or non-biological samples in a wide application spectrum up to molecular level.

In this thesis study, foundation of a stable optical trap setup which is suited for the aimed research studies was planned and accomplished. The setup, at the same time, was planned to have the flexibility to accommodate additional components for the enhancement of experimental potential in support of future research.

Keywords: Optical trapping, a stable optical trap setup.

TEŞEKKÜR

Tez çalışmamda yaptığı olağanüstü yardımlarından ve hem çalışma hayatımda hem de yaşantımda yol gösterdiği için çok değerli danışman hocam Yrd. Doç. Dr. Sertaç EROĞLU'na en içten duygularıyla teşekkür eder minnet ve şükranlarımı sunarım.

Yoğun bir çalışma temposu içinde olmasına rağmen bilgi birikimlerinden faydalanmaya gittiğim her vakitte beni geri çevirmeyen her defasında bir abi kadar yakın olan hocam Doç. Dr. İdris AKYÜZ'e teşekkür ederim.

Çalıştığım konuda bilgi birikimine sahip olan değerli arkadaşım Elvan SAYIN'a bilgilerini benimle paylaştığı için teşekkür ederim.

Tez yazım süreci boyunca aynı evde kaldığım ve istisnasız her gün güler yüzlülüğüyle bana enerji veren arkadaşım Nilay ERCAN'a teşekkürler.

Tezimi yazmaya başlamamdan son noktasını koymama kadar yaşadığım zor ve sıkıntılı günlerde hep yanımda olan, sıcacık gülüşüyle huzur bulduğum arkadaşım Ahmet DANIŞ'a teşekkürler.

Benim için kenetlenip beni el üstünde tutan Ailem'e, her şey için teşekkürler.

Bu çalışma; Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Komisyonu'nun 2008-19019 numara ve “*Kuvvet Spektroskopisi Yöntemiyle DNA Molekülünün Mikromekaniksel Özelliklerinin İncelenmesi*” başlıklı projesi ile desteklenmiştir.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET	v
SUMMARY	vi
TEŞEKKÜR	vii
İÇİNDEKİLER	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ	x
ÇİZELGELER DİZİNİ	xii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xiii
1 GİRİŞ	1
2 OPTİK TUZAKLAMA HAKKINDA TEMEL BİLGİLER.....	7
2.1 Optik Tuzaklamanın Teorisi	7
2.2 Bir Optik Tuzaklama Deney Düzenineğin Temel Bileşenleri	12
2.2.1 Tuzaklama bileşenleri.....	14
2.2.1.1 Lazerler.....	15
2.2.1.2 Objektif.....	17
2.2.2 Görüntüleme bileşeni.....	19
2.2.3 Bilgisayar ve otomasyon bileşenleri.....	19
2.3 Tuzak Konumunun Hareketinin Gerçekleştirilmesi	20
3 LABORATUAR DÜZENLEMESİ.....	22
3.1 Düzenek Kurulumunda Kullanılan Elemanlar ve Özellikleri	23
3.1.1 Titreşim yalıtım masası	23
3.1.2 Tuzaklayıcı lazer	23
3.1.3 Işın yolu kontrol lazeri.....	24
3.1.4 Aynalar	24
3.1.5 Polarizör ünitesi (Glan-Thompson polarizörü ve yarım dalga plaka).....	25

İÇİNDEKİLER (devam)**Sayfa**

3.1.6	Işın genişletici.....	25
3.1.7	Objektif.....	26
3.1.8	XY mekanik öteleme platformu ve XY piezo platform	27
3.1.9	Kondenser.....	27
3.1.10	Kamera	28
3.1.11	Bilgisayar.....	28
4	OPTİK TUZAKLAMA DÜZENEĞİ KURULUMUNUN GERÇEKLEŞTİRİLMESİ	31
4.1	Optik Tuzaklama Düzeneğinin Planlanması.....	32
4.2	Kurulumda Işın Yolu Ayarlamasının Önemi	33
4.2.1	Tuzaklama bileşenlerinin yerleşimi ve ışın yolu ayarı	35
4.2.2	Görüntüleme bileşenlerinin yerleşimi ve ışın yolu ayarı.....	49
4.3	Kararlı Bir Optik Tuzağın Elde Edilmesi	51
5	SONUÇ VE TARTIŞMA.....	53
6	KAYNAKLAR DİZİNİ	56

EKLER

EK-A

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
1.1	Optik tuzaklamanın yıllar içerisinde gelişimi 2
2.1	Mikroskobik parçacığın ortamın kırılma indisine göre davranışı 8
2.2	Optik tuzaklamada lazer ışını tarafından küresel parçacığa aktarılan net momentum nedeniyle gradyent kuvvetin meydana gelişi..... 9
2.3	Küresel parçacık üzerine düşen lazer ışınının momentumundaki değişim..... 10
2.4	Bir optik tuzaklama düzeneğini oluşturan bileşenlerin şematik gösterimi 14
2.5	Lazer ışın modları 16
2.6	NA değerinin alan derinliği ve ışın konisine etkisi..... 18
2.7	İki konveks mercek yardımıyla optik eksen boyunca odak noktası konumunun kontrolü..... 20
2.8	İki konveks mercek yardımıyla optik eksene dik düzlemde odak noktası konumunun kontrolü..... 21
3.1	Kontrol merkezinden bir görüntü 22
3.2	Objektif açıklığının doldurulması 26
3.3	Düzenekte kullanılan ışın genişleticiler 26
4.1	Optik tuzaklama düzeneğinin tümünün çizimi 32
4.2	Işın yolu ile optik eksenin birbirine göre durumu..... 34
4.3	Lazer ve lazerin altındaki blok..... 35
4.4	Işın genişletici konfigürasyonu 36
4.5	Tuzak lazeri ve KK1 arasındaki konfigürasyon 37
4.6	Dik açılı kinematik ayna tutucusu konfigürasyonu 37
4.7	KA1 ve lazer arasındaki optik eksen kontrolü..... 38
4.8	Destek konfigürasyonu 39
4.9	KA1ve KK1 sistemlerinin destek aracılığıyla bağlantısı..... 39
4.10	Periskop sistemi 40
4.11	Periskop sisteminin kurulmasıyla sahip olunan yeni yükseklik 41
4.12	Birinci mercek konfigürasyonu. 42
4.13	Düzeneğin mercek konfigürasyonuna kadar ayarlanmış kısmı 42

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
4.14 Kafes yapı ile oluşturulan ışın yolunun sabit platform merkezine kadar olan bölümü	43
4.15 Sabit platform	44
4.16 Sabit platform iskeletine yerleştirilen üstteki raf plaka	44
4.17 Numune tutucusu	45
4.18 Objektif hareketini sağlayan ünite	47
4.19 KK4 ile KK2 arasındaki optik eksen kontrolü.....	49
4.20 Kamera sisteminin konfigürasyonu	50
4.21 Optik tuzağın gerçekleştirildiği düzeneğin fotoğrafı	51
4.22 Tuzaklanan 1 µm çapındaki lateks mikroküre görüntüsü.....	52

ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>Çizelge</u>	<u>Sayfa</u>
2.1 Objektif türleri ve karakteristik özellikleri	17
3.1 Otomasyon bilgisayarına takılması gereken kartlar.....	28
3.2 Otomasyon bilgisayarına bağlanan üniteler.....	29
4.1 Objektifin kaba ve hassas hareketi amacıyla kullanılan öteleyicilerin özellikleri	47

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
cw	Sürekli dalga
F_{tuzak}	Tuzak oluşturan kuvvetler
\vec{G}	Ağırlık
k	Tuzak sertliği
nm	nanometre
n_m	Ortamın kırılma indisi
pN	pikonewton
r	Parçacığın yarıçapı
R	Parçacığın çapı
W	watt
μm	mikrometre
x	Yer değiştirme
"	inç
λ	Lazer ışınının dalga boyu

<u>Kısaltmalar</u>	<u>Açıklama</u>
Ar	Anti reflekte
DA	Dikroik ayna
NA	Nümerik açıklık
OT	Optik tuzak
KA	Dik açılı kinematik ayna
KK	Kafes küpü+optik tutucu+ sonlandırıcı konfigürasyonu
Nd:YAG	Neodyum doped:yitrium alüminyum garnet
Nd:YLF	Neodyum doped:yitrium–lityum–florür
Nd:YVO₄	Neodyum doped:yitrium–orthovanadate

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam)

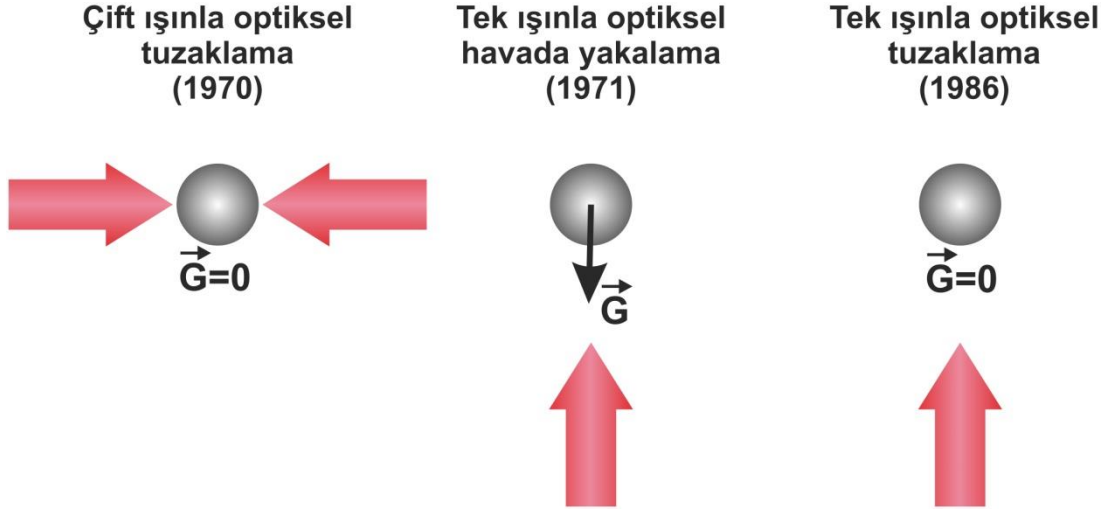
<u>Kısaltmalar</u>	<u>Açıklama</u>
IR	İnfrared (kızıl ötesi)
NIR	Yakın infrared bölge
TEM	Enine elektromanyetik mod
QPD	Kuadrant fotodiyot
CCD	Charge Couple Device
CMOS	Complementary metal oxide semiconductor

BÖLÜM 1

GİRİŞ

Mikroskobik parçacıklar üzerine uygun özelliklere sahip bir lazer ışınının gönderilmesi sonucu, bu parçacıkların tuzaklanması olayına optik tuzak (optik cımbız) adı verilmektedir.

Optik tuzaklamanın doğuşu; 1970 yılında Arthur Ashkin'in sıvı içinde askıda kalan mikroküreleri ilerleme yönleri birbirlerine zıt olacak şekilde yerleştirilmiş iki lazer kaynağından çıkan ışınlar maruz bırakarak tuzaklamayı başarması ile başlar (Ashkin, 1970). Yapılan diğer bir çalışmada ise şeffaf bir numune kabı içerisindeki cam mikroküreler üzerine lazer ışını göndererek, lazer ışınının mikrokürelerden saçılması sonucu üzerlerine etkiyen radyasyon basıncı kuvveti ile yer çekimi kuvvetinin dengelenmesi sonucu parçacıkların havada tuzaklanması gösterilmiştir (Ashkin and Dziedzic, 1971). 1978'de parçacıkların güçlü bir şekilde odaklanmış tek lazer ışını kullanarak da tuzaklanabilmesinin teorik olarak mümkün olabileceğinin bahsedilmesinden sonra (Ashkin, 1978), 1986 yılında Ashkin ve meslektaşları Joseph Dziedzic, John Bjorkholm ve Steven Chu Bell Laboratuvarı'nda su içinde askıda kalan ~25 nm ve 10 µm çaplı parçacıkların tek bir lazer ışını ile tuzaklanabileceğini gösterdiler (Ashkin, et al., 1986). Ashkin'in optik tuzaklama üzerine yapmış olduğu deneysel çalışmaların şematik bir gösterimi Şekil 1.1'de yer almaktadır. Ashkin'in son çalışması ile günümüz optik tuzaklama düzeneklerinin ilkel bir versiyonunu bilim dünyasına kazandırmasının ardından geçen yaklaşık 25 senelik süre, optik tuzaklama düzeneklerine yenilikler kazandıran pek çok bilimsel çalışmaya tanıklık etmiştir.



Şekil 1.1 Optik tuzaklamanın yıllar içerisinde gelişimi.

Optiksel tuzaklama düzeneğinin keşfi ve ardından teorisinin kurulması, optik tuzaklamanın uygulama bulduğu pek çok yeni çalışma alanının ortaya çıkışına ön ayak olmuştur. Bu düzenekler mikron boyutlarındaki parçacıkların manipülasyonuna olanak sağlarken, aynı zamanda gelişmiş konum dedeksiyonu ünitelerinin eklenmesi ile kuvvet spektroskopisi olarak kullanılmalarına da sıklıkla rastlanır. Literatürde yer alan optik tuzaklama ile manipülasyon çalışmalarına örnekler şu şekildedir:

- İlk olarak, sahip oldukları termal enerjilerinden dolayı gelişmiş güzel Brownian hareketine maruz kalan ya da moleküler motor mekanizmaları sayesinde istemli bir şekilde hareket eden virüs ve bakterilerin tek-ışın gradyent tuzakları yardımıyla tuzaklanması ve manipülasyonu çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Öncü çalışmalardan birisi; tütün mozaik virüslerini ve bu virüslerin yoğun odaklı dizilerin 120 mW gücünde argon lazer kullanarak hiçbir belirgin hasar olmaksızın sulu çözelti içerisinde tuzaklanmasının mümkün olduğunu göstermiştir. Yine aynı çalışma ile *Escherichia coli* hücrelerinin tuzaklanması ve manipülasyonu da gerçekleştirilmiştir (Ashkin and Dziedzic, 1987).

- Sperm kalitesinin düşük olduğu durumlarda sperm manipülasyonu ile yumurta hücresinin dölleni sıklıkla kullanılan bir tekniktir. Bu amaçla mekanik manipülasyon yöntemleri en bilinen yöntemler olmasına rağmen optik tuzaklama yöntemleri de kullanılmaktadır. Clement ve arkadaşları tarafından yapılan bir çalışma, olgunlaşmış sığı r yumurtasının optik tuzaklama ile manipülasyonu sayesinde dölleni mesinin mümkün olabileceğini göstermiştir (Clement, et al., 1996).
- Optik tuzaklama sayesinde temassız manipülasyona olanak sağlayan düzeneklere kuvvet bileşenlerinin de ilave edilmesiyle; kanserli meme hücresi zarı (Guo, et al., 2004), kırmızı kan hücresi (Bronkhorst, et al., 1996), kök hücreler (Zhang, et al., 2009) gibi pek çok biyolojik numunenin deformasyon, kopma, tutunum, vb. mekanik özelliklerinin araştırılması mümkün olmaktadır.

Optik tuzaklama yönteminin esas gücü, tek moleküller üzerine kontrollü kuvvet uygulanabilmesine ve bu moleküllerin uygulanan kuvvete gösterdikleri tepkinin ölçümüne olanak sağlamasında yatar. Bu tür çalışmalarda incelenecek olan moleküller, ışık mikroskobu ile direkt olarak gözlenememesi sebebiyle bu moleküllere biyokimyasal yöntemlerle bağlanmış olan ve transdüser görevi gören mikroküreler kullanılır. Bir ucundan mikroküreye bağlanmış olan molekül diğ er ucundan cam tabana ya da diğ er bir hareketsiz yüzeye tutturularak sabitlenir. Böylece tuzaklanmış mikroküreler üzerine etkiyen tuzak kuvveti direkt olarak mikroküreye bağlanmış olan moleküle iletilir. Bu tür bir deneysel düzenek; tek hücrelerin, hücre içi organellerin ve hatta DNA, RNA gibi tek makromoleküllerin mekanik özelliklerinin incelenmesine olanak sağlar. Aynı zamanda günümüzde kullanılmakta olan optik tuzaklama dışındaki diğ er tek molekül araştırma yöntemleri moleküllerin dinamik incelenmesinde yetersiz kalmaktadır. Ancak optik tuzaklama yöntemi, sahip olduğu tek molekülleri dinamik olarak inceleyebilme potansiyeli ile özellikle biyomoleküler numunelerden oldukça önemli bulgular elde edilmesine olanak sağlar. Literatürde optik tuzaklama ile dinamik moleküler mekanik çalışmalarına örnekler şu şekildedir:

- Optik tuzaklama tekniği ile ilk kez çift sarmal DNA (dsDNA)'nın karakteristik olarak uygulanan kuvvete verdiği tepkinin incelenmesi yapılmıştır. dsDNA'nın uzatılırken maruz kaldığı kuvvetin 65 pN'luk eşik kuvvet değerinin altında olması durumunda DNA'nın tersinir bir şekilde orijinal uzunluğuna geri dönerken, kuvvet değerinin arttırılması halinde ise DNA'nın kalıcı deformasyona uğraması nedeniyle faz değiştirerek B formuna dönuştüğü gözlenmiştir (Smith, et al., 1996).
- Diğer bir çalışmada optik tuzaklama tekniği U şeklinde kıvrılmış RNA'nın kinetiğini analiz etmek amacıyla kullanılmıştır. RNA moleküllerinin üzerine uygulanan 0.03 pN/nm'lik kuvvet sayesinde bu molekülleri teker teker açmanın ve katlamanın mümkün olduğu gösterilmiştir (Manosas, et al., 2007).
- Literatürde moleküler motorlar olarak bilinen moleküllere örnek olarak; aktin flamanları boyunca hareket eden miyozin molekülü, mikrotübüller boyunca hareket eden kinezin molekülü ve bazı DNA enzimleri verilebilir. Optik tuzaklama ile bu moleküler motorların kantitatif mobilite incelemesi mümkün olabilmış ve bu çalışmalar sonucunda; çalışılan moleküler motorların adım uzunlukları, ATP döngüsünün kinetiği, motor hareketini durdurmak için gerekli kuvvet miktarı (~5 pN), moleküler motorlar üzerine uygulanan yükün biyokimyasal ve biyomekanik davranışa etkisi gibi pek çok önemli bulgu elde edilmiştir (Svoboda, et al., 1993; Visscher, et al., 1999; Finer, et al., 1994; Mehta, et al., 1999; Rief, et al., 2000; Rock, et al., 2001; Wang, et al., 1998; Mehta and Spudich, 1998; Spudich, et al., 2008).
- Ohlinger ve arkadaşları tarafından yapılan bir çalışmada araştırmacılar sıvı ortamda ses dalgalarının yüksek hassasiyetle dedekte edilebileceğini ileri sürerek optik tuzağın yeni ve ilginç bir uygulamasını gerçekleştirmişlerdir. Yapılan bu çalışmada 3 boyutlu bir optik tuzakta hapsedilen tekli bir altın nano parçacığın konum izlemesi -60 dB'e kadar ses gücü seviyelerinde akustik titreşimleri okumak için kullanılmıştır. Bu durumda nanoparçacığın

kinetik enerjisinde yaklaşık 90 μeV 'luk bir artış gözlemlendiği bildirilmiştir. Optik tuzaklama yönteminin kullanıldığı ve nanokulak adı verilen bu teknik sayesinde mevcut mikroskopi yöntemleri ile ulaşılması mümkün olmayan hassasiyet sayesinde mikroorganizmaların ve moleküler motorların daha detaylı incelenmesi mümkün olabilecektir (Ohlinger, et al., 2012).

Optik tuzaklama yöntemi kullanılarak yapılmış olan bu ve benzeri çalışmalar sonucu literatüre kazandırılan oldukça değerli bilgiler bu yöntemin; moleküller, organeller, hücreler ve hatta dokular düzeyinde gerek manipülasyon ve gerekse mekanik araştırmalar için vazgeçilmez, modern bir teknik olduğunu gösterir. Bu tekniğin ilk ortaya çıkışından günümüze kadar geçen 30-40 senelik süre içerisinde, özellikle biyomoleküler araştırmalar başta olmak üzere uygulama alanı bulduğu pek çok araştırmaya ilaveten yakın gelecekte daha pek çok uygulama alanı bulması kaçınılmazdır.

Optik tuzaklama düzenekleri ticari olarak satılan sınırlı kapasiteye sahip birkaç sistemin dışında genelde kuruluma özgü bileşenlerle oluşturulan açık düzeneklerdir. Açık düzenekler yeni bileşenler ekleme yoluyla kurulumda kolaylıkla değişiklik yapmaya olanak sağlarken en büyük dezavantajı yoğun bir ilk kurulum çalışması gerektirmesidir. Açık sistemlerin diğer bir avantajı da gelişmekte olan optik tuzaklama yönteminin metodolojik olarak araştırılmasına olanak sağlamasıdır. Bu araştırmalar sonucunda günden güne optik tuzaklama düzeneklerinin performansını arttırıcı pek çok çalışma literatürde yerini almaktadır.

Bu tez çalışmasının amacı, gelecekte tek moleküllerin mekanik özelliklerinin araştırılmasına olanak sağlayacak kararlı bir optik tuzaklama düzeneğinin planlaması ve kurulumunun gerçekleştirilmesidir. Tezin giriş bölümünü takip eden bölümler şu şekilde düzenlenmiştir:

İkinci bölümde, öncelikle optik tuzaklama olayının teorik incelenmesi yapılarak optik tuzaklamayı meydana getiren saçılma ve gradyent kuvvetlerini yaratan mekanizma tartışılacaktır. Bir optik tuzaklama düzeneğinin ana bileşenlerinin

tanıtılması ve işlevlerinin açıklanmasına ilaveten tuzak kalibrasyonu hakkında bilgiler bu bölümde verilmektedir.

Üçüncü bölümde, öncelikle düzeneğin yer aldığı laboratuarda yapılan bazı ön çalışmalar anlatılmıştır. Laboratuvarımızda kurulumu gerçekleştirilen optik tuzaklama düzeneğinin başlangıç aşamasındaki planlaması ve bu plandaki her bir bileşen ve bu bileşenlerin konumlandırılmalarına ilaveten özellikleri de tanıtılmıştır.

Dördüncü bölümde, tuzak oluşumu amacıyla yapılan ışın yolu yönlendirilmesi çalışmaları ve tuzak performansını değiştiren faktörlerin hassas konumlandırılması ve yönlendirilmesi çalışmaları detaylı bir şekilde bütün aşamalarıyla anlatılmıştır.

Beşinci bölümde, optik tuzaklama düzeneğinin kurulumu çalışmalarından çıkan sonuçlar ve tartışmalar yer almaktadır.

Ekler bölümü kurulumu gerçekleştiren deney düzeneğindeki bileşenlere ait ayrıntılı bilgilerin yer aldığı bir listeyi içermektedir.

BÖLÜM 2

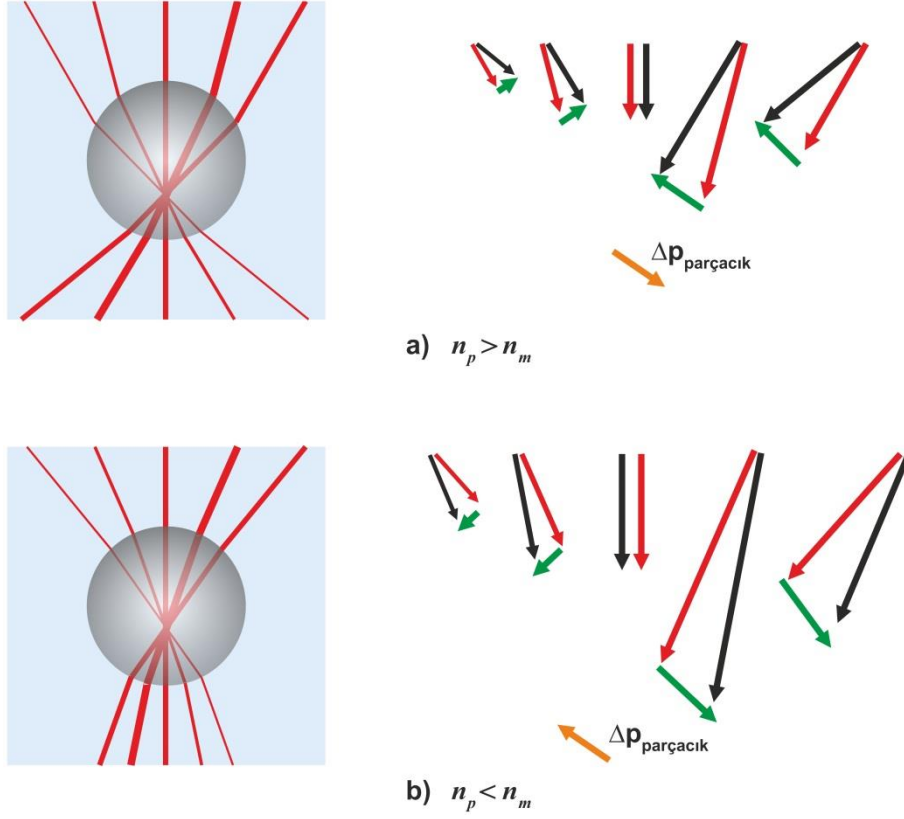
OPTİK TUZAKLAMA HAKKINDA TEMEL BİLGİLER

2.1 Optik Tuzaklamanın Teorisi

Optik tuzaklama ışık ile mikroskobik parçacıkların etkileşmesi sonucu gerçekleşir ve bu etkileşme sonucu optik tuzaklamayı gerçekleştiren gradyent ve saçılma kuvvetleri doğar. Bu kuvvetler parçacığın çapının lazer ışınının dalga boyundan büyük ($R \gg \lambda$), parçacığın çapının lazer ışınının dalga boyundan küçük ($R \ll \lambda$) ve parçacığın çapının lazer ışınının dalga boyuna yaklaşık eşit olması ($R \approx \lambda$) gibi farklı durumlarda incelenebilir.

Lazer ışını tarafından parçacığa etki eden saçılma ve gradyent kuvvetlerinin oluşmasının temelinde ışının parçacıktan yansımaları, kırılması ve soğurulması olayı yatmaktadır. Işının parçacıktan yansımaları, kırılması ve soğurulması olayları parçacık üzerinde bir arada meydana gelmektedir. Bu olaylar sonucu oluşan kuvvetler tuzaklanan parçacığın boyutu ışığın dalga boyundan oldukça büyük olması durumunda (Mie rejimi, $R \gg \lambda$) kolaylıkla incelenebilir.

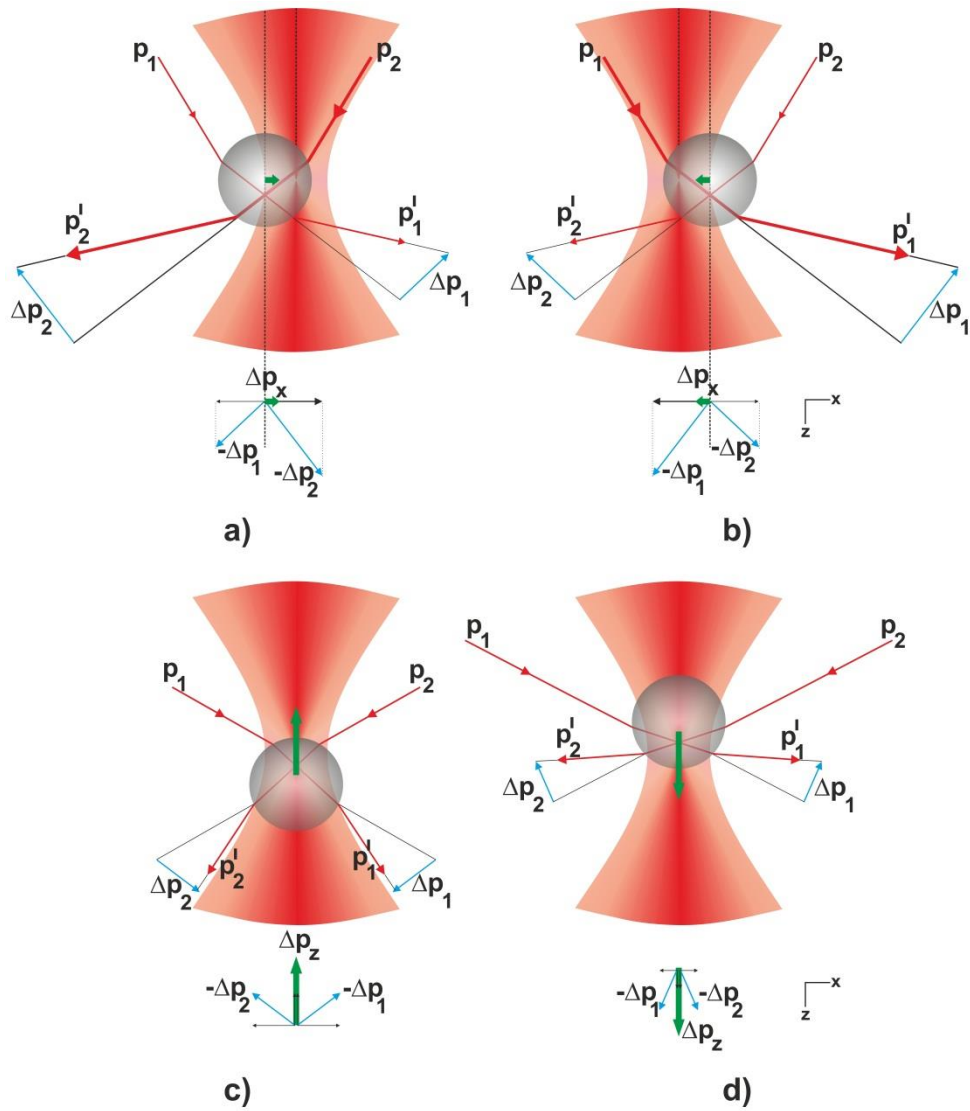
Şekil 2.1’de parçacık ve parçacığın bulunduğu ortamın kırılma indislerine bağlı olarak tuzak olayının durumu anlatılmaktadır ve Şekil 2.1’de yer alan ışın gaussian ışın şiddeti dağılımına sahiptir. Yani ışının şiddet dağılımı ışının merkezinde en büyük değerdedir ve merkezden uzaklaştıkça azalan, simetrik bir davranış göstermektedir. Parçacık üzerine gelen gaussian şiddet profiline sahip ışın, Şekil 2.1a’da gösterildiği gibi ortamın kırılma indisinden (n_m) büyük kırılma indisine sahip parçacıktan (n_p) geçerse parçacık ışın şiddetinin yoğun olduğu bölgeye doğru çekilmekte yani tuzaklama gerçekleşmektedir. Eğer gaussian şiddet profiline sahip ışın ortamın kırılma indisinden küçük kırılma indisine sahip parçacıktan geçerse parçacık ışın şiddetinin yoğun olduğu bölgeden itilmekte ve tuzaklanamamaktadır (Şekil 2.1b).



Şekil 2.1 Mikroskobik bir parçacıktan geçen ışınların ortamın kırılma indisine göre davranışı. Burada kırmızı vektör gelen ışının momentumunu, siyah vektör parçacıktan geçen ışının momentumunu, yeşil vektör momentum değişimini ve turuncu vektör parçacığa aktarılan momentumu temsil etmektedir. a) $n_p > n_m$ durumunda parçacığın ışının şiddetli olduğu bölgeye çekilmesi, b) $n_p < n_m$ durumunda parçacığın ışının şiddetli olduğundan itilmesi.

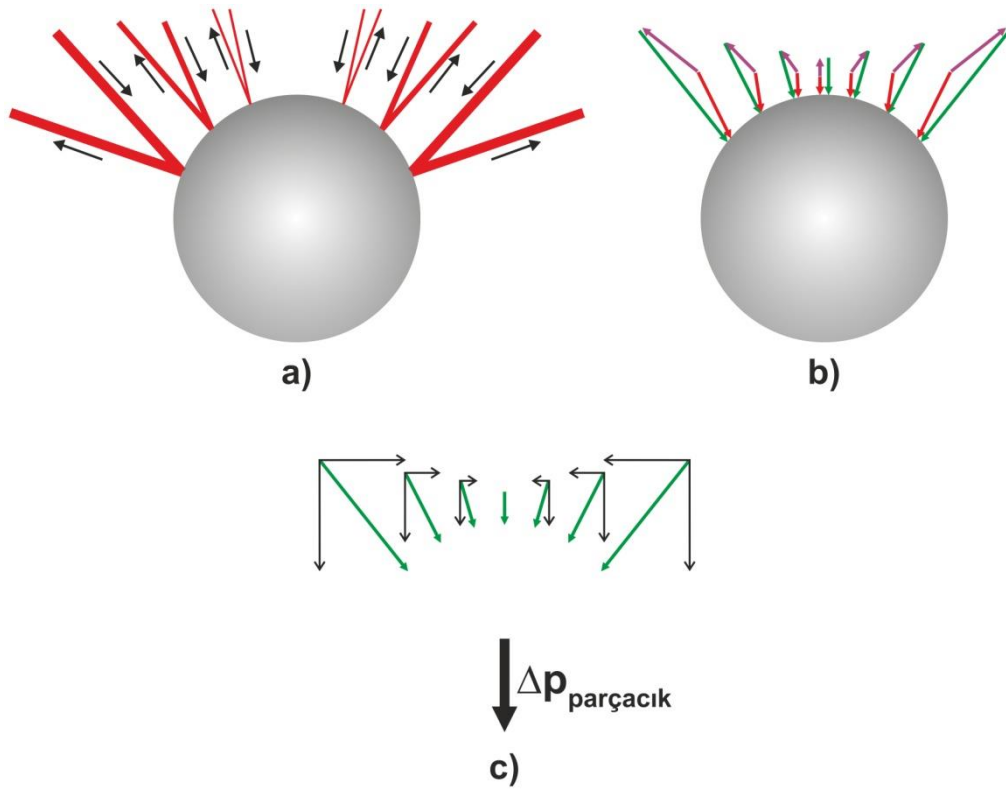
Şekil 2.2’de Mie rejiminde, tuzaklanmış küresel bir parçacığa etki eden gradyent kuvveti ve optik tuzağın oluşum mekanizması gösterilmektedir. Tuzaklanan cismin ortamdan büyük kırılma indisine sahip saydam bir cisim olması durumunda, parçacık yüzeyine çarpan ışınlar parçacık yüzeyine çarptıkları noktada normale yaklaşarak kırılmaya uğrarlar. Saydam parçacık içerisinde geçen ışınlar tekrar kırılmaya uğrayarak cisimden dışarı çıkarlar. Bu durumda ışında, parçacığa giriş ve çıkış esnasında momentum değişimi meydana gelir. Işındaki momentum değişimine eşit ve zıt büyüklükteki bir momentum ışın tarafından parçacığa aktarılır. Newton’un ikinci yasasına göre bir parçacığın momentumundaki değişim oranı parçacığa etkiyen net kuvvete eşittir. Eğer cisim üzerine gelen ışın gaussian ışın profiline sahipse, yani ışının şiddet

dağılımı ışının merkezinde en büyük değerde ve merkezden uzaklaştıkça azalan, simetrik bir davranış gösteriyorsa; tuzaklanan parçacığa aktarılan net momentum ışın şiddetinin yoğun olduğu bölgeye yani odak noktasına yönlü, net bir gradyent kuvvetinin etki etmesine neden olur.



Şekil 2.2 Optik tuzaklamada lazer ışını tarafından küresel parçacığa aktarılan net momentum nedeniyle gradyent kuvvetin meydana gelişi. (a) ve (b) Parçacığın simetri merkezinin ışın ilerleme yönüne dik düzlemde yer değiştirmesinden dolayı üzerine etki eden net kuvvetler, (c) ve (d) Parçacığın simetri merkezinin ışın ilerleme yönünde yer değiştirmesinden dolayı üzerine etki eden net kuvvetler.

Optik tuzaklamada etkin olan ikinci kuvvet ise saçılma kuvvetidir. Saçılma kuvveti küresel parçacık üzerine düşen ışınların radyasyon basıncı nedeniyle parçacığa aktardığı net momentumdan kaynaklanır (Şekil 2.3a, Şekil 2.3b). Saçılma kuvvetinden dolayı parçacığa aktarılan net momentum ve dolayısıyla net kuvvet Şekil 2.3c’de gösterildiği gibi ışın ilerleme yönündedir.



Şekil 2.3 Küresel parçacık üzerine düşen lazer ışınının momentumundaki değişim. a) gelen ışın parçacık üzerinden geri yansıyan kısmı, b) ışın momentum taşır ve gelen ışının yöneliminde farklılık olması durumunda ortaya çıkan momentum değişimine eşit momentumun parçacığa aktarılır. Burada kırmızı vektörler gelen ışınların momentumunu, mor vektörler yansıyan ışınların momentumunu temsil ederken yeşil vektörler ışınların parçacığa transfer ettikleri momentumu temsil etmektedir, c) parçacığa etki eden net momentum, parçacığa aktarılan momentumların bileşenlerinin toplamında ortaya çıkan momentumdur.

Gradyent kuvvetinin ışın ilerleme yönündeki bileşeni ile saçılma kuvveti daima rekabet halindedir. Parçacığın tuzaktan ayrılmaması yani kararlı bir tuzaklama için

gradyent kuvvetinin ışın ilerleme yönündeki bileşeninin saçılma kuvvetinden daha büyük olması gerekir. Kararlı tuzaklama sağlandığında ışın ilerleme yönündeki saçılma kuvvetinin etkisiyle odak noktası ve parçacık merkezi üst üste çakışmaz, parçacık merkezi ışın ilerleme doğrultusunda odak noktasının önünde yer alır.

Küresel bir parçacığa etki eden gradyent ve saçılma kuvvetlerinin süperpozisyonunun detaylı teorik incelemeler sonucu elde edilen ifadesi şu şekildedir (Ashkin, et al., 1986):

$$F_{tuzak} = \frac{n_m P}{c} Q \quad (2.1)$$

Burada n_m ortamın kırma indisi, P ışın gücü, c ışık hızı ve Q boyutsuz etki faktörüdür. Q 'nun değeri objektifin nümerik açıklığı (NA), lazer dalga boyu, parçacık boyutu, ortamın kırma indisinin parçacığın kırma indisine oranı gibi faktörlere bağlıdır.

Denklem 2.1'e göre tuzaklamanın gerçekleşmesini ve performansını etkileyen parçacık ve ortama bağlı kriterler şunlardır: Parçacık dielektrik özelliğe sahip ve kullanılan lazer dalga boyu için geçirgen olmalıdır. Çünkü dielektrik malzemeler elektrik dipollere sahiptirler ve bu dipollerin elektromanyetik alan ile (lazer ışını gibi) etkileşmeleri sonucunda elektrik dipollerin yüksek alan şiddetine doğru çekilmeleri mümkün olur. Aynı zamanda parçacığın kırma indisi bulunduğu ortamın kırma indisinden büyük olmalıdır. Çünkü optik tuzak çalışmasında parçacığın kırma indisi (örneğin silika için $n_{silika} = 1.40$ ile 1.59 arasında değişen değerlere sahiptir) ortamın kırma indisinden ($n_{su} = 1.33$) büyük olduğunda parçacık gelen lazer ışını odaklayan bir merceğe gibi davranır (Christiansen, 2008). Eğer parçacığın kırma indisi ortamın kırma indisinden küçük olursa parçacık tuzakın dışına itilir ve kararlı bir tuzaklama gerçekleşmez. Bu nedenle parçacığın ortamın kırma indisine oranı tuzaklama kuvveti ile doğru orantılıdır. Tuzak performansını etkileyen diğer bir kriter ise parçacık boyutudur. Parçacığın artan büyüklüğü nedeniyle sahip olduğu eylemsizlik de

artacağından, verilen bir sistem için belli bir büyüklükten sonra tuzaklama kuvvetinin büyüklüğü artık parçacığı tuzaklamak için yeterli olamaz. Literatürde tuzaklanan parçacık boyutları ~25 nm ve 10 µm aralığındadır (Ashkin, et al., 1986). Denklem 2.1 küresel parçacıklar için elde edilmiştir. Küresel simetriye sahip olmayan parçacıkların da optik tuzaklanması mümkündür. Ancak bu parçacıklara etkiyen tuzaklama kuvvetinin büyüklüğünü teorik olarak elde etmek ifadelerin kompleksliğinden dolayı oldukça zordur. Sonuçta tuzaklanmış parçacığın tuzak merkezine göre olan yer değiştirmesinin, x , küçük olması durumunda; parçacık üzerine etkiyen geri çağırıcı tuzaklama kuvveti, F_{tuzak} , parçacığın yer değiştirmesi ile doğru orantılı olup yay kuvvetini tanımlayan Hooke yasası ile $F_{tuzak} = -k x$ şeklinde verilir. Burada k yay sabiti ya da optik tuzaklama kuvveti incelemesinde tuzak sertliği olarak bilinir.

Optik tuzağın sertliği k ; tuzağı oluşturan lazerin özellikleri, objektifin nümerik açıklığı, tuzaklanan parçacığın boyutu, kırma indisi ve tuzaklanan parçacığın bulunduğu ortamın kırma indisi gibi parametrelere bağlıdır. Bu parametrelerin kurulumdan kurulumla farklılık göstermesi, kurulumların tuzak sertliklerinin de farklılık göstermesine neden olmakta ve bu durum tuzak sertliğinin her optik tuzak düzeneği için ayırt edici olduğunu göstermektedir.

2.2 Bir Optik Tuzaklama Deney Düzeneğinin Temel Bileşenleri

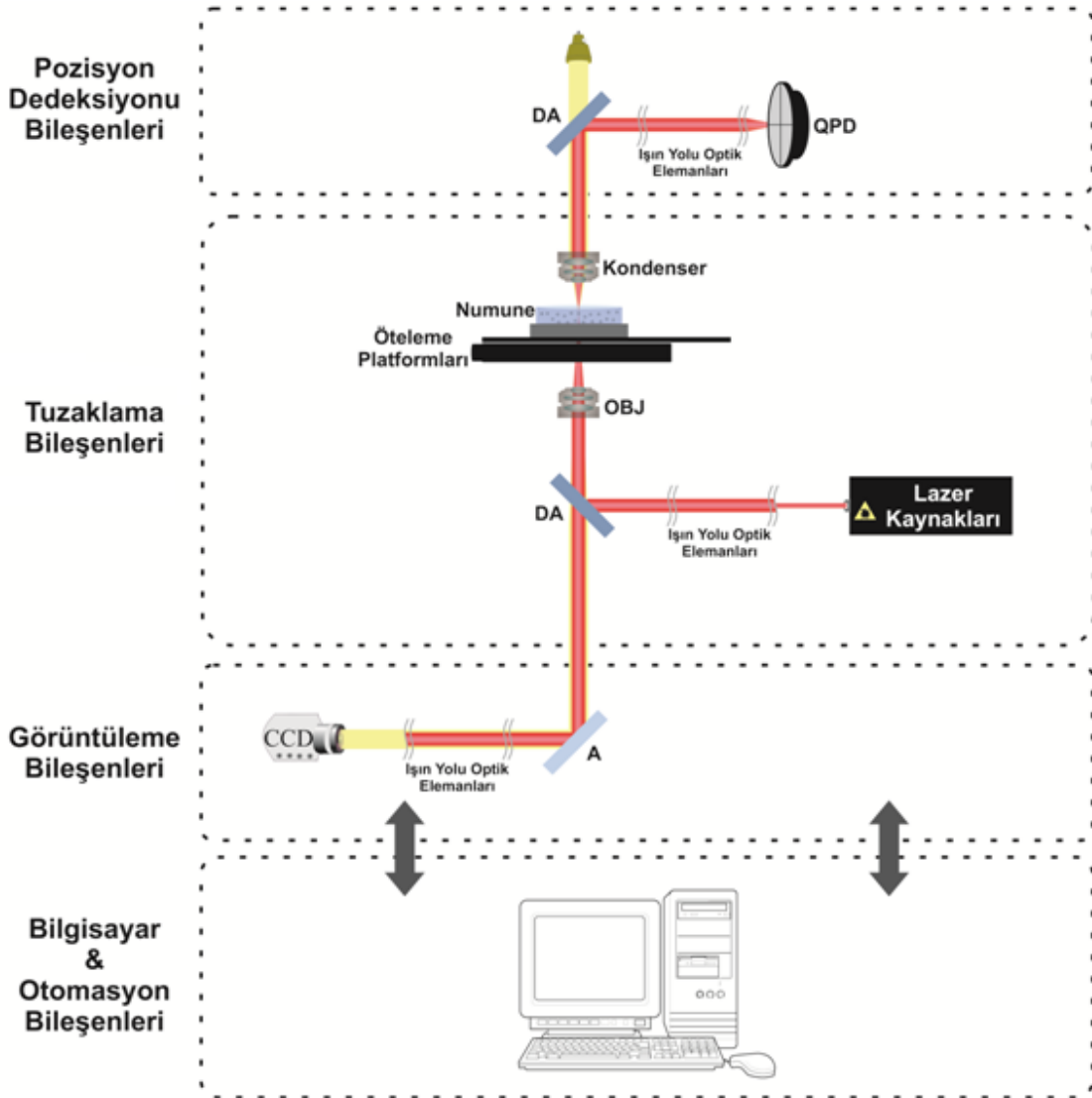
Düzenek kurulumu, hedeflenen bir konu üzerinde çalışma imkânı sağlayacak elemanların uygun şekildeki konfigürasyonu ile gerçekleştirilir. Ancak zaman içerisinde değişiklik gösteren deneysel çalışmalar düzenekte birtakım değişiklikler yapma gereği doğurabilir. Bu nedenle kurulum yapılırken gelecekteki olası ihtiyaçlara cevap verebilecek bir kurulum yapılması tercih edilir. Bu tezin konusunu oluşturan düzenek için de gelecekte yapılması planlanan deneylerle uyumlu değişikliklere olanak sağlayan esnekliğe sahip bir düzenek kurulumu konfigürasyonu amaçlanmıştır.

Optik tuzaklamanın oluşumu için pratikte her ne kadar oldukça iyi bir şekilde odaklanmış güçlü bir lazer ışını ve mikroskobik bir parçacık yeterli olsa da, fonksiyonel bir düzenek bu temel bileşenler dışında bileşenler de içermelidir. Bu bileşenler; tuzak kalitesini arttırmak amacıyla tuzaklayıcı ışın yolu üzerine yerleştirilen optik elemanlar, tuzaklayıcı ışının dinamik ve manuel kontrolünü sağlayan bileşenler, tuzaklanmış mikroskobik parçacıkların görüntülenmesi ve bunlardan sayısal veri alınmasına imkân sağlayan dedektörler ve kameradan oluşur. Bir optik tuzaklama düzeneğinin blok diyagramı Şekil 2. 4’de gösterildiği gibi dört ana bileşen başlığı altında incelenebilir:

- 1) Tuzaklama bileşenleri; lazer, objektif, numune ve numune odacığı, numune öteleme platformu, mercek, ayna, ışın genişletici, yarım dalga plaka, Glan-Thompson polarizör.
- 2) Görüntüleme bileşenleri; kamera, kondenser, ayna, mercek, filtre, iris.
- 3) Konum belirleme bileşenleri; QPD, mercek, ayna, filtre.
- 4) Bilgisayar ve otomasyon bileşenleri; bilgisayarlar, bağlantı kabloları, kontrol üniteleri, otomasyon bilgisayarına takılan kartlar.

Bu bileşenler hemen her optik tuzaklama düzeneğinde karşılaşılan temel bileşenlerdir. Ancak bu bileşenlerin içeriğinde yapılması planlanan araştırmaya özgü oldukça farklı ve gelişmiş üniteler yer alabilir. Bir optik tuzaklama düzeneğinin ana bileşenlerinin ayrıntılı incelemesi izleyen başlıklar altında ele alınmıştır.

Şekil 2.4’de planlanan kurulumda konum belirleme bileşeni yer almasına rağmen bu tez çalışması; gelecekte tek moleküllerin mekanik özelliklerinin araştırılmasına olanak sağlayacak kararlı bir optik tuzaklama düzeneğinin planlaması ve kurulumunun gerçekleştirilmesini hedeflemiş olması sebebiyle, konum belirleme bileşeni incelemesi bu çalışmanın kapsamı dışında bırakılarak konum belirleme bileşeninin düzeneğe entegrasyonunun ayrıntılı incelemesi diğer bir yüksek lisans çalışmasında yer almaktadır (Danış, 2013).



Şekil 2.4 Bir optik tuzaklama düzeneğini oluşturan bileşenlerin şematik gösterimi.

2.2.1 Tuzaklama bileşenleri

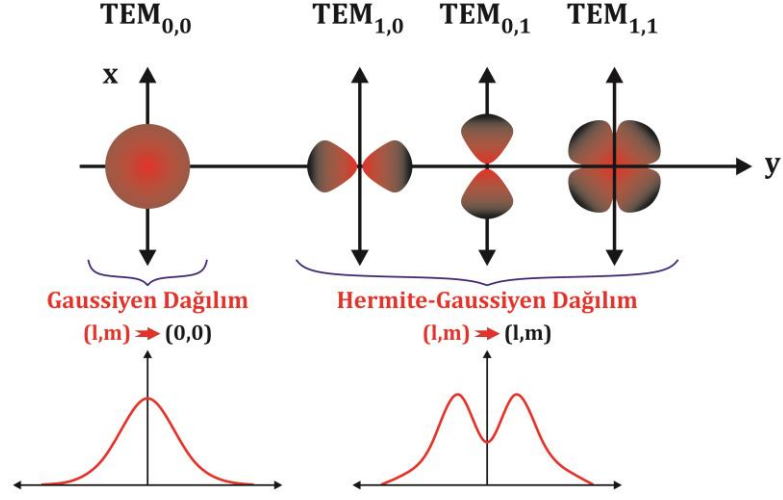
Optik tuzaklama düzeneğinde tuzaklama bileşenlerinin içeriğindeki her bir elemanın uyumlu bir şekilde seçimi ve konumlandırılması tuzak performansının artırılmasında büyük önem taşımaktadır. Bu nedenle optik tuzak çalışmasında kullanılacak elemanların seçimi detaylı bir ön çalışma gerektirir. İzleyen alt başlıklarda tuzaklama bileşenlerinde kullanılan ana elemanlar ve bunların sahip olması gereken genel özellikler tartışılmaktadır.

2.2.1.1 Lazerler

Monokromatik ve koherent olmaları nedeniyle lazerler optik tuzaklamada kararlı bir tuzak oluşturmak için tercih edilen ışık kaynaklarıdır. Lazerler diğer kaynak türlerine nazaran oldukça küçük sapma açısına ve yüksek ışık şiddetine sahip olmaları nedeniyle tuzak performansını arttırmırlar. Tuzaklama için lazer seçimi yapılırken lazerin gücü, dalga boyu, sahip olduğu mod, hedefleme kararlılığı gibi faktörler oldukça önemlidir.

Tuzaklamada yüksek çıkış gücüne sahip tuzaklayıcı bir lazer kullanılması mikroskobik parçacıkların daha güçlü bir tuzaklama kuvveti ile tuzaklanmasını sağlar. Ancak iyi bir şekilde odaklanmış yüksek güçteki lazer kaynağı kullanımı numunede optik hasar yaratma riskini de beraberinde getirir. Bu nedenle tuzaklayıcı lazerin numunede optik hasar yaratma riskinin istenmediği durumlarda bu risk uygun dalga boyuna sahip lazer seçimi ile minimize edilmeye çalışılır. Biyolojik numuneler üzerine yapılan çalışmalar, bu numunelerin ~750-1200 nm dalga boyu aralığında (yakın infrared, NIR, bölge) bağıl saydamlığa sahip olduğunu ve biyolojik numunelerde minimum optik hasarın ise 830 nm ve 970 nm dalga boylarında gerçekleştiğini göstermektedir (Neuman and Block, 2004).

Kaynaktan çıkan lazer ışını farklı modlara sahip olabilir ve bu modlar TEM_{lm} sembolü ile ifade edilir. TEM kısaltması enine elektromanyetik mod (Transverse Electromagnetik Mode) ifadesinin baş harflerinden oluşurken 'l' ve 'm' indisleri enlemesine modu temsil etmektedir. Enlemesine mod, Şekil 2.5'de görüldüğü gibi, ışın şiddeti profilinin uzaysal dağılımını temsil eder. Optik tuzaklamada sıklıkla kullanılan lazer modu TEM_{00} modudur.



Şekil 2.5 Lazer ışın modları.

Oldukça geniş bir ürün yelpazesinde yer alan lazer ışını kaynakları optik tuzaklama amacıyla kullanılabilir. Ancak lazer kaynağı seçiminde kaynağın performansı kadar maliyeti de önemlidir. Günümüzde ürün yelpazesinin en pahalı ucunda yaklaşık 100.000 dolarlık maliyeti ile sürekli dalga (cw) üreten titanyum safir lazerleri yer almaktadır. Diyot pompalı katıhal sınıfında yer alan bu lazerler yakın infrared bölgenin 750 nm ile 950 nm dalga boyu aralığında olup yaklaşık 1W'lık güce ulaşabilirler. Çıkış dalga boyu ayarlanabilen bu lazerlerin geniş spektrumu biyolojik numuneler üzerinde farklı dalga boylarında araştırmalar yapılmasına da olanak sağlar (Neuman and Block, 2004).

Hem maliyet, hem de biyolojik numunelerde minimum optik hasara sebep olmaları açısından en optimum lazer kaynakları; Nd:YAG (neodyum:yitrium alüminyum garnet) lazerleri, bu lazerin türevleri olan Nd:YLF (neodyum:yitrium–lityum–florür) ve Nd:YVO₄ (neodyum:yitrium–orthovanadate) lazerleridir. Bu lazerlerin sırasıyla 1064 nm, 1047 nm (ya da 1053 nm) ve 1064 nm olan dalgaboyları elektromanyetik spektrumun yakın infrared bölgesinde yer alır ve bu lazerlerin diyot pompalı versiyonları oldukça yüksek çıkış gücü (10 W ve üstü) sunarken aynı zamanda çok yüksek genlik ve hedefleme kararlılığına sahiptirler (Neuman and Block, 2004).

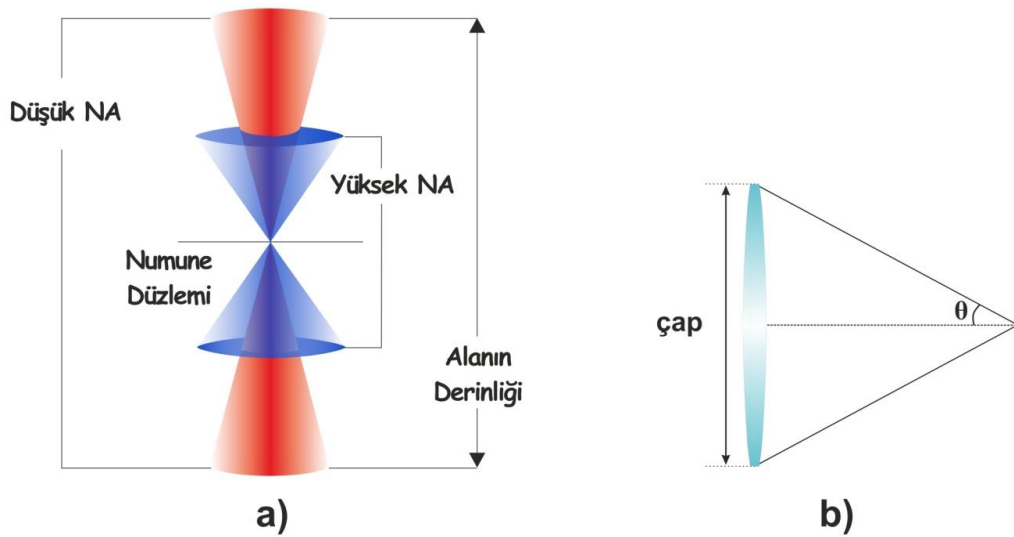
2.2.1.2 Objektif

Bölüm 2.1’de detaylı bir şekilde tartışıldığı üzere optik tuzaklamada kararlı bir tuzaklamanın gerçekleşmesi için gradyent kuvvetinin saçılma kuvvetinden büyük olması gerekir. Gradyent kuvvetinin büyüklüğü objektifin sahip olduğu nümerik açıklık (NA) niceliğine bağlıdır. Bu nedenle bir optik tuzak sisteminde tuzaklamanın kalitesini etkileyen en önemli bileşenlerden birisi de lazer ışınının sıkı bir şekilde odaklanmasını sağlayan objektiftir. Günümüz teknolojisi ile üretilen mikroskop objektifleri oldukça kompleks bir takım bileşik lens dizaynı içeren sofistike optik sistemlerdir. Objektifler çalışma prensiplerine göre kuru objektifler ve immersiyon objektifleri olmak üzere ikiye ayrılırlar. Kuru objektiflerde cisim ile objektif arasında hava bulunur. İmmersiyon objektifleri ise yüksek büyütme gücüne sahip objektiflerdir ve bu objektiflerin daha fazla ışık toplayabilmesi için, cisim ile objektif arasındaki boşluk uygun bir sıvıyla (su ya da yağ) doldurulur. Optik tuzakta objektiften çıkan ışının numune odacığının tabanını oluşturan camdan geçerek odacık içerisinde odaklanması ve odağına yakın mikroskobik parçacıkları tuzaklaması amaçlanır. Ancak objektiften cama geçerken ortam farklılığından dolayı lazer ışını kırılmaya uğrar. Işındaki bu kırılma istenmeyen kusurlar yaratarak tuzaklama kalitesinde düşüğe neden olur. Objektif-cam ara yüzünde ışın kırılmasının önlenmesi amacıyla objektif üzerine mikroskop camının kırma indisine eşit kırma indisli ($n= 1.52$) immersiyon yağı damlatılır.

Çizelge 2.1 Objektif türleri ve karakteristik özellikleri.

Objektif türü		Büyütme Oranı	Çalışma uzaklığı	N.A
Kuru objektifler (Hava objektifleri)		1X-10X	3.2 -17.3mm	0.04-0.5
		40X-60X	0.16-3.6 mm	0.6-0.95
		100X	0.3-1 mm	0.9-0.9
İmmersiyon objektifleri	Yağlı objektifler	40X-60X	0.12-0.35 mm	1.3-1.49
		100X	0.12-0.23 mm	1.25-1.49
	Sulu objektifler	10X-20X	2-3.5 mm	0.3-0.8
		40X-60X	2-3.5 mm	0.8-1
		100X	2.5 mm	1.1

Çizelge 2.1’de görüleceği üzere objektifin büyütme oranı arttıkça çalışma uzaklığı azalırken NA değeri artmaktadır ve bu durum Şekil 2.6a’da gösterilmektedir. NA değerinin hesaplanması $NA = n \sin \theta$ bağıntısı ile mümkündür. Burada n merceğin kırma indisi ve θ objektifin ışın konisinin yarım tepe açısına eşittir (Şekil 2.6b). Sonuç olarak, bir objektifin nümerik açıklığı ne kadar büyükse o objektif daha geniş bir tepe açısına sahip ışın konisi sayesinde daha fazla ışın hüzmesini odak noktasında toplayabilme kabiliyetine sahiptir. Bu durum konvensiyonel mikroskopide objektife daha fazla ışık girerek yüksek çözünürlüklü numune görüntüsüne sebep olurken, optik tuzaklamada saçılma kuvveti ile karşılaştırıldığında daha şiddetli bir gradyent kuvveti oluşturması ve böylece tuzağın kararlı hale gelmesine neden olur. Genellikle optik tuzaklama düzeneklerinde tercih edilen objektiflerin nümerik açıklık değerleri 1.2’ye eşit ya da daha büyüktür.



Şekil 2.6 NA değerinin alan derinliği ve ışın konisine etkisi. a) yüksek ve düşük NA’ya sahip objektiflerin alan derinliklerinin ve ışın konisi geometrilerinin karşılaştırılması, b) NA değerini belirleyen objektifin sahip olduğu ışın konisi yarım açısı.

Aynı zamanda objektifin immersiyon ortamı ile numunenin sulu ortamı arasındaki kırma indisi uyumsuzluğundan dolayı meydana gelen küresel kusurların çalışma uzaklığı arttıkça artış göstermesinden dolayı, çalışma mesafesi küçük olan

objektiflerin kullanılması küresel kusurların minimize edilmesinde büyük avantaj sağlar.

2.2.2 Görüntüleme bileşeni

Optik tuzaklamada çok küçük parçacıklarla (mikroskopik parçacıklarla) çalışılması ve genelde kullanılan lazer ışınının dalga boyunun infrared bölgede yer alması nedeniyle tuzaklama olayının göz ile algılanması imkânsızdır. Bu nedenle yakın infrared bölgeye duyarlı bir görüntüleyiciye ihtiyaç duyulur. Bu işlev için en çok tercih edilen aygıt, yüksek çözünürlüğe sahip CCD ve CMOS kameralardır. Bu kameraların fotodiyot sensörleri elektromanyetik spektrumun görünür ve NIR bölgelerinde ışığa duyarlı yüzey olarak iş görür. Fotodiyot sensörler üzerine düşen ışık elektrik gerilimine çevrilir ve sonrasında bu sinyal bir analog–dijital çevirici (ADC) yardımıyla görüntüye dönüştürülür. Bu kameralarda elde edilen görüntüler yakın ve gerçek zamanlı olup video görüntülerinin dijital kaydı yapılabilir.

CMOS sensörler ışığın yeterli olduğu durumda iyi bir görüntü verirler fakat kısa süreli çalışma için üretilmiş olan bu sensörlerin uzun süre çalışmaları sonucunda meydana gelen ısınmadan dolayı görüntü kalitesinde azalma gözlenir. CCD sensörler ise ısıya duyarlı olmaları nedeniyle uzun süre çalışmaları sonucunda daha kaliteli görüntü verirler.

2.2.3 Bilgisayar ve otomasyon bileşenleri

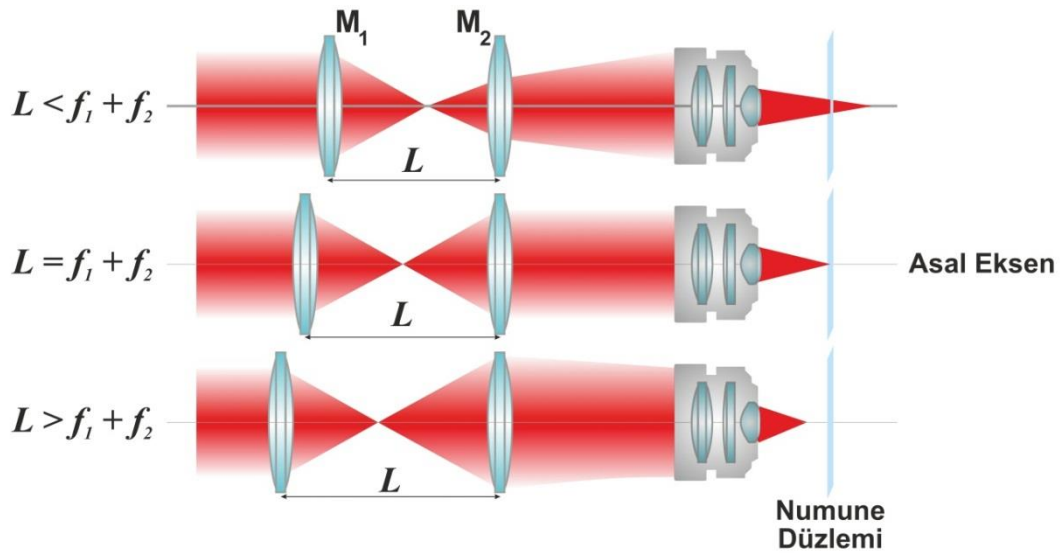
Bilgisayar deneysel bir çalışmada hızlı bir şekilde veri ve görüntü toplayıp depolama imkânı sunmasının yanı sıra pek çok bileşenin kontrolüne olanak sunması nedeniyle önemli bir bileşendir.

Bilgisayar kontrollü bileşenlerin bilgisayara bağlanmasından sonra otomasyonun gerçekleşmesini sağlayan uygun yazılımlar oluşturulur. Bu yazılımlar ile bilgisayara

kullanıcı tarafından girişi yapılan konfigürasyon komutları sayesinde bilgisayar bütün sistemin kontrolünü yapar. Otomasyon aynı zamanda deneysel süreçte, eş zamanlı olarak görüntü izleme ve platform konumunu takip etme gibi pek çok pasif gözlem yapmaya da olanak sağlar.

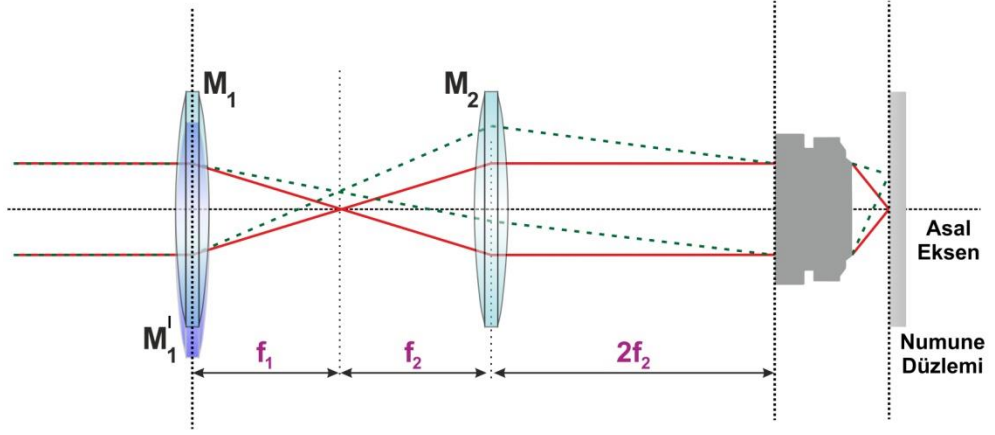
2.3 Tuzak Konumunun Hareketinin Gerçekleştirilmesi

Tuzak merkezinin yer aldığı odak noktasının aksenel ve eksene dik düzlemdeki konumlandırılması odakları çakışık iki konveks mercekten oluşan basit bir optik sistem yardımıyla sağlanır. Optik sistemde ışığın objektiften geçtikten sonra odaklanacağı nokta ışının düştüğü ilk merceğin, M_1 , optik eksen boyunca ileri-geri hareketiyle sağlanır ve bu hareket odağın numune düzleminin önünde ya da arkasında gerçekleşmesine neden olur (Şekil 2.7).



Şekil 2.7 İki konveks mercekle yardımcıyla optik eksen boyunca odak noktası konumunun kontrolü. M_1 merceğinin odak uzaklığı f_1 , M_2 merceğinin odak uzaklığı f_2 ve M_1 merceği ile M_2 merceği arası mesafe L .

M_1 merceğinin asal eksene dik düzlemde yukarı aşağı hareketi ise odak noktasının numune düzlemindeki yer değiştirmesine neden olur (Şekil 2.8).



Şekil 2.8 İki konveks mercek yardımıyla optik eksene dik düzlemde odak noktası konumunun kontrolü. M_1 merceğinin odak uzaklığı f_1 , M_2 merceğinin odak uzaklığı f_2 , M_1 merceği ile M_2 merceği arası mesafe $f_1 + f_2$ ve M_2 merceği ile objektifin arka açıklığı arasındaki mesafe $2f_2$.

Işının odak uzunluğunun kontrol edilmesini sağlayan mercek sisteminin hassas konumlandırılması kararlı bir tuzaklama sertliğinin elde edilmesi için büyük öneme sahiptir. M_1 - M_2 mercekleri arası uzaklık ve M_2 -objektif arası uzaklık Şekil 2.8'deki gibi ayarlandığında M_1 merceği, objektifin arka açıklığı ve numune düzlemi eşlenik (konjuge) düzlemler olup M_1 merceğinin asal eksene dik hareketi esnasında objektif arka açıklığı daima sabit miktarda ışın ile doldurulur. Bu durum ise ışının güç değerinde değişiklik olmaksızın numune düzleminde tuzak pozisyonunu değiştirmeyi mümkün hale getirir.

BÖLÜM 3

LABORATUAR DÜZENLEMESİ

Kurulumu gerçekleştirilecek olan deney düzeneği her türlü çevresel faktörden kaynaklanması muhtemel titreşim ve ışıktan etkilenebilecek hassasiyete sahiptir. Bu durum ise deney sonuçlarına öngörülmesi mümkün olmayan olumsuz etkiler getirir. O halde tuzaklama olayının gerçekleştiği ortamın sese, ısıya ve mekanik titreşimlere karşı yalıtılmış olması deney sonuçlarının kalitesine olumlu etki yapar. Bu nedenle deneysel çalışmaların gerçekleştirileceği laboratuvar içerisinde düzeneğin yerleştirileceği; ses ve ısı değişimlerine karşı yalıtılmış karanlık bir oda yaptırılmıştır. Yalıtım malzemesi olarak odanın duvarları arasına ve tavanına “taşyünü” malzeme kullanılmıştır. Fansız olan cihazlar ve optik elemanlar bu yalıtımlı odada yer alırken cihazların kontrol üniteleri ve bilgisayarlar ise titreşim, hava akımı, ışık kaynağı olmaları sebebiyle karanlık odanın dışında belirlenen bir kontrol merkezine yerleştirildi. Böylece kontrol ve gözleme dayalı cihazlar kullanım kolaylığı sağlayacak şekilde bir arada toplandı (Şekil 3.1). Bu düzenleme, deneyler esnasında düzeneğe yapılması gereken tüm müdahalelerin düzeneğin bulunduğu odaya girmeksizin kontrol merkezinden yapılmasını mümkün kılar.



Şekil 3.1 Kontrol merkezinden bir görüntü. Kapalı halde bulunan pencere düzeneğin bulunduğu odaya açılmaktadır.

3.1 Düzenek Kurulumunda Kullanılan Elemanlar ve Özellikleri

3.1.1 Titreşim yalıtım masası

Nanometre mertebesinde hassasiyete sahip düzeneğin çevresel faktörlerden kaynaklanan her türlü mekanik titreşimden etkilenmesini mümkün mertebe minimize etmek amacıyla düzenek kurulumu, yalıtımlı oda içerisine yerleştirilmiş olan titreşim yalıtım masası üzerinde gerçekleştirilmiştir. 2,4 m x 1,2 m x 0,3 m ebatlarındaki titreşim yalıtım masası optik elemanların sabitlenmesine olanak sağlayan 25 mm aralıklarla yerleştirilmiş M6 vida deliklerine sahiptir (Newport, M-ST-48-12 Smart Table, USA). Masa platformunun altına yerleştirilen 4 adet titreşim emici ayak bulunur ve bu ayaklar basınçlı hava ile çalışmaktadır (Newport, I-2000-N23.5, USA). Ayaklar için gerekli basınçlı hava, yalıtım odası dışarısına yerleştirilmiş olan bir kompresör ile sağlanır. Titreşim yalıtım masasına bağlanan bir kontrolör sayesinde dinamik sönümlenme yapmak da mümkündür.

3.1.2 Tuzaklayıcı lazer

Tuzaklayıcı lazerin gücü, tuzak sertliği açısından önemli bir parametredir. 10 mW'lık lazer gücü artışı tuzak sertliğinde yaklaşık 1 pN'luk artış sağlar. Ancak kullanılacak yüksek güçteki lazerin incelenecek biyolojik sisteme olası zarar verme riski de göz önünde bulundurulmalıdır. Bölüm 2.2.1.1'de açıklandığı gibi incelenecek numunelerin biyolojik numuneler olması durumunda kullanılacak lazerin dalga boyunun bu tür numunelere en az zarar verecek yakın infrared bölgesinde (~750-1200 nm) seçilmesi önemlidir. Bundan dolayı bu kurulum için tercih edilen tuzaklayıcı lazer 1.5 W gücünde, 1064 nm dalga boyuna ve TEM₀₀ moduna sahip, sürekli dalga formunda ışımaya yapan Nd:YAG diyot pompalı lazerdir (Crystalaser, IRCL-1.5 W-1064, USA). Tuzaklama lazer kaynağı oldukça yüksek nokta kararlılığına (< 0.02 mrad) ve oldukça yüksek güç kararlılığına (< % 3) sahip olup ışının kaynak penceresinden çıkış çapı (1/e²) 0.3 mm'dir.

3.1.3 Işın yolu kontrol lazeri

1.5 W gücündeki tuzaklayıcı lazerin dalga boyunun, gözün algılama hassasiyeti dışında olması ışın yolu kurulumu ve ışın yönlendirmesi işlemleri sırasında güçlük yaratır. Aynı zamanda yüksek güçteki bu lazer ile farkında olmadan temas edilmesi ise sağlık riski taşımaktadır. Bu nedenle düzenek kurulumunun çoğu aşamasında görünür bölgede ışın yapan (532 nm) ve 5 mW gibi düşük güce sahip olmasından dolayı sağlık riski taşımayan bir lazer kaynağı (Crystalaser, GCL-005-532-M, USA) ışın yolu kontrol lazeri olarak kullanıldı. Bu lazer ilerleyen aşamalarda dedeksiyon amacı ile de kullanılacak şekilde yerleştirilmiştir.

3.1.4 Aynalar

Işın yönlendirilmesi amacıyla kurulumda iki çeşit ayna kullanılmaktadır. Birinci türdeki aynalar üzerlerine gelen ışını dalga boyu değerinden bağımsız olarak yansıtan geniş-band aynalar, ikinci türdeki aynalar ise dalga boyuna bağlı olarak seçici yansıtma yapan dikroik aynalardır (DA). Dikroik aynalar aslında belirli aralıktaki dalga boylu ışınları yansıtırken, bu aralığın dışındaki dalga boyuna sahip ışınları geçirme özelliğine sahip seçici filtrelerdir.

Düzenekte kullanılan geniş-band aynalar, 1 inç çapında gümüş kaplı aynalardır ve yansıtma katsayıları 0.98'dir (Thorlabs Inc., ME1-P01, USA ve CVI, PS-PM-1037-C, USA).

Kurulumda kullanılan dikroik aynalar ise; 1 inç çapında, 700 nm ve üstündeki dalga boyuna sahip ışınları yansıtan, 700 nm altındaki dalga boyuna sahip ışınları (görünür bölge ışınları) geçiren aynalardır (AHF Analysentec., 725DCSPXR, Germany ve Thorlabs Inc., FES0750, USA).

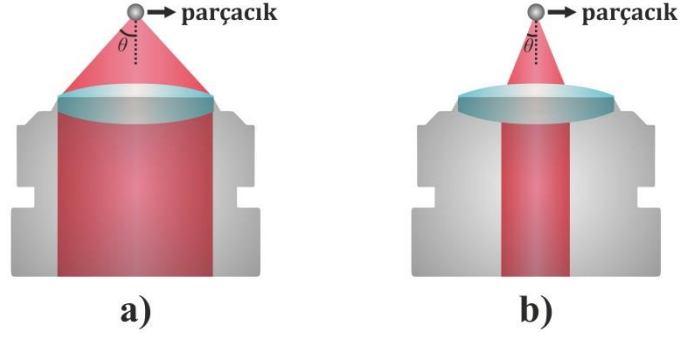
3.1.5 Polarizör ünitesi (Glan-Thompson polarizörü ve yarım dalga plaka)

Optik tuzaklama düzeneğinde tuzaklayıcı lazer şiddetinin kontrol edilebilirliğini sağlamak pratik açıdan pek çok avantaj sağlar ve bu amaç için sıklıkla tercih edilen konfigürasyon yarım dalga plaka ve Glan-Thompson polarizör prizmasından oluşur. Dalga plakalar genellikle kalsit ve kuartz malzemedен üretilir. Bu çalışmada kullanılan yarım dalga plaka (CVI, QWPO-1064-10-2-R10, USA) kuartz malzemedен yapılmıştır. Kuartz malzemeler hem yüksek ışın şiddetine dayanıklıdır ve hem de yüksek optik kaliteye sahiptir. Yarım dalga plaka ile kombinasyon içerisinde kullanılan Glan-Thompson prizması ise aslında bir tür polarize edici prizmadır ve kalsitten yapılmış iki dik açılı üçgen prizmanın birbirlerine göre uygun pozisyonda yapıştırılmaları ile elde edilir. Bu kurulumda kullanılan Glan-Thompson polarizör prizması 670-1064 nm çalışma aralığına sahip ve sönümlenme oranı 1×10^{-5} 'tir (CVI, CLPG-8.0-670-1064, USA).

3.1.6 Işın genişletici

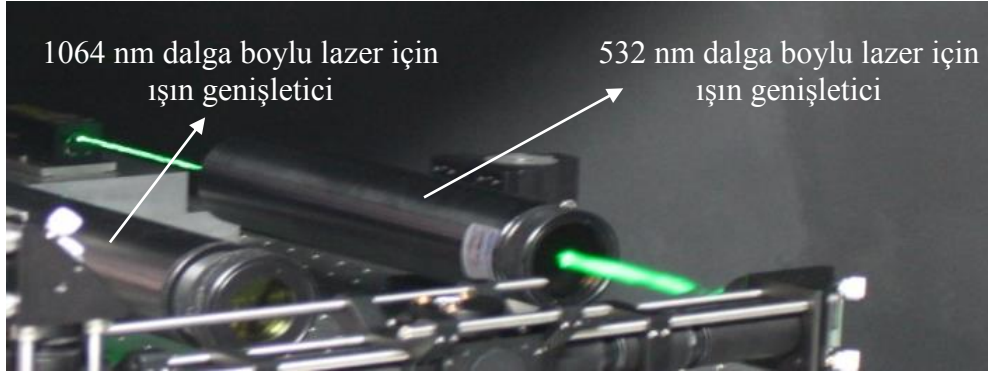
Tuzak sertliğinin maksimize edilmesi objektifin arka açıklığının bu açıklık çapından biraz daha fazla genişliğe sahip lazer ışını ile tamamen doldurulmasıyla sağlanır (Şekil 3.2a). Lazer ışının gaussian profiline sahip olması sebebiyle ışın genişledikçe ışının gradyentinin uzaysal dağılımı da genişler ve böylece gradyent kuvveti saçılma kuvvetinden daha baskın olur. Bu ise kararlı bir tuzaklama oluşturmak için karşılanması gereken en önemli koşulların başında gelir.

Bu kurulumda kullanılan tuzaklayıcı lazer ışınının kaynak penceresinden çıktığı anki çapının 0.3 mm olması nedeniyle lazer ışını genişletilmediği takdirde arka açıklığı 11 mm olan objektifi tam dolduramaz (Şekil 3.2b). Objektif arka açıklığını tam doldurmak için görünür ışında 10 kat ve yakın infrared ışınında 7 kat ışın genişletme özelliğine sahip ışın genişletici elemanlar kullanıldı (CVI, CWBX-6.0-7X-1064, USA ve CVI, CWBX-4.5-10X-532, USA). Bu doldurma oranı sayesinde numune düzleminde en optimum tuzaklama kuvvetinin elde edilmesini sağlar.



Şekil 3.2 Objektif açıklığının doldurulması a) objektifin arka açıklığının biraz taşacak kadar doldurulması, b) objektifin arka açıklığının az doldurulması.

Bu çalışmadaki düzenekte 532 nm dalga boyuna lazer ışınının genişleticiden (CVI, CWBX-4.5-10X-532, USA) geçtikten sonra ışın çapındaki genişleme Şekil 3.3’de açık bir şekilde görülmektedir.



Şekil 3.3 Düzenekte kullanılan ışın genişleticiler.

3.1.7 Objektif

Bölüm 2.2.1.2’de tartışıldığı üzere yüksek büyütme oranına ve dolayısıyla yüksek NA’ya sahip objektifler optik tuzaklamanın gerçekleşmesinde anahtar rol oynarlar. Bu nedenle yapılan çalışmada 100X büyütme oranına, 1.30 NA değerine ve 0.2 mm çalışma aralığına sahip immersiyon yağıyla çalışan objektif (Nikon, 100X Plan Fluor CFI, Japan) kullanıldı.

3.1.8 XY mekanik öteleme platformu ve XY piezo platform

Optik tuzaklama ile numune üzerine etkiyen kuvvetin hesaplanması için numunenin tuzak konumuna bağlı olarak yer değiştirmesinin hesaplanabilmesi gerekir. Numunenin yer değiştirmesi hareketli hassas platformlar ile yapılır. Kurulumu gerçekleştirilen düzenekte birisi mekanik bir platform ve diğeri piezo platform olmak üzere iki XY öteleme platformu yer almaktadır. XY mekanik öteleme platformu numunenin kaba bir şekilde konumlandırılması için kullanılırken daha hassas yer değiştirmeler için XY piezo platform kullanılır.

Bu çalışmada kullanılan 0,01 μm hassasiyetine sahip mekanik öteleme platformunun maksimum hareket aralığı 114x75 mm, yük kapasitesi 10 kg'dır (Prior, H117E1N4, UK). Mekanik platform üzerine konumlandırılan XY piezo öteleme platformunun hassasiyeti ise 0,3 nm olup eksen başına hareketi 150 μm (\pm % 10) dir (Jenna, PXY 151, Germany). XY mekanik öteleme platformunun kontrolü hem joystick ve hem de bilgisayarla yapılabilirken, piezo platform bilgisayar ile kontrol edilmektedir.

3.1.9 Kondenser

Numune düzleminin görüntüsünü kamera yardımıyla aktarılan bir monitörde gözlemleyebilmek için numune düzleminin uygun bir şekilde aydınlatılması gerekir. Aydınlatma ışığının odaklanarak iyi bir şekilde iletilmesi kondenser ile sağlanır. Bir çeşit objektif olan kondenser bileşik mercek sisteminden oluşur. Bu çalışmada kondenser olarak kullanılan 40X büyütme gücüne ve 0.65 NA değerine sahip olan objektif (Olympus, EA40, Japan), aydınlatma ışığını numune düzlemi üzerinde yoğunlaştırarak numune düzlemi görüntüsünün kamera tarafından elde edilmesini sağlar.

3.1.10 Kamera

Kurulumu planlanan düzenekte kullanılacak olan kamera 1/3" boyutunda duyarlı yüzeye sahip basit bir CCD güvenlik kamerasıdır (Samsung, SCC-B1091P, South Korea). CCD kamera 470,000 piksel gelişmiş uygulaması sayesinde iyi gözlem yeteneğine sahiptir. Bu ürün yüksek dijital sinyal işleminin kullanımı sayesinde yatay çözünürlüğün (540TV hattı) yüksek çözümleme gücünü gerçekleştirir. CCD'nin kullanımı ve dijital sinyal işleme sayesinde bu kamera oldukça keskin görüntü kalitesi sağlar. İyi otomatik/manuel beyaz denge fonksiyonu sayesinde kamera herhangi bir ortamda renklerin doğru temsilini sağlar. Kameranın diğer özellikleri şu şekilde sıralanabilir; tarama sistemi 50 Hz, toplam piksel 795x596, etkili piksel 752x582, çalışma sıcaklığı -10 °C ile ~ +50 °C ve nem oranı %90'ın altında olmalıdır.

3.1.11 Bilgisayar

Bu çalışmada birisi yüksek performansa sahip bir bilgisayar olan işlem bilgisayarı (HP, XW9400, USA) ve diğeri standart bir masaüstü bilgisayar olmak üzere iki bilgisayar bulunmaktadır. Tasarım olarak, işlem bilgisayarının düzenekle irtibatlandırılıp düzenek otomasyonu için kullanılması ve veri toplaması planlanırken diğeri masaüstü bilgisayarın offline veri analizi amacıyla kullanılması planlandı. Otomasyon bilgisayarına takılması gereken beş adet kart Çizelge 3.1'de verilmiştir.

Çizelge 3.1 Otomasyon bilgisayarına takılması gereken kartlar.

Bilgisayar Kartı (Slot Tanımı)	Üretici ve Model
AOD için iki kanal değişken frekans kaynağı (PCI),	Intraaction Corp., DVE-120, USA
Görüntü yakalama kartı (PCIE),	NI, PCI 1410, USA
DAQ kartı (PCIE),	NI, PCIE-6259, USA
8 tane RS232 seri port kartı (PCIE),	NI, NIPCIE-8430/8, USA
Yüksek performanslı GPIB kartı (PCIE),	NI, NIPCIE-GPIB+, USA

Bu çalışmadaki optik tuzaklama düzeneğinde akusto optik deflektör (AOD) kullanılmadı. Fakat ileride AOD'in kullanılması planlandığından dolayı AOD'nin frekans kaynağının bilgisayar bağlantısı yapıldı.

Bu kartlar işlem bilgisayarına takıldığında AOD için kullanılan kartın bu bilgisayarla uyum sağlamadığı görüldü. Bu sorun üzerine çevrim dışı veri analizi yapacağımız masaüstü bilgisayarına gerekli ilaveleri yaparak masaüstü bilgisayarı otomasyon bilgisayarı olarak kullanmaya karar verildi. Masaüstü bilgisayarının ilk başta orta seviyede olan işlemcisi ve anakartı daha yüksek performansa sahip olan bileşenlerle değiştirildi (2,61 GHz AMD Phenom (tm) II X3710 işlemci, GA-MA790XT-UD4P anakart (5 PCIE+2PCI)). Otomasyon bilgisayarında bu anakartın kullanılmasının sebebi; standart anakartlarda üç ya da dört tane kart girişi mevcutken, bu anakartta toplamda 7 tane kart girişi olmasıdır. Kartlar otomasyon bilgisayarına takılarak sistemin sorunsuz çalıştığı kontrol edildi. Otomasyon bilgisayarına takılacak olan ekipmanlar ve bunların bağlantı şekilleri Çizelge 3.2'de verilmiştir.

Çizelge 3.2 Otomasyon bilgisayarına bağlanan üniteler.

Bilgisayara Bağlanan Ünite	Bağlantı Türü	Üretici ve Model
Titreşim yalıtım masası kontrolörü,	USB	Newport, ST-200, USA
XY mekanik öteleme platformu kontrolörü,	USB	Prior, ProScan III, UK
XY piezo öteleme platformu kontrolörü,	RS232	Jenna, NV 40/3 CLE, Germany
QPD kontrolörü,	GPIB	UDT Instruments, UDT-531, USA
AOD dual güç kaynağı ile frekans kaynağı,	2 tane SMA	Intraaction Corp., DPA-502D, USA
DAQ için kontrol giriş-çıkış bordu,	VHDCI (68 pin)	NI, SCB-68, USA
CCD kamera,	BNC	Samsung, SCC-B1091P, S. Korea
Lazer güç ölçer,	RS 232	Thorlabs Inc., PM-100, USA

Çizelgede yer alan ekipmanlar otomasyon bilgisayarına bağlanarak sürücüleri yüklendi ve bilgisayar bağlantısının her bir ekipman için sorunsuz çalıştığı kontrol edildi.

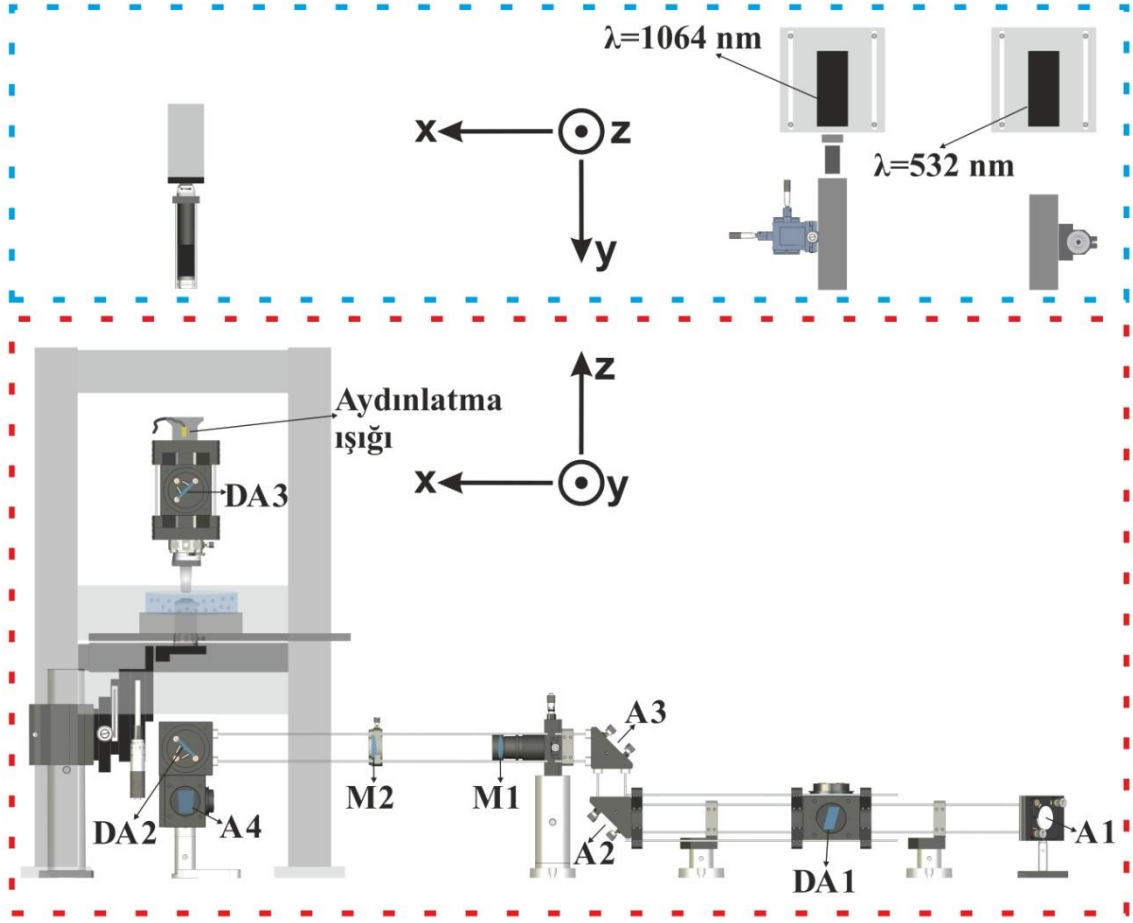
Otomasyon ve sayısal verilerin elde edilmesi amacıyla yazılım platformu olarak kullanılan ve grafik yazılımına olanak sağlayan bir program olan LabVIEW (NI, LabVIEW ver. 8.6, USA) ve bu programın ilave görüntü işleme modülü (NI, IMAQ Vision Acq. ver. 8.5.1., USA) kullanıldı.

BÖLÜM 4

OPTİK TUZAKLAMA DÜZENEĞİ KURULUMUNUN GERÇEKLEŞTİRİLMESİ

Tez çalışmasının başlangıcı aşamasında yapılan literatür araştırmalarına ek olarak düzeneğin kurulumu öncesinde de kapsamlı bir literatür araştırması yapılarak kurulumu planlanan benzer optik tuzaklama düzeneklerinin yerleşimleri incelenerek karşılaştırmalar yapılmıştır. Sonuç olarak, her bir optik tuzaklama düzeneğinin kendine özgü yerleşime sahip olduğu görülmüştür. Bu farklı yerleşimlerin belli başlı sebepleri şu şekilde sıralanabilir: 1) Her düzenekte temel bileşenlere ilaveten düzeneğin kompleksliğine ve fonksiyonelliğine bağlı olarak eklenen bileşenler farklılıklar göstermektedir, 2) Düzeneklerin yerleştirildikleri alanlardaki fiziksel kısıtlamalar (Titreşim yalıtımı masasının boyutları, elektronik ünitelere uzaklık, vs.) yerleşimde etkili olabilmektedir, 3) Kamera, öteleme platformu, piezo platform, optik aksesuarlar... gibi her bir düzenekte kullanılan bileşenlerin işlevleri aynı olmasına rağmen fiziksel boyutları ya da çalışma konumlandırılmaları farklılık gösterebilmektedir.

Böylece düzenek kurulumu için birkaç alternatif düzenek yerleşim çizelgesi oluşturulmuştur. Bu yerleşimlerden bazıları sahip olunan cihaz konfigürasyonları ile uyumlu olmaması sebebiyle elenmiştir. Diğer yerleşim planlarından gelecekte düzenekte yapılacak olan yeniden düzenleme, bileşen ekleme gibi değişikliklere en fazla imkân sağlayanı tercih edilmiştir (Şekil 4.1). Kurulum boyunca başlangıçtaki yerleşim planının ana hatlarına sadık kalınmasına rağmen, önceden kestirilemeyen ve ancak kurulum aşamasında ortaya çıkan; orijinal bağlantı kablolarının uzunluğunun yetersiz olması, bileşenlerin birbirleri ile çarpışma riskinin oluşması gibi bazı teknik problemler nedeniyle yeri geldikçe düzenek yerleşiminde birtakım küçük değişiklikler yapılmıştır.



Şekil 4.1 Optik tuzaklama düzeneğinin tümünün kurulum çizimi. Kırmızı noktalı çizgi ile çizilmiş çerçeve düzeneğin önden görüntüsünü (xz düzlemi görüntüsü) ve mavi noktalı çizgi ile çizilmiş çerçeve düzeneğin önden görüntüsünün arkasında kalan bileşenlerin üstten görüntüsünü (xy düzlemi görüntüsü) temsil etmektedir.

4.1 Optik Tuzaklama Düzeneğinin Planlanması

Optiksel tuzaklama düzeneği, çıplak gözle görülemeyecek kadar küçük olan mikroskobik parçacıkların görüntülenmesine olanak sağlaması sebebiyle aslında modifiye edilmiş bir mikroskop sistemidir. İncelenecek olan numunelerin sıklıkla uygun bir sulu ortam içerisinde bulunan biyolojik numuneler olması sebebiyle, bu tür numuneleri incelemeye uygun mikroskop düzeneği terslenmiş olan bir ışık mikroskobu düzeneğidir. Mikroskop bileşenlerine ilaveten tuzaklamayı gerçekleştirecek diğer tüm bileşenlerin konumlarının kurulum öncesinde detaylı bir şekilde planlanarak düzeneğin

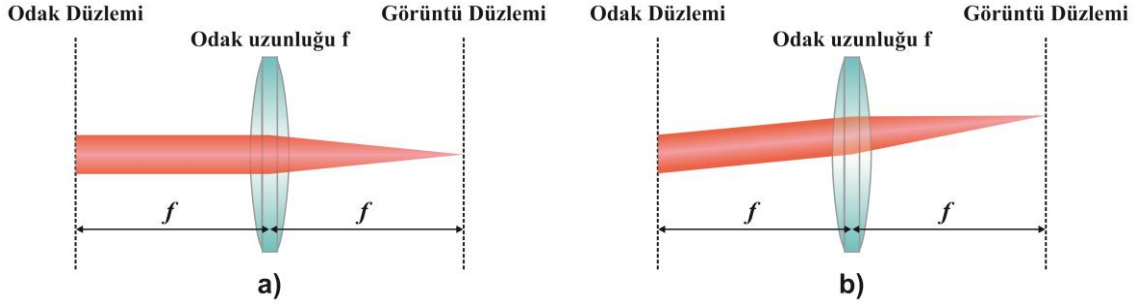
işleyişinin bu plan üzerinde simule edilmesi oldukça büyük zaman tasarrufu sağlarken aynı zamanda kurulum hakkında pratik beceri kazandırır.

Şekil 4.1’de gösterilen tuzaklama düzeneğinde ışının 1064 nm dalga boylu lazerden çıkmasından parçacığı tuzaklamasına kadar geçen süreç, optik bileşenlerin üstlendikleri görevler doğrultusunda şu şekilde açıklanabilir: 1064 nm dalga boyuna sahip lazerden çıkan ışınlar manuel güç ayarlaması yapmak üzere önce yarım dalga plaka sonra da Glan -Thompson polarizör prizmasından geçerek polarize olduktan sonra objektifin arka açıklığını dolduracak çapa ulaşmak için ışın genişleticiden geçer. Bu genişletilmiş ışın dikroik ayna (DA1) tarafından yansıtılıp ışına yükseklik kazandıracak olan periskop sistemine (A2 ve A3 aynaları) gelir. Periskop sistemi x ekseninde hareket eden ışının optik eksen yüksekliğini 75 mm’den 150 mm’ye çıkarır. Işın, periskop sisteminden sonra hareket doğrultusunu manuel olarak kontrol eden iki mercekten oluşan mercek sistemine yönlendirilir ve odak noktaları çakışacak şekilde yerleştirilen $f=150$ mm odak uzaklığına sahip olan iki mercekten geçtikten sonra paralel olarak ilerleyen 1064 nm dalga boyuna sahip lazer ışınını yansıtan DA2 (DA2, 750 nm altındaki ışınları geçirirken 750 nm dalga boyuna sahip ışınları yansıtır) tarafından objektife yönlendirilir ve böylece ışın objektifi geçerek tuzaklanacak parçacığın bulunduğu numune odacığına odaklanır. Odaklanmış lazer ışınının güçlü olması durumunda, bu olay odak noktasında parçacığın ışın tarafından yakalanmasıyla sonuçlanır. Tuzaklama olayını gözlemlemek amacıyla numune düzlemini aydınlatacak bir ışık kaynağı kullanılır. Aydınlatma ışığının kondenser aracılığıyla numune düzlemine odaklanması ve numune düzleminden geçen aydınlatma ışınlarının kameraya ulaşması sonucunda numune düzleminin görüntüsü elde edilir. Bilgisayarla bağlantısı yapılmış olan kamera numune kabı içinde gerçekleşen olayları eş zamanlı olarak bilgisayara aktararak hem gözlem yapılmasını hem de video kaydının yapılmasını sağlar.

4.2 Kurulumda Işın Yolu Ayarlamasının Önemi

Optik eksen, optik elemanların merkezlerinden geçen eksendir. Işının ilerlediği yol ise ışın yolu olarak isimlendirilir. Optik eksen ile ışın yolunun birbirine göre

durumları optik tuzağın performansını etkiler. Işın optik eksenenden saparak merceğe ulaşır, merceği geçtikten sonra optik eksen sapması artarak devam eder (Şekil 4.2b). Bu şekildeki sapma düzenekte mercekten merceğe aktarılır ve sonuç olarak bu sapmalar tuzağın görüntü alanı dışında oluşmasına sebep olur.



Şekil 4.2 Işın yolu ile optik eksenin birbirine göre durumu. a) ışın yolu ile optik eksen çakışık olma durumu, b) ışın yolunun optik eksenenden sapması durumu.

Kararlı bir tuzaklama için genellikle istenen, ışın yolu ile optik eksenin birbirlerine çakışık durumda olmasıdır (Şekil 4.2a). Bu çalışmadaki düzenekte lazer ışınının çıktığı pencereden itibaren objektifi geçtikten sonra tuzağı oluşturduğu noktaya kadar almış olduğu yol yaklaşık 1730 mm'dir. Özellikle bu düzenekte olduğu gibi ışının kat ettiği mesafenin uzun olması durumunda, ışının optik eksenenden sapmasının etkisi oldukça büyük olur. Örneğin lazer ışınındaki 1 mrad ($\sim 0.06^\circ$) gibi ihmal edilebilir küçüklikteki bir sapma miktarı bile düzeltme yapılmadığı durumda, 1730 mm mesafesini kat ettikten sonra ışın ilerleme yönüne dik düzlemde 1.8 mm'lik bir sapmaya neden olur. Bu sebeple bu düzenekte optik bileşenlerin büyük bir kısmı, ışın yolu ile optik eksenin çakışmasını kolaylaştırması sebebiyle optik düzeneklerde sıklıkla kullanılan kafes yapılar içerisine yerleştirilmiştir. Ayrıca ışındaki sapmaların düzeltilmesi amacıyla kafes yapı içerisine yerleştirilen optik tutucuların hepsi kinematik yani istenen doğrultu ya da düzlemlerde bir miktar hareket edebilme kabiliyetine sahip olanlardan seçilmiştir.

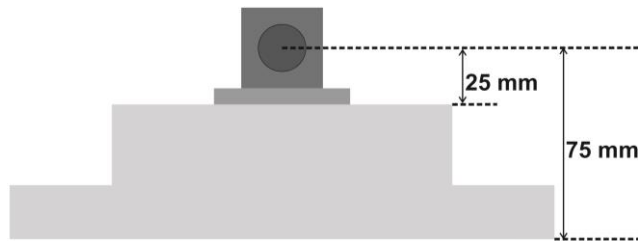
Kafes yapılar 1" ve 2" optik elemanlar için olmak üzere 30 mm ve 60 mm'lik iki farklı standarda sahiptir. Bu çalışmadaki düzenekte kullanılan optik elemanlar 1" çapında olmaları sebebiyle, 30 mm'lik kafes yapı kullanıldı. Bu yapılarda kullanılan her çeşit optik tutucu ve kafes yapı elemanı birbirlerine 6 mm çapında ve farklı uzunluklardaki çelik çubuklarla bağlanır.

Kafes sistemi boyunca ve bu sistem dışında kalan diğer ekipmanlarda (lazer, ışın genişletici, yarım dalga plaka, Glan-Thompson, kamera...), ışın yolunun optik eksene çakıştırılması çalışmaları izleyen alt başlıklarda tartışılmıştır.

4.2.1 Tuzaklama bileşenlerinin yerleşimi ve ışın yolu ayarı

Sürücüleri kontrol merkezinde bulunan lazer başlıklarının uzun süreli çalışma sonucu sıcaklığında artma meydana gelir. Bu durum lazer ışınının optik tuzak kalitesini olumsuz etkileyebilir. Bu nedenle lazer başlıkları ısı banyosu görevi görececek birer alüminyum blok üzerine yerleştirilmişlerdir.

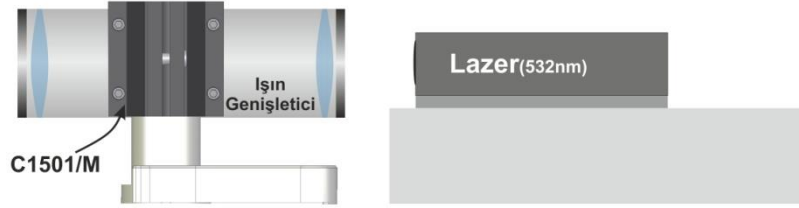
Lazer ışını yüksekliği masadan itibaren 75 mm'de olacak şekilde her iki lazer başlığı lazer başlığı tabanlıklarına yerleştirilerek masanın uygun konumlarında sabitlendi (Şekil 4.3). Işın yolu yüksekliğini mümkün olduğunca masaya yakın tutmak, daha kısa postlar kullanarak postlara bağlanmış optik elemanların titreşimlerden daha az etkilenmesini sağlamak amacıyla önemlidir. Literatürde incelenen düzeneklerin bir kısmında ışın yolu yüksekliği fazla dikkate alınmamıştır. Işın yolu yüksekliği dikkate alınan durumlarda ise ışın yolu yüksekliği 50-100 mm arasında değişmektedir.



Şekil 4.3 Lazer ve lazerin altındaki blok.

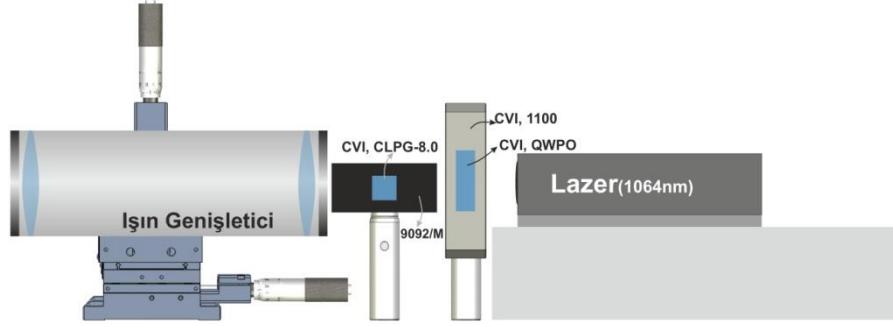
Tabanlıkları üzerine yerleştirilen ve masa üzerinde uygun şekilde konumlandırılan 532 ve 1064 nm dalgaboylu lazerlerin başlıklarından çıkan ışınların masaya paralellüğünün kontrolü amacıyla ayar diski kullanıldı. Sapma olmayan lazer tabanı konumu belirlenerek lazer tabanları bu konumda kalıcı olarak sabitlendi. Lazer başlıklarının merkezlerinin birbirlerine uzaklığı 200 mm'dir.

Lazerlerin yerleşimi tamamlandıktan sonra 532 nm dalga boyulu lazerin önüne konulacak ışın genişleticiyi yerleştirme işlemine geçildi. Işın genişleticisinin merkezi 532 nm dalga boyulu lazerin merkezine karşılık gelecek şekilde kısaç adaptör ile posta bağlandı (Şekil 4.4).



Şekil 4.4 Işın genişletici konfigürasyonu.

Tuzaklama lazerinin önüne Şekil 4.4'dekine benzer bir konfigürasyon, yarım dalga plaka ve Glan-Thompson polarizörünü içerecek şekilde tamamlandı. Yarım dalga plaka merkezi, lazer ile aynı optik eksene sahip olacak şekilde masaya monte edildi. Yarım dalga plakadan hemen sonrada Glan-Thompson polarizörü Glan-Thompson tutucusuna yerleştirilerek bir post yardımıyla optik eksen yüksekliğine getirildi. Ardından 1064 nm dalga boyuna sahip lazer ışını için kullanılan ışın genişleticisi XYZ öteleme platformuna yerleştirilerek bu öteleme platformuyla masaya monte edildi (Şekil 4.5).



Şekil 4.5 Tuzak lazeri ve KK1 arasındaki yapılandırma.

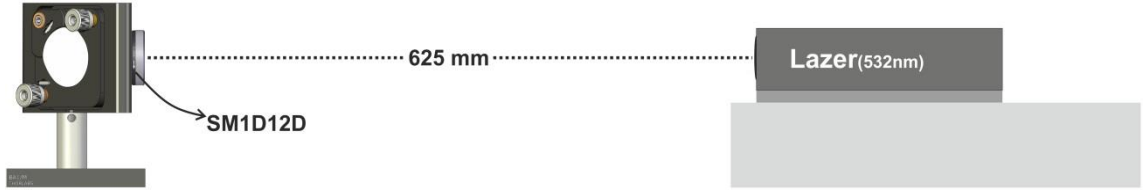
Işın genişleticisi yapılandırmasını bütün kurulum tamamlandıktan sonra tekrar yerine monte edilmek üzere yerinden kaldırıldı. Bunun nedeni lazer ışınının çapının minimum olması durumunda olası sapmaların daha kolay tespit edilmesidir.

Sonraki aşamada 532 nm dalga boylu ışını tuzak bölgesine yönlendirmek üzere yansıtıcı ayna için yapılandırma yapıldı. Yapılandırma $\pm 4^\circ$ lik sapmaya olanak sağlayan hareket kabiliyetine sahip dik açılı kinematik ayna tutucusuna (KA) dik açılı ışın yönlendirici “geniş band metalik ayna” yerleştirilerek oluşturuldu. Kinematik ayna tutucusunun optik eksenini, bir post ve kısıkaç yardımıyla lazerin optik eksen yüksekliğine getirildi (Şekil 4.6). Böylece kafes sisteminin ilk elemanı olan birinci kinematik aynanın (KA1) sabitlemesi sağlanmış oldu.



Şekil 4.6 Dik açılı kinematik ayna tutucusu yapılandırması.

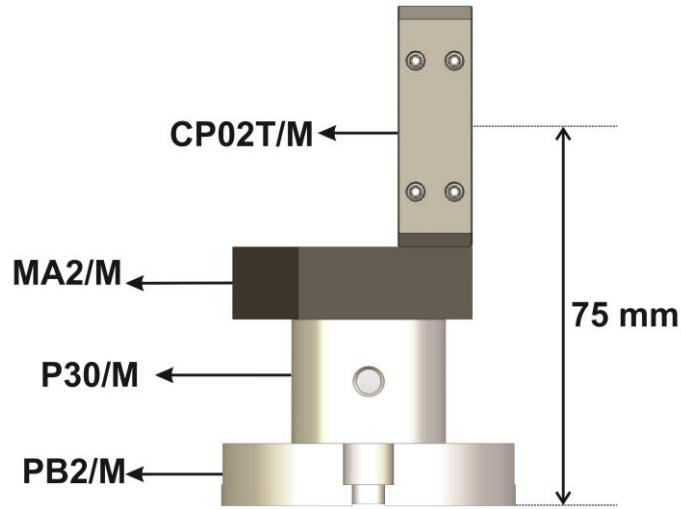
KA1'in masaya monte edilmesinden sonra KA1'in lazere bakan portuna ayar irisi takılarak ışının KA1'in optik ekseninden geçme işlemi kontrol edildi. Masa üzerinde paralelliği kontrol edilmiş olan lazer ışını KA1'in merkezinden, dolayısıyla yansıtıcı aynanın optik ekseninden geçmediğinde KA1'in ayarlaması yeniden yapılarak ışının paralel ilerlemesine olanak sağlayacak konuma getirilmesi sağlandı (Şekil 4.7).



Şekil 4.7 KA1 ve lazer arasındaki optik eksen kontrolü.

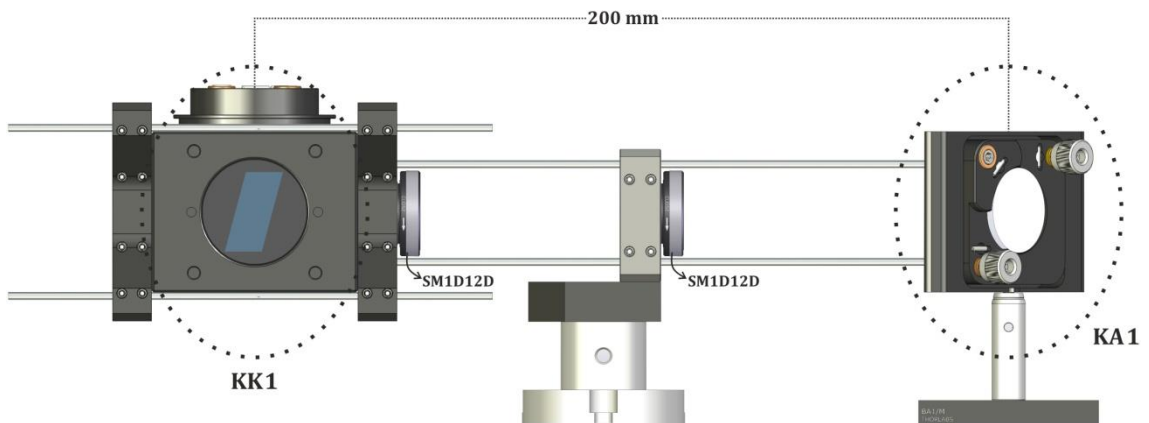
1064 nm dalga boylu lazerden gelen ışını tuzaklama odacığına yönlendirmek üzere dikroik aynanın (DA1) konfigürasyonu şu şekilde yapıldı; DA1 için yapılan konfigürasyonda kafes küpü kullanıldı. Kafes küpünün uygun portuna DA1'i yerleştirmek için optik tutucu ve optik tutucu tabanlığı yerleştirildi ve kafes küpünün kullanmaya gerek kalmayan portuna sonlandırıcı takıldı. Kafes küpü, optik tutucu, optik tutucu tabanlığı ve sonlandırıcı ile oluşturulan bu yapı (KK) post ve kısıkaçlar yardımıyla lazerin optik eksen yüksekliğine getirildi. Böylece sistemde birinci KK konfigürasyonu (KK1) tamamlanmış oldu.

KK1, KA1'in ışın çıkış yönündeki çubuk yuvalarına yerleştirilen çubukları karşılayacak şekilde masaya temas etmeden yerleştirildi. Fakat öncesinde çubukların KK1'in oluşturacağı ağırlığı taşıyabilmesi için KA1 ile KK1 arasına masaya sabitlenen destek konfigürasyonu eklendi (Şekil 4.8).



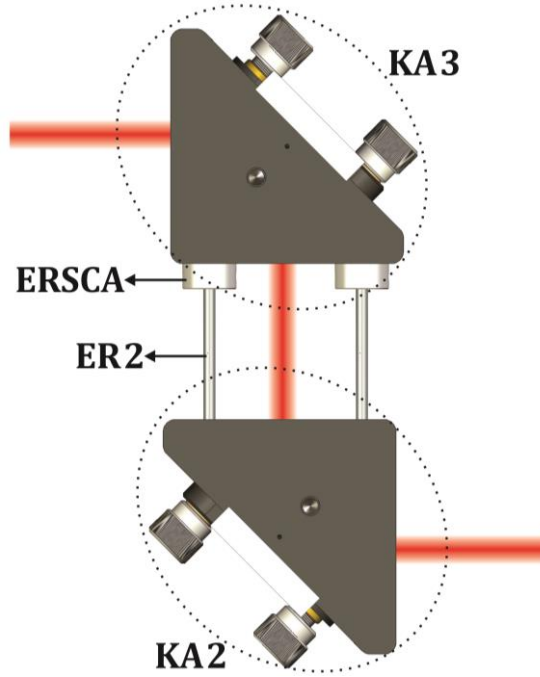
Şekil 4.8 Destek konfigürasyonu.

KA1 ile KK1 arasındaki bağlantı biçimi Şekil 4.9’da yer almaktadır. KA1 ve KK1 arasındaki çubuklar üzerinde ayar plakası gezdirilerek ışın yolu kontrolü yapıldı. Işın yolu ile optik eksen arasında sapma olması durumunda KA1’in ayar vidaları kullanılarak ışın yolu ile optik eksen çakışık duruma getirildi. KK1’in sabitlenmesinden sonra 1064 nm dalga boyulu lazer kapatıldı.



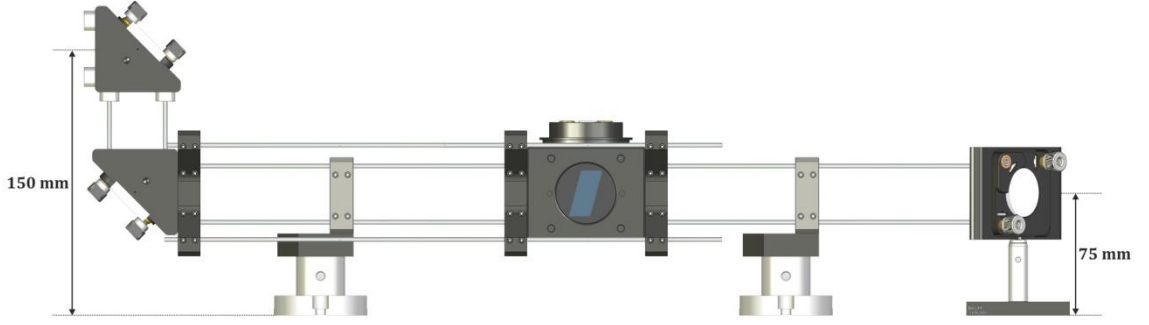
Şekil 4.9 KA1 ve KK1 sistemlerinin destek aracılığıyla bağlantısı.

Bu aşamaya kadar sistemin optik eksen yüksekliği 75 mm idi. Fakat çalışmanın ileri aşamalarında düzeneğe eklenmesi düşünülen mikroskobun ışın giriş portuna uygun yüksekliği elde etmek için 75 mm olan x yönündeki optik eksen yüksekliği 150 mm'ye çıkartıldı. Sistemin kurulumunun başlangıcından itibaren bu yükseklikle başlanabilirdi. Fakat düzenekte yer alan elemanların yüksek postlara asılması maruz kalacakları titreşim genliklerinde artışa neden olur. Bu nedenle başlangıç yüksekliğinin düşük seviyede olması tercih edildi. Optik eksenin yükseltilmesi için periskop sistemi kuruldu. Periskop sisteminde altta yer alan KA2'ye yerleştirilen geniş band metalik ayna x ekseninden gelen ışını 90° döndürerek z eksenine yönlendirir. Sonra üstte yer alan KA3'e yerleştirilen geniş band metalik ayna z eksenindeki ışını 90° döndürerek tekrar x eksenine yönlendirir (Şekil 4.10).



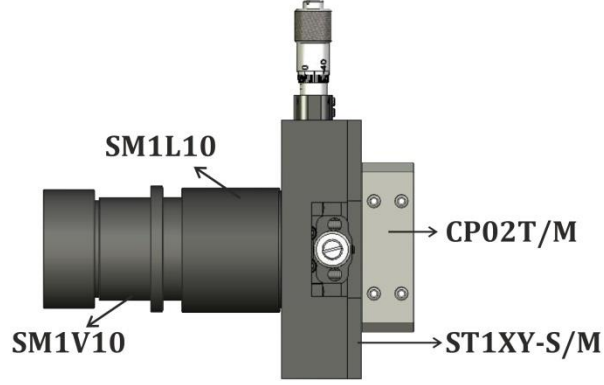
Şekil 4.10 Periskop sistemi.

KK1 ile periskop sistemi çubuklarla birbirine bağlanmadan önce bağlantının sağlam olması için araya Şekil 4.11'de görüldüğü gibi destek konfigürasyonu eklendi.



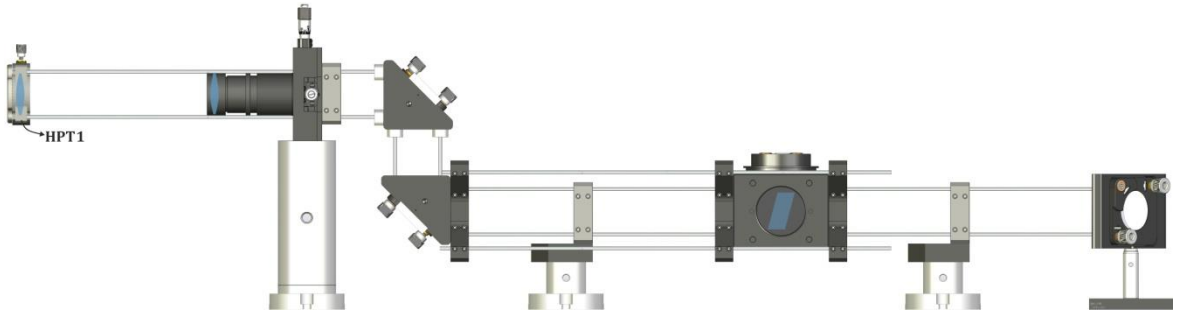
Şekil 4.11 Periskop sisteminin kurulmasıyla sahip olunan yeni yükseklik.

Periskop tamamlandıktan sonra periskoba çubuklar vidalanarak bu çubuklara manuel ışın yönlendiricisi bileşenini oluşturan mercekle sistem kuruldu. Merceklerin ışın çapında bir değişime sebep olmaması için odak uzaklığı aynı olan mercekler (odak uzaklığı $f=150$ mm) kullanıldı. İki mercekten oluşan bu konfigürasyonda mercekler odakları çakışacak şekilde yerleştirildi. Birinci mercek için iki boyutlu optik öteleyici (Thorlabs Inc., ST1XY-S/M, USA) kullanıldı. Bu öteleyicinin üzerindeki mikrometre kolunun döndürülmesi, optik öteleyiciye yerleştirilen optik elemanın ışının ilerleme yönüne dik düzlemde (yz) ± 3 mm ötelenmesini sağlar. Bu optik öteleyiciye yerleştirilecek olan merceğe x ekseninde hareket kabiliyeti kazandırmak amacıyla öteleyiciye 1" uzunluğunda, bir ayarlanabilir-odak lens tüpü yerleştirildi. Bu ayarlanabilir-odak lens tüpü optik öteleyiciye yerleştirilmiş olan 1" uzunluğunda lens tüpü uzatmasının içine yerleştirildi. Böylece ayarlanabilir odak lens tüpü çubuk doğrultusunda ileri geri hareket ettirildi. Sonuç olarak birinci mercekte üç eksen için manuel ışın yönlendirme imkânı elde edilmiş oldu (Şekil 4.12).



Şekil 4.12 Birinci mercek konfigürasyonu.

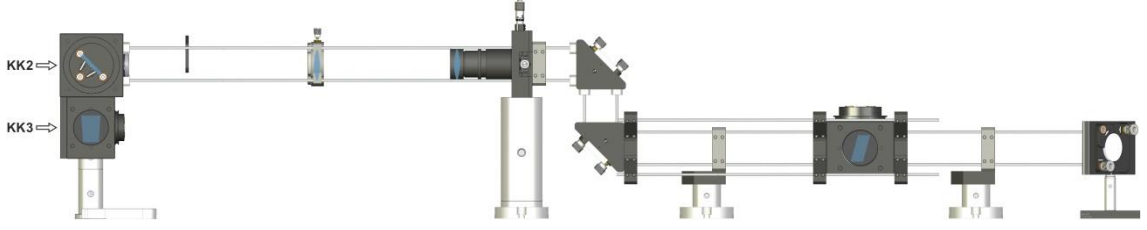
ST1XY-S/M optik öteleyicisi sistemin dayanıklılığını sağlamak için bir post konfigürasyonu ile masaya monte edildikten sonra ikinci mercek konfigürasyonu için çubuklara ışının ilerleme yönüne dik düzlemde (yz düzlemi) ± 1 mm'lik öteleme kabiliyeti veren öteleme tutucusu (Thorlabs Inc., HPT1, USA) yerleştirildi. Bu öteleyici ayrıca optik eksen doğrultusunda ileri-geri hareket yeteneğine de sahiptir. Böylece bu öteleme tutucusu sayesinde 3 boyutlu öteleme olanağı elde edilmiş oldu (Şekil 4.13).



Şekil 4.13 Düzeneğin mercek konfigürasyonuna kadar ayarlanmış kısmı.

Merceklerin ışını genişletmesi küçük sapmaların görülmesini engelleyebilir. Bu nedenle çapı küçük olan lazer ışınıyla ışın yolu ayar-kontrol çalışmasına merceksiz devam edilir. Bütün düzeneğin optik eksen ve ışın yolu kontrolü tamamlandıktan sonra mercekler tutucularına yerleştirilir.

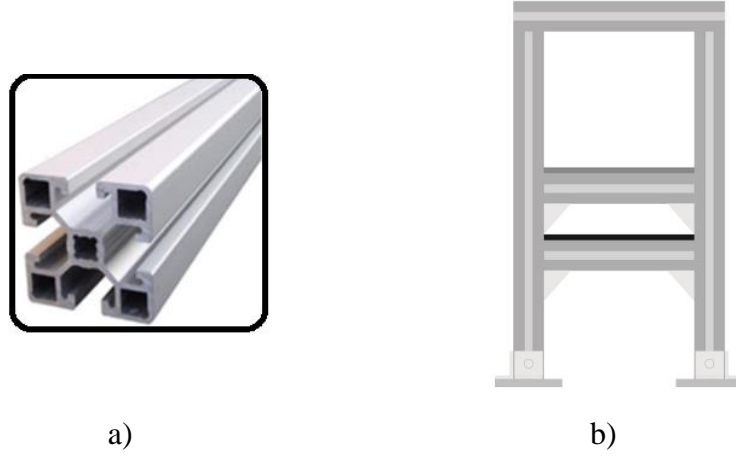
Bu aşamadan sonra kurulumla eklenecek elemanlar ışını hem tuzaklama bileşenlerinin yer aldığı z eksenine hem de görüntüleme bileşenlerinin yer aldığı y eksenine yönlendirmelidir. Bu nedenle düzeneğe Şekil 4.14'deki gibi alt alta iki küp eklendi.



Şekil 4.14 Kafes yapı ile oluşturulan ışın yolunun sabit platform merkezine kadar olan bölümü.

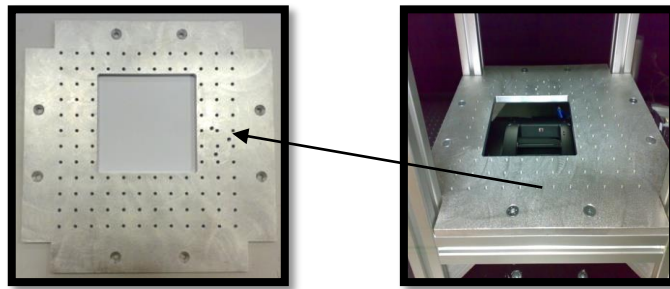
Üstteki küp (KK2); gelen ışını düşey doğrultuda yönlendirecek dikroik aynayı (DA2) içerecek şekilde konumlandırıldı. KK2'nin hemen altındaki KK3 küpü ise numuneden gelen ışınları -y eksenine yansıtarak kameraya yönlendirecek olan geniş band metalik aynayı içerecek şekilde konumlandırıldı. KK2 ve KK3 bileşenleri birbirlerine dört tane 0.5'' uzunluğundaki kafes çubukları ile bağlanarak sağlam bir yapı elde edildi.

x ekseninde bulunan optik elemanların ışın yolu ve optik eksen kontrolü yapıldıktan sonra numunenin ve numunenin incelenmesine imkan sağlayan optik bileşenlerin yerleştirileceği sabit platform inşa edildi (Şekil 4.15b). Sabit platform üzerindeki kurulum gelişmiş bir terslenmiş (inverted) araştırma mikroskobunun açık haline benzer şekilde konfigüre edildi. Sabit platformun iskelet yapısı kanallı yapıya sahip 6063 alüminyum alaşımından imal edilmiş profiller kullanılarak oluşturuldu (Şekil 4.15a). Bu yapının alüminyum alaşımından yapılması ve kanallı yapıya sahip olması platformun daha fonksiyonel ve titreşime karşı daha dayanıklı olmasını sağlar.



Şekil 4.15 Sabit platform a) sabit platform iskeletinin yapımında kullanılan kanallı alüminyum profil, b) sabit platformun önden görünüşü.

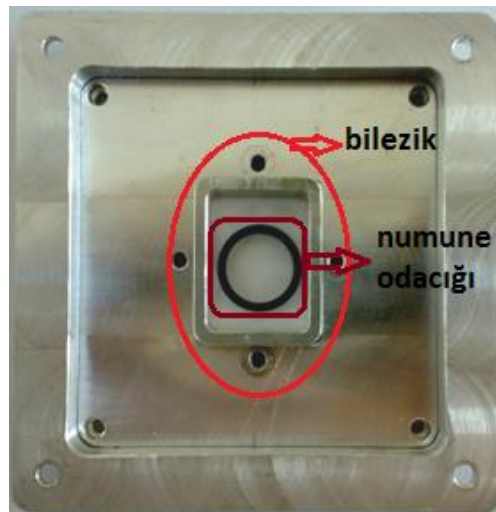
Dört taşıyıcı ayağa sahip platform iskeletini titreşim yalıtım masasının M6 vida deliklerine bağlamak amacıyla her bir ayağının altına alüminyum plakalar yaptırılarak platform planlanan konumda sabitlendi. 400 mm x 400 mm ölçülerinde ve 10 mm kalınlığındaki iki raf plaka iskelet yapıda yerlerine yerleştirildi. Alta yerleştirilen raf plaka, mekanik XY ve piezo öteleme platformlarını taşıırken, üste yerleştirilen raf plaka kondenser ve fotodedektör gibi öteleme platformlarını taşıyacak olan bileşenlerin sabitlenmesini sağlamak amacıyla kullanılması planlandı. Her iki raf plakanın da ortası 160 mm x 160 mm ebatlarında açıklığa sahiptir ve ayrıca üstteki raf plaka Şekil 4.16'da görüldüğü gibi postları konumlandırmak amacıyla 25 mm aralıklarla açılmış M6 vida deliklerine sahiptir.



Şekil 4.16 Sabit platform iskeletine yerleştirilen üstteki raf plaka.

Bölüm 3.1.8’de tartışıldığı üzere; mekanik XY platformunun kullanım amacı istenen numune bölgesini istenen hızda görüntü alanına taşımak iken, piezo platformun kullanım amacı numuneyi tuzak konumuna bağlı olarak hassas bir şekilde hareket ettirebilme kabiliyetine sahip olmaktır. Piezo platform nanometre-altı gibi oldukça hassas yer değiştirmelere olanak sağlarken maksimum yer değiştirme miktarı yüz nanometreler mertebesinde sınırlıdır.

Mekanik XY platformu sabit platformun alt raf plakasına vidalanarak monte edildi. Mekanik XY platformunun üzerine sabitlenmesi gereken piezo platformun vida karşılıklarının mekanik platformdaki vida konumları ile uyumlu olmaması sebebiyle piezo platformun mekanik platform üzerine sabitlenmesi, yaptırılmış olan bir adaptör plaka sayesinde mümkün oldu. Mekanik platform ve piezo platform yerleştirildikten sonra piezo platformun üzerine yerleştirilecek olan numune odacığı için konfigürasyon yapıldı. Mekanik platformun üzerinde numune odacığı için uygun bir alan mevcuttur fakat mekanik platformun üzerine piezo platform yerleştirildiği için numune odacığı da piezo platform üzerinde yer almalıdır. Piezo platform üzerinde numune odacığı için mevcut bir alan olmadığından dolayı numune odacığını piezo platformun 90 mm x 90 mm olan pencere açıklığına yerleştirmek için Şekil 4.17’deki numune tutucusu yaptırıldı.



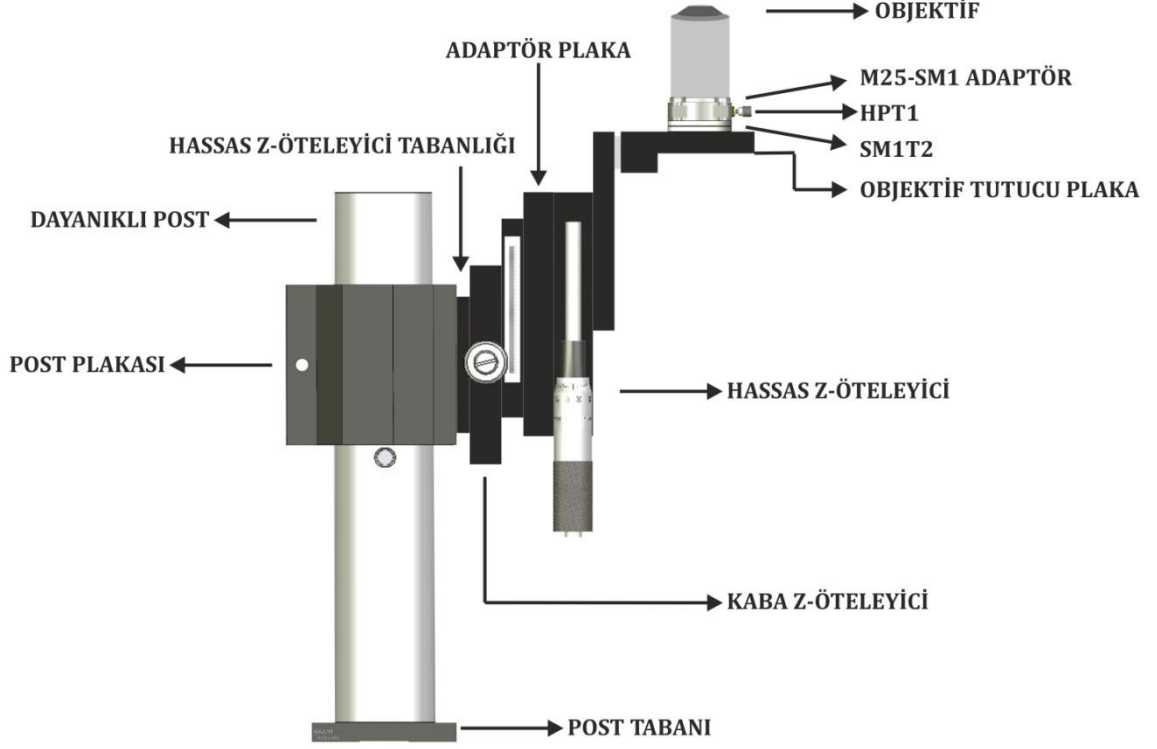
Şekil 4.17 Numune tutucusu.

Numune tutucusu hem piezo platformun pencere açıklığına uygun hem de numune odacığını tutacak şekilde tasarlanmıştır. Numune odacığı bu tutucunun ortasına gömülmüş şekilde yerleştirilir. Numune odacığının alt parçasını oluşturan cam, numune tutucusuna yerleştirildikten sonra hareketsiz bir şekilde kalması için üzerine bir bilezik parça vidalar yardımıyla sabitlenir. Böylece objektifin alt cama temas etmesi durumunda numune odacığı sabit kalabilecektir.

Numuneyi içeren odacık ise mikroskop camı üzerine eritilmiş mum yardımıyla sabitlenen 16 mm çapındaki bir yuvarlak halka (O-ring) ile oluşturulur. Sulu ortamdaki numune içerisine yerleştirildikten sonra halka 18 mm çapında diğer bir mikroskop camı ile kapatılır ve böylece buharlaşma olmadan deneylerin sürdürülmesi sağlanır.

Numune tutucusu ve dolayısıyla numune odacığı, kurulumun devamında yapılacak olan optik eksen ayarı ve kontrolüne engel teşkil ettiğinden dolayı kurulum tamamlanıncaya kadar piezo platformun üzerine yerleştirilmedi. Sabit platformun alt raf plakasındaki konfigürasyon tamamlandıktan sonra alt raf plaka ile masa arasındaki bölgenin uygun yüksekliğine objektif yerleşimi yapıldı.

Düzenekte kullanılan objektif, ışını numune kabı içerisinde odaklamak için, z ekseni boyunca hareket kabiliyetine sahip olmalıdır. Ticari mikroskop sistemlerinde yer alan objektifler ince ve kaba öteleme ayar vidalarıyla bu hareketi sağlayabilmektedir. Düzenegimizdeki objektifinde aynı şekilde kaba ve hassas hareket kabiliyetine sahip olması için Şekil 4.18'deki gibi bir konfigürasyon oluşturuldu. Bu konfigürasyonda iki tane tek eksenli öteleyici kullanıldı (Çizelge 4.1). Bu öteleyicilerden biri 30 µm hareket hassasiyetine sahip kaba z-öteleyicisi (GMT-Linear, MC1B-90, Taiwan) diğeri ise 1 µm hareket hassasiyetine sahip hassas z-öteleyicisidir (Newport, M433, USA). Öteleyiciler bir adaptör plaka ile birbirlerine bağlandıktan sonra hassas z-öteleyicisi 3 mm kalınlığına sahip post uzatması ile objektif tutucusu plakasına vidalandı. Oluşturulan bu konfigürasyon 250 mm yüksekliğinde ve 1.5" çapında sağlam bir posta bir post tutucu plaka yardımıyla yerleştirildi.



Şekil 4.18 Objektif hareketini sağlayan ünite.

Objektif hareketini sağlayan ünite tamamlandıktan sonra kontrol yapıldıktan sonra z ekseninde yapılacak kurulum ve optik eksen kontrolüne engel olmaması için geçici süreliğine kaldırıldı.

Çizelge 4.1 Objektifin kaba ve hassas hareketi amacıyla kullanılan öteleyicilerin özellikleri.

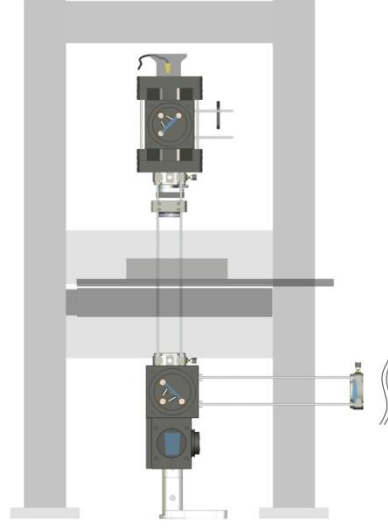
	Kaba z-öteleyici	Hassas z-Öteleyici
Üretici ve Model	GMT-Linear, MC1B-90, Taiwan	Newport, M433 ve SM-50, USA
Eksenel Hareket	Tek eksen	Tek eksen
Eksen Boyunca Maksimum Yerdeğiştirme	± 35 mm	± 25 mm
Hareket Hassasiyeti	30 μ m	1 μ m
Platform Boyutları	40 mm x 90 mm	101.6 mm x 76.2 mm
Maksimum Yük	39 N	67 N
Kontrol Mekanizması	Dove-tail kızığa bağlı ayar düğmesi	Bilye-yuvalı kızığa bağlı mikrometre kolu

Objektifin kurulumu tamamlandıktan sonra sabit platformun üst rafında yer alan bileşenlerin kurulumuna başlandı. Kurulumun bu aşamasında numune aydınlatma bileşeni ve kondenser bulunmaktadır. Ayrıca üst raf yerleşimi, ileride sisteme eklenmesi planlanan konum belirleme bileşenlerinin konumlandırılmasına olanak sağlayacak şekilde planlandı. İlk olarak üst rafta yer alan bileşenleri taşıyacak olan KK4'ün dayanıklılığını arttırmak üzere KK4'e alttan ve üstten birer 30 mm-60 mm kafes adaptörü ve birer 60 mm kafes plakası bağlandı.

Kurulumu gerçekleştiren KK4 bileşeni adaptör plaka kullanılarak tek eksenli bir öteleyiciye (GMT-Linear, MC1B-90, Taiwan) bağlandı. Bu öteleyicinin, KK4 bileşenini z ekseni boyunca hareket ettirmesine olanak sağlayacak şekilde öteleyici 200 mm yüksekliğinde ve 1.5" çapında sağlam bir posta bir post tutucu kısaç plaka yardımıyla yerleştirildi. Geniş post tabanlığına bağlanmış olan post, ışın ayarlamaları yapıldıktan sonra uygun konumuna sabitlendi. Işını ileride eklenmesi düşünülen konum belirleme bileşenlerine yönlendirmek amacıyla sabit KK4'e üçüncü dikroik ayna (DA3) yerleştirildi. Sistemde şu anda konum belirleme bileşenleri olmadığı için DA3'ten yansıyan ışınları engellemek amacıyla KK4'ün bu yönelimdeki çıkış portuna ışın sonlandırıcı takıldı.

KK2 ile KK4'ün birbirine bakan yüzlerine ışın genişliğini ayarlamak üzere kullanılacak bir iris takıldı. Sonra KK2 ile KK4 arasına çubuklarla bağlantı yapıldı. Ayrıca çubuklara öteleyici takıldı ve bu öteleyiciye de iris takıldı. Öteleyici çubuklar üzerinde aşağı-yukarı hareket ettirilerek çubuk boyunca irislerin üzerlerine düşen ışınların merkezi olup olmadığı kontrolü yapıldı (Şekil 4.19).

Sabitlenmiş olan KK4 yapısının alt portuna ise XY- optik eleman öteleyici tutucusu bağlandı. Bu öteleyiciye iris diyaframı takıldı ve RMS standardına sahip kondenser objektifi bir RMS-SM1 adaptörü kullanılarak bu iris diyaframa takıldı. Burada irisi kullanmanın amacı üst taraftan kondensere gelen aydınlatma ışığı huzmesinin miktarını dolayısıyla ışık şiddetini istenen ölçüde kontrollü olarak değiştirmektir.

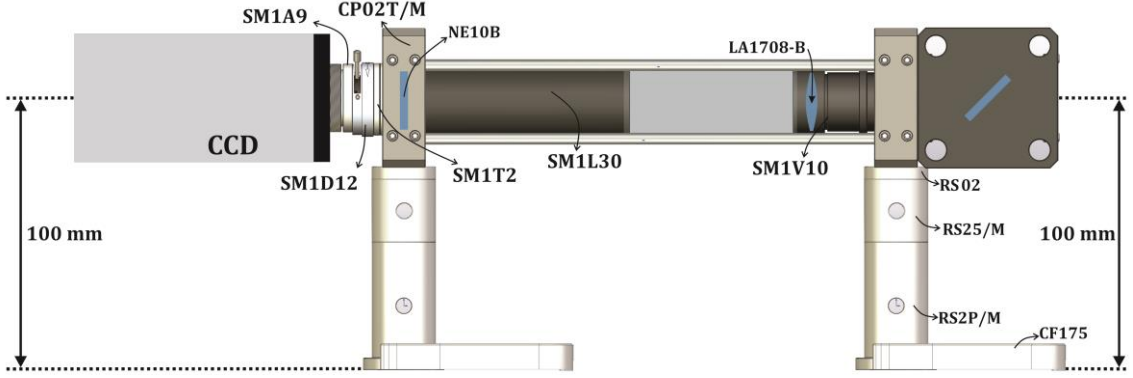


Şekil 4.19 KK4 ile KK2 arasındaki optik eksen kontrolü.

Sabitlenmiş olan KK4 yapısının üst portuna numune aydınlatması için kullanılacak olan led ampulü, bir lens tüpü aracılığıyla, yerleştirildi ve elektrik bandı ile yapıştırılarak sabitlendi. Led ampülden çıkan ışın KK4'ün içinde bulunan DA3'ten geçerek KK4'ün alt portunda yer alan kondenser tarafından toplanacaktır.

4.2.2 Görüntüleme bileşenlerinin yerleşimi ve ışın yolu ayarı

Kamera, optik ekseni masadan 100 mm yükseklikte olacak şekilde tasarlandı. Üç adet 8" uzunluğundaki kafes çubuğu KK3 kafesine bağlanarak, bu çubuğun yuvalarında Şekil 4.20'deki gibi iki kafes plakası (CP02T/M) geçirildi. Bu iki kafes plakası postlar yardımıyla masaya sabitlendi. Kamera yolundaki ilk kafes plakasına bir odaklayıcı lens tüpü içerisinde konumlandırılmış $f=200$ mm odak mesafesine sahip bir düzlem-konveks mercek yerleştirildi. Sonraki kafes plakasına CCD elemanının infrared ışıktan zarar görmesini engellemek amacıyla bir filtre yerleştirildi. Kafes plakasının içine filtre yerleştirildikten sonra bu plakanın -y eksenine bakan portuna iris takıldı. Son olarak bu irise bir adaptör aracılığıyla kamera takıldı (Şekil 4.20).



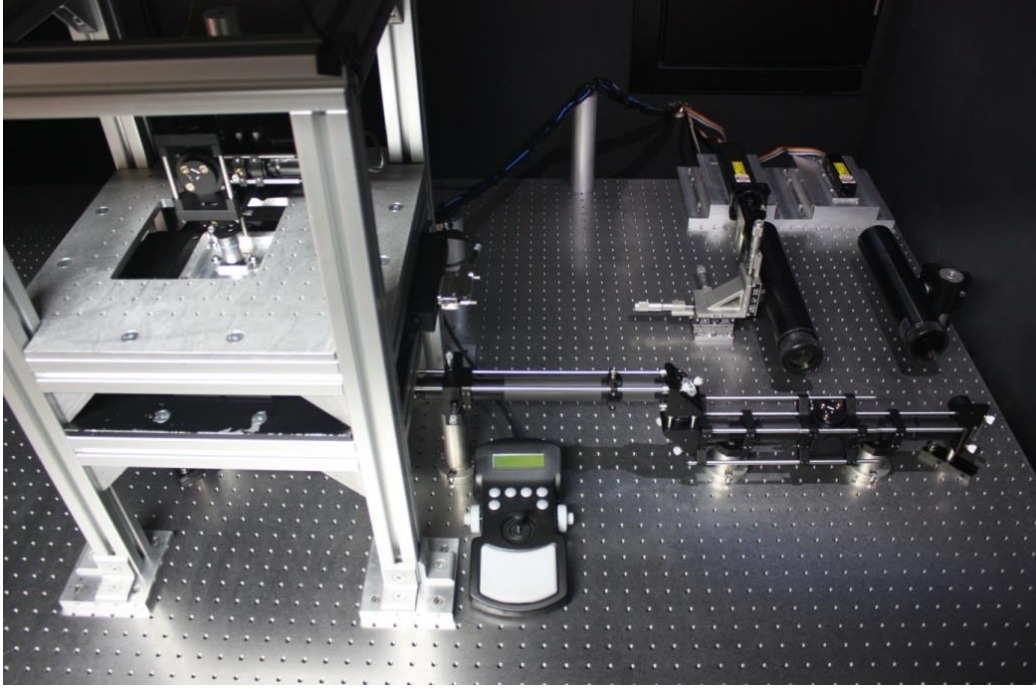
Şekil 4.20 Kamera sisteminin konfigürasyonu.

Kamera yolunda sapma olması durumunda bu sapma yansıtıcı ayna tutucusu yardımıyla aynanın konumu ile oynanarak düzeltilir.

İdealde kafes yapıdaki elemanlar arasındaki bağlantı dört tane kafes çubuğu ile oluşturulur ve bu şekilde optik eksenden sapma göstermeden ilerleme sağlanır. Ancak çalışma esnasında mercekleri ve kafes tüplerini takıp-çıkarma gibi durumlarda dört çubuk büyük problem yaratmaktadır. Kafes yapıdaki çubuk yuvalarının birbirine yakın olması nedeniyle dördünün takılı olması durumunda aralarındaki boşluktan bir optik elemanın ve kafes küpünün geçmesi olanaksızdır. Bu nedenle kafes yapı iskeleti oluşturulurken düzeneğimizde dört yerine üç kafes çubuğu kullanıldı.

Kafes sisteminde yer alan elemanlar arasında yapılan optik eksen kontrolünden sonra bu elemanlara tüp takarak hem elemanların daha sağlam tutunmalarını sağlandı hem de optik elemanların çevreden toz alması engellenerek lazer ışınlarının toz parçacıklarıyla yapacağı etkileşimler (soğurma, yansıma...) engellenmiş oldu. Kafes sistemi ışın yolu ve optik eksen çakışık olacak şekilde tamamlanmış oldu.

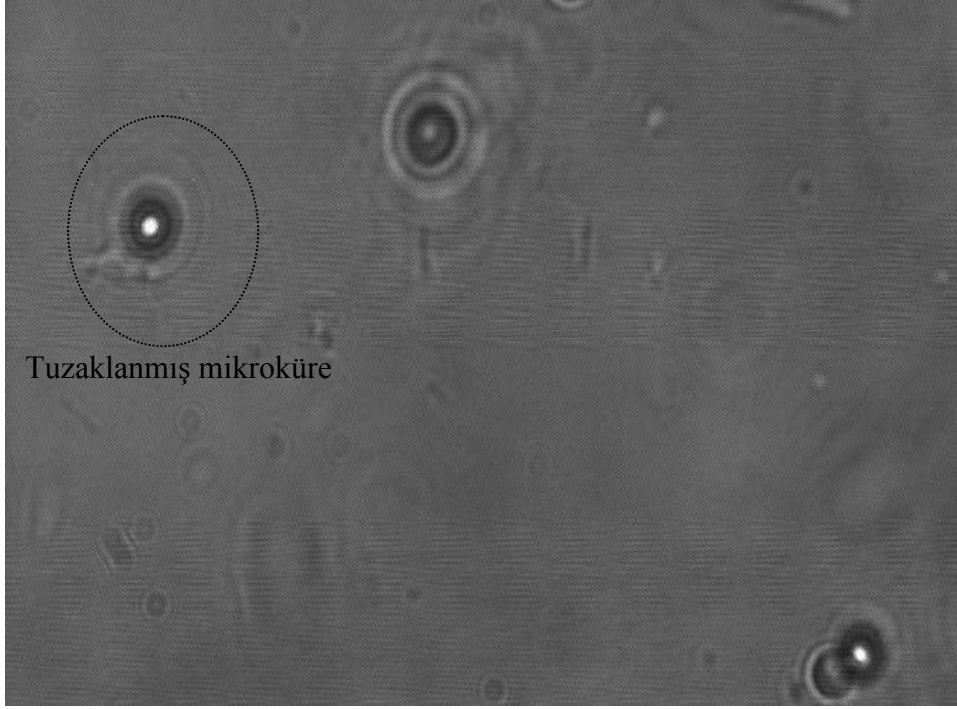
Optik tuzaklama düzeneğinde, Şekil 4.21, ışın yolu ayarının tamamlanması sonrasında 1064 nm dalga boylu lazerin, parçacığı tuzaklaması başarıyla sağlanmıştır.



Şekil 4.21 Optik tuzağın gerçekleştirildiği düzeneğin fotoğrafı.

4.3 Kararlı Bir Optik Tuzağın Elde Edilmesi

1 μm çapa sahip lateks mikroküre içeren seyreltik sulu çözelti hazırlanarak numune odacığına yerleştirildi. Objektife küçük bir damla yağ damlatıldıktan sonra objektif ve kondenser öteleyiciler yardımıyla uygun şekilde konumlandırıldı. Numune aydınlatma ledi ve kamera açılarak objektifin hassas öteleyicisi kullanılarak mikrokürelerin bulunduğu düzlemlerde odaklanma sağlandı. Tuzaklama lazeri açıldıktan sonra odaklanmış lazerin yeri belirlendi. Manuel ışın yönlendirici bileşendeki öteleyicilerin ayarları sayesinde tuzaklayıcı lazer konumu görüntü alanının merkezine yakın olacak şekilde yerleştirildi. Tuzaklamayı gerçekleştirmek üzere manuel ışın yönlendirici merceklerin ışın ilerleme yönündeki konumları hassas ileri geri yer değiştirmelerle belirlendi. Bu konumun; objektifin arka açıklığı ile odak uzaklığı 150 mm olan mercek arasındaki uzaklık, odak uzaklığının iki katı ($2f=300\text{ mm}$) ve bu mercek ile odak uzaklığı 150 mm olan ikinci mercek arasındaki uzaklık $150\text{ mm}+150\text{ mm}=300\text{ mm}$ 'yi sağladığında mikrokürelerin tuzaklanması gerçekleşti (Şekil 4.22).



Şekil 4.22 Tuzaklanan 1 μm çapındaki lateks mikroküre görüntüsü.

BÖLÜM 5

SONUÇ VE TARTIŞMA

Bu tez çalışmasında; gelecekte yapılması planlanan tek moleküllerin optik tuzaklama tekniği ile incelenmesine olanak sağlayan, kararlı bir optik tuzaklama düzeneğinin oluşturulması için planlama aşamasından kurulum aşamasına kadarki yapılan tüm çalışmalar adım adım anlatılmıştır. Çalışma, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Komisyonu'nun 2008-19019 numara ve “*Kuvvet Spektroskopisi Yöntemiyle DNA Molekülünün Mikromekaniksel Özelliklerinin İncelenmesi*” başlıklı projesi ile desteklenmiştir.

Optik tuzaklamada mikroskobik parçacık üzerine pN gibi çok küçük kuvvetlerin uygulanması ve parçacıkta nm gibi çok küçük yer değiştirmelerin meydana gelmesi düzeneğin hassasiyetini ortaya koymaktadır. Düzenek hassasiyetini olumsuz etkileyen çevresel faktörleri minimize etmek amacıyla yalıtımlı bir oda içerisine yerleştirilmiş olan düzenek ile kararlı bir tuzaklama elde edilmesi yoğun ve hassas bir çalışma süreci gerektirir. Kararlı bir tuzak oluşumunu etkileyen birincil faktör tuzaklayıcı lazer ışınının optik eksenle çakışmamasından kaynaklanır. Lazer ışınının optik eksenden sapmasına neden olan etkenler şu şekilde sıralanabilir:

- Işın genişleticilerin konumlandırılmasından kaynaklanan sapmalar,
- Ayna tutucuların kinematik ayarlamalarındaki hatalar,
- Tuzaklayıcı ışının dik açı ile döndürülmesinden sonra yerleştirilen objektifin konumlandırılmasındaki hata.

Işın genişletici elemanlar başlangıçta bir post yardımıyla optik masaya sabitlendi. Ancak bu konfigürasyonda ışın genişleticilerin hassas bir şekilde post üzerinde konumlandırılmayışlarından dolayı ışındaki sapma miktarının oldukça yüksek değerlere ulaştığı gözlemlendi. Özellikle tuzaklayıcı lazer ışını için bu problemin

giderilmesi amacıyla ışın genişletici daha hassas konumlandırma yapmaya olanak sağlayan bir XYZ manipülatörü üzerine yerleştirildi.

Kurulum esnasında ışının simetrikliğinin bozulmasının sebebi literatürde yapılan araştırmalar sonucunda belirlenmiştir. Üzerine gelen ışına göre açılı bir yönelime sahip bir aynadan yansıyan ışının şekli eliptik olur. Işın şeklindeki bu bozulma birinci aynaya göre tam ters yönelimli ikinci ayna ile düzeltilir. Ancak aynaların birbirlerine göre olan yönelimlerindeki çok küçük sapmalar ışının ikinci aynadan çıktıktan sonra simetrikliğinde bir bozulmaya sebep olacağı gibi istenmeyen kırınım deseni de oluşturur. Bu nedenle ışın yolu üzerine yerleştirilecek aynaların sayısının ve konumlarının çok iyi planlanması ve aynı zamanda kinematik ayarlamalarının hassas bir şekilde yapılması gerekir. Bu amaçla ayna tutucularının üç eksenli ayarlama imkân sağlayan, zamanla ve sıcaklık değişimiyle ayarlarının etkilenmediği araştırma kalitesine sahip modellerden seçilmesi önemlidir.

Tuzaklayıcı ışının simetrik bir şekilde objektifin arka açıklığına ulaşması simetrik ve böylece kararlı bir tuzaklama kuvvetinin oluşumunda oldukça büyük rol oynar. Bu nedenle dikroik aynadan 90 derecelik bir açı ile yönlendirilmiş olan ışının merkezi ile objektif merkezinin çakıştırılması işlemi hassas bir şekilde yapılmalıdır. Şu an için manuel kontrol imkânı sağlayan objektif odaklama ünitesinin yakın gelecekte bilgisayar kontrollü hale getirilmesi ve böylece düzenek performansının artırılması planlanmaktadır.

Hassas ışın yolu ayarlaması tuzak ve numune görüntülerini distorsiyona uğramadan aynı anda kamera tarafından izlenebilmesi açısından da büyük öneme sahiptir. Bu nedenle kondenser-objektif-dikroik ayna-kamera ışın yolu, tuzaklayıcı ışın ile uyumlu bir yönelime sahip olmalıdır.

Düzenekte ışın yolunun özellikle kafes yapı içerisinde kalan bölümü lens tüpleri ve karton tüplerle kapatılarak ışınların havada askıda kalan partiküllerden saçılmaya uğraması ve bu durumdan kaynaklı tuzak performansındaki azalma minimize edilmeye çalışılmıştır. Aynı zamanda kapalı ışın yolu zaman içerisinde optik elemanlar üzerinde

istenmeyen partikül birikimini engellediği gibi güçlü lazer ışınının farkına varılmayan saçılmalardan kaynaklanan sağlık riskini de ortadan kaldırır.

Kurulumu izleyen aşamalarda takip eden çalışmalar; düzeneğe hassas konum belirleme bileşenin eklenerek, düzeneğin tek moleküllerin mekanik özelliklerini araştırmaya uygun hale getirilmesini kapsamaktadır (Danış, 2013).

KAYNAKLAR DİZİNİ

- Ashkin, A., 1970, Acceleration and Trapping of Particles by Radiation Pressure, Phys. Rev. Lett., 24, 156-159 p.
- Ashkin, A., Dziedzic J.M., 1971, Optical Levitation by Radiation Pressure, Appl Phys Lett., 19,283 p.
- Ashkin, A., 1978, Trapping of Atoms by Resonance Radiation Pressure, Phys. Rev. Lett., 40, 729–732 p.
- Ashkin, A., Dziedzic J., Bjorkholm J., Chu S., 1986, Observation of A Single-Beam Gradient Force Optical Trap For Dielectric Particles, Opt Lett., 11, 288–290 p.
- Ashkin, A. and Dziedzic, J.M., 1987, Optical Trapping and Manipulation of Viruses and Bacteria, Science, 235, 1517-1520 p.
- Bronkhorst, P., Grimbergen J., Sixma, J. Heethaar, R., Brakenhoff G., 1996, Manipulation of Red Blood Cells Using Optical Trapping, Elsevier, 65, 204-204 (1) p.
- Clement –Sengewald, A., Schütze, K., Ashkin, A., Palma, G. A., Kerlen, G. and Brem G., 1996, Fertilization of Bovine Oocytes Induced Solely with Combined Laser Microbeam and Optical Tweezers, Journal of Assisted Reproduction And Genetics, 13, 3, 259-265 p.
- Christiansen, M., 2008, Optical Studies of Membrane-Peptide Interactions, 83 p.
- Danış, A., 2013, Optik Tuzaklama Düzenegine Hassas Konum Belirleme Ünitesi Entegrasyonu ve Düzenek Otomasyonu, Yüksek Lisans Tezi, ESOGÜ, 75 s. (yayımlanmamış)

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Finer, J.T., Simmons, R.M., Spudich, J.A., 1994, Single Myosin Molecule Mechanics: Piconewton Forces and Nanometre Steps, *Nature*, 368, 113–119 p.
- Guo, H.L., Liu, C.X., Duan, J.F, Jiang, Y.Q, Han, X.H., Li Z.L., Cheng B.Y., Zhang D.Z., 2004, Mechanical Properties of Breast Canser Cell Membrane Studied with Optical Tweezers, *Chin. Phys.Lett.*, 21, 2543-2546 p.
- Mehta, A.D., Spudich, J.A., 1998, Single Myosin Molecule Mechanics, *Adv Struct Biol*, 5, 229–270 p.
- Mehta, A.D., Rock, R.S., Rief, M., Spudich, J.A., Mooseker, M.S., Cheney, R.E., 1999, Myosin-V is A Processive Actin-Based Motor, *Nature*, 400, 590–593 p.
- Manosas, M., Wen, J.D., Li, P.T.X., Smith, S.B., Tinoco, Jr, I. and retort, F., 2007, Force Unfolding Kinetics of RNA using Optical Tweezers. II. Modeling Experiments, *Biophysical Journal*, 92, 3010–3021 p.
- Neuman, K.C., Block, S.M., 2004, Optical Trapping, *Rev. Sci. Instrum.*, Vol. 75, No. 9, 2787-2809 p.
- Ohlinger, A., Deak, A., Lutich, A.A. and Feldmann J., 2012, Optically Trapped Gold Nanoparticle Enables Listening at the Microscale, *PRL*, 108, 5 p.
- Rief, M., Rock, R.S., Mehta, A.D., Mooseker, M.S., Cheney, R.E., Spudich, J.A., 2000, Myosin-V stepping kinetics: A Molecular Model for Processivity, *PNAS*, 97, 17, 9482–9486 p.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)





- Rock, R.S., Rice, S.E., Wells, A.L., Purcell, T.J., Spudich, J.A., Sweeney, H.L., 2001, Myosin VI is A Processive Motor with A Large Step Size, PNAS, 98, 24, 13655–13659 p.
- Smith, S. B., Cui Y, Bustamante C. 1996, Overstretching B-DNA: The Elastic Response of Individual Double-Stranded and Single-Stranded DNA Molecules. Science, 271, 5250, 795-799 p.
- Spudich, J.A., Rice, S.E., Rock, R.S., Purcell, T.J. and Warrick H.M., 2008, Optical Traps to Study Properties of Molecular Motors, CSHL Press, 1305-1318 p.
- Svoboda, K., Schmidt, C.F., Schnapp, B.J., Block, S.M., 1993, Direct Observation of Kinesin Stepping by Optical Trapping Interferometry, Nature, 365,721–727 p.
- Svoboda, K., Block, S.M., 1994, Biological Applications of Optical Forces, Annual Reviews, 23, 247-285 p.
- Visscher, K., Schnitzer, M.J., Block, S.M., 1999, Single Kinesin Molecules Studied with A Molecular Force Clamp, Nature, 400, 184–189 p.
- Wang, M.D., Schnitzer M.J., Yin, H., Landick, R., Gelles, J., Block, S.M., 1998, Force and Velocity Measured for Single Molecules of RNA Polymerase, Science, 282, 902–907 p.
- Zhang, H., Liu K.K. and Haj A. E., 2009, Opto-Mechanical Manipulation of Stem Cells, The Open Nanomedicine Journal, 2, 10-14 p.

EKLER

EK-A



Optik tuzaklamada ışın yolu ayarı yapılırken kullanılan optik bileşenlerin açık ismi, tanımı, modeli ve resmi;

Çizelge A.1 Optik bileşenlerin açık şekilde ismi, modeli ve resmi

TUZAKLAMA BİLEŞENLERİ		
Optik bileşenin ismi (varsa kısaltması)	Üretici firma/model	Resim
Aktif sönümlenme teknolojisine sahip 120cm-240cm-30 cm ölçülerinde titreşim yalıtım masası ve masanın ayakları	Newport, M-ST-48-12 Smart Table, USA ve Newport, I-2000-N23.5, USA	
Hava kompresörü	Thorlabs Inc., PTA 511, USA	
1.5 W güce sahip DSSL ND: YAG ($\lambda=1064$ nm) tuzaklayıcı lazer	Crystalaser, IRCL-1.5 W-1064, USA	
5 mW güce sahip ($\lambda=532$ nm) dedeksiyon lazeri	Crystalaser, GCL-005-532-M, USA	

30 mm kafes için dik açılı kinematik ayna tutucu, (KA)	Thorlabs Inc., KCB1/M, USA	
$\phi 1''$ çapında gümüş kaplı geniş band ayna	CVI, PS-PM-1037-C, USA	
1.5" çapında post (40 mm uzunluğunda)	Thorlabs Inc., TR40/M, USA	
Post tabanı,	Thorlabs Inc., BA1/M, USA	
ER2 kafes çubuğu	Thorlabs Inc., ER2, USA	
ER4 kafes çubuğu	Thorlabs Inc., ER4, USA	
ER6 kafes çubuğu	Thorlabs Inc., ER6, USA	
ER8 kafes çubuğu	Thorlabs Inc., ER8, USA	
SM1 dişli, kolla ayarlanabilir iris diyafram	Thorlabs Inc., SM1D12, USA	
30 mm kafes yapı ile uyumlu kinematik kafes küpü (KK)	Thorlabs Inc., C6W, USA	

<p>$\phi 1''$ çapında dikroik ayna (Cutoff= 725 nm),(DA1)</p>	<p>AHF Analysentec., 725DCSPXR, Germany</p>	
<p>Kinematik kafes kp optik tutucu tabanlığı</p>	<p>Thorlabs Inc., B4C/M, USA</p>	
<p>Optik tutucu</p>	<p>Thorlabs Inc., B5C/M, USA</p>	
<p>Kapalı kafes kp tabanlığı</p>	<p>Thorlabs Inc., B1C/M, USA</p>	
<p>KK için kafes kp portu sonlandırıcısı</p>	<p>Thorlabs Inc., SM1CP2, USA</p>	
<p>30 mm-60 mm kafes plaka adaptrleri</p>	<p>Thorlabs Inc., LCP02, USA</p>	
<p>$\phi 1''$ çapında plano-konveks mercek (IR için AR, f=150 mm)</p>	<p>New Focus, 5611-322-C1, USA</p>	
<p>30 mm kafes için XY optik öteleyici (± 3 mm)</p>	<p>Thorlabs Inc., ST1XY-S/M, USA</p>	

1" çapında ayarlanabilir odak adaptörü	Thorlabs Inc., SM1V10, USA	
1" çapında lenslere uygun 1" derinliğinde tüp	Thorlabs Inc., SM1L10, USA	
$\phi=1.5$ " çapında postlar için post tabanı	Thorlabs Inc., PB2/M, USA	
$\phi=1.5$ " çapında post uzatması (0.5" uzunluğunda)	Thorlabs Inc., PS5M, USA	
$\phi=1.5$ " çapında post (100 mm uzunluğunda)	Thorlabs Inc., P100/M, USA	
30 mm kafes için XY optik öteleyici (± 1 mm)	Thorlabs Inc., HPT1, USA	
$\phi 1$ " plano-convex mercek (IR için AR, f=100 mm) ARC: 650-1050 nm	Thorlabs Inc., LA1509-B, USA	
ER2 çubuğu	Thorlabs Inc., ER2, USA	
Çubuk adaptörü	Thorlabs Inc., ERSCA, USA	

<p>Kanallı profiller</p>	<p>Sigma Profil, Doğuş Kalıp Metal Form San. Tic. Ltd. Őti., İstanbul</p>	
<p>100X, 1.30 NA, 0.20 mm çalışma aralığına sahip “oil immersion” mikroskop objektifi</p>	<p>Nikon, 100X Plan Fluor CFI, Japan</p>	
<p>Tek eksenli öteleyici (±35 mm), kaba ötelemeye kullanılır.</p>	<p>GMT-Linear, MC1B-90, Taiwan</p>	
<p>Hassas z öteleyicisi</p>	<p>Newport, M433 ve SM-50, USA</p>	
<p>φ=1.5” çapında post (250 mm uzunluğunda)</p>	<p>Thorlabs Inc., P250/M, USA</p>	
<p>φ=1.5” çapında postlar için post tutucu kısaç plakası</p>	<p>Thorlabs Inc., C1501/M, USA</p>	


30 mm kafes için XY optik öteleyici (± 1 mm)	Thorlabs Inc., HPT1, USA	
SM1 tüp adaptörü 0.5" derinliğinde dış dişli	Thorlabs Inc., SM1T2, USA	
SM1-M25 adaptör (SM1 dış dişli- M25 iç dişli)	Thorlabs Inc., SM1A12, USA	
40X ve 0.65 NA Kondenser	Olympus, EA40, Japan	
30 mm kafes için XY optik öteleyici (± 1 mm)	Thorlabs Inc., HPT1, USA	
SM1-RMS adaptör (SM1 dış dişli- RMS iç dişli)	Thorlabs Inc., SM1A3TS, USA	
60 mm kafes için kafes plakası	Thorlabs Inc., LCP01/M, USA	

<p>Tek eksenli öteleyici (± 35 mm), kaba ötelemede kullanılır.</p>	<p>GMT-Linear, MC1B-90, Taiwan</p>	
<p>$\phi = 1.5''$ çapında post (200 mm uzunluğunda)</p>	<p>Thorlabs Inc., P200/M, USA</p>	
<p>$\phi = 1.5''$ çapında postlar için post tutucu kısaç plakası</p>	<p>Thorlabs Inc., C1501/M, USA</p>	
<p>Geniş post tabanı</p>	<p>Thorlabs Inc., BA2/M, USA</p>	
<p>0,01 μm XY hassasiyetine sahip lineer kodlanmış mekanik platform, kaba ayar için kullanılır.</p>	<p>Prior, H117EIN4, UK</p>	
<p>Piezo platform; hassas ayar için kullanılır.</p>	<p>Jenna, PXY 151 kapasitif ölçüm sistemi, Germany</p>	
<p>Mekanik platform için kontroller ünitesi</p>	<p>Prior, ProScan III, UK</p>	

Mekanik platformun manuel kontrolü için joystick	Prior, PS3J100, UK	
7X ışın genişletici ($\lambda=1064$ nm lazer için)	CVI, CWBX-6.0-7X-1064, USA	
10X ışın genişletici ($\lambda=532$ nm lazer için)	CVI, CWBX-4.5-10X-532, USA	
1" hareket kabiliyetine sahip XYZ öteleme sistemi	Newport, M-462-XYZ-M, USA	
Yarım dalga plaka	CVI, QWPO-1064-10-2-R10, USA	
Yarım dalga plaka tutucusu	CVI, 1100-10M, USA	
Glan-Thomson polarizörü	CVI, CLPG-8.0-670-1064, USA	
Glan-Thomson polarizörü tutucusu	New Focus, 9092/M, USA	





Görüntüleme Bileşenleri		
Optik bileşenin ismi ve tanımı (varsa kısaltması)	Üretici firma/model	Resim
30 mm'lik kafes yapılarla uyumlu kafes küpü	Thorlabs Inc., C6W, USA	
Kinematik kafes küpü optik tutucu tabanlığı	Thorlabs Inc., B4C/M, USA	
Kafes küpü optik tutucusu	Thorlabs Inc., B5C/M, USA	
Kapalı kafes küpü tabanlığı	Thorlabs Inc., B1C/M, USA	
Kafes küpü portu sonlandırıcısı	Thorlabs Inc., SM1CP2, USA	
ER8 kafes çubuğu	Thorlabs Inc., ER8, USA	
Geniş band metalik ayna	Thorlabs Inc., ME1-P01, USA	
CCD kamera	Samsung, SCC-B1091P, South Korea	

<p>$\phi 1''$ plano-konveks mercek (IR için AR, $f=200$ mm) ARC: 650-1050 nm</p>	<p>Thorlabs Inc., LA1708-B, USA</p>	
<p>1" çapında ayarlanabilir odak adaptörü</p>	<p>Thorlabs Inc., SM1V10, USA</p>	
<p>SM1 tüp adaptörü 1" derinliğinde dış dişli</p>	<p>Thorlabs Inc., SM1T10, USA</p>	
<p>1" çapında lenslere uygun 3" derinliğinde tüp</p>	<p>Thorlabs Inc., SM1L30, USA</p>	
<p>$\phi 1''$ ND filtre (Optik yoğunluk=1.0)</p>	<p>Thorlabs Inc., NE10B, USA</p>	
<p>SM1 tüp adaptörü 0.5" derinliğinde iç dişli</p>	<p>Thorlabs Inc., SM1M05, USA</p>	
<p>5 mm sütun post spacer</p>	<p>Thorlabs Inc., RS02, USA</p>	
<p>25 mm Pedestal sütun postu uzatması</p>	<p>Thorlabs Inc., RS25/M, USA</p>	
<p>50 mm pedestal sütun postu</p>	<p>Thorlabs Inc., RS2P/M, USA</p>	

Çatal kısıkaç	Thorlabs Inc., CF175, USA	
30 mm kafes için kalın kafes plakası	Thorlabs Inc., CP02T/M, USA	
SM1 tüp adaptörü 0.5" derinliğinde dış dişli	Thorlabs Inc., SM1T2, USA	
SM1 dişli, kolla ayarlanabilir iris diyafram	Thorlabs Inc., SM1D12, USA	
SM1-C adaptör (SM1 iç dişli- C mount dış dişli)	Thorlabs Inc., SM1A9, USA	
ER8 kafes çubuğu	Thorlabs Inc., ER8, USA	

Gözlem aksesuarları; optik tuzak düzeneğinin kurulum aşamasında gözle algılanamayan IR ışınının optik eksenle çakışık olup olmadığını görebilmek için IR görüntüleyici kullanıldı. Ayrıca kurulumun tüm aşamasında hem 532 nm dalgaboylu lazer ışını hemde 1064 nm dalgaboylu lazer ışınının göze zarar verme riskini engellemek için koruyucu gözlük kullanıldı.

Çizelge A.2 Gözlem ve ayar aksesuarları

Optik bileşenin ismi ve tanımı (varsa kısaltması)	Üretici firma/model	Resim
IR lazer için (830-1064 nm) koruyucu gözlük	Thorlabs Inc., LG9, USA	
IR görüntüleyici kamera	Newport, IRV2-1700, USA	
Ayar plakası	Thorlabs Inc., CPA1, USA	
30 mm kafes için ayarlama plakası (IR hedef)	Thorlabs Inc., VRC4CPT, USA	
SM1 dişli, yüzükle ayarlanabilir iris diyafram	Thorlabs Inc., SM1D12D, USA	
IR ışını izleme kartı	Thorlabs Inc., VRC2, USA	