İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

SİLİNDİRİK ODAKLI LAZER HÜZMELERİ İLE YÜZEY TEMİZLEME VE CAM İŞLEME ÇALIŞMALARI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Tuğba TUNAY

Fizik Mühendisliği Anabilim Dalı

Fizik Mühendisliği Programı

Anabilim Dalı : Herhangi Mühendislik, Bilim
Programı : Herhangi Program

MAYIS 2015

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

SİLİNDİRİK ODAKLI LAZER HÜZMELERİ İLE YÜZEY TEMİZLEME VE CAM İŞLEME ÇALIŞMALARI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Tuğba TUNAY
(509101135)

Fizik Mühendisliği Anabilim Dalı

Fizik Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Selçuk AKTÜRK
Anabilim Dalı : Herhangi Mühendislik, Bilim
Programı : Herhangi Program

MAYIS 2015

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 509101135 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi **Tuğba TUNAY**, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı **"SİLİNDİRİK ODAKLI LAZER HÜZMELERİ İLE YÜZEY TEMİZLEME VE CAM İŞLEME ÇALIŞMALARI"** başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı :	**Doç. Dr. Selçuk AKTÜRK** İstanbul Teknik Üniversitesi	.....
Jüri Üyeleri :	**Doç. Dr. Ahmet Levent Subaşı** İstanbul Teknik Üniversitesi	.....
	Yrd. Doç. Dr. Mehmet Fevzi Uğuryol Yıldız Teknik Üniversitesi	.....

Teslim Tarihi : **29 Nisan 2014**
Savunma Tarihi : **28 Mayıs 2015**

Babama,

ÖNSÖZ

Öğrencisi olduğum süre boyunca kendimi geliştirmem için beni yönlendiren, bilgi, tecrübe ve ileri görüşlülüğüyle çalışmama ışık tutan, bu çalışmayı bana vererek ufkumu genişleten çalışmamın yöneticisi Sayın Hocam Doç. Dr. Selçuk Aktürk'e,
Yüksek lisansımı İTÜ'de yapmama vesile olan ve lisans eğitimimde engin bilgilerinden yararlandığım, değerli hocam Prof. Dr. Hamit Yurtseven'e,
Tezimin hazırlanması sırasında beni cesaretlerinden ve manevi desteğini eksik etmeyen, çalışmama önemli katkıları olan, vaktini ve emeğini ayıran değerli arkadaşım, çalışma arkadaşım ve okulumuzun araştırma görevlilerinden Uzm. Tansu Ersoy'a,
Çalışmamın bir kısmını birlikte yürüttüğümüz, fikirlerinden yararlandığım, çalışma arkadaşım Arş. Gör. Ramazan Şahin'e,
Yardımseverlik ve dostluklarını benden esirgemeyen, güler yüzlü çalışma arkadaşlarım Arş. Gör. Berna Yalızay ve Yağız Morova'ya,
Yüksek lisansımda geçirdiğim süre boyunca varlıklarıyla bana umut ve güç veren aileme ve arkadaşlarıma, teşekkürü bir borç bilirim.
Bu çalışmayı, maddi ve manevi imkânsızlıklarda desteğini esirgemeyen, her zaman yanımda olan aileme ve fizikçi olmamı isteyen, çok özlediğim merhum babama ithaf ederim.

Mayıs 2015

Tuğba Tunay
(Fizikçi)

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ ..... **vii**
İÇİNDEKİLER ..... **ix**
KISALTMALAR ..... **xi**
ÇİZELGE LİSTESİ ..... **xiii**
ŞEKİL LİSTESİ ..... **xv**
ÖZET ..... **xix**
SUMMARY ..... **xxi**
1. GİRİŞ **1**
1.1 Femtoaniye Lazer ile Malzeme İşleme 1
1.2 Lazer Hüzmeleri 1
1.3 Silindirik (Astigmatik) Odaklama 4
2. YÜZEY TEMİZLİĞİ UYGULAMALARI **9**
2.1 Lazerle Eser Temizliği Literatür Özeti 9
2.1.1 Genel Bakış 9
2.1.2 Kâğıt Temizliği 12
2.2 Deneysel Düzenek 12
2.2.1 Teori 12
2.2.2 Femtosaniye Lazer ile Temizleme 14
2.2.3 Karakterizasyon 16
2.2.3.1 Renk ölçüm çalışmaları 16
2.2.3.2 Mikroskop Görüntüleri 19
2.2.3.3 EDS Analizi 21
2.2.3.4 Mekanik Güç 22
2.3 Deneysel Sonuçlar 25
3. LAZERLE CAM İŞLEME UYGULAMALARI **29**
3.1 Literatür Özeti 29
3.1.1 Genel 29
3.1.2 Cam 30
3.1.3 Fiber Bragg ızgaralar 31
3.1.3.1 Fiberler 31
3.1.3.2 Fiber Bragg ızgaralar 32
3.2 Deneysel Düzenek 388
3.2.1 Cam üzerinde kırılma indisi değişimi fabrikasyonu 39
3.2.2 Cam üzerindeki Bragg ızgaraların karakterizayonu 42
3.3 Fiber Bragg Izgara Fabrikasyonu 46
3.3.1 Örneklerin hazırlanması 46
3.3.2 Fs lazer ile ızgara yazımı 46
3.3.3 Fiber Bragg ızgaraların karekterizasyonu 49
3.4 Sonuçlar 52
4. SONUÇ VE ÖNERİLER **54**
KAYNAKLAR **57**
ÖZGEÇMİŞ **65**

KISALTMALAR

EDS : Elektron Dağıtıcı X-Işını Spektrometresi (Energy Dispersive X-ray Spectroscopy)
TEM : Enine Elektrik ve Manyetik Mod (Transeverse Mode)
SEM : Taramalı Elektron Mikroskopu (Scanning Electron Microscope)
TST : Çekme Deneyi (Tensile Stress Test)
Yb: Cam Lazeri: İterbiyum Katkılı Cam lazeri
fs : Femtosaniye (Femtosecond)
FBG : Fiber Bragg Izgara (Fiber Bragg Grating)
CW : Sürekli Dalga (Continuous Wave)
UV : Morötesi (Ultraviolet)
LSFM : Işık Taramalı İki Boyutlu Flüoresans Görüntüleme (Light Sheet Fluorescence Microscopy)
N.A. : Sayısal Açıklık (Numerical Aperture)
DC : Doğru Akım (Direct Current)
AC : Alternatif Akım (Alternating Current)

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 : Fs lazerle temizleme işleminde kullanılan kâğıt tipleri listesi. 14
Çizelge 2.2 : Temizlenmiş tarihi kâğıtların EDS analiz sonuçları..... 21
Çizelge 3.1 : Bragg dalgaboyunun alabileceği teorik değerler 65

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 : Hüzme genişliği ve spot genişliğinin gösterimi 3
Şekil 1.2a : Plano-konveks lens illüstrasyonu. 5
Şekil 1.2b : Plano-konkav lens illüstrasyonu. 5
Şekil 1.3a : Plano-konveks lenste çizgisel odaklama. 5
Şekil 1.3b : Plano-konkav lenste çizgisel odaklama. 5
Şekil 1.4 : Lens sistemine girebilen maksimum açı 'Φ_{max}' ın gösterimi. 6
Şekil 2.1a : Mekanik temizlemede kullanılan gereçler. 10
Şekil 2.1b : Mekanik temizlemede kullanılan gereçler. 10
Şekil 2.1c : Kimyasal süngerle ne kadar kir kaldırılabildiğinin bir örneği. 10
Şekil 2.2 : Mekanik yüzey temizleme, kimyasal temizleme, su banyosu ve buharlı nem uygulamalarının örnekleri. 11
Şekil 2.3 : Temizleme işleminde kullanılan deneysel düzenek. 15
Şekil 2.4 : CIE L*a*b* Renk Evren Modeli. 17
Şekil 2.5 : Çeşitli güçlerde işlenen, yapay olarak eskitilmiş ve kirletilmiş kâğıtların renk ölçüm sonuçları. 18
Şekil 2.6 : Değişik güçlerde işlenmiş, B1,B2 ve B3 kodlu tarihi el yazmalarının renk ölçüm sonuçları. 18
Şekil 2.7a : A1 kodlu örneğin işlenmemiş kısmının optik mikroskop görüntüleri. 20
Şekil 2.7b : A1 kodlu örneğin 150mW güçle işlenmiş kısmının optik mikroskop görüntüleri. 20
Şekil 2.7c : A1 kodlu örneğin 227mW güçle işlenmiş kısmının optik mikroskop görüntüleri. 20
Şekil 2.7d : A2 kodlu örneğin işlenmemiş kısmının optik mikroskop görüntüleri. 20
Şekil 2.7e : A2 kodlu öreneğin 150mW güçle işlemiş kısmının optik mikroskop görüntüleri. 20
Şekil 2.7f : A2 kodlu örneğin 210mW güçle işlenmiş kısmının optik mikroskop görüntüleri. 20
Şekil 2.8a : B1 kodlu tarihi eserin,temizlenmemiş yüzeyinin SEM görüntüsü. ... 18
Şekil 2.8b : B1 kodlu tarihi eserin, 200mW ile temizlenmiş yüzeyinin SEM görüntüsü. 21
Şekil 2.8c : B1 kodlu tarihi eserin temizlenmemiş yüzeyinin SEM görüntüsü. ... 21
Şekil 2.8d : B1 kodlu tarihi eserin, 80mW ile temizlenmiş yüzeyinin SEM görüntüsü. 21
Şekil 2.9 : 'dog bone' şeklinde kesilmiş örneğin illustrasyonu. 23
Şekil 2.10 : Çekme deney düzeneği. 23
Şekil 2.11a : A1 kodlu örneğin, farklı güçlerde temizlenmiş bölgelerine ayrı ayrı uygulanmış çekme testinin sonuçları. 25
Şekil 2.11b : A2 kodlu örneğin, farklı güçlerde temizlenmiş bölgelerine ayrı ayrı uygulanmış çekme testinin sonuçları. 25
Şekil 2.11c : A3 kodlu örneğin, farklı güçlerde temizlenmiş bölgelerine ayrı ayrı uygulanmış çekme testinin sonuçları. 25
Şekil 2.11d : A4 kodlu örneğin, farklı güçlerde temizlenmiş bölgelerine ayrı ayrı uygulanmış çekme testinin sonuçları. 25
Şekil 2.12a : Aşırı ağarma meydana gelmiş bir tarihi eser örneği. 26

Şekil 2.12b **:** Düşük güçle çalışılmış,bir miktar yapıştırıcının yüzeyde kaldığı ancak aşırı ağarmanın oluşmadığı bir tarihi kâğıt örneği. 26
Şekil 3.1 **:** Fiber optik kablonun kesiti,katmanları ve katman çapları. 31
Şekil 3.2 **:** Fiberde periyodik olarak oluşturulmuş Bragg ızgaralarının basit bir şeması 33
Şekil 3.3a **:** Fiber Bragg ızgaradan yansıyan güç miktarının dalga boyuna göre değişimi. 34
Şekil 3.3b **:** Fiber Bragg ızgaradan iletilen güç miktarının dalga boyuna göre değişimi 34
Şekil 3.3c **:** Izgara uzunluğuna bağlı olarak yansıyan güç miktarının değişimi.... 34
Şekil 3.3d **:** Fiber Bragg ızgaradan yansıyan güç miktarının Δn değerlerine bağlı olarak dalga boyuna göre değişimi. 34
Şekil 3.4 **:** Cam üzerinde kırılma indisi değişimi fabrikasyon deney düzeneği .. 40
Şekil 3.5a **:** Camda 1030 nm femtosaniye lazer taramasıyla oluşturulan ızgaraların optik mikroskop görüntüleri Solda 200 μm genişliğinde,10 μm periyotlu ızgaralar, sağda200 μm genişliğinde 5 μm periyotlu ızgaralar. 41
Şekil 3.5b **:** Camda 1030 nm femtosaniye lazer taramasıyla oluşturulan 200 μm genişliğinde,5 mikron periyotlu ızgaraların optik mikroskop görüntüleri. 41
Şekil 3.5c **:** Camda 1030 nm femtosaniye lazer taramasıyla oluşturulan 200 μm genişliğinde, 4 μm periyotlu ızgaralar ızgaraların optik mikroskop görüntüleri 41
Şekil 3.6 **:** Camın işlenmiş ve işlenmemiş bölgelerine 632 nm dalga boylu He-Ne lazer ışınları düşürerek girişim yaparak oluşturduğu saçakların CCD kamera görüntüsüne ait deney düzeneği. 45
Şekil 3.7a **:** Cam numunenin işlenmemiş kısmına ait CCD kamera görüntüsü. ... 45
Şekil 3.7b **:** Cam numunenin 10 μm periyotla işlenmiş kısmına ait CCD kamera görüntüleri. 45
Şekil 3.7c **:** Cam numunenin işlenmemiş kısmına ait CCD kamera görüntüleri. 45
Şekil 3.7d **:** Cam numunenin 5 μm işlenmiş kısımlarına ait CCD kamera görüntüleri. 43
Şekil 3.8a **:** Cam numunenin işlenmemiş yüzeyin CCD görüntüsünün Matlab Analizi. 46
Şekil 3.8b **:** Cam numunenein 5 μm ızgara periyodu ile işlenmiş yüzeyin CCD görüntülerinin Matlab Analizi. 46
Şekil 3.9 **:** Fs lazer ile Fiber Bragg Izgara fabrikasyonu deney düzeneği. 47
Şekil 3.10a **:** 15mW güçle işlenmiş Fiber Bragg ızgaraların optik mikroskop görüntüleri. 48
Şekil 3.10b **:** 20mW güçle işlenmiş Fiber Bragg ızgaraların optik mikroskop görüntüleri. 48
Şekil 3.10c **:** 25mW güçle işlenmiş Fiber Bragg ızgaraların optik mikroskop görüntüleri. 48
Şekil 3.10d **:** 30mW güçle işlenmiş Fiber Bragg ızgaraların optik mikroskop görüntüleri. 48
Şekil 3.11 **:** Fiber Bragg ızgaraların spektroskopi analizi için kurulan spektrometre düzeneğinin şeması. 49
Şekil 3.12 **:** 15mW güçle yazılmış Fiber Bragg Izgaraların spektroskopi

analizi sonuçları..... 50
Şekil 3.13 **:** 20mW güçle yazılmış Fiber Bragg Izgaraların spektroskopi analizi sonuçları..... 50
Şekil 3.14 **:** 25mW güçle yazılmış Fiber Bragg Izgaraların spektroskopi analizi sonuçları..... 51
Şekil 3.15 **:** 30mW güçle yazılmış Fiber Bragg Izgaraların spektroskopi analizi sonuçları..... …51

SİLİNDİRİK ODAKLI LAZER HÜZMELERİ İLE YÜZEY TEMİZLEME VE CAM İŞLEME ÇALIŞMALARI

ÖZET

Günümüzde, optik ve fotonik teknolojinin temel yapısını teşkil etmektedir. Optik teknolojisindeki hızlı ve büyük gelişmeler, lazer kullanımının yaygınlaşmasına yol açmıştır. Özellikle, bilimsel ve teknolojik uygulamalarda, belirli bir dalga boyunda çalışan ve kısa süreli darbeler üreten kaynaklara duyulan yaygın ihtiyaç femtosaniye (fs) lazer uygulamalarının önemini arttırmaktadır. Fs lazer tekniği hassas metroloji uygulamaları, biyomedikal görüntüleme, doğrusal olmayan optik, yüzey temizleme ve mikroişleme çalışmaları gibi pek çok alanda kullanılmaktadır. Bilhassa, ultrahızlı lazerle yüzey temizleme ve cam işleme çalışmaları gelişim göstermek için yüksek potansiyele sahiptir.

Femtosaniye lazerler ultra kısa atımlar yapar. Bu şekilde, her atımın kullandığı lazer enerjisi az olur ve çevresel dokularda ısısal ve mekanik hasarlar minimize edilmiş olur. Kısa darbeli lazerlerin bir diğer avantajı ise geçirgen yapılardan metal gibi yansıtıcı yüzeylere kadar pek çok malzeme üzerinde, foto duyarlılığa gereksinim olmadan kullanılabiliyor olmasıdır. Diğer yandan, bu yoğun, kızılötesi ışınlar silindirik bir mercek ile çizgisel odaklandığında bir seferde pek çok noktayı işlemek mümkün olur. Bu nedenle, bu çalışmada, fs lazer ışınlarını astigmatik odaklayarak tarihi kâğıtlar üzerindeki kirlerin hassas temizliği ve cam çekirdekli fiberlere Bragg ızgaralar yazımı üzerinde durulmuştur.

Tarihi eserlerin korunması var olan hasarları ortadan kaldırmak ve gelecekte oluşabilecek hasarların önüne geçmek ilkesine dayanır. Bu bağlamda eser temizliği konservasyon sürecinin önemli bir konusudur. Özellikle eski kâğıt eserler çok hassas ve kırılgan yapıda olduğundan, kâğıda mekanik hasar vermeden, fiziksel ve kimyasal özelliklerini bozmadan dikkatle temizlemek gerekir. Lazer ile ablasyon onlarca yıldır tarihi eser temizliğinde kullanılmakta ve başarılı sonuçlar vermektedir. Bu yöntemin temassız ve kimyasalsız oluşu, hassas ve kırılgan yüzeyleri işlemede geleneksel yöntemlerin önüne geçmesi, yakın zamanda tarihi değeri olan kâğıtların korunumunda da kullanılmasını gündeme getirmiştir.

Çalışmanın birinci aşamasında, femtosaniye lazerlerin kâğıda fiziksel ve kimyasal zarar vermeden, yüzeydeki kirleri temizlemede etkin bir yöntem olarak kullanılabileceği gösterilmeye çalışılmıştır. Lazerle temizleme işlemi sonrasında kâğıdın rengi, kimyasal yapısı, selüloz liflerinin bütünlüğü ve mekanik gücü gibi özellikleri üzerinde meydana gelebilecek değişimler araştırılmıştır. Lazer kaynağı olarak 1030 nm dalga boylu Yb: Cam femtosaniye lazeri kullanılmış ve örnekler bilgisayarla hassas kontrolü sağlanarak üç boyutta hareket ettirilebilen motor üzerine yerleştirilmiştir. Gaussiyen lazer hüzmesinin örnek üzerine çizgisel odaklanabilmesi için silindirik mercek kullanılmıştır. Lazerin gücü, motorun hızı, motorun adım aralığı ve silindirik merceğin odak uzaklığı değiştirilerek örneğin orijinal yapısını bozmadan etkin bir temizlik yapabilmek için uygun parametreler belirlenmiştir.

Son yıllarda, optik dalga kılavuzları, şeffaf malzemelere gömülü yansıtıcı ızgaralar ve üç boyutlu fotonik cihazların üretilmesi de birçok optik uygulama için gerekli hale gelmiştir. Sıkıca odaklanmış lazer ışınları ile fiberin cam çekirdeği içine Bragg ızgaraları yazarak bu yeni optik cihazlar başarıyla oluşturulabilir.

Şu anda, ultraviyole (UV) ışın teknolojisi ile camda kırılma indisi değişimi oluşturulabilmektedir; ancak, UV uygulamaları camın fotoduyarlılığı ile sınırlıdır. Örneklerin UV ışığa duyarlılığını arttırmak için germanyum katkılama ya da hidrojenle fotosensitizasyon gibi ilave işlemler gerekli olabilir. Ayrıca, UV ışınla oluşturulmuş kırılma indisi modülasyonları çok yüksek sıcaklıklarda silinebilmektedirler.

Bununla birlikte, son yıllarda yeni bir teknik orta atılmıştır: Ultra hızlı lazer darbeleriyle fiberde Bragg ızgara yazımının UV ışığın sınırlarının ötesine geçtiği görülmüştür. Bu sayede, herhangi bir yabancı madde kakılamaya gerek kalmadan, şeffaf malzeme içinde kırılma indisi değişikliği meydana getirilebilir. Çünkü, fs lazer hüzmeleri geçirgen bir malzemeye sıkı odaklandığında, doğrusal olmayan bir emilim gerçekleşir; optik kırılmalar ve mikro plazmalar oluşumuna sebep olur. Ayrıca, kısa darbeli lazerle oluşturulan ızgaralar yüksek sıcaklıklara dayanıklılık göstermektedir. Bu nedenlerle, kızılötesi ışınla Bragg ızgara yazım tekniğinin UV ışın tekniğinden daha kapsamlı olduğu görülmektedir.

Cam işleme çalışmasında kullanılan Yb: Cam fs lazerinin tekrarlama frekansı 1kHz, darbe süresi 550 fs ve dalga boyu 1030 nm'dir. 75 mW ortalama güçte çalışılmıştır. Hüzmeler 25 mm ve 75 mm'lik silindirik lensler ile 1 mm kalınlığında camlara ve 60μm çaplı fiber çekirdeğine odaklanmıştır. Mikron hassasiyetinde hareket edebilen plakalar sayesinde örneklerin üç boyutlu hareketi sağlanmıştır. İşleme süresi bilgisayara bağlı bir perde ile kontrol edilmiş ve her ızgara için 100 ms olarak ayarlanmıştır. Cam örneklerin karakterizasyonu için Mach-Zehnder spektrometresi, fiberdeki yapıların karakterizasyonu için Ava Spec 3648 fiber optik spektrometre kullanılmıştır.

Araştırmalarımız ortaya koymuştur ki, astigmatik odaklı femtosaniye lazer hüzmeleri ile aharlı ve aharsız kâğıt yüzeyi temizliği başarılı sonuçlar vermektedir. Ayrıca, IR ışın yayan fs lazerler ile fiber çekirdeğinde girişim oluşturarak Bragg ızgaralar yazmanın, standart UV lazeri ile FBG yazımı teknikleri kadar kolay uygulanabildiği gösterilmiştir.

SURFACE CLEANING AND GLASS PROCESSING STUDIES WITH CYLINDIRICAL FOCUSED LASER BEAM

SUMMARY

Today, optics and photonics constitute the principle structure of technology. Rapid and great growths in optical industry has led to the extensive use of lasers. In this respect, femtosecond (fs) lasers have been gaining importance in laser technology since many scientific and technological applications requires a laser system running at a particular wavelength and producing short pulses. Precision metrological applications, measurement of photochemical processes, biological display, nonlinear optics, cleaning processes and micromachining are between the uses of fs lasers. In particular, surface cleaning and glass processing studies with fs laser beams have high potential to develop in optical issues.

Femtosecond lasers have ultrashort laser pulses which reduces used laser energy, thus, thermal and mechanical damages in peripheral structures are minimized. Another advantage of the ultrafast laser beams is that it can be used on various types of materials from transparent substances to reflective ones. Besides, when the infrared beams are focused into a line by a cylindrical lens, it is possible to write many points at a time. Therefore, in this study cylindrical focused fs laser beams will be used in order to ablate contamination on historical papers precisely and to write Bragg gratings in the pure glass.

The main concern of conservation of the historical arts is the cleaning process. The written sources that have historical, artistic and religious significance shows the way to the unknown past. Paper is the basic material of the written sources. In order to save the breakable organic materials like the old paper arts without changing the colour and the mechanical stability, the contamination should be cleaned efficiently. Ultrafast lasers have been quite attractive for cleaning historical arts since it is contactless and clean process. In this process, there is no need to use any solvent and chemical, it can work with micro sensitivity and it is possible to observe the cleaning process simultaneously. Controlling the parameters like the wavelength and the power of the laser light as well as the spatial beam profile determines the efficiency of the conservation.

In the first part of the study, both historical and artificial paper samples were cleaned by using femtosecond pulsed laser. The laser source was Yb: Glass femtosecond laser at central wavelength of 1030 nm. The samples were placed on the micrometer-precision stage which can move in three dimensions. Gaussian laser beams were focused on the surface of sample by using cylindrical lens. For effective cleaning without changing the original colour of sample and damaging the surface, optimum parameters were determined by changing the laser power, speed of stage, step distance of stage and focal length of the cylindrical lens.

In recent years, the fabrication of optical waveguides as well as buried reflective gratings in transparent materials and generating three dimensional photonic devices

are required for many applications in optics, also. By writing fiber Bragg gratings in the glass core of the fiber with firmly focused laser beams, new optical devices can be generated successfully.

Many investigations of generating Bragg Gratings in glasses by UV beams have been handled before. However, laser damage by fs laser beams has received little attention because of its low photon energy. The development of high energy density ultrashort pulse lasers, however, has encouraged the researches of the potential for inducing multiphoton reactions and optical devices in glass. In the second part of the study, the technique of Bragg grating inscription in glass and optical fibers with ultrafast infrared radiation and cylindrical lenses has proven to be as simple as the traditional UV laser grating writing techniques.

The physics behind the FBGs mechanism is that if a glass sample were heated by intense laser beams, the absorption coefficient would increase due to multiphoton interactions and ionization. Therefore optical properties such as refractive index of the glass structure will change. The laser-induced refractive-index change is the base for FBG fabrication since most of the optical fibers have glass cores. Fabricated transparent damage lines inside the glass fiber core will reflect a specific wavelength: Bragg wavelength. In addition, the period of the grating structures will shift when any change occurs in the temperature or the strain. By this way, Bragg gratings inscribed in the glass fibers can be used to measure optical properties and constants by analysing the Bragg wavelength. Therefore, FBGs' optical, thermal and mechanical properties makes them effective for sensing, storing and nonlinear applications.

At present, the UV technologies have been well established to fabricate refractive ındex modulations in samples, however, their application is restricted to the photosensitivity of glass. In order to increase the UV photosensitivity of the sample extra processes like germania dopant or hydrogen photosensitization may be required. Another point is that in thermal applications high temperatures may cause any erasure in the UV-induced refractive index modulation.

However, in recent years, a technique based on ultrafast infrared laser pulses has been demonstrated. The fs inscription method for FBGs goes beyond the limitation of the UV photosensitivity. The interaction between ultrashort pulses and transparent materials results in a refractive index change without the need of any impurities in the optical host. When femtosecond laser pulses are tightly focused into a bulk transparent material, nonlinear absorption in the focal volume will take place, leading to optical breakdown and microplasma formation. This infrared radiation induced visible, transparent structures are also stable at high temperatures. Thus, it can be said that fs Bragg grating inscription methods in optical fibers are more versatile than excimer laser ones.

This new situation has made it necessary to deeply investigate and properly characterize the devices made using the infrared laser beam fabrication technology. With the goal of being able to create optical devices for both optical and photonic innovations it is appropriate to explore the effects of femtosecond laser radiation in the glass and fiber optics. Consequently, a 1030 nm Yb: Glass laser that emits 550-fs, 1-kHz pulses and delivers an average power of 75 mW was used for the glass processing study. The beam was focused through 25mm and 75 mm cylindrical lenses and injected into 1 mm thickness glass and 60μm diameter fiber core. The average energy of the laser beam at the sample location was 75 μJ. With the help of a micro precision XYZ stage, the samples were moved in three dimensions. The exposure time was controlled

with a PC connected shutter and it was 100 ms for every gratings. By focusing the laser beam through cylindrical lenses, we successfully wrote transparent and periodic Bragg gratings inside glasses and optical fiber cores. In order to characterize the structures on the glass Mach Zehnder interferometer was used. And Ava Spec 3648 fiber optic spectrometer was set up for the characterization measurements of fiber Bragg gratings. Spectrometric analysis results of the structures both in the glass and the fiber core were compared with the theoretical expectations.

Our research has demonstrated that surface cleaning of historical papers by astigmatic focused femtosecond laser beams gives good results. Furthermore, writing stable Bragg gratings by creating interference in the fiber core with ultrashort pulses can be applied easily compared with the standard UV laser.

1. GİRİŞ

1.1 Femtosaniye Lazer ile Malzeme İşleme

Femtosaniye (fs) lazerler uzunluğu saniyenin katrilyonda biri mertebesinde olan ultra kısa atımlar yapar [1-2]. Bu tip kısa darbeli lazerlerin avantajı ışığı birkaç mikrondan daha küçük çaplarda odaklaması ve atım enerjisinin çok düşük olmasıdır [2-4]. Uzun atımlı lazerle malzeme işlerken ısının termal difüzyon süresi atım hızından büyük olduğundan, işlenen yerin etrafında önce eriyip sonra katılaşan istenmeyen yapılar oluşabilir. Ultra hızlı lazerlerde ise atımların hızı termal difüzyon hızından büyüktür. Bu sayede ısı madde içinde henüz yayılmadan enerji belli bir noktada yoğunlaşır ve işlenen yer neredeyse erimeden gaz fazına geçer. Buna faz inflakı da denir [1]. Böylelikle hem ışığın yoğunlaştığı alanda güçlü ablasyonlar görülür hem de işlenen bölgenin çevresinde oluşan termal ve mekanik hasar minimize edilmiş olur. Ayrıca, UV lazerlerin aksine duman, buhar ve partiküller de yüksek oranda giderilmiş olur [5-7]. Sonuç olarak, verimi yüksek yerel bir işleme sağlanmış olur.

Femtosaniye lazerin bu özelliği malzeme üzerinde hassas işleme açısından önemli bir avantajdır. Hüzmeler iyi bir şekilde odaklanıp eşik enerjisine yakın enerjiler kullanılırsa malzeme üzerinde mikron ve mikron altı yapılar elde etmek mümkün olur. Dolayısıyla, kısa atımlı lazerler işlenecek malzemenin özelliklerini değiştirmek ya da ablasyon gibi amaçlarla hem geçirgen hem de ışığı soğurabilen malzemeler üzerinde etkili bir biçimde kullanılabilir [7-14].

1.2 Lazer Hüzmeleri

Optikte Gauss huzmesi elektrik alan ve yoğunluk dağılımı Gauss fonksiyonuna benzeyen dalgalara denir. Pek çok lazer Gauss profiline yakın ışık yayar, bu tür lazerlere enine elektrik ve manyetik (TEM) modda çalışan lazerler denir. TEM modundaki dalgalarda elektrik alan ve manyetik alan vektörünün salınım doğrultusundaki bileşeni (z bileşeni) sıfır olarak kılavuzlanır. Silindirik simetriye sahip bir lazerde TEM modları Laguerre polinomu ve Gauss ışın profilinin bir

kombinasyonu olan bir denklem ile ifade edilir. Bu denklemlerin çözümleri TEM_{pl} sembolüyle gösterilir. Burada $p = (0, 1, 2 \dots)$ radyal, $l = (0, 1, 2 \dots)$ açısal mod numaralarıdır. Lazerler yaygın olarak temel enine (TEM_{00}) modda çalıştırılır [15]. Optik lazer rezonatörü TEM_{00} modunda iken gelen ışık kırınım limitindeki bir lensle odaklandığında Gaussiyen dalga başka parametrelerle tanımlanmış bir başka Gaussiyen dalgaya dönüşür. Bu da optik çalışmalarda Gauss dalgasının güvenilir bulunmasının sebebidir. Gauss hüzmeleri ışığı sembolize eden matematiksel fonksiyon Helmholtz denkleminin paraksiyal yaklaşımda çözümüdür [16]. Paraksiyal yaklaşımda ışının optik eksene çok yakın ilerlediği varsayılır.

Bu denklemin Gauss fonksiyonu şeklindeki çözümü, ışığın elektrik alanının genliğini belirtir. Zaten elektromanyetik dalgayı oluşturan elektrik ve manyetik alanlar birlikte yayıldığından, bu iki alandan herhangi birini tanımlamak ışığı tanımlamak için yeterlidir [17].

Bununla birlikte, bir Gauss ışığının davranışını iyi anlayabilmek için birkaç parametrenin daha tanımlanması gerekir. Bunlar: Hüzme genişliği, eğrilik çapı ve Gouy faz kayması'dır.

Bu bağlamda, Gauss dalga denklemine ait elektrik alan fonksiyonunun elde edilişini ve bahsedilen parametrelerin denkleme etkisini daha detaylı açıklamak yerinde olacaktır.

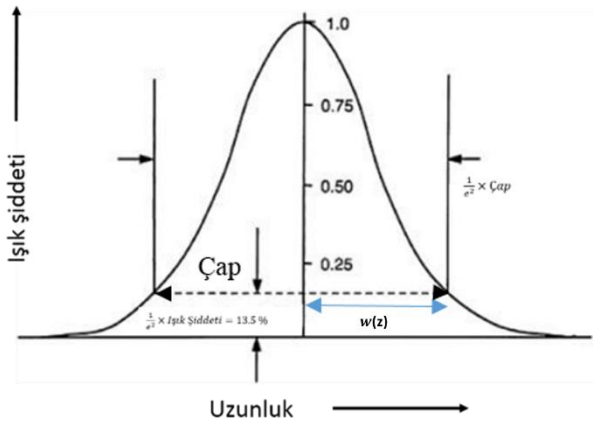
Üç boyutlu dalgaların en basit türü düzlem dalgalarıdır. *x, y, z* eksenel mesafeler olmak üzere, *z* doğrultusunda yayılan bir düzlem dalga **(1.1)** denklemi ile ifade edilir.

$$\Psi(x,y,z,t) = Ae^{i(kz-\omega t)} \qquad \textbf{(1.1)}$$

Burada *A* genlik sabiti, *k* dalga sayısı, ω açısal frekans, *t* zamandır. Ancak bu eşitlik bir lazer ışığını temsil etmez. Çünkü genlik enine sonsuz genişlemektedir. Lazer ışını için daha uygun bir genlik ifadesi, dalga *z* doğrultusunda salındıkça azalan bir ifade olmalıdır. Bu genlik **(1.2)**'de verilen fonksiyon ile belirtiilir.

$$A = A(x,y) = e^{\frac{-(x^2+y^2)}{w(z)^2}} \qquad \textbf{(1.2)}$$

Burada $w(z)$ spot genişliğidir ve ışık şiddetinin maksimum değerinın *1/e²* *(0.135)*, elektrik alan genliğinin ise *1/e* oranına düştüğü anki hüzme yarıçapı olarak tanımlanır. Hüzme genişliği ise $E = E_{max}/e^2$ durumundaki hüzme çapıdır [18] ve $w(z)$ değerinin iki katıdır. Şekil 1.1'de hüzme genişliği (çap) ve spot genişliği $w(z)$ gösterilmektedir.



Şekil 1.1 : Hüzme genişliği ve spot genişliğinin gösterimi [19].

Dalga yüzü; dalganın aynı fazda olan tüm noktalarını içeren yüzey olarak tanımlanır. Eğer hüzme genişliyorsa dalga yüzü küresel bir şekle sahip olmalıdır, çünkü, bir dalga herzaman dalga yüzüne dik bir doğrultuda ilerler. Bu durumda küresel dalga fonksiyonu,

$$\Psi(\mathrm{x},\mathrm{y},\mathrm{z}) \sim e^{-(x^2+y^2)/w(z)^2} e^{i(kz-\omega t)} e^{ik((x^2+y^2)/2z)} \qquad \textbf{(1.3)}$$

olur [17]. Denklem **(1.3)**'te ilk terim Gaussiyen profili, ikinci terim tek yönlü dalga terimini, üçüncü terim ise dalga düzleminin eğrilik yarıçapını temsil eder.

Dalga fonksiyonu, üç boyutlu dalga denklemi,

$$\nabla^2 \Psi - \frac{1}{v^2}\frac{\partial^2 \Psi}{\partial t^2} = 0 \qquad \textbf{(1.4)}$$

ifadesinin içine yerleştirilerek Helmholtz denklemi **(1.5)** elde edilir [16].

$$\nabla^2 E + k^2 E = 0 \ (Helmholtz\ denklemi) \qquad \textbf{(1.5)}$$

Elektrik alan için test fonksiyonu (1.6);

$$E(x,y,z) = E_0(x,y,z)e^{ikz} \qquad \textbf{(1.6)}$$

önerilir ve laplasyende yerine konulursa,

$$\frac{\partial^2 \varepsilon_0}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varepsilon_0}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varepsilon_0}{\partial z^2} + 2ik\frac{\partial \varepsilon_0}{\partial z} = 0 \qquad \textbf{(1.7)}$$

eşitliği bulunur [17]. Burada elektrik alanın *z* ye bağlı değişimi göz ardı edilerek (paraksiyel yaklaşım) paraksiyel dalga denklemi **(1.8)** elde edilir:

$$\frac{\partial^2 \varepsilon_0}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varepsilon_0}{\partial y^2} + 2ik\frac{\partial \varepsilon_0}{\partial z} = 0 \qquad \textbf{(1.8)}$$

Bu denklem çözüldüğünde, bir Gauss hüzmesi için elektrik alanın genliğine ait denklem **(1.9)** olarak bulunmuş olur [16].

$$E(r,z) = E_0 \frac{w_0}{w(z)} e^{\left(-\frac{r^2}{w(z)^2}\right)} e^{\left(-ikz - ik\frac{r^2}{2R(z)} + i\zeta(z)\right)} \qquad \textbf{(1.9)}$$

Denklemde, *r* merkez eksene radyal mesafeyi, *k* dalga sayısını, $w(z)$ spot genişliğini, w_0 minimüm hüzme yarıçapını, *R(z)* dalga yüzlerinin eğrilik yarıçapını, ζ(z) Gouy faz kaymasını verir.

Gouy fazı, Gauss dalgasının oluşumu için salınım doğrultusunda olması gerekli olan faz kaymasıdır. λ ışığın dalga boyu olmak üzere, Rayleigh mesafesi $Z_R = \frac{\pi w_0^2}{\lambda}$ [20] ifadesi ile verirse Gouy Fazı **(1.10)** eşitliği ile bulunur [15, 16].

$$\zeta(z) = \tan^{-1}\left(\frac{z}{Z_R}\right) \qquad \textbf{(1.10)}$$

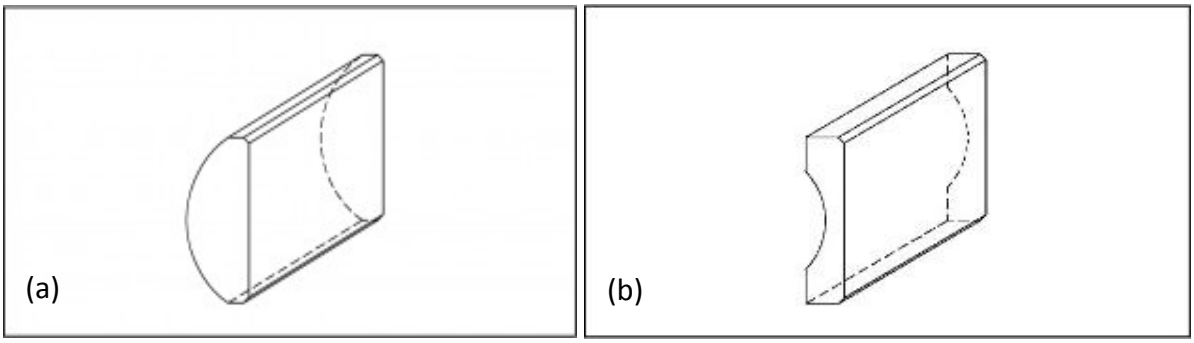
Gouy fazı sadece dalga yüzünün çok karmaşık olduğu durumlarda ele alınır.

1.3 Silindirik (Astigmatik) Odaklama

Silindirik mercekler, silindir bir yüzey ve bir düzlemle sınırlandırılmış merceklerdir. Bu merceklerin yaygın kullanılan türleri, eğimli yüzlerinin şekline göre göre plano-

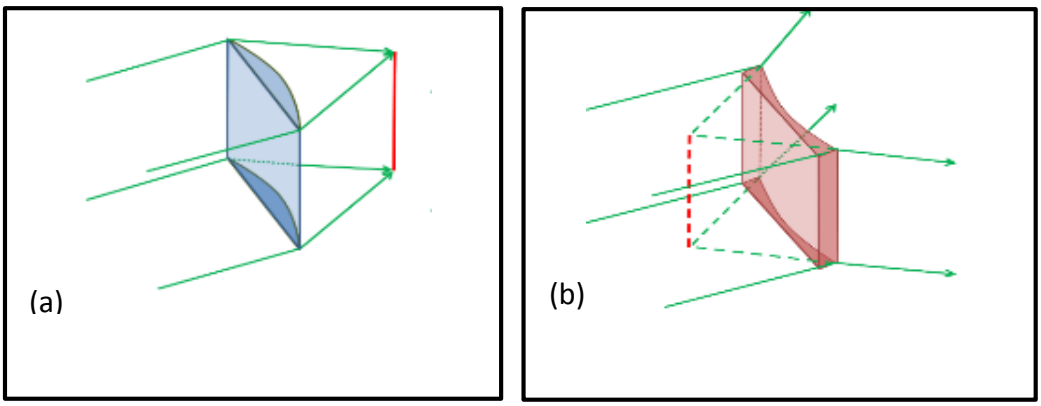
konveks ya da plano-konkav olarak isimlendirilir [21]. Şekil. 1.2a'da plano-konveks lens, Şekil 1.2b'de plano-konkav lense ait illüstrasyonlar görülmektedir [22].

Bunların dışında bir yüzeyi silindir diğer yüzeyi küresel olan küresel-silindirik mercekler ve bir yüzü silindir olup, diğer yüzü küre ya da düzlemle değiştirilebilen tor mercekler de bu gruba girmekte, astigmatik odaklama yapabilmektedir [21].



Şekil 1.2 : (a) Plano-konveks lens illüstrasyonu (b) Plano-konkav lens illüstrasyonu [22].

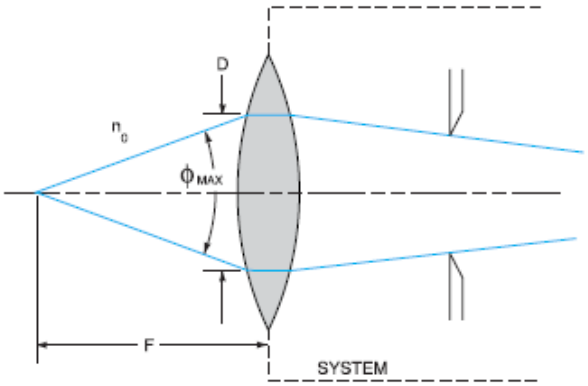
Silindirik mercek, ışığı bir noktaya odaklamak yerine bir çizgi şeklinde odaklar. Merceğin silindirik yüzeyi ile buna teğet bir düzlemin kesişiminin bir çizgi olduğu düşünülürse mercek ışığı bu çizgiye paralel bir başka çizgi üzerine odaklar. Odaklama işlemi sırasında lens ışığı tanjant düzlemine dik bir hat üzerinde sıkıştırır ve kesişim çizgisine paralel yönde değişmeden bırakır. Eğer mercek plano-konveks ise ışınların kendisi kesişir, yani ışık toplanır. Eğer mercek plano-konkav ise ışınların uzantıları kesişir ve ışık dağılır [21]. Şekil 1.3a'da plano-konveks lenste çizgisel odaklamanın, Şekil1.3b'de plano-konkav lenste çizgisel odaklamanın bir gösterimi verilmiştir [23].



Şekil 1.3 : (a) Plano-konveks lenste çizgisel odaklama (b) Plano-konkav lenste çizgisel odaklama [23].

Silindirik (astigmatik) lens yaklaşımını özetleyebilmek için öncesinde bir takım parametreleri açıklamak yerinde olacaktır. Sayısal açıklık (N.A.) bu parametrelerden biridir ve bir lensten yayılan ışığın geometrik ölçüsünü ifade eder. Başka bir deyişle N.A., bir optik sistemin kabul edebileceği ışınların yaptığı maksimum açı aralığını karakterize eden birimsiz bir sayıdır . Şekil 1.4'te gösterildiği gibi, Φ_{max} sistemden (lensten) geçebilen ışığın yapacağı maksimum tam açı olmak üzere, N.A. **(1.11)** eşitliği ile gösterilir [24].

$$NA = n_0 \, sin\left(\frac{\Phi_{max}}{2}\right) \tag{1.11}$$



Şekil 1.4 : Lens sistemine girebilen maksimum açı Φ_{max}'ın gösterimi [24].

Bu ifadede 'n' kırılma indisidir ve maddede yol alan ışığın boşlukta yol alan haline göre ne kadar yavaş ilerlediğini gösterir. Kırılma indisi **(1.12)**, ışığın boşluktaki hızı *c* nin, ışığın geçirgen madde içindeki hızı *v* ye bölünmesi ile bulunur [25].

$$n = \frac{c}{v} \tag{1.12}$$

Kırılma indisi ile lensin ışık toplayabilme kapasitesi doğru orantılıdır: Bu nedenle lensin kırılma indisi arttıkça, lensin sayısal açıklığı da artar.

Yarıçapı r_0 olan paralel lazer ışını odak uzaklığı f olan bir plano-konveks lensten geçtiğinde çapı küçülür. Bunu sebebi şudur: Lazer ışını merceğin önünde bir f kadar uzaklıkta bir çizgi üzerinde toplanacaktır ve yarım açı $\theta \sim \frac{r_0}{f}$ sabit kalmak üzere daralır. Sonuç olarak, mercekten f kadar uzakta, uzunluğu L olan, bir çizgi oluşur.

Ayrıca silindirik merceklerden kurulan sistemlerle lazer hüzmeleri simetrik bir şekilde genişletilip, eliptik ışınlar dairesel ışınlara çevirilebilir. Major yarıçapı r_1, minör yarıçapı r_2 olan bir hüzmeyi, yarıçapı r_1 olan dairesel bir hüzmeye çevirmek istiyorsak, odak uzaklığı f_1 olan bir plano-konkav silindirik mercekle, odak uzaklığı f_2 olan bir plano-konveks silindirik mercek kullanılabilir. Burada büyütme oranı **(1.12a)** plano-konveks lensin odak uzunluğunu plano-konkav lensin odak uzunluğuna bölerek, ya da major yarıçapı minör yarıçapa bölerek **(1.12b)** bulunur.

$$M = \frac{f_{planokonveks}}{f_{planokonkav}} \qquad \textbf{(1.12a)}$$

$$\frac{r_1}{r_2} = \frac{f_2}{f_1} \qquad \textbf{(1.12b)}$$

Silindirik mercekler optik metroloji, lazer tarama teknolojisi, diyot lazer spektroskopisi, optik işlemci uygulamaları, ışık taramalı iki boyutlu flüoresans görüntüleme (LSFM) [26], çizgisel aydınlatma mikroskopisi [27] vb. alanlarda ışığı çizgisel odaklamak amacıyla sıklıkla kullanılır . Bunlara görme parçacık velosimetri, görme optiği [28], tümleşik optik ve düzlemsel optik eklenebilir [29].

2. YÜZEY TEMİZLİĞİ UYGULAMALARI

2.1 Lazerle Eser Temizliği Literatür Özeti

2.1.1 Genel Bakış

Yazının M.Ö. 4 binli yıllarda, en önemli yazma malzemesi olan kâğıdın ise M.S. 2. yüzyılda keşfi ile yazılı belge ve eserlerin korunma gerekliliği de ortaya çıkmıştır. İlk koruma çalışmaları, tarihi belgeleri bitki suyu ile yıkayıp kutular içinde saklamak gibi organize olmayan yöntemler olmuş ve bu durum 19. Yüzyılda Vatikan Kütüphanesi Kardinali'nin profesyonel konservasyon çalışmaları başlatmasına kadar böyle gitmiştir. 20. Yüzyıldan bu yana ise kirlilik, asit, böcek, mantar ve diğer çevresel kaynaklı faktörlerin kâğıda olan etkisi hakkında araştırmalara başlanmış ve yazılı dökümanların korunması için daha organize çalışmalar yürütülmüştür [30].

Tarihi eserlerin korunması var olan hasarları ortadan kaldırmak ve gelecekte oluşabilecek hasarların önüne geçmek prensibine dayanır [31]. Tarihi ve kültürel belgelerin her biri ayrı malzemelerden, şekillerden, yüzey dokularından ve üretim tekniklerinden meydana geldiklerinden herhangi bir koruma metodunun dikkatli değerlendirilmesi ve test edilmesi gerekmektedir [30-33]. Yazılı dökümanların bir kısmı selüloz kökenli olduğundan kolayca tahrip olabilmektedir. Yanlış bir müdahale, eserin hasara uğramasına sebep olabilir.

Alt katmana zarar vermeden ve orijinalliği bozmadan kirlerin kaldırılması temizleme işleminde en çok dikkat edilmesi gereken noktadır. Günümüzde eser temizliğinde kullanılan geleneksel yöntemler yöntemler mekanik temizleme [34-35], kimyasal temizleme, yıkama ve alkalizasyon olarak sıralanabilir [36]. Fs lazerle kâğıt temizliğinin tarihi eser konservasyonundaki önemi anlayabilmek için geleneksel yöntemleri daha detaylı açıklamak yerinde olacaktır.

İlk olarak, mekanik temizleme yönteminde kâğıt ve derinin yumuşak bir fırça ile tozu alınabilmekte ve kitaplardaki toz, ucu bezle kapatılmış bir elektrikli süpürge ile

kitaplardan kaldırılabilmektedir [32]. Kimyasal olmayan vulkanize sünger silgiler ya da aşındırıcı olmayan vinil silgiler de mekanik yüzey temizliği için kullanılmaktadır [35]. Bunun dışında, kâğıt üzerindeki böcek nemaları ve küfler neşter, aspiratör veya özel elektrikli süpürgeler ile kaldırılabilmektedir. Derin dondurucu tekniği ise kâğıt üzerindeki haşereleri öldürmek için uygun olabilir [36]. Şekil 2.1a ve Şekil 2.1b'de mekanik temizlemede kullanılan gereçler, Şekil2.1c'de kimyasal süngerle ne kadar kir kaldırılabildiğinin bir örneği görülmektedir [37]. Ancak, mekanik yüzey temizleme işleminin konservatörlerce dikkatle yapılması gerekmektedir. Yanlış temizleme tekniği kirin kalıcı yerleşmesine, ya da kâğıdın kopmasına sebep olabilir.



Şekil 2.1 : (a), (b) Mekanik temizlemede kullanılan gereçler (c) Kimyasal süngerle ne kadar kir kaldırılabildiğinin bir örneği [37].

Tarihi kâğıtlar üzerinde bulunabilen, bazı yapıştırıcı maddeler asidik ve zararlıdır, kâğıtta lekelere neden olabilir ve temizlenmesi gerekir. Eğer yapıştırıcı su bazlı ise, buharlı su banyolarıyla, ya da yerel nem uygulamalarıyla kaldırılabilir. Sentetik yapıştırıcıları ve basınca duyarlı bantları çıkarmadan önce organik bir çözücü ile çözme ya da yumuşatma işlemi yapmak gerekir. Buhar bazen bu tür yapıştırıcıları kaldırmak için yararlı olabilir [36]. Şekil 2.2'de mekanik, kimyasal ve sulu temizleme uygulamalarının örnekleri görülmektedir [38].



Şekil 2.2 : Mekanik yüzey temizleme, kimyasal temizleme, su banyosu ve buharlı nem uygulamalarının örnekleri [38,39].

Geleneksel tarihi kâğıt temizleme yöntemlerinden bir diğeri ise yıkama yöntemidir. Bu yöntemle asidik bileşikler yıkanır ve kirler kaldırılır. Yıkama ayrıca kurumuş ve bozulmuş kâğıdı dinlendirir ve düzleştirir. Sadece yıkamanın asitlere karşı yetersiz kaldığı durumlarda alkalin ilavesi tavsiye edilmektedir. Alkalin takviyesi, alkalizasyon püskürtme ya da daldırma yoluyla elde edilebilir [36].

Ancak, geleneksel temizleme yöntemlerinin işlevselliklerinin yanında, yetersiz kaldığı noktalar da bulunmaktadır [40]. Örneğin, kimyasal temizlemede kullanılan kimyasal çözücülerin kontrol edilmesi ve temizlenen yüzeyden istenildiği anda arındırılması oldukça zordur. Çözücünün sadece kir ile değil, temizlenmek istenmeyen bölgelerle de etkileşmesi eserde hasar oluşturabilmektedir [41-42]. Mekanik temizleme tekniğinde ise alt yapıya ve orjinalliğe zarar verme olasılığı vardır [39-40]. Alışılagelmiş tekniklerde gözlenen bu sıkıntıların önüne geçebilmek için, tarihi eser temizliğinde kullanılabilecek yeni yöntemlerin arayışı içine girilmiş ve lazerle tarihi eser temizliği son yıllarda etkili bir alternatif olarak görülmüştür [40-44]. Günümüzde lazer tekniği taş, yağlı boya, heykel ve kumaş gibi yapıların korunmasında etkili bir biçimde kullanılmaktadır. Lazer tekniğinin temassız oluşu, uygulama sırasında

kimyasal kullanılmayışı [43,45] ve lazer ışınlarının sadece iyi tanımlanmış kir üzerinde etkili olup, temizlenmek istenmeyen kısımlarla etkileşime girmemesi (seçici ablasyon) önemli avantajlarındandır [44,46]. Bu tekniğin en büyük dez avantajıysa geniş yüzey alanlarında kullanmanın maliyetli ve zor olmasıdır [47]. Ancak, sürdürülen ARGE çalışmaları femtosaniye lazerle tarihi eserlerin konservasyonunun daha çeşitli malzemeler ve yüzeyler üzerinde uygulanabilmesini sağlama yolunda önemli adımlar kaydetmektedir.

2.1.2 Kâğıt Temizliği

Lazerler yaklaşık 40 yıldır özellikle taş malzemelerden oluşan tarihi eser temizliğinde kullanılmakta ve başarılı sonuçlar vermektedir [40-43, 47]. Bu yöntemin temassız ve kimyasalsız oluşu, hassas ve kırılgan yüzeyleri işlemede geleneksel yöntemlerin önüne geçmesi, yakın zamanda kâğıt konservasyonunda da kullanılmasını gündeme getirmiştir [48, 49].

İdeal bir kâğıt temizleme işlemi için hem kirleri başarılı bir şekilde kaldırmak, hem de malzemenin orjinal yapısını bozmamak gerekmektedir. Bu nedenle lazerin ayarlanabilir parametreleri örneğin ve kirin özelliklerine göre seçilmelidir. İşlemeye uygun lazer gücü, darbe süresi, darbe tekrarlama frekansı ve kullanılan merceğin odak uzaklığını belirlemek için optimizasyon çalışmaları yapılmalıdır [50]. Bunlardan en kritik olanı lazerin gücüdür ki; kirin dağlanma eşik enerjisinin üstünde ancak malzemenin dağlanma eşik enerjisinin altında bir değer olmalıdır [48]. Bu sayede kirli tabaka temizlenirken kirin altındaki katmanın ablayasyona uğramasının önüne geçilmiş olunacaktır.

2.2 Deneysel Düzenek

2.2.1 Teori

Lazerlerle tarihi eser temizleme yöntemi geliştirilmesinde orijinal tarihi eserler üzerinde çalışmak riskli olacağı için, başvurulması gereken yöntem, eserlere benzer nitelikte, ancak tarihi değeri olmayan modeller oluşturmaktır. Bunun için seçilen malzemenin yapay olarak kirletilmesi ve eskitilmesi gerekmektedir. Tarihi değeri olan malzemeyle benzer özellikte model geliştirmek, daha sonra uygun parametreleri bu modeller üzerinde belirlemek, yani gerçek eser temizliğinin bir simülasyonunu yapmak gerekir. Model örnekler ne kadar çeşitli olursa temizleme yönteminin

kullanışlılığı da o kadar iyi analiz edilir. Bu sebeplerle örneklerin hazırlanma aşamasında çeşitli metaryellerden, şekillerden, yüzey dokularından, üretim tekniğinden meydana gelmiş kâğıtların tercih edilmesine dikkat edilmiş, her bir kâğıt cinsinin lazer temizliğine uygun olup olmadığı ayrı ayrı incelenip araştırılmıştır.

Deneyin ilk aşamasında tarihi değeri olmayan ahar[1]lı, aharsız modern kâğıt ve aharsız el boyama kâğıtlar üzerinde çalışılmıştır. Bu öneklere ek olarak yaklaşık 10 yıllık kâğıtlar üzerinde de çalışılmıştır. Bahsedilen bütün bu modeller önce kirletilip daha sonra aynı koşullar altında yaşlandırılmıştır. Kâğıtları kirletmek amacıyla üzerleri Pritt Henkel marka stick yapıştırıcıyla kaplanmış ardından üzerine grafit kalem tozu veya mavi pastel boya uygulanmıştır. Yaşlandırma işlemi için, doğal yaşlanmanın bir simülasyonunu gerçekleştirmek gerekmiştir. Yapay yaşlandırma işlemi sürecinde çok yüksek sıcaklıklarla çalışmamak gerekir çünkü bu polimerlerin termal degradasyonuna sebep olabilir [50]. Termal degredasyon yüksek ısı sonucu moleküllerin bozulmaya uğramasıdır [51]. Yüksek ısılarda moleküllerin zincirleri birbirinden ayrılmaya ve diğer zincirlerle etkileşmeye başlar. Bu da polimerin yapısını bozar. Termal degredasyona uğramış bir kâğıdın hem fiziksel yapısı hem de başlangıçta karakterize edilmiş optik özellikleri değişecektir. Bu yüzden polimerlerin mekanik özelliklerini kaybetmemesi amacıyla kâğıda vereceğimiz ısının bir maksimum limiti olmalıdır. Bir diğer dikkat edilmesi gereken nokta kuru ısının mı yoksa nemli ısının mı kullanılması gerektiğidir. Pastör fırını kullanılarak uygulanan kuru ısı yöntemi ortamda nem eksikliği yaratacağından kâğıdın liflerinde tersinir olmayan hidrojen bağı oluşumuna sebep olabilir. Buna hornifikasyon denir. Amacımız termal degredasyona ve hornifikasyona izin vermeden çalışmak olduğundan yüksek ısıdan kaçınmamız ve nemi sağlamamız gerekir [50].

Bu sebeple standart test teknikleri olan ASTM D 4714 ve TAPPI T 544 cm-08'de önerildiği gibi [52] %50 nem ve 90°C ısıya sahip bir ortamda kâğıtları 13 gün boyunca yaşlandırmak uygun görülmüştür. Bu amaçla kuru ısıda olduğu gibi pastör fırını kullanılmış, farklı olarak fırına düzenli su takviyesi yapılıp nem ölçümü alınarak, nem değerinin sabit kalması sağlanmıştır.

[1] Kâğıdı sağlamlaştırmak ve yazı yazmaya elverişli hale getirmek, ayrıca mürekkebin fazla emilimini önlemek amacıyla kâğıt cilasında kullanılan, genellikle yumurta akı ve/veya nişastadan meydana gelen bir karışım.

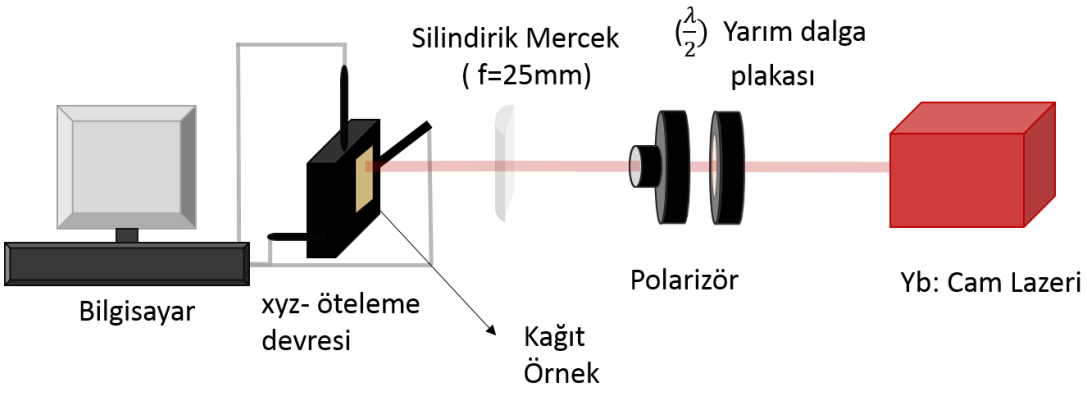
Deneyin ikinci aşamasında 17. ve 18. yüzyıllara ait üç adet birbirinden farklı ve yüzeyleri nişasta aharıyla kaplanmış tarihi kâğıt örnekler üzerinde çalışılmıştır. Çizelge 2.1'de deneyde kullanılan kâğıtlar listelenmektedir. A1-A4 kodlu olanlar yapay olarak yaşlandırılmış kâğıtlar, B1-B3 kodlular ise XVII. ya da XVIII. yüzyıldan kalma tarihi kâğıtlardır.

Çizelge 2.1 : Femtosaniye lazerle temizleme işleminde kullanılan kâğıt tipleri listesi.

Kod	Ahar Tipi	Menşei
Yapay kirletilmiş		
A1	Yumurta ve nişasta	Yapay yaşlandırılmış
A2	Aharsız	Yapay yaşlandırılmış
A3	El boyama	Yapay yaşlandırılmış
A4	Yumurta ve nişasta	~10 yaşında
Tarihi kâğıt		
B1	Nişasta	XVII. Yüzyıl
B2	Nişasta	XVIII. Yüzyıl (İlk yarısı)
B3	Nişasta	XVIII. Yüzyıl (İlk yarısı)

2.2.2 Femtosaniye Lazer ile Temizleme

Bu çalışmada, ilk olarak Lazer gücü, daha sonra tarama hızı parametrelerinin fs lazerle kâğıt temizleme işlemindeki etkileri araştırılmıştır. Daha sonra yapay olarak eskitilip yaşlandırılmış ve 200-300 yıllık kâğıtlar üzerinde lazer temizleme gerçekleştirilmiştir. Temizleme işleminde kullanılan deneysel düzenek Şekil 2.3'te gösterilmektedir.



Şekil 2.3 : Temizleme işleminde kullanılan deneysel düzenek.

Lazer kaynağı olarak dalga boyu 1030 nm olan iterbiyum cam (Yb: Cam) lazeri kullanılmıştır. Çalışmalarda kullanılan lazer saniyede 1kHz darbe frekansına sahiptir ve darbe süresi 550 fs'dir. 25mm'lik silindirik mercek kullanılarak lazer demeti çizgi şeklinde örnek üzerine odaklanmış ve 1 mm/s tarama hızı kullanılmıştır. Örnek bilgisayar kontrollü 3 boyutlu hareket sistemi ile taranarak 10 mm x 10 mm'lik bölgeler temizlenmiştir.

Silindirik mercekle hüzme odakta dikdörtgen çizgi şeklinde odaklanır. Bu çalışmada işlenecek bütün örnekler için odaktaki hüzme çapı, yani dikdörtgen çizgilerin eni ve boyu, sırasıyla 10 mikron ve 1 mm olarak ayarlanmıştır. İlk olarak, yapay olarak kirletilen örnekler üzerinde lazer gücünün etkisi incelenmiştir. Kirin dağlanma eşik enerjisinin üstünde ancak malzemenin dağlanma eşik enerjisinin altında olan enerji yoğunluğu aralığı araştırılmıştır. Daha sonra**,** örnek 3 boyutta hareket edebilen bilgisayara bağlı motorla kontrol edilerek, 10 × 10 mm² alanında bölgesine fs lazer ışınları düşürülmüştür. Temizleme işlemi sırasında lazer ışınları odakta gauss fonksiyonu halinde dağıldığından, peş peşe gelen taramalarda üst üste binmelerin meydana gelme olasılığı doğmaktadır. Bunun önüne geçmek için adım aralığını iyi ayarlamak gerekir. Bir diğer dikkat edilmesi gereken parametre ise tarama hızıdır. Tarama hızı çok yüksek olursa işlem sonunda kâğıdın üzerindeki kir yeterince kaldırılmamış olabilir, tarama hızı çok düşük olursa da temizlenen nokta üzerine düşen ışık yoğunluğu artacağından örnek hasar görebilir. Bu sebeple değişik tarama hızlarında ve değişik adım aralıklarında çalışılarak optimizasyon deneyleri yapmak gerekir. Yapılan optimizasyon çalışmaları sonucunda en uygun adım aralığının 0.5 mm ve en uygun tarama hızının 1 mm/s olduğu görülmüştür. Birim yüzeye düşen ışık

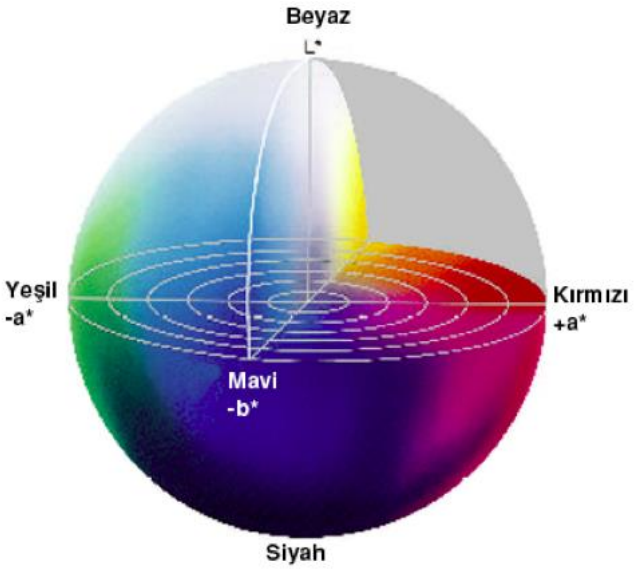
akısı, diğer değişle aydınlanma lazerin gücüyle doğru orantılı bir büyüklüktür. Bu nedenle, çok düşük lazer güçlerinde ablasyon gerçekleşmezken, çok yüksek değerlerde örnek zarar görebilir. Uygun enerji aralığını bulmak için değişik atım enerjilerinde denemeler yapmak gerekir. Örnek olarak kullanılan kâğıtlar için en uygun enerji aralığı 80-230 μJ olarak bulunmuştur. Bu değerler yaklaşık 80-230 mW güce denk gelmektedir. Yarım dalga plakaları *o*- ve *e*- ışınları arasında π kadarlık faz farkı oluşturan, dalga plakaları arasındaki mesafe yol farkının $\lambda/2$ olacağı şekilde ayarlandığı, elektromanyetik dalgaların polarizasyon doğrultusunu değiştirmek ya da ters çevirmek için kullanılan bir kristalden meydana gelir. Dolayısıyla, gücü ayarlamak için kutuplayıcı ve yarımdalga plakası kullanılmıştır.

2.2.3 Karakterizasyon

2.2.3.1 Renk ölçüm çalışmaları

Lazerle temizleme işleminin etkinliğini değerlendirmede kullanılacak parametrelelerden biri renk ölçüm sonuçlarıdır. Spektrometre, yansıma, geçirgenlik ve renk ölçümlerinde kullanılan bir cihazdır. Bu cihazlar, elektromanyetik spektrumun belirli bir kısmında spektral çizgiler üretme; dalga boyu, foton enerjisi gibi bağımsız değişkenler kullanarak, ışık yoğunluğu, polarizasyon gibi ışık özelliklerini ölçme prensibiyle çalışır. Kâğıt temizleme işlemi sonrasında, kâğıdın temizlenmiş ve temizlenmemiş bölgeleri arasındaki renk farkı ölçümü yapılmış, ölçüm aracı olarak Hunterlab Miniscan EZ modeli renk ölçüm spektrometresi kullanılmıştır.

Bir rengin tanımlanması için birbirinden bağımsız üç temel öğeye ihtiyaç vardır. Bunlar: Renk, doygunluk ve parlaklıktır. Renklerin renk uzaylarındaki yerleri bu değişkenlere göre belirlenir [53]. Günümüzde en çok kullanılan ve temel alınan renk evreni CIE L*a*b* uzayıdır [54-55]. L*a*b* renk modeli rengin parlaklığını ve renk özelliklerini birbirine dikey (sarı-mavi, yeşil-kırmızı ve açık-koyu) eksenlerden oluşan üç boyutlu dikdörtgensel koordinatlar üzerinde gösterir. Bir rengin aynı anda hem sarı hem mavi veya hem kırmızı hem yeşil olamayacağı teorisinden yola çıkarak tasarlanmıştır [54, 56]. Evrensel ve iyi dengelenmiş bir sistem olması sebebiyle bu çalışmada renk ölçütü olarak CIE L*a*b* renk sistemi kullanılmıştır. Şekil 2.4'de CIE L*a*b* renk evren modeli görülmektedir [55].



Şekil 2.4 : CIE L*a*b* Renk Evren Modeli [55].

Burada L ekseni ışığın açıklık veya koyuluğunu belirtir. Işığın parlaklığı, L=0 (en açık) ve L= 100 (en koyu) değerleri arasında derecelendirilir. a ekseninin pozitif değerleri kırmızılığı, negatif değerleri ise yeşilliği gösterir. Benzer şekilde; b ekseninin pozitif değerleri sarılığı, negatif değerleri maviliği gösterir.

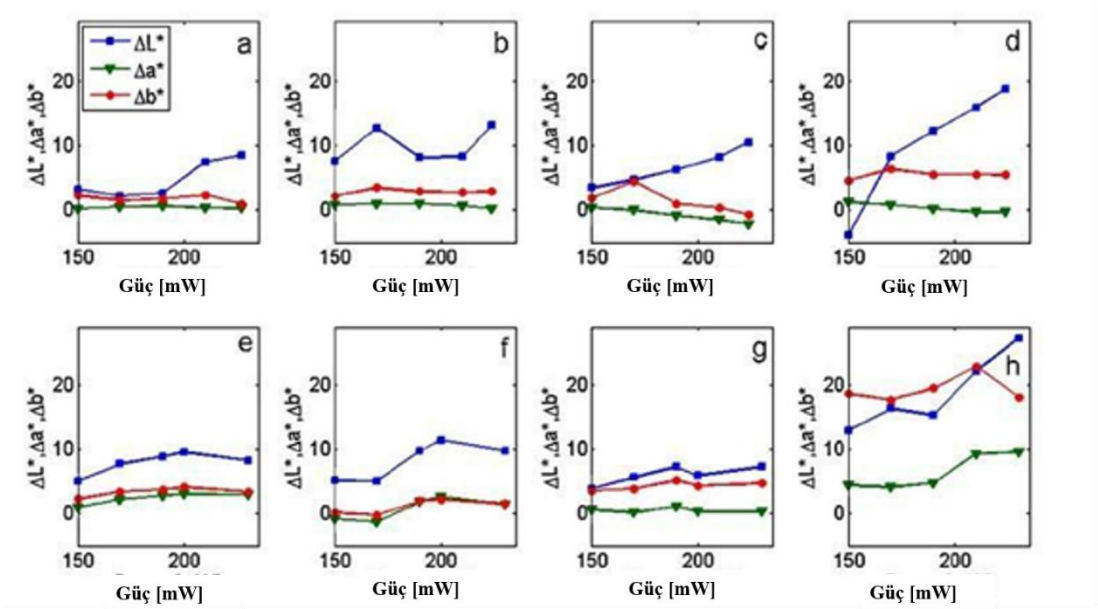
Renk ölçüm işlemi sürecinde işlenmiş kısımların rengini kıyaslayabilmek için referans renk değerleri bulunması gerekir. Bu amaçla kâğıt örneğin temizlenmemiş kısımlarının üç farklı yerinden ölçüm alınmış, bunların da ortalaması alınarak referans değerler bulunmuştur. Bu değerler L_R*, a_R* ve b_R* ile gösterilmiştir. Bağıl renk değişimleri şu formüllerle hesaplanır:

$$\Delta L^* = L^* - L_R^* \quad \textbf{(2.1)}$$

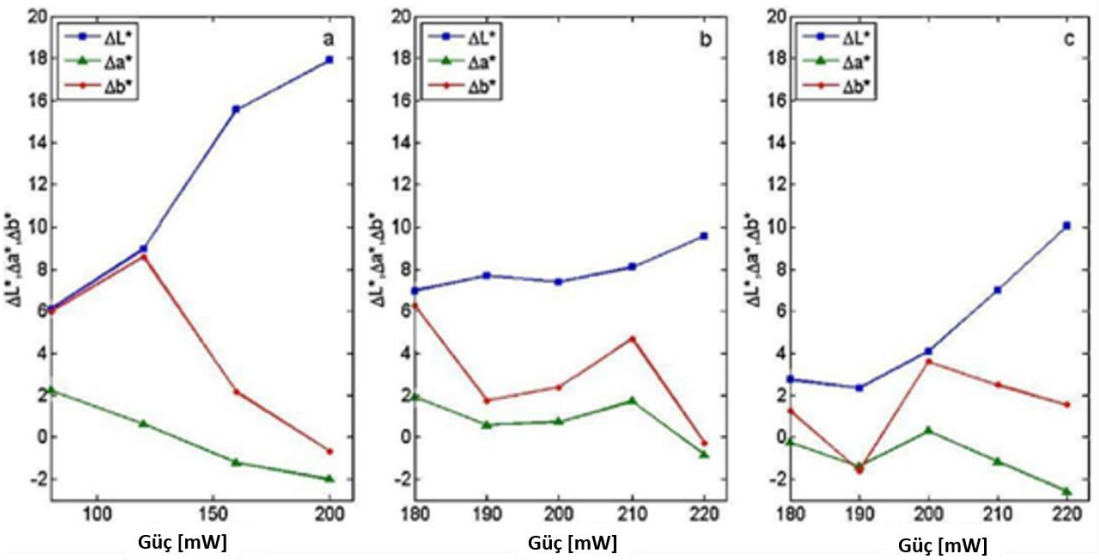
$$\Delta a^* = a^* - a_R^* \quad \textbf{(2.2)}$$

$$\Delta b^* = b^* - b_R^* \quad \textbf{(2.3)}$$

Yapay olarak kirletilmiş ve yaşlandırılmış, 150 mW ile 250 mW arasında değişen güçlerde işlenmiş kâğıtların renk ölçüm sonuçları Şekil 2.5'te gösterilmektedir. Şekil 2.6'te ise orjinal tarihi el yazmalarının değişik güçlerde işlenmiş bölgelerinde yapılmış renk ölçüm sonuçları görülmektedir.



Şekil 2.5 : Çeşitli güçlerde işlenen, yapay olarak eskitilmiş ve kirletilmiş kâğıtların renk ölçüm sonuçları. Üstteki ilk sıra tutkallı ve karbonla kirletilmiş kâğıtlara ait. Alttaki sıra tutkallı ve mavi pastel boyayla kirletilmiş kâğıtlara ait. Soldan sağa örnekler: A1, A2, A3 ve A4. Grafiklerde dikey eksen: ΔL^*, Δa^*, Δb^* değerlerini, yatay eksen: gücü [mW] göstermektedir.



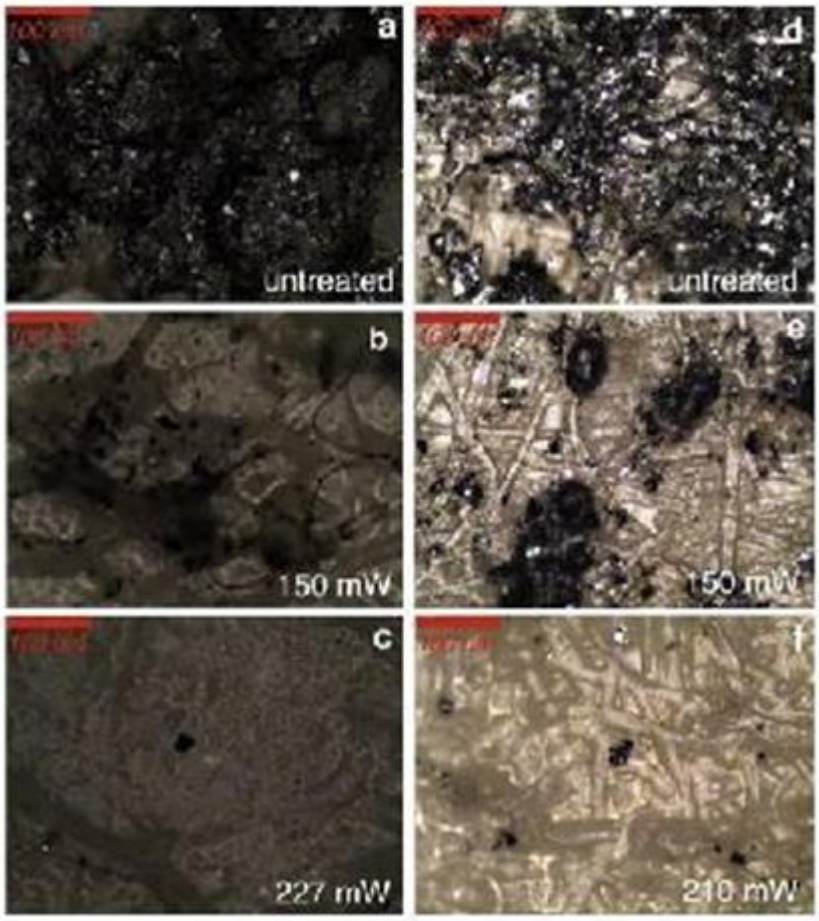
Şekil 2.6 : Değişik güçlerde işlenmiş, B1, B2 ve B3 kodlu tarihi el yazmalarının renk ölçüm sonuçları.

Şekil 2.5 ve Şekil 2.6 gösteriyor ki işlenen öreneklerin hemen hemen hepsinde lazer gücüyle doğru orantılı olarak renk açılması olmuştur. Bununla beraber, özellikle düşük lazer güçlerinde renk değişimlerinin çok düşük olduğu gözlenmiştir.

2.2.3.2 Mikroskop Görüntüleri

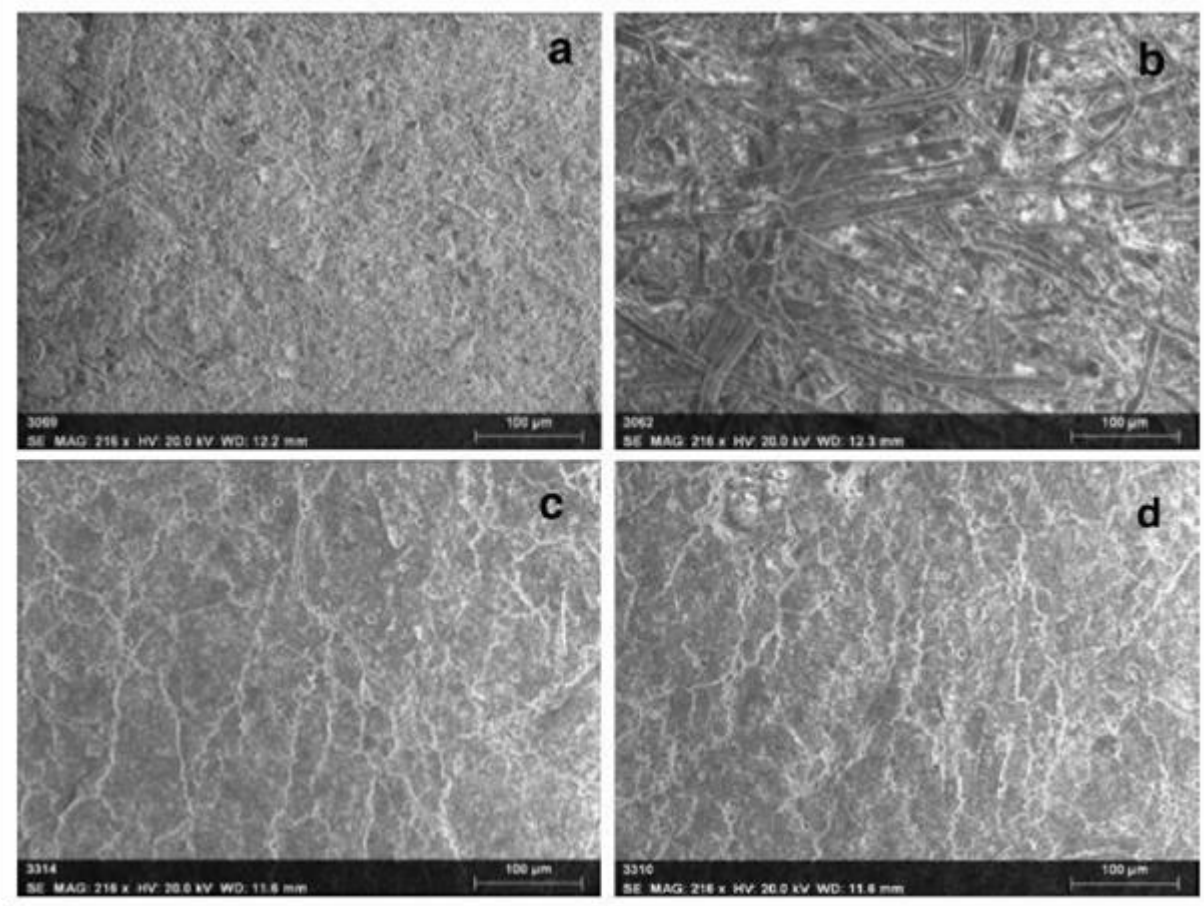
Yüzeylerin modifikasyonları optik mikroskopla (Nikon, Eclipse, LV150 L) ve Taramalı Elektron Mikroskobu ile (SEM, Carls Zeiss, EVO LS 10) araştırılmıştır. Bu sayede yüzeyin hem iki boyutlu hem de topografik görüntüleri elde edilmiştir. Ayrıca örneklerin yakından fotoğraf görüntüleri de alınmıştır.

Şekil 2.7 A1 ve A2 kodlu örneklerin optik mikroskop görüntülerini içermektedir [31]. Örneklerin temizlenmemiş, 150 mW ile temizlenmiş ve 200 mW üzeri güçle temizlenmiş kısımlarından alınan bu görüntüler göstermektedir ki, yüzeydeki karbon kirleri herhangi bir yanma meydana gelmeden kaldırılmıştır. Görüntülerdeki siyahlıklar yüzeyden temizlenememiş tutkal ve grafittir. Ayrıca yüksek lazer gücünde yüzeydeki kirlerin daha büyük bir kısmı kaldırılmıştır.



Şekil 2.7 : Optik mikroskop görüntüleri. Lazerin gücü şeklin üzerinde gösterilmiştir. A1 kodlu örnek: (a) işlenmemiş, (b) 150mW, (c) 227mW. A2 kodlu örnek: (d) işlenmemiş, (e) 150mW, (f) 210mW [31].

İşlenmemiş ve işlenen yüzeylerin topografik yapısıyla ilişkili değerlendirmede bulunabilmek için taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile alınan görüntüler ise, Şekil 2.8'de görülmektedir [31]. SEM mikrografileri gösteriyor ki yüksek güçle temizlenmiş kısımlarda karbon kiriyle birlikte aharın da bir kısmı kalkmış ancak selüloz fiberlerin üzerinde herhangi bir hasara rastlanmamıştır. Bunda aharın lifleri korumasının da etkisi olmuştur. Örneğin daha düşük güçle temizlenmiş kısmında ise kâğıdın üzerindeki kirler temizlenirken, ahar soyulmamış ve yine selüloz lifleri aharın altında kaldığından görüntüde ortaya çıkmamışlardır.



Şekil 2.8 : B1 kodlu tarihi eserin SEM görüntüsü. Soldaki sütun temizlenmemiş yüzeyin görüntüsünü, sağdaki sütun ise 200mW (b) ve 80mW (d) ile temizlenmiş yüzeyin görüntüsünü göstermektedir [31].

2.2.3.3 EDS Analizi

İşlenmiş kâğıtların meydana gelebilecek kimyasal değişimleri analiz etmek için EDS (Enerji Dağıtıcı X- Işını Spektrometresi, Bruker, Quantax, 200) analizi yapılmıştır. Analiz sonucunda SiO_2, SO_3, K_2O, CaO, FeO, Na_2O, MgO, Al_2O_3 oksitlerin miktarlarında değişim görülmüştür. Çizelge 2.2'de desteklendiği gibi, en büyük artış SiO_2 oksitinde olmuş, lazerin gücü oksidasyonu ivmelendiren bir etken olmuştur.

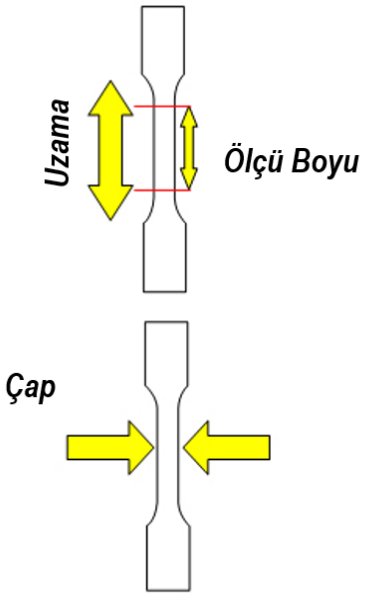
Çizelge 2.2 Temizlenmiş tarihi kâğıtların EDS analiz sonuçları.

Kâğıt Kodu	Lazer Gücü (mW)	ΔL*	Δa*	Δb*	Max. Oksidayon değişimi	Lifler
B1	80	6.12	2.24	5.99	0.51	Ortaya çıkmamış
	200	17.92	-2.00	-0.65	9.43	Ortaya Çıkmış
B2	180	2.75	-0.25	1.26	0.57	Ortaya Çıkmamış
	220	10.04	-2.58	1.54	4.41	Ortaya çıkmış

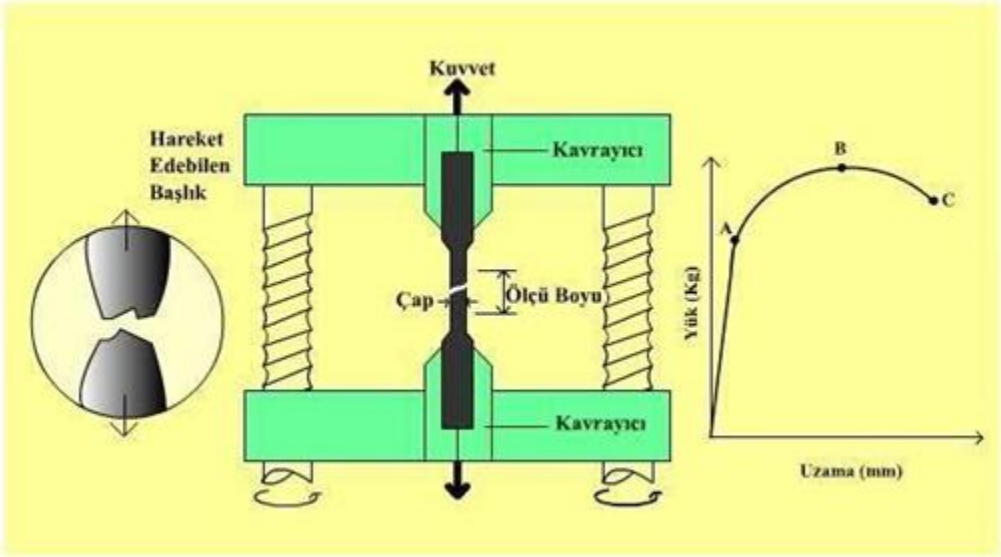
Bununla birlikte, analiz sonucunda normalde selüloz liflerinin yapısında bulunmayan atomlar da tespit edilmiştir (Al, K, Ca, Mg, Si ve Fe). Bunlar tozun yapısında bulunan atomlar olduğundan, örrneğin yüzeyine çevreden gelmiş olma ihtimali vardır. Ayrıca, tespit edilen alüminyum ve potasyum şap adı verilen bir tuz grubuna ait te olabilir. Çünkü kimyasal adı potasyum alüminyum sülfat olan bu bileşik kâğıt üretiminde yaygın olarak kullanılmaktadır. Benzer şekilde, tespit edilen kalsiyum; söndürülmüş kireç adı da verilen, kimyasal formülü $Ca(OH)_2$ olan ve kâğıt yapımında kullanılan kalsiyum hidroksitten kaynaklanmış olabilir. Bir başka ihtimal ise kalsiyumun kâğıt üretim sektöründe dolgu maddesi olarak kullanılan kalsiyum karbonattan (kireç taşı, $CaCO_3$) gelmiş olmasıdır.

2.2.3.4 Mekanik Güç

Ultra hızlı lazer ile kâğıt üzerindeki kirlerin ablasyonu, selüloz liflerinin gücünün zayıflamasına, kâğıdın kırılganlığının artmasına, yani kâğıdın daha kolay kopmasına sebep olabilir. Lazerle temizleme işleminin kâğıdın mekanik gücünü azaltıp azaltmadığının araştırılması için, çekme deneyi testi (Tensile Stress Test) yapılması uygun olur. Çekme deneyinde kullanılacak numunenin şeklinin bir standardı vardır, bu sebeple bütün örnekler 'köpek kemiği' [55-59] şeklinde kesilmiştir. Şekil 2.9 örneklere verilmesi gereken şeklin, Şekil 2.10 ise basit bir çekme deney düzeneğinin illüstrasyonudur [59].



Şekil 2.9: ‘köprek kemiği’ şeklinde kesilmiş örneğin illustrasyonu.



Şekil 2.10 : Çekme deney düzeneği [59].

Testin prosedürü şudur: Örnek kavrayıcıya yerleştirilir ve kuvvet uygulanarak kopana kadar yavaş yavaş çekilir. İşlem sırasında, uygulanan kuvvetle doğru orantılı artan uzama miktarı kaydedilir. Sonuçlar örneğin geometrisine göre değişim göstermesin diye örneğe standart bir şekil (köpek kemiği) verilir. Uzama miktarı ile birim deformasyonu hesaplamak için **(2.4)** ile verilen eşitlik kullanılır [58].

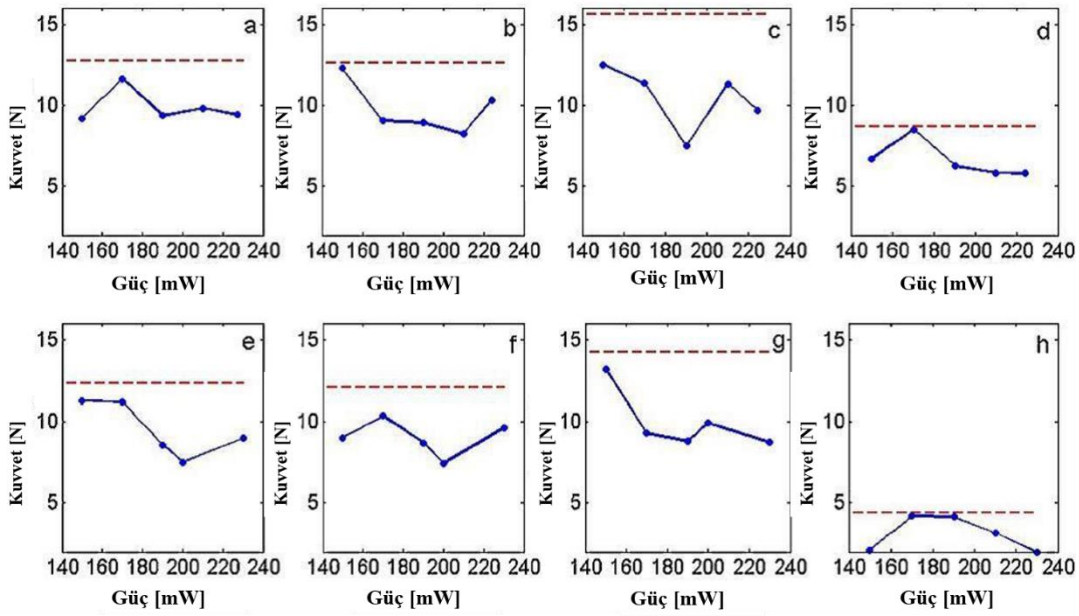
$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} = \frac{L - L_0}{L_0} \quad \textbf{(2.4)}$$

Burada, L_0 numunenin ilk boyu, L kuvvet uygulandıktan sonraki boy, ε birim deformasyondur. Kuvvet ölçümü **(2.5)** denklemi ile gerilmeyi (σ) hesaplamak için kullanılır.

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad \textbf{(2.5)}$$

Burada, F çekme kuvveti, A numunenin ilk kesit alani, σ çekme mukavemeti, diğer deyişle gerilmedir.

Bu çalışmada sadece çekme kuvveti ölçümü yapılmıştır. Numunenin şekli standart olduğu için kesit alanı hepsinde aynıdır, bu nedenle gerilme de kuvvetle doğru orantılı olacaktır. Test edilecek örneklere Şekil 2.9'da görüldüğü gibi köpek kemiği biçimi verilerek LF Plus Çekme Sıkıştırma Test Cihazı (Llyod- LF plus)'na yerleştirilmiştir. Numunenin bir ucu sabitlenirken diğer ucu 3 mm/s hızla çekilmiştir. Kâğıdın koptuğu anki gerilme direnci (mukavemet gücü) ölçülmüştür. Sonuçlar Tablo 2.2'de gösterilmektedir. Sonuçları karşılaştırmak için referans değerleri bulunması gerektiğinden, aynı şekilde işlenmemiş kâğıt örneklere de çekme deneyi yapılmıştır. Şekil 2.11'deki kırmızı çizgiler bu sonuçları göstermektedir.



Şekil 2.11 : A1, A2, A3 ve A4 kodlu örneklerin, farklı güçlerde temizlenmiş bölgelerine ayrı ayrı uygulanmış çekme testinin sonuçları. Üst sıra karbonla kirletilip eskitilmiş, alt sıra mavi pastel boyayla kirletilip eskitilmiş kâğıtlara ait. Soldan sağa: A1, A2, A3 ve A4 kodlu örnekler.

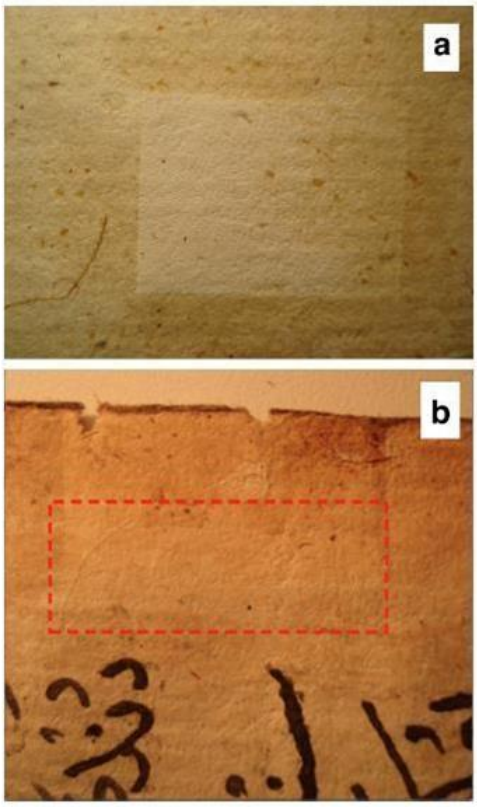
Sonuçlar değerlendirildiğinde hemen hemen bütün durumlarda kâğıdın mekanik gücündeki zayıflama göz ardı edilir boyutlarda kalmaktadır. Örneklerin tamamı ve üzerindeki kirler tek tip olmadığından, yani eşit özellik göstermediklerinden, çekme testi sonuçlarında dalgalanmalar gözlenmektedir. Ancak, genelleme yapıldığında, örneklerin çoğunda artan lazer gücünün kâğıdın çekmeye karşı direncini, yani mekanik gücünü aşağı çektiği sonucuna varılır.

2.3 Deneysel Sonuçlar

Bu bölümde elde ettiğimiz deney sonuçları tartışılacaktır. Öncelikle temizleme işlemi sonrasındaki renk değişimini ele almak gerekir. Bütün durumlarda hem eskitilmiş kâğıtların hem de doğal tarihi kâğıdın parlaklığının arttığı görülür (Şekil 2.5, Şekil 2.6). Zaten kâğıdın üzerinden koyu renkli bir kir tabakası kalktığı için bu beklenen bir durumdur. Grafiklerde görülen ufak tefek sapmalar, kâğıt yüzeyinin homojen olmamasından kaynaklanır. Özellikle tarihi kâğıtlarda örneğin her tarafının eşit özellik göstermediği çıplak gözle bile görülebilmektedir.

Lazer gücü çok yüksek olduğunda örnekte ağarma meydana geldiği gözlemlenmektedir (Şekil 2.12a). Lazer gücünü düşük tutup, yüzeyde hafif kir

bırakıldığında ağarmanın önüne geçilebilmektedir. Yani lazer gücünü düşük tutup yüzeyde bir miktar kir bırakınca etkili temzilik sağlanmış olur. Şekil 2.12b bunun bir örneğidir.



Şekil 2.12: (a) Aşırı ağarma meydana gelmiş bir tarihi eser örneği. Ortadaki açık renkli kısım işlenmiş bölgedir. (b) Düşük güçle çalışılmış, bir miktar yapıştırıcının yüzeyde kaldığı ancak aşırı ağarmanın oluşmadığı bir tarihi kâğıt örneği. Temizlenmiş bölge kırmızı kesikli çizgilerle gösterilmektedir [31].

Δa^* ve Δb^* değerleri de renkteki değişimi göstermeleri açısından önemlidir. 2 birimden büyük renk değişimleri insan gözü tarafından rahatlıkla algılanabilir. Karbonla kirletilmiş kâğıtlarda Δa^* ve Δb^* değerlerinin kabul sınırına çok yakın olduğu görülür (Şekil 2.5 üst sıra). Mavi pastelle kirletilmiş olanlarda ise (Şekil 2.5 alt sıra) yoğunlukla sarılaşma görülür. Bu da mavi kirin yapısından dolayı öngörülen bir durumdur. Tarihi kâğıtlarda ise çok düşük renk değişimleri görülür, ancak, bazı noktalarda yüksek renk değişimleri gözlenmektedir (Şekil 2.6).

Etkili kâğıt konservasyonu için bir diğer gereklilik ise temizleme sonrasında kâğıdın mekanik gücünün ciddi ölçülerde azalmasıdır. Kâğıt selüloz liflerden meydana geldiğinden hem fiziksel hem kimyasal olarak narin ve kırılgandır. Bu sebeple,

temizleme işleminin kâğıdın fiber yapısına zarar vermemesi gerekmektedir. Çünkü lif yapısı kâğıdın mekanik gücünü belirleyen bir faktördür. Eğer lazer ışınları selüloz liflerinin düzenini bozarsa (selüloz lifleri zarar görürse) veya kimyasal yapılarına zarar verirse kâğıdın çekme kuvveti ile birlikte mekanik gücü de azalır ve kâğıt daha kırılganlaşır. Çekme deneylerinin sonuçları göstermektedir ki (Şekil 2.11), lazerle işlenmiş kâğıtların mekanik gücü hiç işlenmemiş olanlarınkine oranla daha azdır. Ne var ki bu, kaçınılmaz bir sonuçtur, çünkü; yüzeydeki kir ya da ahar tabakası kısmen kaldırılmıştır. Bu da mekanik gücü değiştirir. Eğer kâğıdın mikro yapıları zarar görmediyse, mekanik güçteki azalma kabul edilebilirdir. Buna ek olarak, Şekil 2.11'de görüldüğü gibi özellikle düşük lazer güçlerinde, mekanik güçteki değişim minimumdur. Aharlı A1, A3 örnekleri ile aharsız A2, A4 örnekleri karşılaştırıldığında, aharsız olanların referans değerlerine göre daha ciddi bir mekanik güç düşüşü sergilediği görülür.

Sonuçlar göstermektedir ki; fs lazer ile ablasyonun yüksek hassasiyeti ve minimize edilmiş yan etkileri, tarihi eser niteliğindeki kâğıtların, bilhassa aharlı kâğıtların ve el yazmalarının korunmasında etkili bir yöntemdir [31].

3. LAZERLE CAM İŞLEME UYGULAMALARI

3.1 Literatür Özeti

3.1.1 Genel

Lazerler endüstride işaretleme, kaplama, kazıma, kesme, delme, kaynak, lehim, yüzey işleme, test sistemleri gibi pek çok alanda sıklıkla kullanılmaktadır. Yüksek işlem hızı, düşük termal hasar, yüksek derinliğe ulaşılabilmesi, minimum kaynak genişliği, uygulanabilen malzeme çeşitliliği, kirliliğin en aza indirilmesi gibi özelliklerinden dolayı lazerler diğer işlem çeşitlerine göre mikro işlemede daha tercih edilirdirler [60-62].

Lazerler paralel dalgalar halinde, monokromatik, eş fazlı, yoğun ve doğrusal ışınlar üretir [63]. Bu nedenle lazer ışınları yüksek güçlüdür ve mikron mertebesine kadar odaklanabilirler. Böylelikle lazer ışını enerjisini çok küçük bir alana ileterek ısıdan etkilenen bölgenin alanı minimize eder ve malzeme işleme için gerekli olan enerji yoğunluğuna ulaşılır.

Lazer ile yüzey işlemenin kalitesine çeşitli süreç ve parametrelerin etkisi vardır. Bunlar; lazer gücü [64-66], atım süresi, işlem hızı, atım şekli, malzeme özelliği [66], hedeflenen işlemenin geometrisi [64, 66] ve odak noktası büyüklüğüdür. Kaliteli bir lazer işleme için tüm bu parametreler optimize edilmelidir. Mikro yüzey İşlemede kullanılan başlıca lazerler Nd: Cam lazeri [67], CO_2 lazeri[68], diyot lazerler, fiber lazerler [69] ve Yb: Cam lazerleri [3, 70]dir. Yb: Cam lazerler 1030 nm dalgaboyunda ışıma yapar ve kaynaktan çıkan yüksek frekanslı ışınlar saydam maddelerin yanı sıra, ışık yansıtıcı özelliği olan bazı maddelerde de iyi soğurulur [3]. Bu açıdan CO_2 lazerlerden farklılık gösterir. Bu nedenle pek çok malzeme Yb: Cam lazeri ile kolaylıkla işlenebilir [3, 70-75].

Günümüzde endüstride mikro yapılara yaygın bir ihtiyaç duyulmaktadır. Lazer kullanımının hassas malzeme işlemedeki avantajları [75], bu tekniği üretim sektörünün süregelen ve gelecek işlemleri açısından ön plana çıkarmaktadır.

Lazerlerin üretim sektörüne girmesi ve daha düşük güçlerle yüksek kaliteli kesimler yapılması çalışmaların ana hedefidir.

3.1.2 Cam

Femtosaniye (fs) lazer ile cam işleme ilk olarak Hirao grubu tarafından keşfedilmiştir [1, 108]. Bu grup yüksek güçlerde femtosaniye lazer darbeleriyle silis üzerinde, difraktif eleman, dalga kılavuzu ve yerel kırılma indisi modifikasyonu gibi karmaşık kırılma indisi yapılarının doğrudan yazılabildiğini ortaya koymuşlardır. Ultraviyole (UV) lazerlerle silis üzerinde kırılma indisi değişikliği ve kimyasal değişim meydana getirme çok daha önce ortaya konmuş ve çalışılmış bir konudur [1]. Ancak, fs darbeleri kullanarak camda kırılma indisi değişimi kristaller [104] de dâhil olmak üzere hemen her türlü malzeme üzerinde kullanılabilmesi açısından yeni ve daha avantajlı [76,77] bir işlemdir. Yüksek güçlü femtosaniye sistemleri camsı malzemelerin lazerle işlenmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır [75-81]. Bu sistemlerin birçoğu tarafından üretilen kızılötesi ışınlarla camlarda kırılma indisi değişikliği meydana getirilerek, dalga kılavuzu [75, 82] ve yüzey yapısı [83] fabrike edilebilmektedir. Uzun atımlı ve sürekli-dalga lazerleri, camda ısı depolanmasına yol açar. İşlenen bölgenin çevresinde hasarlar ve mikro çatlaklar oluşur. Fs lazerler ise ultra kısa atımlar yapar. Bu sayede, cam üzerinde işlem gören bölgenin yakın çevresinde zararlar en aza iner [3, 75].

Esasen camda kırılma indisi değişikliği meydana getirme yöntemi çoklu foton emilimi sonucu malzeme sıkışması ilkesine dayanır [5]. Lazer ışınının enerjisi iyonizasyon eşik şiddetinin üzerine çıktığında, çoklu foton iyonlaşmasına bağlı dielektik kırılma, lokalize erimeye ve malzeme sıkışmasına neden olur. Bu da kalıcı kırılma indisi değişikliğine yol açar [84]. İyonizasyon eşik değeri malzemeye bağlı olmakla birlikte, kırılma indisi değişikliği cam geçiş sıcaklığına bağlıdır. İyonizasyon eşik değerinin altında, indüklenmiş indeks değişiminin diğer bir rejimi gözlenir. Bu indeks değişimi cam geçiş sıcaklığı altındaki sıcaklıklarda silinebilir bir sertleşmedir. Bu rejimde, UV ışınların germanyum katkılı silika camlarda sebep olduğu çoklu foton emiliminin sonuçlarına benzer sonuçlar oluşur [1]. İyonizasyon eşik enerjisinin çok üstüne çıkıldığında ise camda yanma ve hasar meydana gelir. Bu nedenle iyonizasyon eşiği ultra kısa atımlı lazerlerle camda mikro yapı işlemede dikkat edilmesi gereken bir parametredir.

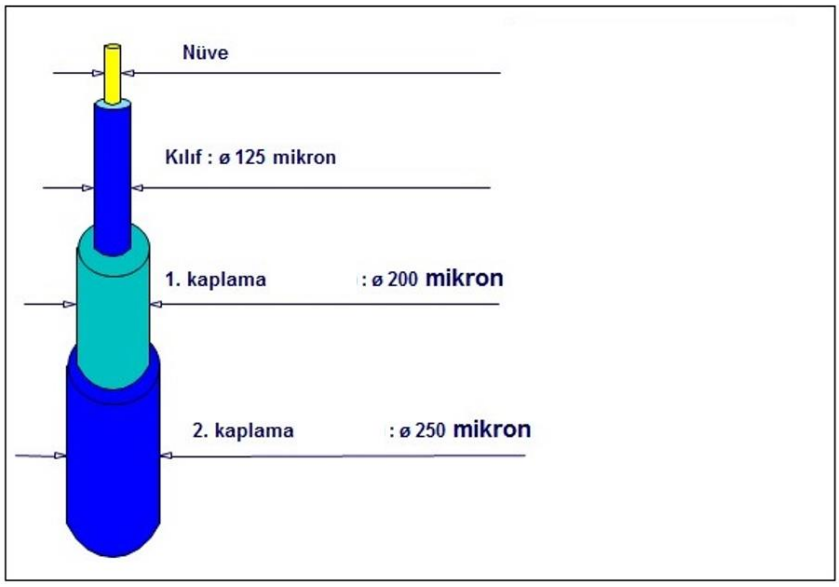
3.1.3 Fiber Bragg ızgaralar

3.1.3.1 Fiberler

Bu bölümde fiberin tanımı, yapısı, ışığı iletim şekli, uygulamaları, avantajları ve çeşitlerine bir giriş yaparak genel bir anlayış vermek amaçlanmıştır.

Fiber optik çok ince ve hassas cam bir ip üzerinden ışığın iletilmesi prensibiyle çalışır. Metal kablolarla kıyaslandığında nem, rutubet, elektromanyetik alanlardan etkilenmemeleri ve sabit bağlantı kuruluşuna imkân vermeleri açısından tercih edilirdirler [85]. Ayrıca fiber optik kablolarda veri iletiminin ışık hızıyla, düşük kayıpla olması uzak mesafelere veri aktarımında yaygınlıkla kullanılmasını sağlar.

Fiber optik kablolar üç kısımdan oluşur: En içte, merkezde nüve (çekirdek) adı verilen, ışığın yayıldığı ince, esnek bir tabaka bulunur. Bu tabaka genellikle saf camdan yapılmakla birlikte, plastikten yapıldığı çeşitleri de vardır. Nüvenin çapı fiberin tek veya çift modlu oluşuna göre 8 mikron ile 100 mikron arasında değişmektedir. Nüvenin dışını kılıf adı verilen optik bir malzeme sarar ve merkezden yansıyan ışığın tam yansıma yaparak tekrar merkeze dönmesini sağlar. Cam örtü ya da plastik örtü şeklinde bulunabilir. Kılıfın üzerinde, fiber kabloyu darbe ve neme karşı koruyan genelde plastikten imal edilmiş kaplama vardır. Kaplamanın optik bir özelliği yoktur, sadece fiber kabloyu çevre koşullarından korumakla görevlidir. Bazen fiberi daha iyi koruyabilmek için ikinci bir kaplama da kullanılablir [86]. Şekil 3.1'de basit bir fiber optik kablonun kesiti ve katman çapları gösterilmektedir [87].



Şekil 3.1 : Fiber optik kablonun kesiti, katmanları ve katman çapları [87].

Fiber optik kablolarda ışığın iletilmesi şu şekilde gerçekleşir: Lazerden çıkan ışınlar cam örtüye sınır açısından büyük gelme açılarıyla geldiğinde, fiberin çekirdeği ile kılıf arasındaki kırıcılık indisi farkı sebebiyle, ortam değiştiremeyerek tam yansımaya uğrar. Bu şekilde kılıfa çarpıp geri yansıyan ışınlar biraz yavaşlayarak ve kayba uğrayarak çekirdeğin içinde ilerler [86]. Diğer bir deyişle optik fiberin çekirdeği bir dalga kılavuzu gibi davranır. Burada fiberin kıvrım yapmadan düz bir yol izlemesi, veri iletim hızı ve kalitesi açısından önemlidir.

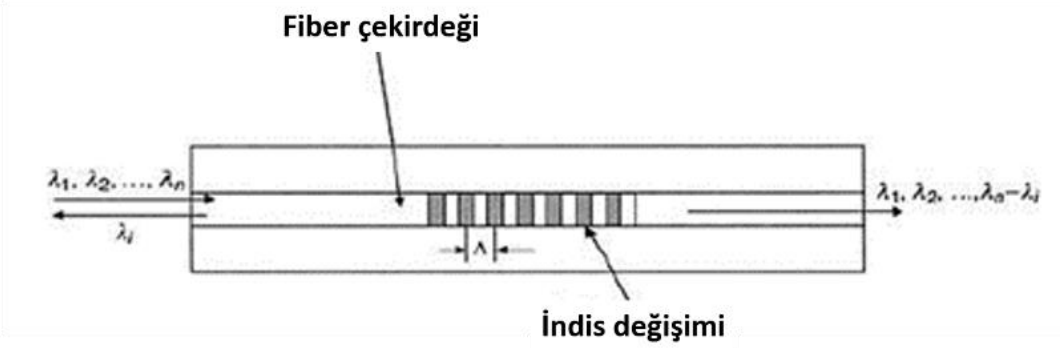
Fiber kablolar çekirdek çapına, yapıldıkları malzemelere ve ışığın kırılma şekline göre çeşitlere ayrılırlar. Tek modlu fiberler, ince çekirdekli kablolardır (≈ 9 mikron) ve sadece tek bir modu desteklerler. Daha çok veri kaybının az olması gereken uzun mesafeli iletişim hatlarında tercih edilirler. 1300-1550 nm dalga boylu ışığı iletirler [88]. Çok modlu fiberler geniş çaplı (≈ 62 mikron) çekirdeğe sahiptir ve daha çok gücün iletilmesinin gerekli olduğu kısa mesafeli iletişim hatlarında kullanılırlar. Veri kaybının tek modlulara kıyasla daha fazla, maliyetin ise düşük olduğu yapılardır. Çoklu yayınma hatlarını ve çapraz modları desteklerler. 850-1300 nm dalga boylu ışığı iletirler [86]. Tamamen plastikten üretilmiş, yaklaşık 1 mm çekirdek çapında fiberler de mevcuttur ve bunlar 650 nm kırmızı ışığı iletirler [89]. Bunlara ek olarak, çekirdek bölgesi vakum olan fiberler son dönemde geliştirilmiştir. Bu fiberler teoride en yüksek bant genişliğine sahiptir ve iletilen sinyal, ışık hızına oldukça yakındır; ama pratikte bu fibere kayıpsız ek yapılması olanaksız görünmektedir [90].

Yapıldıkları malzemelere göre ise fiberleri; cam fiberler (cam çekirdekli cam zarflı), plastik silisyum fiberler (plastik çekirdekli plastik zarflı), plastik fiberler (plastik çekirdekli plastik zarflı) [89], dereceli indis fiber ve kademeli indis fiberler [91] olarak ayırmak mümkündür.

3.1.3.2 Fiber Bragg ızgaralar

Fiber ızgaraların temelini optik fiberin çekirdek bölgesindeki kırılma indisinin fiberin uzunluğu boyunca belirlenmiş periyotlarla modülasyonu oluşturmaktadır [92-94]. Bu ızgaralar yansıma ve iletim modunda tasarlanabilir. Yansıma modunda tasarlanmış olanlarına fiber Bragg ızgara (FBG) adı verilir [93, 95]. Kısaca, Bragg ızgaraları, özellikli bir dalga boyu aralığındaki ışığın yüksek oranda yansıtılabilmesi için, optik fiber çekirdeği içinde kırılma indisinin periyodik olarak değiştirilmesidir [81]. Şekil 3.2'de fiberde periyodik olarak oluşturulmuş Bragg ızgaralarının basit bir şeması

görülmektedir [96]. Şekilden anlaşılacağı gibi ızgara yapılar sadece belirli bir dalga boyunu (λ_i) yansıtırken, diğer dalga boylarını geçirmektedir. Izgaraların arasındaki mesafeye ızgara saçak aralığı veya ızgara periyodu denir ve Λ ile gösterilir. λ_i'nin diğer dalgaboylarından farkı şudur: Fiber Bragg ızgaralarının periyodu ile λ_i dalgaboyuna sahip yansıyan dalga eş fazlıdır.



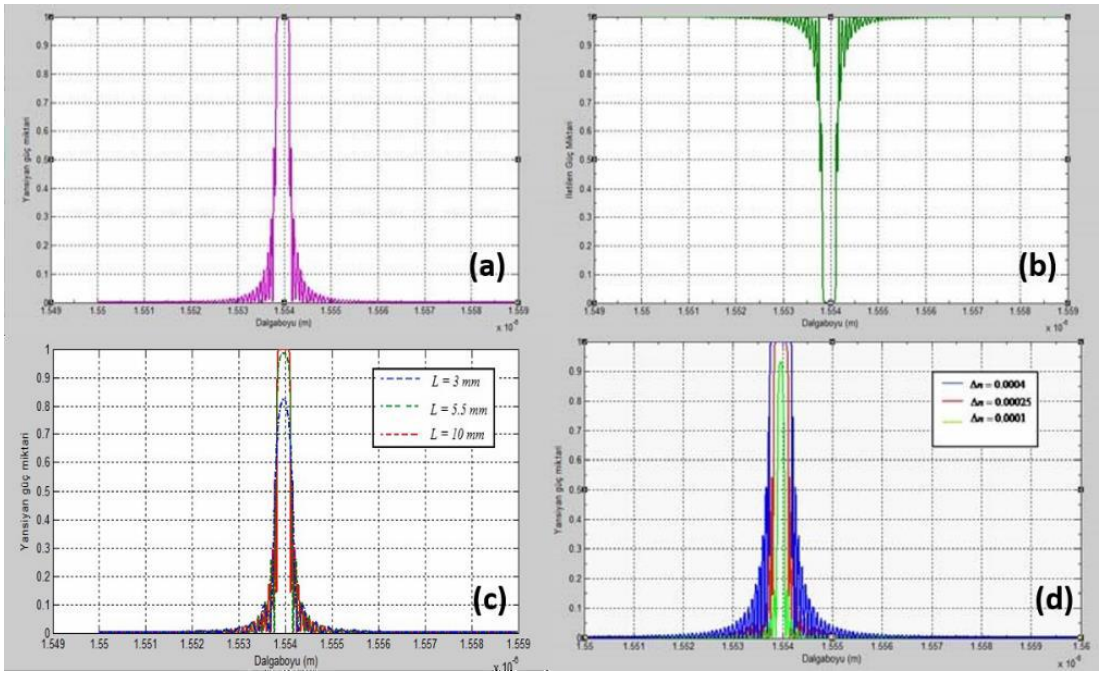
Şekil 3.2 : Fiberde periyodik olarak oluşturulmuş Bragg ızgaralarının basit bir şeması [96].

Fiber çekirdeği yoğun lazer ışığına maruz kaldığında kırılma indisi değişir ve Fiber Bragg ızgaraların optik yansıtıcılığı Bragg dalga (λ_B) için maksimum değerini alır **(3.1)**.

$$m\lambda_B = 2n_{eff}\,\Lambda \qquad m=0,1,... \tag{3.1}$$

Burada n_{eff} efektif kırılma indisiü, λ_B ise maksimum yansımanın gerçekleştiği Bragg dalga boyudur [92-93]. Şekil 3.2a'da ızgaradan yansıyan güç miktarının dalga boyuna göre değişimi, Şekil 3.2b'de iletilen güç miktarının dalga boyuna göre değişimi görülmektedir. Görüldüğü gibi Bragg dalga boyundaki ışığın büyük kısmı yansırken, diğer dalga boylarındaki ışınlar yüksek oranda iletilmektedir.

Yansıyan güç miktarı kırılma indisindeki değişim, band genişliği ve yansıma spektrumunun yan boylarındaki güç değerlerine bağlılık gösterir. Bu parametralerden herhangi biri arttığında yansıyan güç miktarı da artar. Şekil 3.3c'de ızgara uzunluğunun yansıyan güce etkisi, Şekil 3.3d'de kırılma indisi değişiminin yansıyan güce etkisi görülmektedir [93].



Şekil 3.3 : (a) Fiber Bragg ızgaradan yansıyan güç miktarının dalga boyuna göre değişimi (b) Fiber Bragg ızgaralarında iletilen güç miktarının dalga boyuna göre değişimi. (c) Izgara uzunluğuna bağlı olarak yansıyan güç miktarının değişimi (d) Δn değerlerine bağlı olarak yansıyan güç miktarlarının dalga boyuna göre değişimi [93].

Fiberin çekirdeğinde ilerleyen ışık ızgara saçaklarından yansıdığında modlar birbiri ile bağlaşır. Bağlaşımlı kip teorisinden ilerleyen ve yansıyan dalga ilişkisi hesaplanabilir. $U(z)$ ilerleyen, $V(z)$ yansıyan dalga, q AC bağlaşma katsayısı , $\hat{\sigma}$ DC bağlaşma katsayısı olmak üzere, tek modlu fiber için:

$$\frac{dU}{dz} = i\hat{\sigma}U(z) + qV(z) \tag{3.2}$$

$$\frac{dV}{dz} = -i\hat{\sigma}V(z) + q^{*}U(z) \tag{3.3}$$

kuple mod eşitlikleri verilir [92]. Tekdüze ızgaralar için **(3.2)** ve **(3.3)** denklemlerinin analitik çözümlenmesi gerekir. Burada bağlaşma katsayısı q **(3.4)** ile,

$$q(z) = i\kappa(z)exp(-2i\int_0^z \sigma(z')dz') \tag{3.4}$$

ve DC bağlaşma katsayısı $\hat{\sigma}$ **(3.5)** ile verilir.

$$\hat{\sigma} = \delta + \frac{2\pi}{\lambda}\overline{\delta n_{eff}} - \frac{1}{2}\frac{d\Phi}{dz} \tag{3.5}$$

Burada, $\overline{\delta n}_{eff}$ ızgara uzunluğu boyunca indis değişim fonsiyonudur. Eğer ızgara periyodu sabit ise $\frac{d\Phi}{dz}$=0 ve $\overline{\delta n}_{eff}$ =sabit olur. Bu çalışmada yansıma ızgaraları tek düze olduğundan ızgara periyodu sabittir. Dolayısıyla,

$$\hat{\sigma} = \delta + \frac{2\pi}{\lambda}\delta n_{eff} \tag{3.6}$$

bulunur [92]. $\hat{\sigma}$'nin artmasıyla yansıma bant genişliği artmaktadır. δ, bozulmayı ifade eder ve **(3.6)** denklemi ile bulunur:

$$\delta = \frac{n_{eff}}{c}(\omega - \omega_B) = 2\pi n_{eff}\left(\frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda_D}\right) \tag{3.7}$$

Burada, λ_D , δn_{eff} sıfıra yaklaşırken Bragg koşulunu sağlayan dalga boyudur. Izgara uzunluğuna *L* dersek, *V(L)* =0 sınır koşulundan, tek düze ızgaralar için denklemlerin çözümü **(3.8)** ve **(3.9)** olarak elde edilir [93].

$$U(z) = \alpha(\cosh(\alpha(L-z)) - i\delta\sinh(\alpha(L-z)) \tag{3.8}$$

$$V(z) = i\kappa\sinh(\alpha(L-z)) \tag{3.9}$$

Burada, ileri ve geri yöndeki propogasyon modları arasındaki kuplaj katsayısı *κ*,

$$\kappa = \frac{\pi\delta n_{eff}\,\eta}{2n_{eff}\Lambda} = \frac{\pi\delta n_{eff}\,\eta}{\lambda_B} \tag{3.10}$$

ifadesiyle tanımlanır ve *α* **(3.11)** ile verilir.

$$\alpha = \sqrt{\kappa^2 - \hat{\sigma}^2} \tag{3.11}$$

Burada, *η* frekans değişim oranıdır. δn_{eff} kırılma indisindeki değişimdir.
z= L de hiç yansıma olmayacağı ışığın tamamının iletileceği düşünülürse, *V(L)*=0 ve *U(L)*=1 alınır ve yansıma **(3.12a)** ve iletim **(3.12b)** genlikleri sırasıyla,

$$\rho = \frac{V(0)}{U(0)} \tag{3.12a}$$

$$\nu = \frac{1}{U(0)} \tag{3.12b}$$

olur. Izgaradan yansıyan güç miktarı **(3.13a)** ve **(3.13b)**, iletilen güç miktarı ise (3.14a) ve **(3.14b)** eşitlikleri ile verilir [93].

$$R = |\rho^2| \quad \textbf{(3.13a)}$$

$$R = \left(\kappa \sinh \frac{\alpha L}{\alpha \cosh(\alpha L) - i\delta \sinh(\alpha L)}\right)^2 \quad \textbf{(3.13b)}$$

$$T = |\nu^2| \quad \textbf{(3.14a)}$$

$$T = \left(\frac{\alpha}{\alpha \cosh(\alpha L) - i\delta \sinh(\alpha L)}\right)^2 \quad \textbf{(3.14b)}$$

Izgara periyodunun değişkenliğine göre Bragg ızgaraları farklı isimlendirilir. En basit yapı olan tekdüze ızgaralar için periyot ızgara boyunca sabittir. Ancak faz değişken ve faz kaymalı ızgaralarda ızgara saçak aralığı değişmektedir [92, 97]. Bragg ızgaralarını kuplaj karakterine ve üretim sırasında gelişim şekillerine göre de sınıflandırabiliriz. Kuplaj fonksiyonuna bağlı olarak temel ızgaraların üç farklı tipi vardır. Bunlar; ızgara periyodu 0.25 -0.5 mikron kadar olan kısa periyotlu ızgaralar, kısa periyotlu ızgaraları eğerek oluşturulan eğimli ızgaralar, ve ızgara periyodu 100-500 mikron arasında olan uzun periyotlu ızgaralardır [90]. Eğimli ızgaralar ile çekirdekten yansıyan ışınların kuplajını yapmak mümkündür ve bu sayede erbium katkılı fiber yükselticilerde kazanç denkleştirme için kullanılmaktadırlar [98]. Uzun periyotlu ızgaralar ışığın ileriye dönük kuplajını yaparak çoğaltır. Kayıp filtreleri gibi hareket ederler ve sıklıkla kazanç denkleştirme için kullanılırlar. Uzun periyotlu oldukları için tek tek yazmak mümkün olduğundan kolaylıkla yazılabilirler. FBG yapılarını yazımları sırasındaki gelişimlerine göre de sınıflandırmak mümkündür. Bunlardan Tip 0 ızgaralar, Hill tarafından keşfedilmiş kendi kendine organize olan, yani fiberin uçlarından kısmi yansıyan ışınların periyodik girişimleri sonucu oluşan ızgaralardır. Sınırlı kullanım alanları vardır ve Bragg dalga boyu, ızgara yazımında kullanılan ışığın dalga boyuna eşittir. Bunun dışında monoton yapılı Tip I ızgaralar ve yüksek güçlü ışınla tek atımla ve genelde fiberin çekirdeğinde oluşrurulan Tip II ızgaralar [99] vardır [100]. Tip IIa, bir pozitif bir negatif indis değişimi olan yapılardır [101, 102]. Tip III, kimyasal bileşeni olan ve ısıl dayanıklığa sahip ızgaralardır. Oluşumu sırasında fiberin çekirdeği kimyasalla katkılanır. Yazım şekli açısından diğerlerinden farklıdır.

FBG fabrikasyonu için, fiber çekirdeğinin enlemesine lazer ışığına maruz bırakarak girişim deseni oluşturmak gerekir [78-81, 95, 102]. Süregelen çalışmalarda Bragg

ızgaraları oluşturmak için UV ışık kullanılmıştır [66, 69, 103]. Bu çalışmada ise UV ışını yerine fs lazerle Bragg ızgaralar oluşturulmuş ve avantajları analiz edilmiştir.

Radyasyon ile kırılma indisi değiştirme olayı ışığa duyarlılık sonucunda oluşur [103]. Bu durumda fiber bragg ızgaraları ve fotosensitivite ilişkisi hakkında genel bir anlayış vermek yerinde olacaktır. Ultraviyole ile yazım tekniğinde fiberin fotoduyarlılığı önemli bir parametredir. UV ışınlarıyla FBG yazımından önce, fiberin fotoduyarlılığının arttırılması için çeşitli yollara başvurulmaktadır. Bunlar fiberi yüksek sıcaklıkta hidrojen atmosferinde tutma, düşük sıcaklıkta hidrojen katkılama, hidrojence zengin flamanla yerel ısıtma, sıcaklığı yüksek ortamlarda yazımı gerçekleştirme, OH iyonuyla besleme, ve hidrojen katkılı fiberleri UV ışınına maruz bırakma olarak sıralanabilir [103]. Fs lazerlerin ultra yüksek tepe gücü sayesinde foto duyarlılık gereksinimi ortadan kalkar ve fiber Bragg ızgaralar her çeşit fibere yazılabilir [77-81].

Fiber Bragg ızgara küçük boyutu, imalat kolaylığı, uyumluluğu ve düşük maliyeti sebebiyle yaygın olarak optik ağlar [104], dalgaboyu bölmeli çoklamasız optik haberleşme sistemleri [92] ve fiber optik sensörlerde [93] sıklıkla tercih edilen optik bileşenlerden biridir. Ayrıca, uçaklar, savaş gemileri, petrol boru hatları, petrol ve gaz kuyusu rezervuarları ve nükleer reaktörlerde, monitörlemede kullanılmaktadır [105].

FBG yapılarına sıcaklık ve gerilim gibi bir etki uygulandığında ızgaranın periyodunda ve kırılma indisinde değişim olur. Bu durum Bragg dalga boyunun kaymasına yol açar. Dalga boyundaki kaymayı analiz ederek sıcaklık ve gerilimdeki değişimler kolaylıkla yorumlanabilir. Bu da, FBG tabanlı optik sensörlerin çalışma ilkesinin temelini oluşturur [93]. Ancak, yüksek sıcaklık algılama uygulamalarında termal stabilite önemlidir. Bununla birlikte, UV lazer kullanılarak hazırlanan bragg ızgaralarınların termal stabilitesi zayıftır ve sert ortamlarda yüksek sıcaklık algılama için uygun olmayabilir [93]. Ayrıca, malzemenin UV ışınlarına foto duyarlılık göstermesi gerekir. Fs lazer teknolojisi ile klasik metodların aksine, herhangi bir fotoduyarlılık gereksinimi olmadan,lazer gücü kontrol edilerek, her çeşit fiber üzerinde farklı termal stabilite gösteren Tip I ve Tip II ızagaralar oluşturulabilir [100]. Fs lazeri farklı kılan, fiberin fs-lazerle etkileşimi sırasında, enerji emiliminin, multifoton, tünelleme ve çığ iyonizasyonu gibi doğrusal olmayan fenomenler aracılığıyla gerçekleşmesidir. Ultra kısa darbe süresi sayesinde malzemenin fazla enerji emmesine izin verilmediğinden katastrofik hasarlar önlenmiş olur ve ısıl dayanıklılık artar. Örneğin, safir fibere fs ile

yazılan bragg ızgaraları 2000 ℃ ye kadar termal stabilite gösterirken, silika fiberlere fs lazerle yazılan Tip 2 Bragg ızgaraları 1200 ℃ kadar dayanabilir. Bu sayede fs lazer ile fiberde oluşturulan Bragg ızgaraları yüksek sıcaklık algılama uygulamalarında kullanılabilir [1,18].

Bunun dışında, güç ölçeklemek için kompakt, sağlam ve ucuz yüksek güç kaynaklarına olan talep araştırmaları entegre monolitik fiber kurulumlarına doğru itmektedir. Bu amaçla fiber çekirdeğinin modülasyonu için Bragg ızgaraları kullanılabilir. Geniş çekirdeklerde ultraviyole ışınla fiber Bragg ızgaralar oluşturmak iki açıdan zordur: İlk olarak, büyük kesitli fiberlerde Bragg ızgaraları yazımı zaman alıcı ve masraflıdır. İkincisi düşük modlu fiberlerde çok modlu etkileşimler modal kararsızlıklar ve polarizasyon etkilerine yol açar. Ancak, şeffaf malzemelerde fs lazerlerin kullanım esnekliği vardır [106]. Fs lazerle kırılma indisi değişiklikleri fiber çekirdeği içinde, hatta fiber kaplama içinde lokalize olabilir. Kırılma indisi değişikliklerinin konumu ve büyüklüğüne göre farklı çekirdek veya kaplama modları sağlanabilir (tümleşik mod filtreleme ve ışın şekillendirme). Bu bağlamda, FBG yazımı yeni olanaklar ve tasarım seçeneklerini mümkün kılar.

Öte yandan, optik ışık fiber Bragg ızgaradan geçerken zaman gecikmesine uğrar. Izgaraların bu özelliği iletim hattının dispersif yapısını değiştirir. Diğer bir deyişle fiberin çekirdeğinden geçerken dispersiyona uğrayan ışık tersine dispersiyona uğrar ve ışığın dağılmasını önlenir.

Özetle, fiber Bragg ızgaraları sıcaklık gerilme sensörü [93], dispersiyon kompanzatörü [92] ve optik yükselticilerin kazanç spektrasının düzeltilmesi amacıyla kullanılabilir. Düşük yerleştirme kaybı, düşük polarizasyon hassasiyeti ve esnek tasarım bu uygulamalamlarda FBG yapılarına önemli avantajlar sağlamaktadır [106].

Bu yazıda, fs lazerle çeşitli materyaller üzerinde Bragg ızgaraları oluşturulması anlatılmıştır. Ultra kısa atımlı fs lazer radyasyonuyla fiber çekirdeği üzerinde girişim meydana getirerek Bragg ızgaraları yazmanın standart UV lazeri ile FBG yazımı teknikleri kadar kolay uygulanabildiği gösterilmiştir.

3.2 Deneysel Düzenek

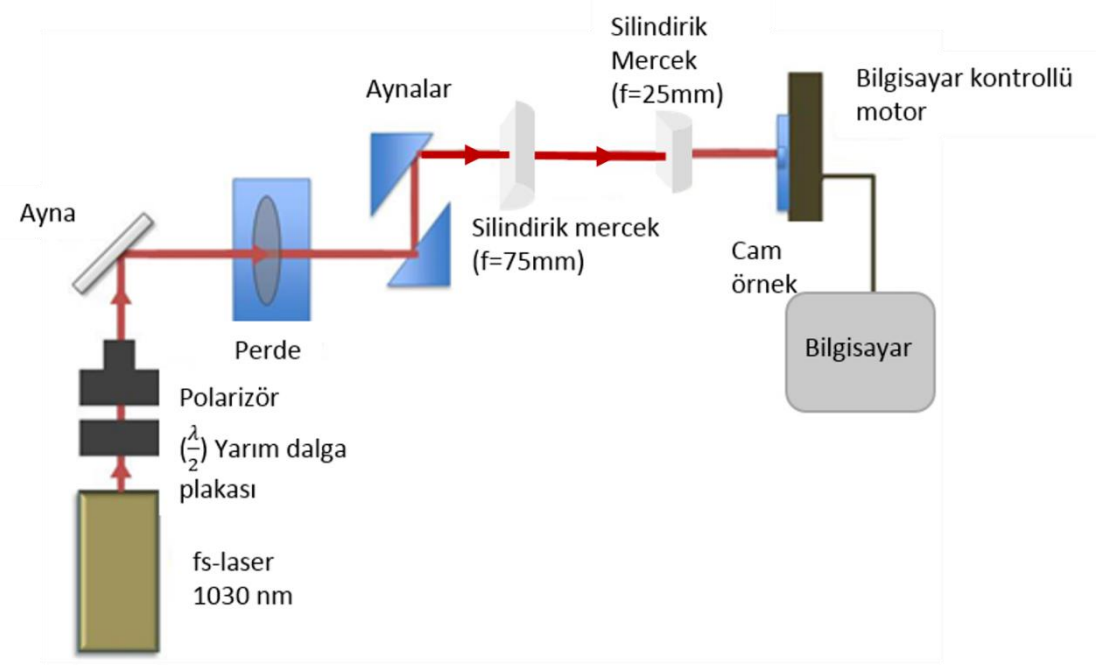
Ultraviyole lazer yaklaşımıyla kıyaslandığında fs tekniğin önemli bir avantajı Bragg ızgaraların UV radyasyona foto duyarlı olması gerekmeyen birçok optik malzemede

etkili olmasıdır [104]. Bu çalışmada, fs lazer atımlarını silindirik mercekle çizgisel odaklayarak fiber üzerinde kırılma indisi değişimi meydana getirip Bragg ızgaraların yazılabileceği analiz edilmiştir. Fabrikasyon aşamasında kullanılacak ışığın dalga boyu, band genişliği, gücü, saçaklar arası periyot, işleme süresi ızgaraların yapısını belirleyen önemli parametreler olmuştur. Çalışmanın karakterizasyon kısmında, yansıyan ve iletilen güç miktarlarının, ızgara periyoduna, ve kullanılan güç değerlerine bağlı olarak değişimi irdelenmiştir.

Çalışmanın birinci aşamasında kırıcılık indisi cam üzerinde Bragg ızgaraları aynı güç değerinde çeşitli periyotlarla fabrike edilmiş ve karakterizasyonu yapılmıştır. İkinci aşamada silika katkılı optik fiber üzerinde sabit periyotla değişik güçlerde Bragg ızgaraları oluşturulmuş ve karakterizasyonu yapılmıştır.

3.2.1 Cam üzerinde kırılma indisi değişimi fabrikasyonu

Çalışmanın bu aşamasında, fiber üzerinde ızgara fabrikasyonundan önce, cam bir malzemeyi yakmadan kırılma indisi değişikliği yaratacak en uygun parametreleri bulmak için optimizasyon çalışmaları yapılmıştır. Çalışmanın ilerleyen kısmında kullanılacak fiberin çekirdeği cam olduğundan burada elde edilecek sonuçlar önemlidir. İlk olarak lazer gücü, daha sonra işleme süresi parametrelerinin fs lazerle cam üzerinde Bragg ızgara oluşumundaki etkileri araştırılmıştır. Daha sonra cam malzeme üzerinde değişik periyotlarda Bragg ızgaraları oluşturulmuş, ve ızgaraların spektral özelliklerinin analizi yapılmıştır. Cam üzerinde kırılma indis modülasyonunda kullanılan deney düzeneği Şekil 3.4'de gösterilmektedir.

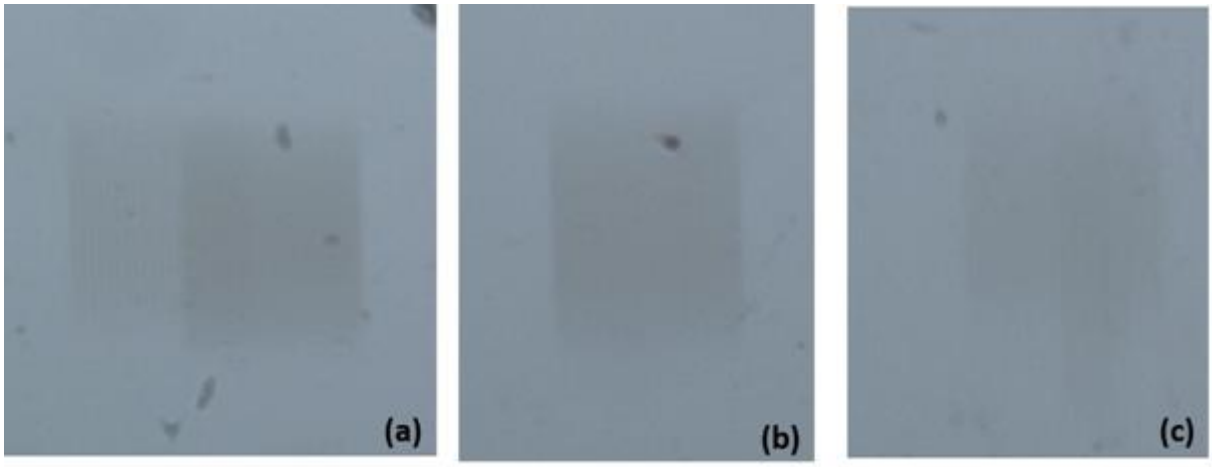


Şekil 3.4 : Cam üzerinde kırılma indisi değişimi fabrikasyonu deney düzeneği.

Çalışmada, Yb: Cam femtosaniye lazeri kullanılarak, tekrarlanma frekansı 1kHz, darbe süresi ~550 fs olan 1030 nm dalga boyunda darbeler üretilmiştir. Ortalama güç 75 mW'tır (Ortalama enerji 0.075 mJ). 75 ve 25 mm'lik silindirik lensler birlikte kullanılarak çizgisel odaklama sağlanmıştır. Cam numunelerinin optik zarar görmesini engellemek için örnek lensin odak noktasının biraz ötesine yerleştirilmiştir. Işın profili Gauss profilindedir ve odakta hüzme çapı 3μm'ye yakındır. Cam örnek 3 boyutta hareket edebilen bilgisayar kontrollü motor üzerine monte edilip, motorun hareketi için Nano Root 3-D bilgisayar programı kullanılmıştır. Izgaralar tek tek yazıldığından ışığın örnekle etkileşim süresini kontrol edebilmek için bilgisayara shutter bağlanmıştır. Shutterın kontrolü için APT bilgisayar programı kullanılmıştır ve her bir ızgara için işleme süresi 100 ms olarak optimize edilmiştir. Lazerin ışığını yükseltmek için 1030 nm'yi en iyi yansıtan dielektik ayna kullanılmıştır.

İlk olarak, eşik enerji değerini bulabilmek için kalınlığı 1 mm olan cam (mikroskop camı) örnek üzerinde lazer gücünün etkisi araştırılmıştır. Birim yüzeye düşen ışık enerjisi çok düşük değerlerde indis değişimi meydana getiremezken çok yüksek değerlerde örneği yakabilir. Malzemede katastrofik hasar meydana getirmeden kırılma indisini değiştirecek eşik enerjiyi bulabilmek için, örnek üzerinde değişik atım enerjilerinde denemeler yapılmıştır. Cam örnek için en uygun enerji 75 μJ (~75mW) olarak bulunmuştur. Gücü ayarlamak için kutuplayıcı ve yarım dalga plakası

kullanılmıştır. Gauss hüzmeleriyle çalışmadan önce aksikon kullanılarak Bessel hüzmeleriyle çalışılmış, ancak fabrike edilen ızgaraların boyu yeterince uzun olmadığından, bir seferde pek çok ızgara elde etmek yerine, silindirik mercek kullanarak tek tek ve daha uzun ızgaralar yazılması uygun görülmüştür. Daha sonra, örnek 3 boyutta hareket edebilen bilgisayara bağlı motorla kontrol edilerek, uzunluğu 200 μm olan bir bölgeye, her bir ızgara için 100 ms süreyle (ızgara başına 100 atım) fs lazer ışınları düşürülmüştür. Odakta Gaussiyen dağılan lazer ışınlarının çok kısa adım aralıklarında girişim meydana getirmesini önlemek için uygun ızgara periyotlarıyla çalışmak gerekir. Odakta hüzme genişliği ~3mikron olduğundan, ızgara periyodu 4μm'ye kadar minimize edilebilmiştir. Farklı adım aralığıyla oluşturulmuş ızgaraların, spektral özelliklerini ve kırılma indis değişimini karşılaştırabilmek için periyodu 10μm, 5μm ve 4μm olarak değişen yapılar oluşturulmuştur. Şekil 3.4 camda fs lazer taramasıyla oluşturulan ızgaraların optik mikroskop görüntülerini göstermektedir. Şekil 3.4a'da solda 200 μm genişliğinde, 10 μm periyotlu ızgara, sağda 200 μm genişliğinde 5 μm periyotlu ızgaralar, Şekil 3.4b'de 200 μm genişliğinde 5 mikron periyotlu ızgaralar, Şekil 3.4c'de 200 μm genişliğinde 4 μm periyotlu ızgara profilleri görülmektedir.



Şekil 3.5 : Camda 1030 nm femtosaniye lazer taramasıyla oluşturulan ızgaraların optik mikroskop görüntüleri (a) Solda 200 μm genişliğinde, 10 μm periyotlu ızgaralar, sağda 200 μm genişliğinde 5 μm periyotlu ızgaralar. (b) 200 μm genişliğinde 5 mikron periyotlu ızgaralar. (c) 200 μm genişliğinde 4 μm periyotlu ızgaralar.

Fabrikasyondan sonra oluşturulan her yapının kırılma indisi değişimi, saçak kaymasını optik yol değişikliği ile ilişkilendiren bir interferometre düzeneği kullanılarak ölçülmüştür.

3.2.2 Cam üzerindeki Bragg ızgaraların karakterizayonu

Yüksek enerjili bir atım doğrusal olmayan bir ortam içinde hareket ederken odaklanma sebebiyle ışın ekseni üzerinde yoğunluk fazla olacağından, geçirgen malzeme önce erir sonra katılaşır [107]. Bu durum Kerr etkisinin bir sonucudur. Optik Kerr etkisinde, bir ortamdaki optik yoğunluk çok yüksek olduğunda doğrusal olmayan faz gecikmesi meydana gelir [2]. Işık, yoğunluğuyla doğru orantılı olarak kırılma indisinde bir değişikliğe sebep olur. Bu etki lazer ışını gibi çok yoğun ışınlarda meydana gelir.

Çalışmanın bu kısmında camda oluşturulan Bragg ızgaralarının spektral özelliklerini analiz etmek ve ızgaralardaki kırılma indisi değişimini ölçmek için bir interferometre deney düzeneği kullanmak uygun olacaktır. Lazer ışığının girişim özelliğinden yararlanarak geçirgen maddelerin kırılma indislerinin ölçümünde ve saydam cisimlerin yüzeylerinin düzgünlüğünün kontrolü için kullanılan interferometre, monokromatik ve paralel ışın demetlerini kısmi geçirgen bir levha olan ışın ayırıcı üzerine düşürür. Işın ayırıcı, üzerine düşen ışınların bir kısmını geçirerek düzlem aynaya gönderir. Düzlem aynadan yansıyan ışınlar, bir başka ışın ayırıcının içinden geçer. Kısmi yansıtıcı bu ışınları CCD kameraya gönderir. Işın ayırıcıdan yansıtılan ikinci ışın demeti, levhayı geçerek yansıdıkları aynaya dik olan başka bir aynadan yansır, örnek üzerinden geçer ve bir başka ışın ayırıcıdan geçerek CCD kameraya ulaşır. Bu iki ışının yol farkından dolayı girişim yapmasıyla ekranda karanlık ve aydınlık saçaklar gözlenir.

Çalışmanın karakterizasyon aşamasında, işlenmiş bölgelerin çok yakınında boş cam üzerinde, daha sonra ise işlenmiş bölge üzerinde girişim meydana getirerek, gözlenen saçakların arasındaki optik yol farkı analiz edilmiştir. Cam üzerinde oluşturulan Bragg ızgara yapılarının interferometrik analizi için Şekil 3.6'daki düzenek kurulmuştur. Şekil 3.6'daki Mach-Zehnder interferometresi işlenmiş bölgelerdeki kırılma indisi artışı ve bu yapılardan geçip optik yolunu değiştiren ışınların sebep olduğu saçak kaymasını ilişkilendirmektir. Diğer bir deyişle, çalışmanın bu aşamasında kullanılan interferometre sadece kırılma indisindeki oynamaları ölçecektir.

Örneklerin üzerine 632 nm dalga boylu He-Ne lazer ışığı düşürüldüğünde, ışık camdan geçer ve ışın ayırıcıdan gelen hüzmelerle girişim yapar. λ_{test} interferometre kurulumunda kullanılan lazerin dalga boyu (burada 632 nm), L cam numunenin kalınlığı (~1 mm), Δn kırılma indisindeki değişim, k dalga sayısı **(3.15)** olmak üzere, ardışık iki saçak için faz kayması $\Delta\varphi$, **(3.16)** denklemi ile belirlenir [107]:

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \tag{3.15}$$

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda_{test}} \Delta \mathrm{nL} \tag{3.16}$$

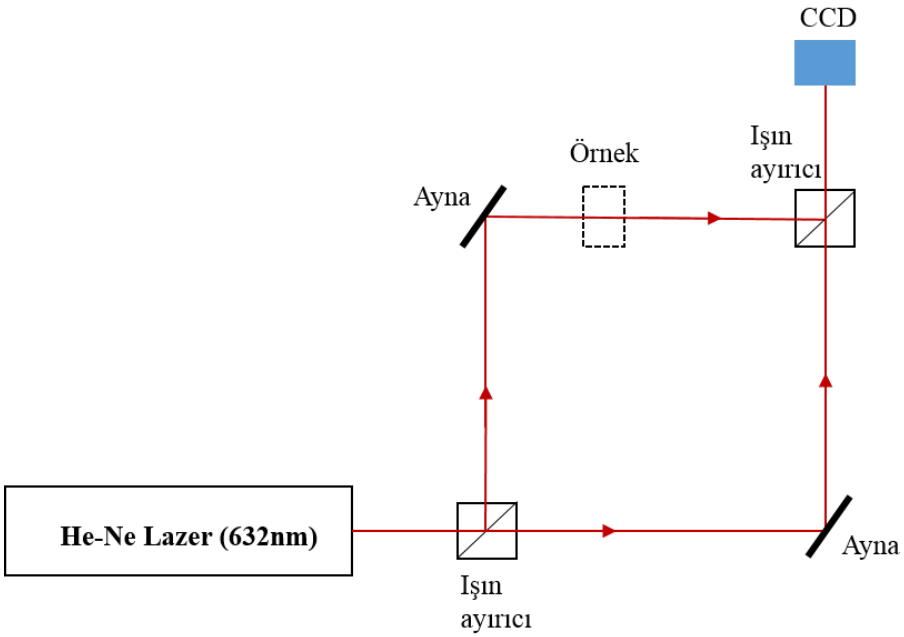
Burada faz kayması **(3.17)** eşitliği ile verilirse, camdaki kırılma indisi değişimini (Δn) veren denklem **(3.18)** olur.

$$\Delta\varphi = \pi \frac{\Delta\Lambda}{\Lambda} \tag{3.17}$$

$$\Delta n = \frac{\lambda_{test}}{2L} \frac{\Delta\Lambda}{\Lambda} \tag{3.18}$$

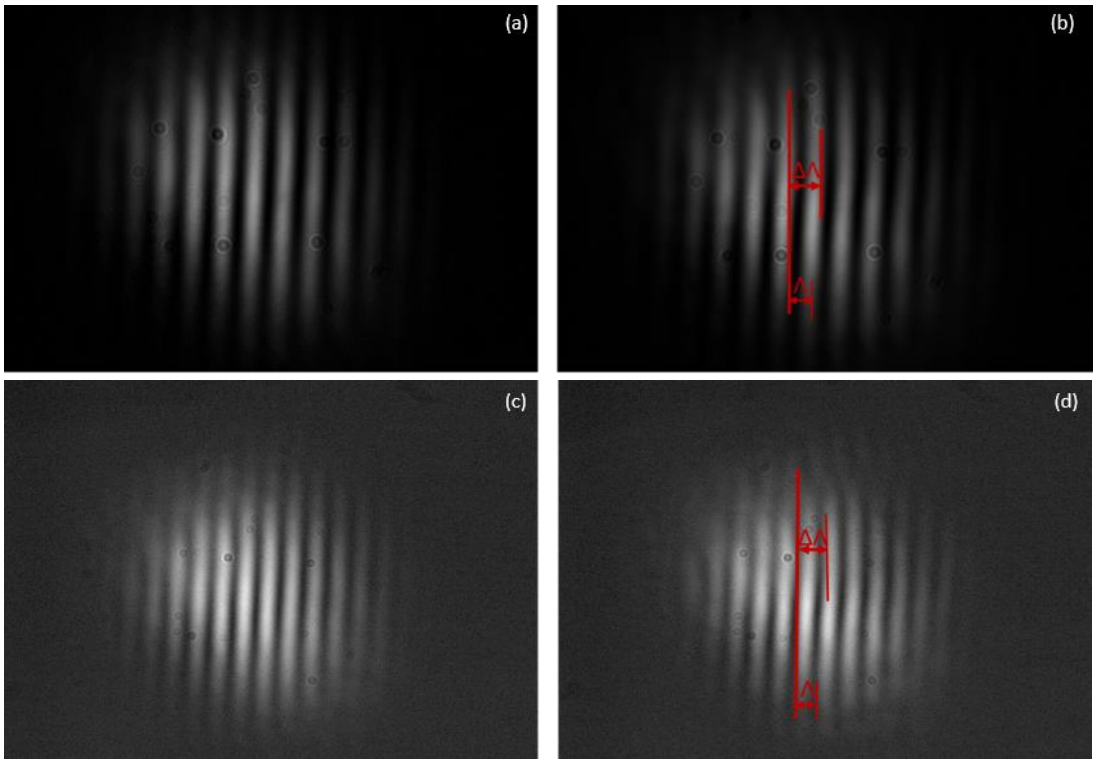
(3.17) ve **(3.18)**'de Λ ızgara periyodu, $\Delta\Lambda$ ızgara periyodundaki değişimdir. $\frac{\Delta\Lambda}{\Lambda}$ maksimum bozulmanın olduğu yerdeki saçak kaymasıdır.

İşlenmiş bölgelerden geçen ışınlar camdaki kırılma indisi artışı sebebiyle optik yolunu değiştirir. Gecikmeye uğrayan ışınların oluşturduğu saçaklarda kayma meydana gelir. Camın işlenmemiş, boş bölgelerine gönderilen ışınların periyodu Λ, işlenmiş bölgelerinden geçen ışınların oluşturduğu saçakların periyodu $\Delta\Lambda$ olmak üzere, iki saçak için faz kayması $\frac{\Delta\Lambda}{\Lambda}$ olur.



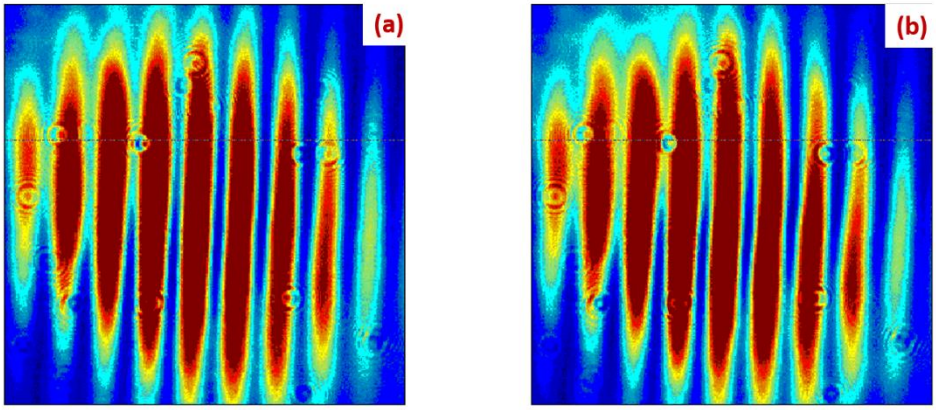
Şekil 3.6 : Mach-Zehnder İnterferometresi. Camın işlenmiş ve işlenmemiş bölgelerine düşen 632 nm dalga boylu He-Ne Lazer ışınları düşürerek oluşturulan saçakların CCD kamera görüntüsüne ait deney düzeneği.

Şekil 3.7'de cam numunenin işlenmiş ve işlenmemiş bölgelerinde gözlenen saçak desenlerinin CCD kamera görüntüleri gösterilmektedir. Şekil 3.7b ve Şekil 3.7d'de yüksek güçlü fs lazer darbelerine maruz kalan bölgelerde kırılma indisi değişimine bağlı saçak kaymaları görülmektedir.



Şekil 3.7 : Cam numunenin işlenmiş ve işlenmemiş kısımlarına ait CCD kamera görüntüleri. Farklı periyotlarla işlenmiş cam numune üzerine düşürülen He-Ne lazer ışınlarının girişim saçakları ve saçaklardaki kaymalar gözlenmektedir. Soldaki sütunlar (a), (c) işlenmemiş yüzeylerinin görüntüsünü, sağdaki sütunlar ise 10 μm (b) ve 5 μm (d) periyotla işlenmiş yüzeyin görüntüsünü göstermektedir.

Camda meydana gelen kırılma indisinin hesaplanabilmesi için, işlenmiş cam üzerine düşen 632 nm dalga boylu He-Ne Lazer ışınlarının girişim yaparak oluşturduğu saçaklar ile boş cam üzerine gönderilen ışınların oluşturduğu saçaklar arasındaki faz kaymasını hesaplamak gerekmektedir. Bu amaçla, CCD kamera ile alınan görüntülerin MATLAB analizi yapılmıştır. Şekil 3.7'de işlenmemiş yüzeye ve 5 μm periyotla işlenmiş yüzeyin CCD görüntüsüne ait renklendirilmiş MATLAB analizi görülmektedir. Görüntünün üstündeki siyah çizgi saçak kaymasının hesaplandığı düşey kesite aittir. Sonuç olarak, periyodu 10μm ve 5 μm olan ızgara yapıları için faz kaymaları sırasıyla; $\Delta\varphi = \frac{2\pi}{8}$ ve $\Delta\varphi = \frac{2\pi}{10}$ olarak bulunmuştur.



Şekil 3.8 : Cam numunenin işlenmemiş yüzeyinin (a) ve 5 μm ızgara periyodu ile işlenmiş yüzeyinin (b) CCD görüntülerinin MATLAB Analizi.

λ_{test} = 632 nm, cam numunenin kalınlığı L= (~1 mm) alındığında, denklem **(3.15)** ile kırılma indisi değişimi sırasıyla $\Delta n \sim 79 \times 10^{-6}$ ve $\Delta n \sim 60 \times 10^{-6}$ olarak hesaplanmaktadır.

3.3 Fiber Bragg Izgara Fabrikasyonu

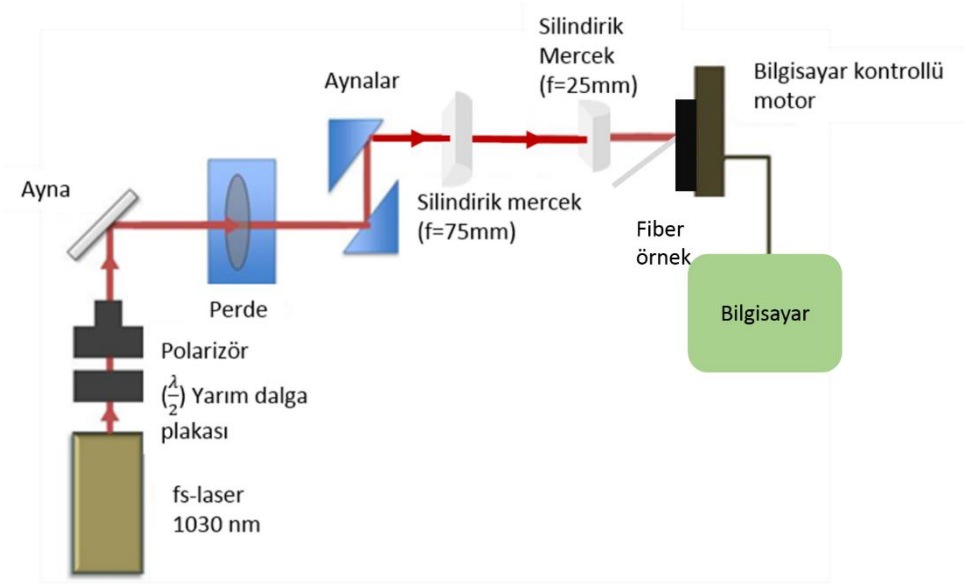
3.3.1 Örneklerin hazırlanması

Bragg ızgara yazımı için kullanılan fiberlerin hazırlık prosedürü şu adımlardan oluşmuştur: İlk olarak, her bir örnek, rubi kesiciyle yaklaşık 40mm uzunluğunda kesilmiş, dış çeper soyma makası ile sırasıyla önce dış korucu malzeme ve sonra iç plastik koruyucu sıyrılmıştır. Daha sonra, iç çeper soyma makası ile cam nüve üzerindeki ince silikon örtü soyulmuştur. Fiber örnekler alkol ve aseton ile temizlenmiş, temizliğin yeterli görülmediği durumlarda ultrasonik banyoda yıkanmışlardır. Böylece örnekler ızgara yazımı için hazır hale gelmiştir.

3.3.2 Fs lazer ile ızgara yazımı

Bragg ızgaraları bir fiberin çekirdeğini yoğun periyodik ışınlara maruz bırakarak elde edilen kırıcılık indisi yapılarıdır. Radyasyon ile kırılma indisi değiştirme olayı ışığa duyarlılık sonucunda oluşur. Fs ile cam gibi geçirgen malzeme işlerken, ışığa duyarlılık gereksinimi ortadan kalkar. Çalışmanın bu kısmında, fs lazer ile fiberin cam çekirdeği üzerinde FBG fabrikasyonu yapılmıştır. İlk olarak lazer gücü, daha sonra tarama süresi parametrelerinin fs lazerle fiber üzerinde FBG oluşumundaki etkileri

araştırılmıştır. Daha sonra silika katkılı fiber üzerinde sabit periyotla Bragg ızgaraları oluşturulmuş ve ızgaraların spektral özelliklerinin analizi yapılmıştır. Şekil 3.9'da fiber üzerinde kırılma indis modülasyonunda kullanılan deney düzeneği gösterilmektedir.



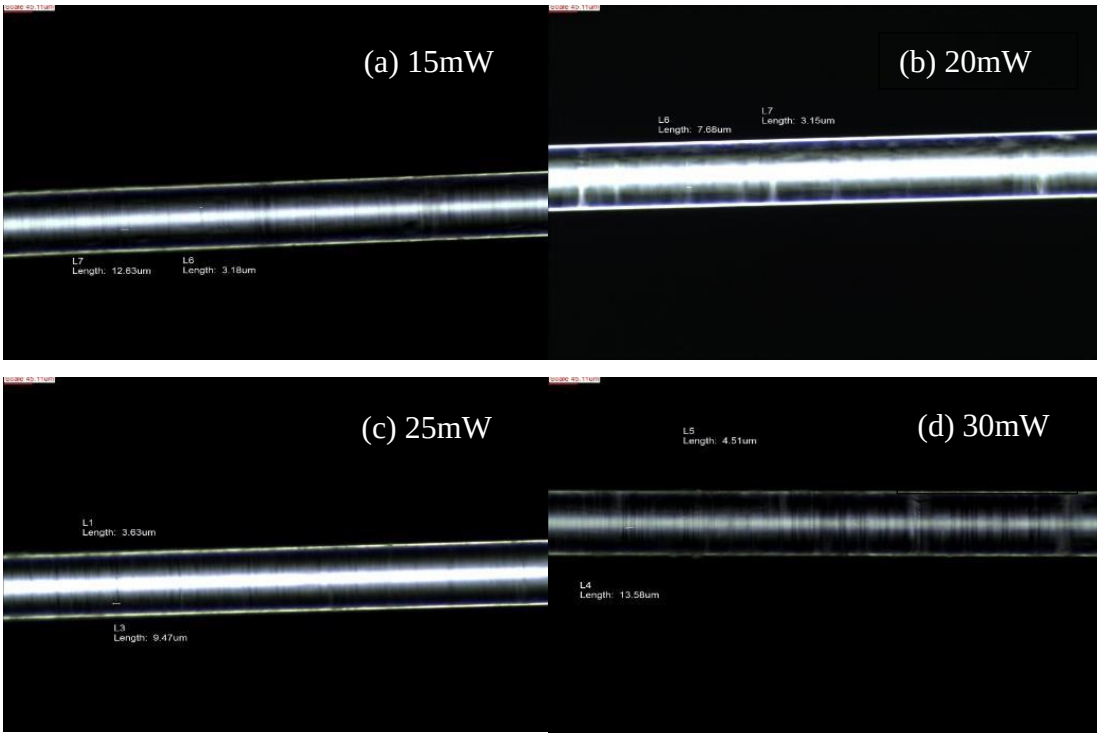
Şekil 3.9 : Fs lazer ile fiber Bragg ızgara fabrikasyonu deney düzeneği.

Çalışmada, kullanılan iterbiyum cam fs lazerinin tekrarlama frekansı 1kHz'dir. Atımların darbe süresi 550 fs ve dalga boyu 1030 nm'dir. Ortalama enerji 0.015-0.040 mJ arasında değişmektedir. Gücün kırılma indisi modülasyonu üzerindeki etkisini analiz etmek için, eşik güce yakın değerlerde, ortalama 15-40 mW aralığında güçlerde çalışmalar yapılmıştır. Lazer ışınlarının yeteri kadar ince bir çizgi halinde odaklanabilmesi için 75 mm ve 25 mm'lik silindirik lensler kullanılmıştır. Silindirik mercekle odaklanan çizgiler fiberin uzunlamasına doğrultusuna dik gelmektedir. Fiber optik malzemenin örnek tutucu üzerinden aşağı doğru sarkmaması için, örnek; metal levha üzerinde hazırlanmış bir kılavuz içine yerleştirilmiş ve fiberin açıkta kalan kısmının boyu yeterince küçük tutularak bantla sabitlenmiştir. Bu sayede fiberin yere paralel tutulması sağlanarak, odağın dışına çıkması önlenmiştir.

Kullanılan ışın profili gauss profilinde olup odakta huzme çapı enine ~4-5 μm' dir. Fiber örnek 3 boyutta hareket edebilen bilgisayar kontrollü motor üzerine monte edilip, motorun hareketi Nano Root 3-D bilgisayar programı ile sağlanmıştır. L=1 cm uzunluğunda bölgelere 10 μm'lik sabit periyotlu ızgaralar (1000 adet ızgara) tek tek yazılmıştır. Işığın örnekle etkileşim süresini kontrol edebilmek için bilgisayar kontrollü sürgü kullanılmış, APT programlama dili aracılığıyla, sürgünün açık kalma

süresi her bir ızgara için 100 ms olarak ayarlanmıştır. Karşılıklı yerleştirilmiş iki adet dielektik ayna kullanılarak, lazer ışınlarının yerden yüksekliği arttırılmıştır.

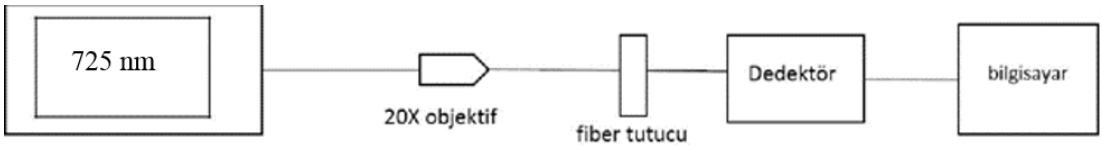
İlk olarak, eşik enerji değerini bulabilmek için merkez çapı yaklaşık 60 μm, (cam örtüyle beraber 246 μm), uzunluğu 40 mm olan silika katkılı fiber optik kablolar üzerinde lazer gücünün etkisi araştırılmıştır. Malzemede hasar oluşturmadan kırılma indis modülasyonu sağlayacak eşik güç değerini bulmak için, örnek üzerinde çeşitli enerji değerlerinde denemeler yapılmıştır. Fiberi yakmadan kırılma indisi değişimi meydana getirecek en uygun enerji aralığı 15-40 μJ arasında bulunmuştur. Gücü ayarlamak için kutuplayıcı ve yarım dalga plakası kullanılmıştır. Daha sonra, örnek 3 boyutta hareket edebilen bilgisayara bağlı motorla kontrol edilerek, her bir ızgara için 100 ms süreyle (ızgara başına 100 atım) fs lazer ışınları düşürülmüştür. Odakta lazer ışınlarının çok kısa adım aralıklarında girişim meydana getirmesini önlemek için uygun ızgara periyotlarıyla çalışmak gerekir. Odakta hüzme genişliği ~4-5 mikron olduğundan, ızgara periyodu 10 μm olmuştur. Şekil 3.10 fiberde fs lazer taramasıyla oluşturulan 15mW (a), 20 mW (b), 25mW (c) ve 30mW (d) atım güçleriyle oluşturulmuş ızgaraların optik mikroskop görüntülerini göstermektedir.



Şekil 3. 10 : 15 mW (a), 20 mW (b), 25 mW (c), 30mW (d) güçlerle işlenmiş fiber Bragg ızgaraların optik mikroskop görüntüleri.

3.3.3 Fiber Bragg ızgaraların karekterizasyonu

Fiber Bragg ızgaraların temelini, optik fiber dalga kılavuzunun çekirdeğindeki kırılma indisinin, fiber uzunluğu boyunca belirli periyotlarla değişimi oluşturmaktadır. Fiber üzerinde oluşturulan Bragg ızgaralara ışık gönderdiğimizde yansıyan ışığın dalga boyunda kaymalar meydana gelir. Kullanılan ışığın enerji yoğunluğu ve ızgara periyodu kırılma indis değişimini, dolayısıyla Bragg dalga boyunu etkileyen faktörlerdir [107]. Bu nedenle yansıyan dalga boyunda meydana gelen değişimleri analiz edebilmek için parametrelerden herhangi birini sabit tutmak gerekir. Çalışmanın karakterizasyon aşamasında ızgara periyodu sabit ve 10 mikron olarak alınmış, işlenmiş fiberlerde çeşitli lazer güçlerinin Bragg dalga boyuna etkisi incelenmiştir. Diğer bir deyişle Fiber Bragg ızgaraların, yansıttıkları enerji yoğunluğunun, işlemede kullanılan ışığın yoğunluğuyla ve kırılma indisindeki değişimle ilişkisi incelenmiştir. Bu amaçla karakterizasyon için spektroskopi analizi yapılmıştır. Optik spektoskopi maddenin özelliklerini ışık aracılığıyla analiz etmeye imkân sağlar. Çalışmada Ava-Spec 3648 fiber optik spektrometre ve AvaSoft 753/210 Avantes yazılımı kullanılmıştır. Şekil 3.11'de karakterizasyonda kullanılan düzeneğin şeması görülmektedir.



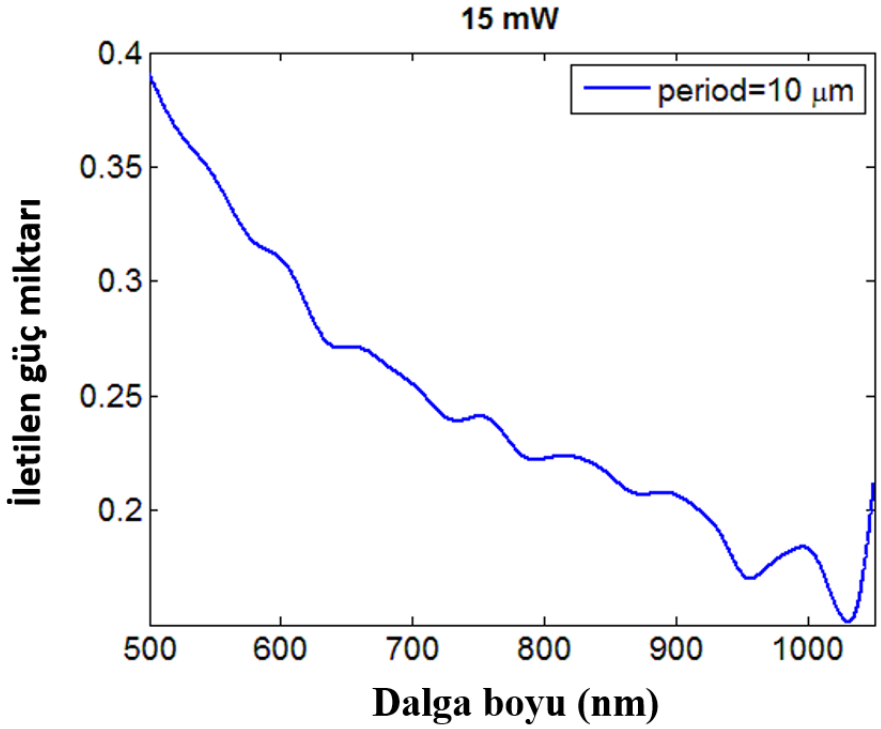
Şekil 3.11 : Fiber Bragg ızgaraların spektroskopi analizi için kurulan spektrometre düzeneğinin şeması.

Işığın fiberin içindeki dalga boyu λ_{fiber}, ızgara periyodunun (5µm, 10µm) tam katları olmasına dikkat edilerek 500 µm olarak kararlaştırılmıştır. Fiberin kırılma indisi n_{eff}, 1.45 alındığında, ışığın havadaki dalga boyu λ_B **(3.19)** eşitliği ile verilir.

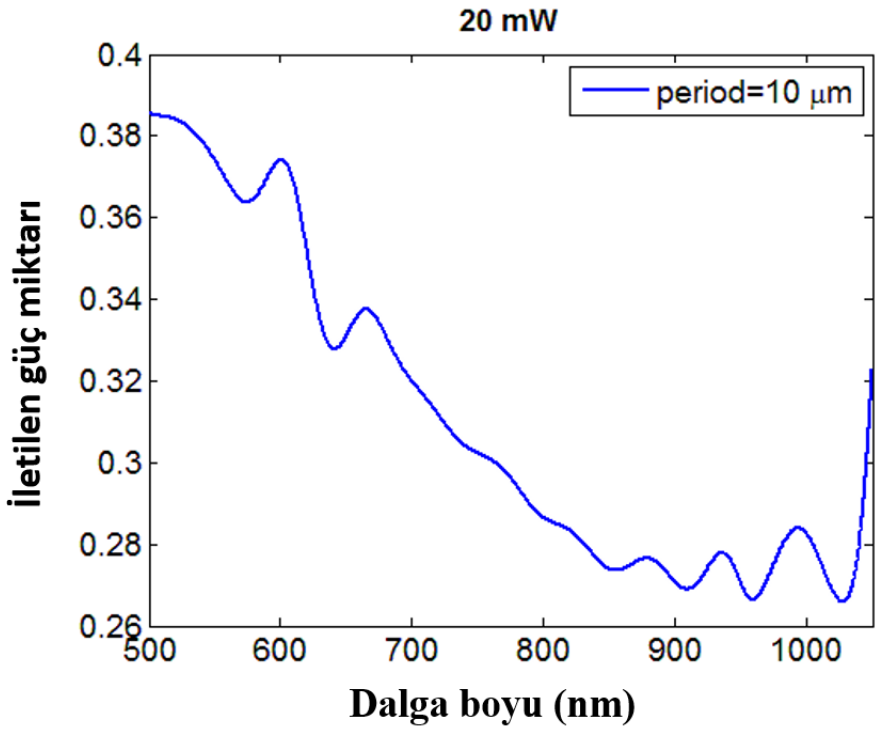
$$\lambda_{fiber} * n_{eff} = \lambda_B \qquad \textbf{(3.19)}$$

Denklem **(3.19)** kullanılarak fibere gönderilen ışık 725 nm hesaplanmıştır. Bu nedenle spektrometrede 725 nm dalga boylu ışık kullanılmıştır. 15mW (Şekil 3.12), 20mW (Şekil 3.13), 25mW (Şekil 3.14) ve 30mW (Şekil 3.15) güç ile çalışılmış fiberlerin spektroskopi analiz sonuçları göstermektedir ki, güç miktarının ve kırılma indisi değişiminin artan değerleri için yansıyan güç miktarı artmıştır. Ayrıca, Değişik lazer gücü ve kırılma indisi değerleri için yansıyan dalga boyunun değiştiği görülmüştür.

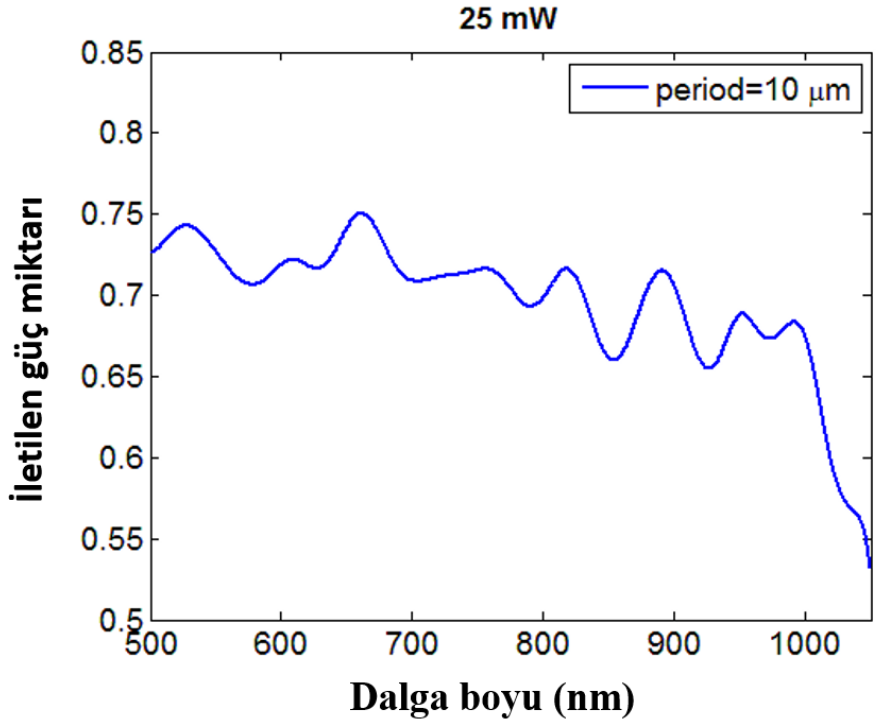
Grafiklerde ışık gücünün minimalize olduğu dalga boylarında, ızgaraların maksimum yansıtıcılık gösterdiği sonucuna varılmıştır.



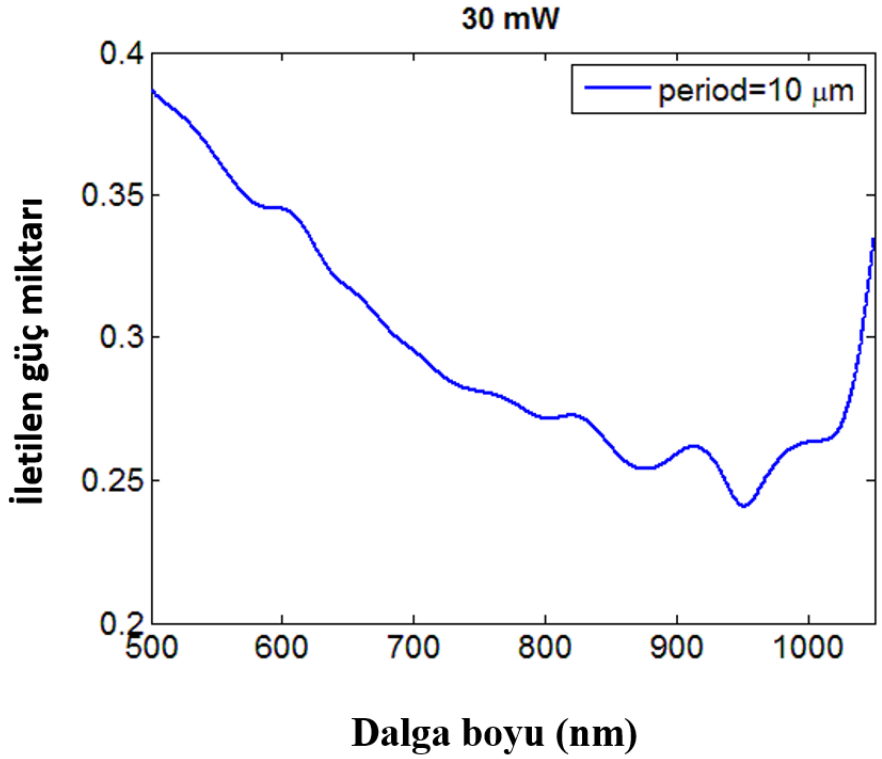
Şekil 3.12 : 15mW güçle yazılmış fiber Bragg ızgaraların spektroskopi analizi sonuçları. Izgaralardan geçen ışık gücünün dalga boyuna göre değişimi.



Şekil 3.13 : 20mW güçle yazılmış fiber Bragg ızgaraların spektroskopi analizi sonuçları. Izgaralardan geçen ışık gücünün dalga boyuna göre değişimi.



Şekil 3.14 : 25mW güçle yazılmış fiber Bragg ızgaraların spektroskopi analizi sonuçları. Izgaralardan geçen ışık gücünün dalga boyuna göre değişimi.



Şekil 3.15 : 30mW güçle yazılmış fiber Bragg ızgaraların spektroskopi analizi sonuçları. Izgaralardan geçen ışık gücünün dalga boyuna göre değişimi.

3.4 Sonuçlar

Şekil 3.12, Şekil 3.13, Şekil 3.14 ve Şekiil 3.15 incelendiğinde görülmektedir ki, ızgaralardan geçen ışığın şiddeti belirli dalga boyu değerlerinde minimum olmaktadır. Buradan, grafiklerin ani düşüş gösterdiği dalga boyu değerlerinin Bragg dalgaboyu olduğu ve ızgaraların $\boldsymbol{\lambda_B}$ ile gelen ışınlara maksimum yansıtıcılık gösterdiği sonucu çıkarabilir.

Ancak dikkat edilmesi gereken bir nokta vardır: Bragg ızgaralar birden fazla dalga boyu değeri için maksimum yansıtıcılık göstermiştir, bu da; birden fazla $\boldsymbol{\lambda_B}$ değeri olabileceği sonucunu doğurur. Bu durum şöyle açıklanabilir: Denklem **(3.1)**'de verilen ifadede $\boldsymbol{\lambda_B}$ çekilirse,

$$\lambda_B = \frac{2\Lambda n_{eff}}{m} \tag{3.21a}$$

$$2\Lambda = m\lambda_{fiber} = \frac{m\lambda_B}{n_{eff}} \tag{3.21b}$$

$$\lambda_B = \left(\frac{2 * 1.45 * 10}{m}\right) \cong \left(\frac{30}{m}\right)\mu m \tag{3.20c}$$

olur [107]. Buradan $\boldsymbol{\lambda_B}$'nin 30 **μm**'nin katları olması gerektiği sonucuna varılır. Bu durumda $\boldsymbol{\lambda_B}$' nin teorik olarak alabileceği bazı değerler Tablo 3.1'de listelenmiştir. Şekil 3.12, Şekil 3.13, Şekil 3.14 ve Şekil 3.15'deki fonsiyonların düşüş gösterdiği dalga boyu değerlerinin bir kısmı da Tablo 3.1'de görülmektedir. Tablo 3.1 incelendiğinde, $\boldsymbol{\lambda_B}$'nin teorik olarak alabileceği bazı değerlerin, çalışmadan elde edilen değerlerle uyumluluk gösterdiği görülmektedir.

Özetle, sonuçlar göstermektedir ki, fs lazer teknolojisi birçok farklı malzemelerin içine ızgara yazımı için imkân sunmaktadır. Aynı ızgaraları UV uyarılarıyla oluşturmak daha güçtür. Bu nedenle, kısa darbeli lazerler cam kütlesine karmaşık kırılma indisi yapılarının yazılabilmesine dair güncel araştırmaların içindedir. Bu teknoloji ile mikro akışkan kanallar ve dalga kılavuzları gibi mikro işlemeyle oluşturulan yapılarla kırılma indisi değişimi kavramını birleştirerek endüstride ve biyomedikalde kullanılabilecek güçlü araçlar ve sensörler oluşturulabilir. Bu teknolojiyle polimerlerde lazer işlemeyle mikroskobik yapılar işlenebilir. Ancak, fs lazer ile FBG yazarak kırılma indisi değiştirme teknolojisi önemli gelişmelere rağmen, hala emekleme dönemindedir. Önümüzdeki yıllarda, UV ışınla elde edilen başarılı sonuçların, fs ile de elde edilebilmesi muhtemeldir. Bunun yanında kontrol edilebilirliği yüksek olan UV

teknolojisinin de kullanışlılığını bir süre devam ettirmesi muhtemeldir. Ancak bu iki yaklaşım birbirinin tamamlayıcısı niteliğindedir.

Çizelge 3. 1 Bragg dalgaboyunun alabileceği teorik değerler.

m	$\lambda_B(\text{teorik})$ (nm)	$\lambda_B(15\ \text{mW})$ (nm)	$\lambda_B(20\ \text{mW})$ (nm)	$\lambda_B(25\ \text{mW})$ (nm)	$\lambda_B(30\ \text{mW})$ (nm)
56	538	532	532	-	-
55	545	548	548	549	548
52	576	583	581	583	586
50	600	-	-	604	600
48	625	619-23	620	620	620
47	638	635	-	637	632
46	652	-	652	656	651
44	682	682	682	682	682
43	697	705	705	697	-
41	732	731	721	723	-
36	833	8120	820	833	820
35	857	869	-	868	-
34	882	-	878	-	-
32	938	947	947	947	946

4. SONUÇ VE ÖNERİLER

Kısa atımlı lazerlerle silindirik mercek kullanılarak çeşitli materyaller üzerinde FBG oluşturulabilir. UV ile kıyaslandığında femtosaniye tekniğin en önemli avantajı Bragg ızgaraların ultraviyole radyasyona duyarlı olması gerekmeyen birçok optik malzemelerde de etkili bir şekilde oluşturulabilmesidir.

Sonuç olarak, IR ışın yayan fs lazerler ile fiber çekirdeğinde girişim oluşturarak optik dalga kılavuzlarında Bragg ızgaralar yazmanın, standart UV lazeri ile FBG yazımı teknikleri kadar kolay uygulanabildiği gösterilmiştir. Ayrıca, sonuçlar göstermektedir ki; fs lazer ile ablasyonun yüksek hassasiyeti ve minimize edilmiş yan etkileri, tarihi eser niteliğindeki kâğıtların, bilhassa aharlı kâğıtların ve el yazmalarının korunmasında etkili bir yöntemdir.

KAYNAKLAR

[1] **Kashyap, R.** (1999). *Fiber bragg gratings*. Academic press. 504-524

[2] **Sennaroğlu, A**. Katıhal Femtosaniye zerleri. Alındığı tarih: 20.12. 2014, adres: http://home.ku.edu.tr/~asennar/2010-BT-3.pdf

[3] **Yalizay, B., Ersoy, T., Soylu, B., & Akturk, S**. (2012). Fabrication of nanometer-size structures in metal thin films using femtosecond laser Bessel beams. *Applied Physics Letters*, *100*(3), 031104

[4] **Varlamova, O., Martens, C., Ratzke, M., & Reif, J.** (2014). Genesis of femtosecond-induced nanostructures on solid surfaces. *Applied optics*, *53*(31), I10-I15

[5] **Davis, K. M., Miura, K., Sugimoto, N., & Hirao, K.** (1996). Writing waveguides in glass with a femtosecond laser. *Optics letters*, *21*(21), 1729-1731.

[6] **Dianov, E. M., Mashinsky, V. M., Myzina, V. A., Sidorin, Y. S., Streltsov, A. M., & Chickolini, A. V.** (1992). Change of refractive index profile in the process of laser-induced fibre damage. *Soviet lightwave communications*, *2*(4), 293-299.

[7] **Kashyap, R., Sayles, A. H., & Cornwell, G. F.** (1997, May). Heat-flow modeling and visualization of catastrophic self-propagating damage in single-mode optical fibers at low powers. In *Laser-Induced Damage in Optical Materials: 1996* (pp. 586-591). International Society for Optics and Photonics.

[8] **Miura, K., Qiu, J., Inouye, H., Mitsuyu, T., & Hirao, K.** (1997). Photowritten optical waveguides in various glasses with ultrashort pulse laser. *Applied Physics Letters*, *71*(23), 3329-3331.

[9] **Du, D., Liu, X., Korn, G., Squier, J., & Mourou, G.** (1994). Laser-induced breakdown by impact ionization in SiO_2 with pulse widths from 7 ns to 150 fs.*Applied physics letters*, *64*(23), 3071-3073

[10] **Glezer, E. N., Milosavljevic, M., Huang, L., Finlay, R. J., Her, T. H., Callan, J. P., & Mazur, E.** (1996). Three-dimensional optical storage inside transparent materials. *Optics Letters*, *21*(24), 2023-2025.

[11] **Rayner, D., Naumov, A., & Corkum, P.** (2005). Ultrashort pulse non-linear optical absorption in transparent media. *Optics express*, *13*(9), 3208-3217.

[12] **Chin, S. L., Théberge, F., & Liu, W.** (2007). Filamentation nonlinear optics. *Applied Physics B*, *86*(3), 477-483.

[13] **Eaton, S. M., Zhang, H., Ng, M. L., Li, J., Chen, W. J., Ho, S., & Herman, P. R.** (2008). Transition from thermal diffusion to heat accumulation in high repetition rate femtosecond laser writing of buried optical waveguides. *Optics express*, *16*(13), 9443-945.

[14] **Bernier, M., Faucher, D., Vallée, R., Saliminia, A., Androz, G., Sheng, Y., & Chin, S. L.** (2007). Bragg gratings photoinduced in ZBLAN fibers by femtosecond pulses at 800 nm. *Optics letters*, *32*(5), 454-456.

[15] **Gaussian Beam** (t.y) *Wikipedia*. Alındığı tarih**:** 10.12.2014, adres: http://en.wikipedia.org/wiki/Gaussian_beam.

[16] **Galvez, E. J.** (2006). Gaussian beams in the optics course. *American journal of physics*, *74*(4), 355-361.

[17] **Griffiths, D. J., & Reed College.** (1999). *Introduction to electrodynamics* (Vol. 3). Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall.

[18] **Jacobs, G.** (2006). Understanding spot size for laser scanning. *Professional Surveyor Magazine*, 1-3.

[19] **Fischer, R. E., Tadic-Galeb, B., Yoder, P. R., & Galeb, R.** (2000). *Optical system design* (pp. 199-201). New York: McGraw Hill.

[20] **Alda, J.** (2003). Laser and Gaussian beam propagation and transformation.*Encyclopedia of optical engineering*, 999-1013

[21] **Meister, D., & Sheedy, J. E.** (2000). *Introduction to Ophthalmic Optics*. SOLA Optical USA

[22]**Url1**<http://www.solarisoptics.com.pl/en/?main_menu=produkt&k1=41&k2=0&k3=0&id=95>, alındığı tarih: 20.02.2015.

[23]**Url2**<http://www.eyescure.com/Default.aspx?ID=64&Name=Errors_of_Refraction>, alındığı tarih: 01.03.2015.

[24]**Url-3** <http://www.newport.com/Optics-Formulas/144956/1033/content.aspx>, alındığı tarih: 02.03.2015.

[25] **H. D. Young** (1992). "35". *University Physics 8e*. Addison-Wesley. ISBN 0-201-52981-5

[26] **Voie, A. H., Burns, D. H., & Spelman, F. A.** (1993). Orthogonal-plane fluorescence optical sectioning: Three-dimensional imaging of macroscopic biological specimens. *Journal of microscopy*, *170*(3), 229-236.

[27] **Sheppard, C. J. R., & Mao, X. Q.** (1988). Confocal microscopes with slit apertures. *Journal of Modern Optics*, *35*(7), 1169-1185.

[28] **Özer, A.** Görme Optiği ve Refraksiyon. 101-108. Alındığı tarih: 01.03.2015, adres:http://www.uskudar.edu.tr/file/optisyenlik/Gorme-Optigi-ve-Refraksiyon.pdf

[29] **Sheppard, C. J.** (2013). Cylindrical lenses—focusing and imaging: a review [Invited]. *Applied optics*, *52*(4), 538-545.

[30] **İlden, S.** (2009). Tahrip olmuş el yazmalarının onarım ve tedavi teknikleri. *Uşak Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, *2009*(3).

[31] **Ersoy, T., Tunay, T., Uğuryol, M., Mavili, G., Akturk, S.** (2014). Femtosecond laser cleaning of historical paper with sizing. *Journal of Cultural Heritage*, *15*(3), 258-265.

[32] **Baron,N.** The Conservation of Historic Documents in the Archive of Bogotá, Colombia. The Book and Paper Group Annual 25(2006). Alındığı tarih: 21.12.2014, adres: http://cool.conservation-us.org/coolaic/sg/bpg/annual/v25/bp25-15.pdf

[33] **Kaminska, A., Sawczak, M., & Sliwinski, G.** (2005, March). Investigation of the laser cleaning effect on historical wood-pulp paper documents. In *Prague--2004 DL over* (pp. 951-954). International Society for Optics and Photonics.

[34] **AIC**, Caring for Your Treasures, American Institute for Conservation of Historic & Artistic Works, Accessed 26 April 2014

[35] **CCI-ICC**, "How to Care for Paper Documents and Newspaper Clippings," *Canadian Conservation Institute*, Accessed 13 April 2014

[36] **NEDCC**, "Conservation Treatment for Works of Art and Unbound Artifacts on Paper," *Northeast Document Conservation Center*, Accessed 26 April 2014

[37] **Url-4**<http://arts.brighton.ac.uk/collections/design-archives/projects/conservationblog>, alındığı tarih: 01.04.2015

[38] **Url-5** <http://www.josepbosch.net/preservation.htm>,alındığı tarih: 01.04.2015

[39] **Quandt, Abigail B.** Recent developments in the conservation of parchment manuscripts. *The Book and Paper Group Annual: volume 15*. AIC. Book and Paper Group, 1996. 99-115.

[40] **Kathpalia, Y. P.** (1985). *Conservation of archive materials*. Unesco.

[41] **E. Pearlstain, D. Cabelli, A. King, N. Indictos, J. Am.** Inst. Conserv. 22 (1982) 1–12.

[42] **J. Nelson, A. King, N. Indictos, D. Cabelli, J. Am.** Inst. Conserv. 18 (1982) 59–76.

[43] **Lazzarini, L., Marchesini, L., & Asmus, J. F.** (1973). Lasers for the cleaning of statuary: initial results and potentialities. *Journal of Vacuum Science and Technology*, *10*(6), 1039-1043

[44] **Kaminska, A., Sawczak, M., Komar, K., & Śliwiński, G.** (2007). Application of the laser ablation for conservation of historical paper documents. *Applied surface science*, *253*(19), 7860-7864.

[45] **Scholten, J. H., Teule, J. M., Zafiropulos, V., & Heeren,** R. M. A. (2000). Controlled laser cleaning of painted artworks using accurate beam manipulation and on-line LIBS-detection. *Journal of cultural heritage*, *1*, S215-S220.

[46] **Fotakis, C., Anglos, D., Couris, S., Georgiou, S., Zafiropulos, V., & Zergioti, I.** (1997, January). Laser technology in art conservation. In *Resonance ionization spectroscopy 1996: Eighth international symposium* (Vol. 388, No. 1, pp. 183-190). AIP Publishing.

[47] **İnşaat Teknolojisi: Taş yapılarda temizleme** (2013) T.C. MEB (pp 1-7)

[48] **Bilmes, G. M., Freisztav, C., Schinca, D., & Orsetti, A.** (2005, June). Cleaning and characterization of objects of cultural value by laser ablation. In *Optical Metrology* (pp. 585704-585704). International Society for Optics and Photonics.

[49] **Kennedy, C. J., Vest, M., Cooper, M., & Wess, T. J.** (2004). Laser cleaning of parchment: structural, thermal and biochemical studies into the effect of wavelength and fluence. *Applied surface science*, *227*(1), 151-163.

[50] **Kato, K. L., & Cameron, R. E.** (1999). A review of the relationship between thermally-accelerated ageing of paper and hornification. *Cellulose*, *6*(1), 23-40.

[51] **Budrugeac, P., Miu, L., Bocu, V., Wortman, F. J., & Popescu, C.** (2003). Thermal degradation of collagen-based materials that are supports of cultural and historical objects. *Journal of thermal analysis and calorimetry*, *72*(3), 1057-1064.

[52] **Url-6** <http://www.tappi.org/content/tag/sarg/t453.pdf>, alındığı tarih: 20.04.2015

[53] **International Color Consortium.** (2006). Specification ICC. 1: 2004-10. *Image Technology Colour Management–Architecture, Profile Format, and Data Structure. International Color Consortium Website. http://www. color. org/ICC1v42_2006-05. pdf.*

[54] **Url-7** <https://www.colorcodehex.com/color-model.html>, alındığı tarih: 01.12.2014.

[55] **Url-8** <http://www.colourphil.co.uk/lab_lch_colour_space.shtml>, alındığı tarih: 01.12.2014.

[56] **Url-9** <http://www.ktu.edu.tr/dosyalar/14_14_00_77c0a.pdf>, alıdığı tarih: 02.01.2015.

[57] **Url-10** <http://w3.balikesir.edu.tr/~ay/lectures/iy2/lecture2.pdf>, alındığı tarih: 02.01.2015.

[58]**Url11<**http://www2.bayar.edu.tr/muhendislik/malzeme/dersler/malzeme_lab/%C3%A7ekme.pdf>, alındığı tarih: 02.01.2015.

[59]**Url12 <**www.selcuk.edu.tr/dosyalar/files/033/M_UNALDI_cekme_Sertlik.doc>, Alındığı tarih: 02.01.2015.

[60] **Çavdar, K., Tanrısever, T.** Farklı malzemelerin lazerle kesilmesi. Uludağ Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi, Cilt 18, Sayı 2, 2013

[61] **Çiçek, A.** (2011). İmalat alanında yaygın olarak kullanılan mikro işleme teknikleri. *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, *15*(1)

[62] **Liao, C. R., & Wang, D. N.** (2013). Review of femtosecond laser fabricated fiber Bragg gratings for high temperature sensing. *Photonic Sensors*, *3*(2), 97-101.

[63] **Tekin, S.** Osilatör sel sisteminde optik kavite yapıları ve lazer kazanç mekanizmaları. Ankara Üniversitesi (2008)

[64] **Rothschild, M., Ehrlich, D. J., & Shaver, D. C.** (1989). Effects of excimer laser irradiation on the transmission, index of refraction, and density of ultraviolet grade fused silica. *Applied physics letters*, *55*(13), 1276-1278.

[65] **Kyung, J. H., & Lawandy, N. M.** (1996). UV light induced selective etching in borosilicate glasses for micropatterning. *Electronics Letters*, *32*(5), 451-452.

[66] **Zhang, J., Herman, P. R., Lauer, C., Chen, K. P., & Wei, X. M.** (2001, June). 157-nm laser-induced modification of fused-silica glasses. In *Photonics West 2001-LASE* (pp. 125-132). International Society for Optics and Photonics.

[67] **Kashyap, R., & Blow, K. J.** (1988). Observation of catastrophic self-propelled self-focusing in optical fibres. *Electronics Letters*, *24*(1), 47-49.

[68] **Chung, C. K., Wu, M. Y., Wu, J. C., Sung, Y. C., & Huang, G. R.** (2006, January). Silicon micromachining by CO2 laser. In *Nano/Micro Engineered and Molecular Systems, 2006. NEMS'06. 1st IEEE International Conference on* (pp. 1445-1448). IEEE.

[69] **Zhu, X., & Peyghambarian, N.** (2010). High-power ZBLAN glass fiber lasers: review and prospect. *Advances in OptoElectronics*, *2010*.

[70] **Ersoy, T., Tunay, T., Uğuryol, M., Mavili, G., & Akturk, S.** (2014). Femtosecond laser cleaning of historical paper with sizing. *Journal of Cultural Heritage*, *15*(3), 258-265.

[71] **Sahin, R., Akturk, S., & Simsek, E.** (2014). Quantifying the quality of femtosecond laser ablation of graphene. *Applied Physics A*, *116*(2), 555-560.

[72] **Jonáš, A., Yalizay, B., Akturk, S., & Kiraz, A.** (2014). Free-standing optofluidic waveguides formed on patterned superhydrophobic surfaces. *Applied Physics Letters*, *104*(9), 091123.

[73] **Kabas, A. S., Ersoy, T., Gülsoy, M., & Akturk, S.** (2013). Femtosecond laser etching of dental enamel for bracket bonding. *Journal of biomedical optics*,*18*(9), 098003-098003.

[74] **Türkoğlu, A. K., Ersoy, T., Canbaz, F., & Akturk, S.** (2012). Effects of waveguide behavior during femtosecond-laser drilling of metals. *Applied Physics A*, *108*(4), 935-941.

[75] **Della Valle, G., Osellame, R., & Laporta, P.** (2009). Micromachining of photonic devices by femtosecond laser pulses. *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics*, *11*(1), 013001.

[76] **Nolte, S., Thomas, J., Voigtländer, C., Becker, R. G., Richter, D.**, & Tünnermann, A. (2011, May). Femtosecond laser induced fiber Bragg gratings in active and multi mode fibers. In *The European Conference on Lasers and Electro-Optics* (p. CJ10_1). Optical Society of America..

[77] **Kondo, Y., Nouchi, K., Mitsuyu, T., Watanabe, M., Kazansky, P. G., & Hirao, K.** (1999). Fabrication of long-period fiber gratings by focused

irradiation of infrared femtosecond laser pulses. *Optics letters*, *24*(10), 646-648..

[78] **Mihailov, S. J., Smelser, C. W., Grobnic, D., Walker, R. B., Lu, P., Ding, H., & Unruh, J.** (2004). Bragg gratings written in all-SiO2 and Ge-doped core fibers with 800-nm femtosecond radiation and a phase mask. *Journal of Lightwave Technology*, *22*(1), 94.

[79] **Smelser, C. W., Mihailov, S. J., & Grobnic, D.** (2004). Hydrogen loading for fiber grating writing with a femtosecond laser and a phase mask. *Optics letters*,*29*(18), 2127-2129..

[80] **Grobnic, D., Smelser, C. W., Mihailov, S. J., Walker, R. B., & Lu, P.** (2004). Fiber Bragg gratings with suppressed cladding modes made in SMF-28 with a femtosecond IR laser and a phase mask. *Photonics Technology Letters, IEEE*,*16*(8), 1864-1866..

[81] **Grobnic, D., Mihailov, S. J., Smelser, C. W., & Ding, H.** (2004). Sapphire fiber Bragg grating sensor made using femtosecond laser radiation for ultrahigh temperature applications. *Photonics Technology Letters, IEEE*, *16*(11), 2505-2507..

[82] **Gui, L., Xu, B., & Chong, T. C.** (2004). Microstructure in lithium niobate by use of focused femtosecond laser pulses. *Photonics Technology Letters, IEEE*,*16*(5), 1337-1339.

[83] **Mendez, C., Torchia, G. A., Delgado, D., Arias, I., & Roso, L.** (2005, June). Fabrication and characterization of Mach-Zehnder devices in LiNbO 3 written with femtosecond laser pulses. *In Fibres and Optical Passive Components, 2005. Proceedings of 2005 IEEE/LEOS Workshop on* (pp. 131-134). IEEE.

[84] **Ashcom, J. B., Gattass, R. R., Schaffer, C. B., & Mazur, E.** (2006). Numerical aperture dependence of damage and supercontinuum generation from femtosecond laser pulses in bulk fused silica. *JOSA B*, *23*(11), 2317-2322.

[85] **İnce, İ.** (2013). Emniyetli bir ulusal ağ yapısı model önerisi ve ağ altyapı sistemlerinin birleştirilmesi (Yüksek Lisans Tezi). Trakta Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Edirne.

[86] **MEB, Optik Kablolama.** (2008) Bilişim Teknolojisi Modülü, MEGEP, Ankara.

[87]**Url-13** http://tr.prysmiangroup.com/tr/business_markets/Teknik-Makaleler/fiber-optik-kablolar-ve-standartlari. Alındığı tarih: 02.02.2015.

[88] **Hecht, E.** (1999), Hecht & Optik (Armağan, N., Can,N. Çev.). Akademi Yayın Hizmetleri.

[89]**Url-14** İstanbul Teknik Üniversitesi Bilgi İşlem Daire Başkanlığı, Alındığı tarih: 12.03.2015.Adres:http://bidb.itu.edu.tr/seyirdefteri/blog/2013/09/07/fiber-optik-sistemler.

[90] **Poletti, F., Wheeler, N. V., Petrovich, M. N., Baddela, N., Fokoua, E. N., Hayes, J. R., ... & Richardson, D. J.** (2013). Towards high-capacity fibre-optic communications at the speed of light in vacuum. *Nature Photonics*, *7*(4), 279-284.

[91] **Agrawal, G. P.** (2012). *Fiber-optic communication systems.* (Vol. 222). John Wiley & Sons.

[92] **Güler, N. F., Navruz, İ.** (2006). Optik haberleşme Sistemlerinde Dispersiyon Kompanzasyonunda Optik Izgara Tabanlı ÇÖzümler. *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, *21*(1).

[93] **Karaman, L. (2009).** Fiber Bragg Izgara Tabanlı Optik Sensörlerin Analizi, (Yüksek Lisans Tezi), Yıldız Teknik Ünitersitesi, İstanbul.

[94] **Grobnic, D.** (2010). Femtosecond Laser Induced Bragg Gratings in Silica and Exotic Optical Fibers Applications. p. BWA1.

[95] **Wikszak, E., Thomas, J., Burghoff, J., Ortaç, B., Limpert, J., Nolte, S., ... & Tünnermann, A.** (2006). Erbium fiber laser based on intracore femtosecond-written fiber Bragg grating. *Optics letters*, *31*(16), 2390-2392.

[96]**Url-15** <http://www.edn.com/design/medical/4397650/Optical-in-situ-glucose-sensor>, Alındığı tarih: 05.03.2015.

[97] **Erdogan, T.** (1997). Fiber grating spectra. *Lightwave Technology, Journal of*,*15*(8), 1277-1294.

[98] **Singroli, A., Gupta, V.** (2015). Review Of a Noval Approach For Dispersion Compensation In Optical System With a Fiber Bragg Grating.*Associated International Journal of Computer Science & Electronic, 4*(3). doi:http://www.aijcse.com/volume 4 issue 3.html

[99] **Dong, L., Archambault, J. L., Reekie, L., Russell, P. S. J., & Payne, D. N.** (1993). Single pulse Bragg gratings written during fibre drawing. *Electronics Letters*, *29*(17), 1577-1578.

[100] **Smelser, C., Mihailov, S., & Grobnic, D.** (2005). Formation of Type I-IR and Type II-IR gratings with an ultrafast IR laser and a phase mask. *Optics express*, *13*(14), 5377-5386.

[101] **Canning, J.** (2008). Fibre Gratings and Devices for Sensors and Lasers, Lasers and Photonics Reviews, 2 (4), 275-289.

[102] **Smelser, C. W., Grobnic, D., & Mihailov, S. J.** (2004). Generation of pure two-beam interference grating structures in an optical fiber with a femtosecond infrared source and a phase mask. *Optics letters*, *29*(15), 1730-1732.

[103] **Fokine, M.** (2002). Photosensitivity, chemical composition gratings and optical fiber based component (Doktora Tezi). KTH, Superseded Departments, Microelectronics and Information Technology, IMIT.

[104] **Mihailov, S. J., Grobnic, D., Smelser, C. W., Lu, P., Walker, R. B., & Ding, H.** (2008). Induced Bragg gratings in optical fibers and waveguides using an ultrafast infrared laser and a phase mask. *Laser Chemistry*, *2008*. DOI: 10.1155/2008/416251

[105] **Altuğ, G.** (2007). Fiber Optik Grating Sensörler (Yüksek Lisans Tezi). Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

[106] **Mendoza, E. A., Esterkin, Y., Kempen, C., & Sun, Z.** (2011). Multi-channel monolithic integrated optic fiber Bragg grating sensor interrogator. *Photonic Sensors*, *1*(3), 281-288.

[107] **Siiman, L. A.** (2008). Ultrashort Laser Pulse Interaction with Photo-Thermo-Refractive Glass (Doktora Tezi). University of Central Florida,College of Optics and Photonics, Orlando, Florida. Adres: http://etd.fcla.edu/CF/CFE0002349/Siiman_Leo_A_200808_PhD-fixed-2.pdf

[108] **Davis, K. M., Miura, K., Sugimoto, N., & Hirao, K.** (1996). Writing waveguides in glass with a femtosecond laser. *Optics letters*, *21*(21), 1729-1731.

ÖZGEÇMİŞ



Ad-Soyad : Tuğba Tunay

Doğum Tarihi ve Yeri: 18 / 11 / 1983 - İstanbul

E-posta : tugbatunay@gmail.com

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans :** 2008, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Eğitim Fakültesi, Fizik Öğretmenliği Bölümü
- **Yüksek isans :** 2015, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fizik Mühendisliği Anabilim Dalı, Fizik Mühendisliği Bölümü

TEZDEN TÜRETİLEN YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- Ersoy, T., Tunay, T., Uğuryol, M., Mavili, G., & Akturk, S. (2014). Femtosecond laser cleaning of historical paper with sizing. *Journal of Cultural Heritage*, *15*(3), 258-265.
- Ersoy, T., Tunay, T., Uğuryol, M., Mavili, G., & Akturk, S. 2015. Femtosecond laser cleaning of historical paper with sizing. *Light: a bridge earth and space: Winter College on Optics*, 9-20 Şubat 2015, ICTP, Trieste, İtaly.
- Ersoy, T., Tunay, T., Uğuryol, M., Mavili, G., & Akturk, S. 2012. Femtosaniye Lazer ile Tarihi Eser Temizlenmsi. *14. Ulusal optik, Elektro-Optik ve Fotonik Çalıştayı*, 14 Eylül 2012, İstanbıl,Türkiye, (pp.46).
- Ersoy, T., Tunay, T., Aktürk, S., Uğuryol, M., & Mavili, G. 2014. El Yazması Eserlerin Temizliğinde Darbeli Lazer Yönteminin Kullanılması. *Uluslararası Cilt Sanatı Buluşması,* 29 Kasım- 8 Aralık 2012, İstanbul,Türkiye, (pp. 105-108).

DİĞER YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- Yurtseven, H., & Tunay, T. (2010). Temperature dependence of the Raman frequencies in the γ and β phases of solid nitrogen. *International Journal of Modern Physics B, 24*(31), 6069-6078.