

T.C.
GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

OPTİK TEKNOLOJİLERİN UYGULANMASI İLE TEKSTİL
TEMİZLEME ÇALIŞMALARI

HÜSEYİN MERT ÇALICIOĞLU
YÜKSEK LİSANS TEZİ
FİZİK ANABİLİM DALI

GEBZE
2019

T.C.
GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

OPTİK TEKNOLOJİLERİN UYGULANMASI İLE TEKSTİL
TEMİZLEME ÇALIŞMALARI

HÜSEYİN MERT ÇALICIOĞLU
YÜKSEK LİSANS TEZİ
FİZİK ANABİLİM DALI

DANIŞMANI
PROF. DR. FEVZİ NECATİ ECEVİT

GEBZE
2019

T.R.
GEBZE TECHNICAL UNIVERSITY
GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

**TEXTILE CLEANING WITH USING OPTICAL
TECHNOLOGIES**

HÜSEYİN MERT ÇALICIOĞLU
A THESIS SUBMITTED FOR THE DEGREE OF
MASTER OF SCIENCE
DEPARTMENT OF PHYSICS

THESIS SUPERVISOR
PROF. DR. FEVZİ NECATİ ECEVİT

GEBZE
2019

GTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 03/07/2019 tarih ve 2019/30 sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından 12/07/2019 tarihinde tez savunma sınavı yapılan Hüseyin Mert Çalıcıoğlu'nun tez çalışması Fizik Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS tezi olarak kabul edilmiştir.

JÜRİ

ÜYE

(TEZ DANIŞMANI) : Prof. Dr. Fevzi Necati ECEVİT

ÜYE

: Prof. Dr. Zafer Ziya ÖZTÜRK

ÜYE

: Prof. Dr. Arif DEMİR

ONAY

Gebze Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun

...../...../..... tarih ve/..... sayılı kararı.

ÖZET

Bu tez çalışmasında ns atım genişliğine sahip lazer ile temizleme çalışmaları sunulmuştur. Literatürde; tarihi eserlerin restorasyonunda, atımlı lazerlerin temizleme amacı ile kullanıldığı bilinmektedir. Bu çalışmanın amacı; tekstil üzerinde bulunan zorlu lekelerin temizlenmesinde, yıkama ve kuru temizleme yöntemlerine alternatif olabilecek lazer atımları ile temizleme yönteminin geliştirilmesidir. Çalışmalar esnasında, lazer parametrelerinin etkinliği incelenerek optimum temizleme aralığı tespit edilmiştir.

Temizleme çalışmalarında; standart pamuklu kumaş üzerine sebum, karbon siyahı, kan, kakao ve şarap lekeleri ile standart olarak lekelenendirilmiş standart leke şeritleri kullanılmıştır. Deneylerde 6 ns atım genişliğine, 1-30 Hz aralığında değişebilen atım tekrarlama frekansına sahip, 815 ve 127 mJ/cm² aralığında enerji yoğunluğuna sahip bir Nd:YAG lazer ve lazerin 2. harmoniği kullanılmıştır. Temizleme işlemi yapılan tekstillerin beyazlama miktarlarına bakılmış ve tekstilde meydana gelen hasarlanmalar incelenmiştir.

Yapılan çalışmalar sonucunda; lazer ile tekstil temizlemede kullanılan lazer parametrelerinin (atım enerji yoğunluğu, tekrarlama frekansı, atım sayısı ve dalgaboyu) temizleme üzerinde etkili olduğu görülmüştür. 1064 nm dalga boyunda karbon siyahı ve sebum lekeleri üzerinde ve 532 nm dalgaboyunda ise sebum, karbon siyahı ve şarap lekeleri üzerinde temizleme elde edilmiştir. Leke tipleri üzerinden genelleme yapmak gerekirse, yağ bazlı ve partiküler lekeler üzerinde ns atımlara sahip lazer etkili iken enzimatik lekeler üzerinde etkisiz olduğu görülmüştür. Ağartılabilir lekeler üzerinde ise sadece 532 nm dalgaboyunda temizleme sağlanabilmiştir. Temizleme sonrasında elde edilen sonuç, etkinliği bilinen bir tekstil temizleme aracı olan çamaşır makinesi (deklarasyon programından elde edilen beyazlatma performansı) ile kıyaslanmıştır. Yapılan karşılaştırma sonucunda lazer ile temizleme performansı, karbon siyahı ve sebum lekeleri üzerinde çamaşır makinesine oranla daha etkili sonuç verirken, şarap lekesi üzerinde çamaşır makinesi yıkama performansının altında sonuç vermiştir.

Anahtar Kelimeler: Nd:YAG Lazer, Lazer Temizleme, Darbeli Lazer

SUMMARY

In this thesis study, a laser cleaning by using laser with ns pulse width is presented. Laser cleaning techniques are used in many fields and they provide effective solutions to prevent damage caused by the existing cleaning techniques. In the literature; we can see that pulsed lasers were used for cleaning in the restoration of historical monuments. The aim of this study is to improve the pulsed laser cleaning technique which is an alternative for tough stains for washing and dry cleaning. In this way, it is aimed to prevent the use of chemicals that pollute the environment and the consumption of the water that is very valuable today. During the experiments, the efficiency of laser parameters is examined to find out the optimum cleaning interval

For cleaning experiments; standard stain strip which has sebum, carbon black, blood, cocoa and wine stains on a standard cotton fabric were used. Also; Nd: YAG laser with a pulse width of 6 ns, a pulse repetition frequency varying between 1-30 Hz, the energy density in the range of 815 and 127 mJ / cm² and its 2nd harmonic were used. The bleaching amounts and the damages of the textiles were examined.

It has been understood that laser parameters (pulse energy density, repetition frequency, number of pulses and wavelength) have a significant effect on textile cleaning. Cleaning was achieved on carbon black and sebum stains at 1064 nm wavelength and on sebum, carbon black and wine stains at 532 nm wavelength. To give a general fact for the stain types, it has been found that the laser with ns pulses is effective on oil-based and particulate stains while it is ineffective on enzymatic stains. On bleachable stains, the cleaning is achieved only in 532 nm wavelength. The tristimulus Y values, a measure of bleaching, obtained after cleaning and they were compared with, a known textile cleaning tool, washing machine (bleaching performance obtained from the declaration program). As a result, laser cleaning performance was found to be more effective on carbon black and sebum stains compared to the washing machine, but it has less efficiency than the washing machine performance on wine stains.

Key Words: Nd:YAG Laser, Laser Cleaning, Pulsed Laser

TEŞEKKÜR

Tez çalışmam boyunca her türlü bilimsel katkıyı sunup, tezimin oluşmasında ve tamamlanmasında yoğun katkıları olan, Sayın Prof. Dr. Fevzi Necati ECEVİT'e, sağlamış olduğu motivasyon ve yakın ilgiden dolayı,

Tezin oluşumunda laboratuvar altyapısını kullandığım ve bana Proje Mühendisi olarak çalışma imkânı sağlayan ARÇELİK A.Ş.'ye,

Çalışmalarım boyunca desteğini hiç esirgemeyen sevgili eşime ve aileme teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	v
SUMMARY	viii
TEŞEKKÜR	ivii
İÇİNDEKİLER	x
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xi
ŞEKİLLER DİZİNİ	xiii
TABLolar DİZİNİ	xvi
1. GİRİŞ	1
1.1. Tezin Amacı, Katkısı ve İçeriği	2
2. TEORİK BİLGİLER	3
2.1. Lazer Temelleri	3
2.1.1. Elektromanyetik Dalgalar	3
2.1.2. Soğurma (Absorption)	4
2.1.3. Kendiliğinden Işıma (Spontaneous Emission)	5
2.1.4. Uyarımlı Işıma (Stimulated Emission)	5
2.1.5. Nüfus Terslenmesi (Population Inversion)	6
2.1.6. Kutuplanma	6
2.2. Lazer	7
2.2.1. Nd:YAG Lazer	8
2.2.2. Q Anahtarlama	10
2.3. Lazer Ablasyon	10
2.3.1. Doğrusal Soğurma	13
2.4. Lazer Temizleme	14
2.4.1. Lazer Temizleme Mekanizmaları	14
2.4.1.1. Seçici Buharlaştırma	15
2.4.1.2. Parçalanma (Spallation)	16
2.4.1.3. Şok Dalgası	17
2.4.1.4. İnkübasyon Etkisi	17

2.5. Lazer ile Temizleme İşlemindeki Etkin Parametreler	18
2.5.1. Atım Genişliği	18
2.5.2. Atım Sayısı	19
2.5.3. Atım Tekrarlama Frekansı	19
2.5.4. Atım Enerjisi ve Gücü	19
2.5.5. Lazer Demeti Alanı	20
2.6. Renk Uzayı	21
3. MATERYAL VE METOT	23
3.1. Leke şeritlerinin Fiziksel Özelliklerinin Ölçümü	24
3.1.1. Absorbans Ölçümü	24
3.1.2. Termal İletkenlik Katsayısı Ölçümü	25
3.1.3. Yoğunluk Ölçümü	26
3.2. Leke Giderim Çalışmaları	27
3.3. Leke Giderim Tespiti	28
3.4. Tekstil Hasar Tespiti	29
3.4.1. İplik Yapısının İncelenmesi	29
3.4.2. Tekstil Mukavemet Testi	30
4. BULGULAR	32
4.1. Leke şeritlerinin Fiziksel Özelliklerinin Tespiti	32
4.2. Absorbans Değer Tespiti	32
4.3. Termal İletkenlik Katsayısı Ölçümü	34
4.3.1. Yoğunluk Ölçümü	35
4.4. Lazer Temizleme Çalışmaları	35
4.4.1. Sebum Lekesi	36
4.4.1.1. 1064 nm Dalga Boyu	36
4.4.1.2. 532 nm Dalga Boyu	41
4.4.2. Karbon Siyahı	46
4.4.2.1. 1064 nm Dalga Boyu	46
4.4.2.2. 532 nm Dalga Boyu	51
4.4.3. şarap	55
4.4.3.1. 532 nm Dalga Boyu	55
4.5. Tekstil Hasarlanma Çalışmaları	59

4.5.1. Optik Mikroskop Görüntüleri	59
4.5.1.1. Sebum Lekesi	60
4.5.1.2. Karbon Siyahı	63
4.5.2. Tekstil Mukavemet Testleri	66
5. TARTIŞMA VE SONUÇ	67
KAYNAKLAR	69
ÖZGEÇMİŞ	72

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simgeler ve</u> <u>Kisaltmalar</u>	<u>Açıklamalar</u>
λ	: Dalgaboyu
α	: Soğurma katsayısı
ρ	: Yoğunluk
h	: Planck sabiti
ν	: Frekans
c	: Işık hızı
α	: Soğuruculuk
τ	: Atım genişliği
ζ	: İnkübasyon etkisi
E	: Enerji
D	: Kaldırılan krater çapı
w_0	: Lazer demet çapı
F	: Lazer enerji yoğunluğu
F_{th}	: Lazer ablasyon eşik enerji yoğunluğu
a	: Termal giricilik
C_p	: Isı kapasitesi
k	: Termal iletkenlik katsayısı
I	: Geçen ışığın şiddeti
I_0	: Gelen ışığın şiddeti
P	: Güç
z	: Tabaka kalınlığı
d	: Soğurma derinliği
f	: Atım tekrarlama frekansı
L_v	: Buharlaştırma ısısı

I	:	Güç yoğunluğu
Y	:	Tristimulus açıklık koyuluk değeri
N	:	Lazer atım sayısı
TCE	:	Trikoloroetilen
PCE	:	Perkloroetilen
Nd:YAG	:	Neodmiyum Katkılı İttriyum Aluminyum Lal Taşı
UV	:	Morötesi
VIS	:	Görünür bölge
NIR	:	Yakın kızılaltı
mm	:	Milimetre
ns	:	Nanosaniye
ps	:	Pikosaniye
fs	:	Femtosaniye

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Şekil No:</u>	<u>Sayfa</u>
2.1: Elektromanyetik spektrum.	3
2.2: Soğurma ve kendiliğinden ışıma.	4
2.3: Uyarımlı ışıma.	5
2.4: Lazer iç mekanizması.	7
2.5: Nd:YAG Lazer iç mekanizması.	8
2.6: Nd:YAG kristali enerji bantları ve 1064 nm dalgaboylu ışının salınımı.	9
2.7: Farklı atım genişliğine sahip lazer ablasyonları.	11
2.8: Seçici buharlaştırma mekanizması.	15
2.9: Lazer etkisi ile parçalanma.	17
2.10: CIE L*a*b*renk uzayı.	21
3.1: Standart leke şeridi.	24
3.2: Shimadzu UV-3600 Plus Spektrofotometresi.	25
3.3: Hot Disk TPS2500 Termal iletkenlik ölçüm cihazı.	25
3.4: Micrometritics AccuPyc Piknometre cihazı.	26
3.5: Atımlı lazer temizleme deney düzeneği.	27
3.6: Datacolor 600 spektrofotometre.	28
3.7: Olympus BX43 Optik mikroskop.	29
3.8: Tek yırtma pantolon metodu.	30
3.9: James Heal Titan2 Tekstik mukavemet cihazı.	31
4.1: Lekeli kumaşların absorbans değerleri.	33
4.2: Sebum lekesi; $\lambda=1064$ nm dalgaboyu, $F= 815$ mJ.cm ⁻² enerji yoğunluğu ve farklı atım sayısı ve tekrarlama frekanslarında yapılan temizleme çalışmalarının Y değerleri.	37
4.3: Sebum lekesi; $\lambda=1064$ nm dalgaboyu, $F= 385$ mJ.cm ⁻² enerji yoğunluğu ve farklı atım sayısı ve tekrarlama frekanslarında yapılan temizleme çalışmalarının Y değerleri.	38
4.4: Sebum lekesi; $\lambda=1064$ nm dalgaboyu, $F= 127$ mJ.cm ⁻² enerji yoğunluğu ve farklı atım sayısı ve tekrarlama frekanslarında yapılan temizleme çalışmalarının Y değerleri.	40

4.5:	Sebum lekesi; $\lambda=532$ nm dalgaboyu, $F= 385$ mJ.cm-2 enerji yoğunluğu ve farklı atım sayısı ve tekrarlama frekanslarında yapılan temizleme çalışmalarının Y değerleri.	42
4.6:	Sebum lekesi, $\lambda=532$ nm dalgaboyu, $F= 255$ mJ.cm-2 enerji yoğunluğu ve farklı atım sayısı ve tekrarlama frekanslarında yapılan temizleme çalışmalarının Y değerleri.	43
4.7:	Sebum lekesi, $\lambda=532$ nm dalgaboyu, $F= 127$ mJ.cm-2 enerji yoğunluğu ve farklı atım sayısı ve tekrarlama frekanslarında yapılan temizleme çalışmalarının Y değerleri.	45
4.8:	Karbon siyahı $\lambda=1064$ nm dalgaboyu, $F= 815$ mJ.cm-2 enerji yoğunluğu ve farklı atım sayısı ve tekrarlama frekanslarında yapılan temizleme çalışmalarının Y değerleri.	47
4.9:	Karbon siyahı lekesi $\lambda=1064$ nm dalgaboyu, $F=385$ mJ.cm-2 enerji yoğunluğu ve farklı atım sayısı ve tekrarlama frekanslarında yapılan temizleme çalışmalarının Y değerleri.	48
4.10:	Karbon siyahı lekesi $\lambda=1064$ nm dalgaboyu, $F=127$ mJ.cm-2 enerji yoğunluğu ve farklı atım sayısı ve tekrarlama frekanslarında yapılan temizleme çalışmalarının Y değerleri.	50
4.11:	Karbon siyahı lekesi, $\lambda=532$ nm dalgaboyu, $F=385$ mJ.cm-2 enerji yoğunluğu ve farklı atım sayısı ve tekrarlama frekanslarında yapılan temizleme çalışmalarının Y değerleri.	51
4.12:	Karbon siyahı lekesi $\lambda=532$ nm dalgaboyu, $F=255$ mJ.cm-2 enerji yoğunluğu ve farklı atım sayısı ve tekrarlama frekanslarında yapılan temizleme çalışmalarının Y değerleri.	53
4.13:	Karbon siyahı lekesi $\lambda=532$ nm dalgaboyu, $F=127$ mJ.cm-2 enerji yoğunluğu ve farklı atım sayısı ve tekrarlama frekanslarında yapılan temizleme çalışmalarının Y değerleri.	54
4.14:	Şarap lekesi $\lambda=532$ nm dalgaboyu, $F=385$ mJ.cm-2 enerji yoğunluğu ve farklı atım sayısı ve tekrarlama frekanslarında yapılan temizleme çalışmalarının Y değerleri.	56
4.15:	Karbon siyahı lekesi $\lambda=532$ nm dalgaboyu, $F=255$ mJ.cm-2 enerji yoğunluğu ve farklı atım sayısı ve tekrarlama frekanslarında yapılan temizleme çalışmalarının Y değerleri.	58
4.16:	Işınlanmamış sebum lekesi optik mikroskop görüntüsü.	60
4.17:	$\lambda=1064$ nm, $J=385$ mJ/cm ² , $N=1$ atım lazer uygulanmış sebum lekesi optik mikroskop görüntüsü.	60
4.18:	$\lambda=532$ nm, $J=385$ mJ/cm ² , $N=1$ atım lazer uygulanmış sebum lekesi optik mikroskop görüntüsü.	61
4.19:	$\lambda=1064$ nm, $J=385$ mJ/cm ² , $N=300$ atım lazer uygulanmış sebum lekesi optik mikroskop görüntüsü.	61
4.20:	$\lambda=532$ nm, $J=385$ mJ/cm ² , $N=300$ atım lazer uygulanmış sebum lekesi optik mikroskop görüntüsü.	62
4.21:	Işınlanmamış karbon siyahı lekesi optik mikroskop görüntüsü.	63
4.22:	1064 nm, $J=385$ mJ/cm ² , $N=1$ atım lazer uygulanmış karbon siyahı lekesi optik mikroskop görüntüsü.	63

4.23:	$\lambda=1064$ nm, $J=385\text{mJ/cm}^2$, $N=300$ atım lazer uygulanmış karbon siyahı lekesi optik mikroskop görüntüsü.	64
4.24:	$\lambda=532$ nm, $J=385\text{mJ/cm}^2$, $N=1$ atım lazer uygulanmış karbon siyahı lekesi optik mikroskop görüntüsü.	64
4.25:	Lazer ışınlanan ve ışınlı bölgeler.	65
4.26:	$\lambda=532$ nm, $J=385\text{mJ/cm}^2$, $N=300$ atım lazer uygulanmış karbon siyahı lekesi optik mikroskop görüntüsü.	65

TABLÖLAR DİZİNİ

<u>Tablo No:</u>	<u>Sayfa</u>
3-1: Litron Nano LG 150-30 Nd:YAG Lazerin Teknik Özellikleri.	27
4-1: Lekeli kumaşların termal iletkenlik değerleri.	34
4-2: Deneylerde kullanılan lekeli kumaşların yoğunluk ölçüm sonuçları.	35
4-3: Sebum lekesi $\lambda=1064$ nm dalgaboyunda temizleme yapılan lazer parametreleri.	36
4-4: Sebum lekesi; $\lambda=1064$ nm dalgaboyu, $F= 815$ mJ.cm-2 enerji yoğunluğu ve farklı atım sayısı ve tekrarlama frekanslarında yapılan temizleme çalışmalarının Y değerleri.	36
4-5: Sebum lekesi; $\lambda=1064$ nm dalgaboyu, $F= 385$ mJ.cm-2 enerji yoğunluğu ve farklı atım sayısı ve tekrarlama frekanslarında yapılan temizleme çalışmalarının Y değerleri.	38
4-6: Sebum lekesi; $\lambda= 1064$ nm dalgaboyu, $F= 127$ mJ.cm-2 enerji yoğunluğu ve farklı atım sayısı ve tekrarlama frekanslarında yapılan temizleme çalışmalarının Y değerleri.	39
4-7: Sebum lekesi $\lambda=532$ nm dalgaboyunda temizleme yapılan lazer parametreleri.	41
4-8: Sebum lekesi; $\lambda=532$ nm dalgaboyu, $F= 385$ mJ.cm-2 enerji yoğunluğu ve farklı atım sayısı ve tekrarlama frekanslarında yapılan temizleme çalışmalarının Y değerleri.	41
4-9: Sebum lekesi, $\lambda=532$ nm dalgaboyu, $F= 255$ mJ.cm-2 enerji yoğunluğu ve farklı atım sayısı ve tekrarlama frekanslarında yapılan temizleme çalışmalarının Y değerleri.	43
4-10: Sebum lekesi, $\lambda=532$ nm dalgaboyu, $F= 127$ mJ.cm-2 enerji yoğunluğu ve farklı atım sayısı ve tekrarlama frekanslarında yapılan temizleme çalışmalarının Y değerleri.	43
4-11: Karbon siyahı lekesi $\lambda=1064$ nm dalgaboyunda temizleme yapılan lazer parametreleri.	46
4-12: Karbon siyahı lekesi $\lambda=1064$ nm dalgaboyu, $F=815$ mJ.cm-2 enerji yoğunluğu ve farklı atım sayısı ve tekrarlama frekanslarında yapılan temizleme çalışmalarının Y değerleri.	46
4-13: Karbon siyahı lekesi $\lambda=1064$ nm dalgaboyu, $F=385$ mJ.cm-2 enerji yoğunluğu ve farklı atım sayısı ve tekrarlama frekanslarında yapılan temizleme çalışmalarının Y değerleri.	48
4-14: Karbon siyahı, lekesi $\lambda=1064$ nm dalgaboyu, $F=127$ mJ.cm-2 enerji yoğunluğu ve farklı atım sayısı ve tekrarlama frekanslarında yapılan temizleme çalışmalarının Y değerleri.	49
4-15: Karbon siyahı lekesi, $\lambda=532$ nm dalgaboyu, $F=385$ mJ.cm-2 enerji yoğunluğu ve farklı atım sayısı ve tekrarlama frekanslarında yapılan temizleme çalışmalarının Y değerleri.	51

4-16:	Karbon siyahı lekesi $\lambda=532$ nm dalgaboyu, $F=255$ mJ.cm ⁻² enerji yoğunluğu ve farklı atım sayısı ve tekrarlama frekanslarında yapılan temizleme çalışmalarının Y değerleri.	52
4-17:	Karbon siyahı $\lambda=532$ nm dalgaboyu, $F=127$ mJ.cm ⁻² enerji yoğunluğu ve farklı atım sayısı ve tekrarlama frekanslarında yapılan temizleme çalışmalarının Y değerleri.	54
4-18:	Şarap lekesi, $\lambda=1064$ nm dalgaboyunda temizleme yapılan lazer parametreleri.	55
4-19:	Şarap lekesi $\lambda=532$ nm dalgaboyu, $F=385$ mJ.cm ⁻² enerji yoğunluğu ve farklı atım sayısı ve tekrarlama frekanslarında yapılan temizleme çalışmalarının Y değerleri.	56
4-20:	Şarap lekesi $\lambda=532$ nm dalgaboyu, $F=255$ mJ.cm ⁻² enerji yoğunluğu ve farklı atım sayısı ve tekrarlama frekanslarında yapılan temizleme çalışmalarının Y değerleri.	57
4-21:	Lazer temizleme ile çamaşır makinası temizleme beyazlatma performans karşılaştırması.	59
4-22:	Mukavemet test sonuçları.	66

1. GİRİŞ

Kıyafet temizleme sürecinde gerek ev tipi çamaşır makinalarında gerekse profesyonel ıslak/ kuru temizleme proseslerinde çok çeşitli kimyasallar kullanılmaktadır. Özellikle kuru temizleme süreçlerinde çok çeşitli organik kimyasallar kullanılmakta olup, trikloroetilen (TCE) ve/veya perkloroetilen (PCE) içermektedir.

Kuru temizleme; adının çağrıştırdığının aksine, kuru ortamda veya kuru biçimde yapılan bir temizleme işlemi değildir; bu ismin verilmesinin altında leke çıkarımı için su yerine kimyasallar içeren çözücüler (*solvent*, leke giderici) kullanılması yatmaktadır. Standart bir kuru temizleme işleminde şu adımlar takip edilir: (i) Müşteriden teslim alınan kıyafetlerdeki lekeler tespit edilir; (ii) hangi kimyasal leke giderici kullanılacağına karar verilir; (iii) lokal lekeye ön müdahale yapılır; (iv) kuru temizleme makinasında trikloroetilen (TCE) veya perkloroetilen (PCE veya PERC) ile ana yıkama işlemi yapılır; (v) aynı makina içerisinde kurutma işlemi yapılarak TCE/PCE'nin kıyafetler üzerinden uçması (buharlaşması) sağlanır; (vi) kurutulan kıyafetteki leke eğer tamamen gitmemiş ise ikinci defa lokal leke giderim işlemi uygulanır; ve nihayet (vii) ütülenerek müşteriye teslim edilir.

Islak temizlemenin kuru temizlemeden en temel farkı, ana yıkama işlemi esnasında kuru temizlemede kullanılan kimyasalların yerine aslen su ile yapılmasıdır. Islak temizleme, yıkama programı tekstile göre ayarlanabilen özel çamaşır makinalarında özel deterjanlar kullanılarak yapılır. Standart bir ıslak temizleme işleminde şu adımlar takip edilir: (i) Müşteriden teslim alınan kıyafetlerdeki lekeler tespit edilir; (ii) hangi kimyasal leke giderici kullanılacağına karar verilir; (iii) lokal lekeye ön müdahale yapılır; (iv) ıslak temizleme için özel tasarlanmış yıkayıcılarda lekeye-kumaşa özel yıkama programında, bu temizleme işlemine özel deterjanlar ile ana yıkama yapılır; (v) yıkama işlemi sonrasında kıyafetteki lekeler tamamen gitmemiş ise tekrar lokal leke giderim işlemi uygulanır; (vi) kıyafet kurutulur; ve son olarak (vii) kıyafet ütülenerek müşteriye teslim edilir.

Her iki yöntemde de ana yıkama öncesi ve sonrasında lokal leke çıkarmaya yönelik organik çözücü kimyasal kullanımını içerir, lekenin durumuna göre en az bir, sıklıkla da iki defa lokal leke giderici kimyasal kullanıldığı görülmektedir. Bu

kimyasallar hedef leke ve tipine bağlı olarak farklı derişimlerde ve farklı kimyasal içeriklere sahip olsalar dahi, ana çözücü olarak TCE ve PCE barındırmaktadırlar[1]. Kimyasalların aşırı kullanımı çok ciddi boyutlarda evre kirliliği ile birlikte insan sağlığına da ciddi olumsuz etkileri bulunmaktadır. Bu kimyasallar kalp hastalıklarına sebebiyet verdikleri gibi [2] kanserojenlerdir [1].

1.1. Tezin Amacı, Katkısı ve İçeriği

evre ve insan sağlığına bu denli zararlı olan bu kimyasalların kullanımını azaltma hedefiyle, alternatif temizleme yöntemlerinin performans çalışması ve sınaî uygulama potansiyellerinin araştırılması önem arz etmektedir.

Günümüzde lazerlerin çeşitli alanlarda temizleme maksatlı kullanımı bilinmektedir. Özellikle müzelerde sergilenen tarihi eser niteliği taşıyan tekstillerin atımlı lazerler ile temizleme çalışmalarının yapıldığı bilimsel yayınlar bulunmaktadır [3-10].

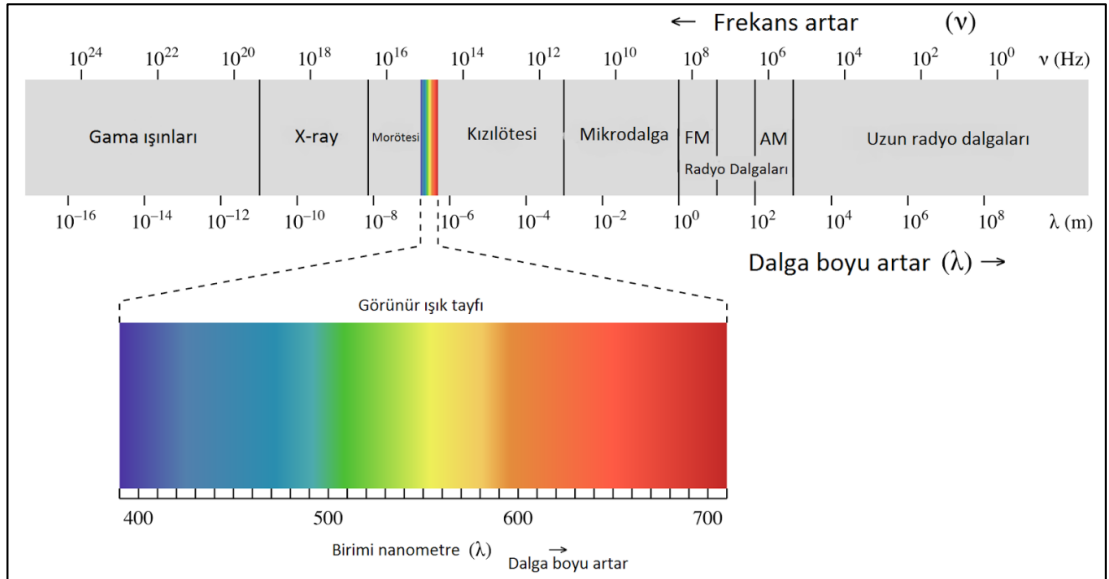
Bu tez kapsamında, ev tipi çamaşır makinalarında ve/veya kuru temizlemede kullanılan kimyasallara alternatif teşkil etme potansiyelinin belirlenmesi amacıyla yapılan, atımlı lazerler ile tekstil temizleme çalışmaları sunulmaktadır.

2. TEORİK BİLGİLER

2.1. Lazer Temelleri

2.1.1. Elektromanyetik Dalgalar

Elektromanyetik dalga, birbirine dik elektrik ve manyetik alan bileşenlerinden oluşan, vakum ortamında ışık hızında yayılan bir dalga biçimidir. Her ne kadar bütün elektromanyetik dalgalar vakum ortamında ışık hızında hareket etseler de bunu çeşitli frekanslarda, dalga boylarında ve enerjilerde yaparlar. Bunların frekans ve dalga boylarına göre sınıflandırılmasıyla da elektromanyetik spektrum ortaya çıkmaktadır. Artan alga boyuna göre bir sınıflandırma yapıldığı zaman sırasıyla gama ışınları, x ışınları, mor ötesi, görünür bölge, kızılaltı, mikrodalgalar ve radyo dalgaları olmak üzere sıralanabilir. Şekil 2.1’de [11] elektromanyetik spektrum görseli verilmektedir.



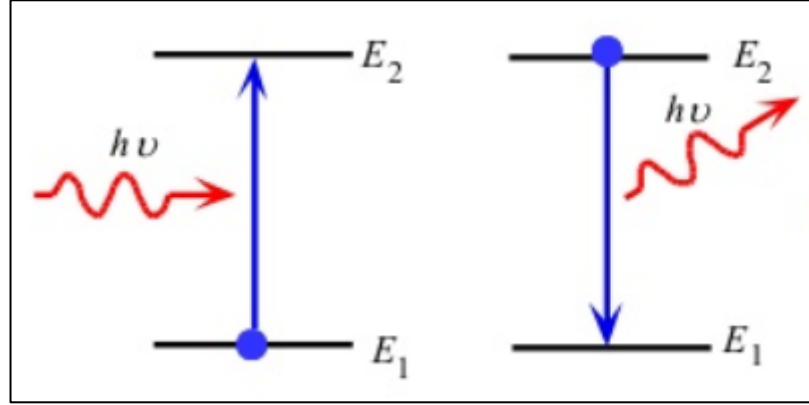
Şekil 2.1: Elektromanyetik Spektrum

$$E = h\nu \quad (2.1)$$

$$c = \lambda\nu \quad (2.2)$$

Eşitlik (2.1) ve (2.2)'de sırasıyla elektromanyetik dalganın enerji eşitliği ve ışık hızı eşitliği verilmektedir. Planck Sabiti bir sabit olduğu için, enerji doğrudan frekansa bağlıdır denebilir. Eşitlik 2'de de görüldüğü gibi sabit bir değer olan ışık hızı frekans ve dalgaboyuna bağlıdır. Bu iki eşitlikten yola çıkarak elektromanyetik dalgalarda dalgaboyu ve frekansın ters orantılı olduğu görülmektedir.

2.1.2. Soğurma (Absorption)



Şekil 2.2: Soğurma ve kendiliğinden ışıma

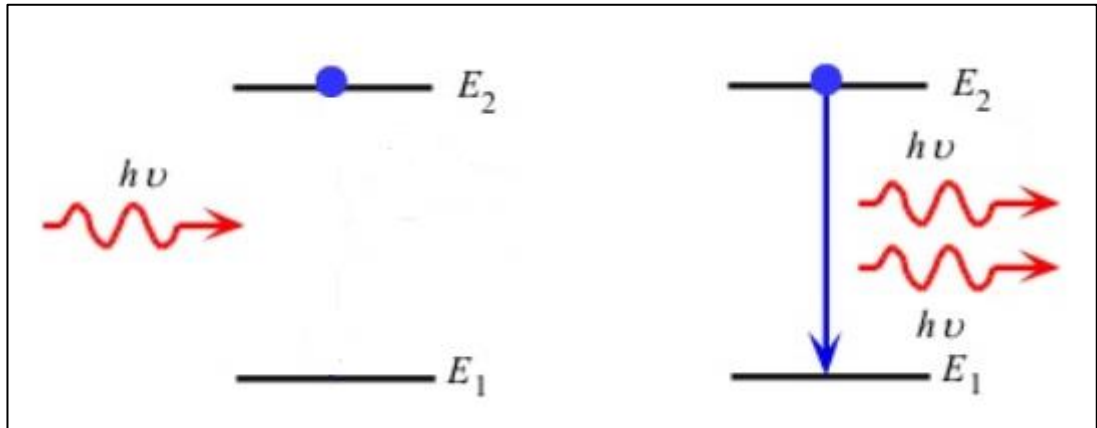
Düşük enerji seviyesindeki bir elektron, enerjisi bir fotondan veya elektromanyetik dalgadan soğurabilir ve daha yüksek enerji seviyesine geçebilir. Soğurma, gelen bir fotonun enerjisi, bir elektronun geçiş yapacağı iki seviye arasındaki enerji farkından daha büyük veya eşit olduğunda gerçekleşir. Şekil 2.2'de görüldüğü gibi E_1 ve E_2 enerji düzeyleri arasındaki fark $\Delta E = h\nu = E_2 - E_1$ kadardır. Soğurulan fotonun enerjisi E_f , $h\nu$ değerinden büyük veya eşit ise gelen foton soğurulur [12].

2.1.3. Kendiliğinden Işıma (Spontaneous Emission)

Soğurma olayından sonra elektronlar üst enerji seviyesinde uzun süre duramazlar. Bu seviyelerde kararsız oldukları için birkaç nanosaniye sonra düşük olan enerji seviyesine geri dönerler [13]. Bu geri dönüş esnasında, iki enerji seviyesi arasındaki enerji farkı kadarlık bir enerjiye sahip foton salınır ve bu fenomene kendiliğinden ışıma denir.

2.1.4. Uyarımlı Işıma (Stimulated Emission)

Bir elektron; uyarılmış halde iken (E_2 enerji seviyesinde), gelen başka bir $h\nu$ enerjili foton, elektronu bir alt seviyeye (E_1 enerji seviyesine), gelen fotonun özelliklerine özdeş özelliklere sahip başka bir foton salarak inmeye zorlaması olayına uyarımlı ışıma denir. Bu doğada kendiliğinden oluşabilecek bir olay değildir sadece koşullar uygunsa, yani doğru zamanda ışımayı uyuracak bir foton olduğu zaman ortaya çıkmaktadır.



Şekil 2.3: Uyarımlı Işıma

Uyarımlı ışıma LAZER'in (laser = light amplification by stimulated emission) en temel çalışma prensibidir. Uyarımlı ışımının altında yatan fizik ilk olarak 1917 yılında Einstein tarafından ortaya atılmış [14], 1928'de Ladenburg tarafından deneysel olarak

doğrulanmış olmasına [15] rağmen ilk lazer cihazı 1960 yılında Theodore Maiman tarafından oluşturulmuştur [16].

2.1.5. Nüfus Terslenmesi (Population Inversion)

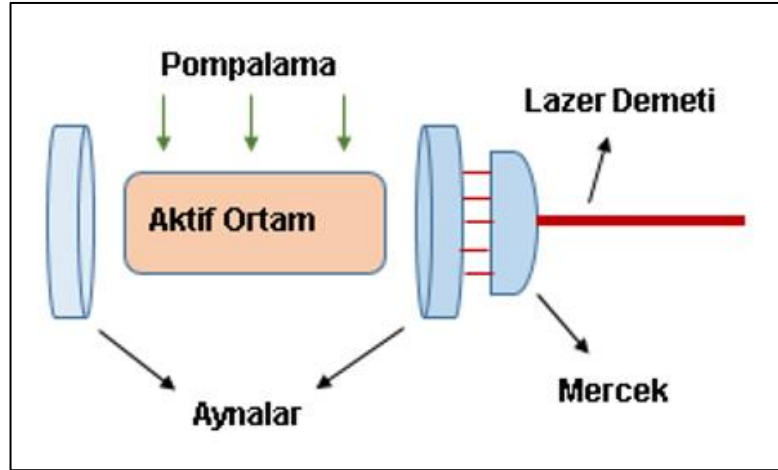
Kendiliğinden yayılım lazerin en temel çalışma prensibidir, fakat lazer ışını oluşturabilmek için çok sayıda fotona ihtiyaç vardır. Bir lazer aktif ortamında, örneğin bir katı hal lazer kristalinde serbest elektronlar genelde alt enerji seviyesindedirler. Lazer ışını oluşturmak için, çok sayıda serbest elektronu aynı zamanda üst enerji seviyesine çıkarmak gerekmektedir. Ardından uyarımlı ışımaya ile serbest elektronlar tetiklenerek aynı anda alt enerji seviyesine indirilerek lazer ışını oluşturması sağlanabilir. Nüfus terslemesi ise çok sayıda serbest elektronu üst enerji seviyesine çıkartılıp orada tutulmasına denilmektedir.

2.1.6. Kutuplanma

Bir enine elektromanyetik dalga olan lazer ışınının özelliklerinden biri de kutuplanmadır. Elektromanyetik dalgaların elektrik alan ve manyetik alan bileşenleri yayılma doğrultusuna ve birbirlerine diktir. 3 boyutlu kartezyen koordinat sisteminde z doğrultusunda ilerleyen bir elektromanyetik dalganın elektrik alan bileşeni z düzlemine dik herhangi bir yönde olabilir. Yayılma düzlemine dik rastgele yönelen elektrik alan bileşenleri barındıran elektromanyetik dalgaya kutupsuz denir. Kutuplanma terimi ise yayılan bir elektromanyetik dalganın elektrik alan bileşeninin davranışını tanımlar. Lazerler genelde doğrusal kutupludur yani elektrik alan bileşenleri bir düzlemde sınırlıdır bu düzlem de kutuplanma düzlemi denir. İki tane farklı doğrultularda, eşit elektrik alan genliğine sahip, doğrusal kutuplanmış elektromanyetik dalga üstüste bindirilirse ve aralarında $\pi/2$ kadarlık faz farkı eklenirse oluşan elektromanyetik dalganın elektrik alan genliğinin yön değişimi bir daire çizer. Bu tip kutuplanmaya dairesel kutuplanma denir. Eğer elektrik alan genlikleri farklı iki dalga için aynı şeyler tekrarlanırsa bu sefer de eliptik kutuplanma elde edilir.

2.2. Lazer

Uygulama alanlarına göre çok çeşitli lazer sistemleri olsa dahi bütün lazerlerde ortak olan birtakım özellikler vardır ve lazerler bu özellikler sayesinde eşsizdirler. Bir lazer ışını birçok elektromanyetik dalganın birleşmesiyle oluşur ve bu elektromanyetik dalgalar lazer ışınında aynı frekansa sahiptirler. Bu sayede lazer ışını tek renklidir. Bir diğer özellik ise, aynı frekansa sahip elektromanyetik dalgalar arasında faz farkı olmamasıdır. Buna koherentlik denir. Lazer ışını o kadar iyi kolime edilmiştir ki, idealde demet ıraksamadan, gerçekte ise çok az ıraksayarak çok uzun menziller kat edebilirler. Son olarak ise lazer ışınları kutupludur. Şekil 2.4’de bir lazer sisteminin iç yapısı verilmiştir. Aktif ortam pompalanarak nüfus terslenmesi oluşturulur, ardından uyarımlı ışınla lazer ışını oluşturulan fotonlar elde edilmiş olur. Sistemde iki tane ayna vardır bunlardan biri tam yansıtıcı, diğeri kısmi geçirgendir. Kısmi geçirgen aynaya gelen eş fazlı ve eş frekanslı fotonların bir kısmı kolime edilerek lazer ışını oluşturur geri kalanı ise lazer oluşumunu sürdürmek için lazer kavitesine geri yansıtılırlar.

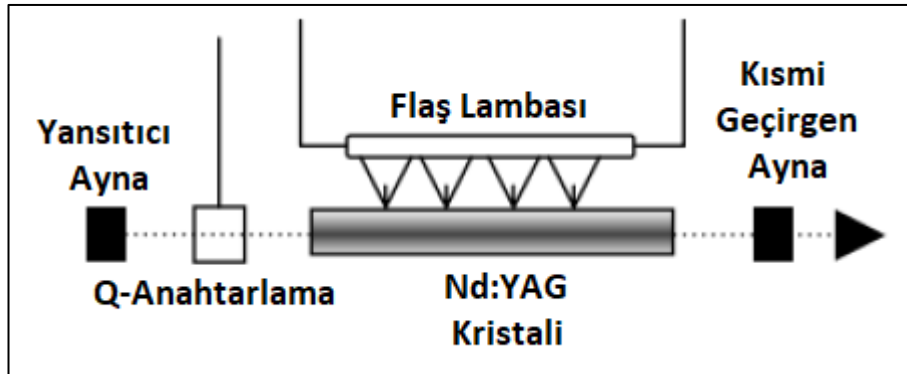


Şekil 2.4: Lazer iç mekanizması

2.2.1. Nd:YAG Lazer

Nd:YAG lazerleri (neodymium doped yttrium aluminum garnet) görece küçük bir pompalama enerjisi ile yüksek verimli ışıma sağlayan lazer sistemleridir. Bu katı hal lazerleri, içinde kullanılan lazer kristali gereği 1064 nm dalgaboyunda ışıma yapmaktadırlar. Bununla birlikte doğrusal olmayan frekans dönüşüm kristalleri ile ikinci, üçüncü ve dördüncü harmonikler üretilebilir. Bunlar sırasıyla bir ND:YAG lazerin 532, 355 ve 266 nm dalgaboylarında ışınlar çıkarmasını sağlar [17]. Harmonik üretimi, Nd:YAG lazerin çıkardığı fotonların frekansının iki, üç ve dört katına çıkartılarak dalgaboyunun yarıya, üçte birine ve dörtte birine indirilmesidir. Örnek olarak ikinci harmonik üretimini ele alırsak; $c = \lambda f$ bağıntısına göre, ışık hızının sabit olmasından dolayı frekansı iki katına çıkartılınca dalgaboyu yarıya düşmektedir.

Bu lazer sistemleri Şekil 2.5’de [18] görüldüğü üzere; bir YAG malzemesine Nd iyonları katkılanarak elde edilen bir lazer kristalinden, yakın UV ve yakın IR bölgeleri arasında ışıma yapabilen flaş lambasından, bir tanesi kısmen geçirgen olan iki aynadan ve güçlü lazer atımları sağlamak için q-anahtarlama deklanşör içerir.

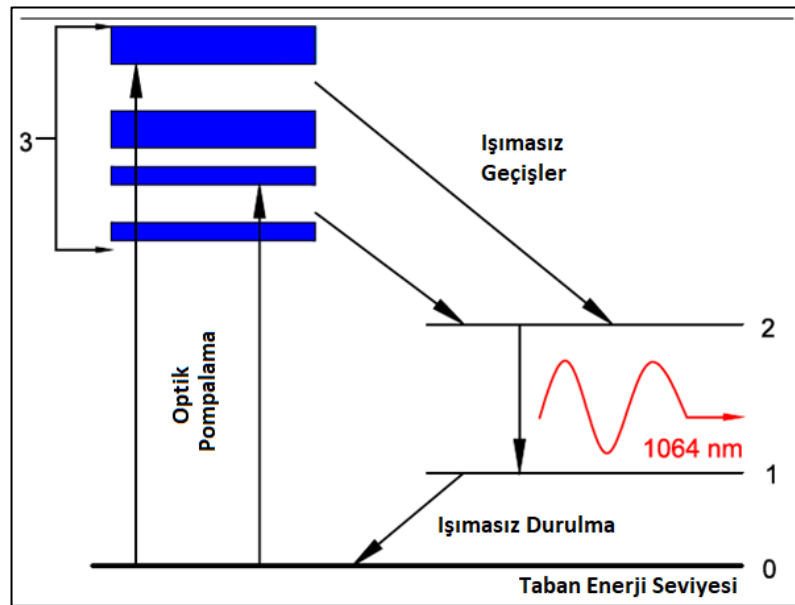


Flaş lambası tarafından pompalanan ışığın küçük bir kısmı lazer malzemesindeki Nd iyonları tarafından soğurulur. Nd’nin enerji seviyeleri sayesinde pompalanan flaş lambası yeterince güçlüyse nüfus terslemesi oluşur. Nüfus terlemesinden sonra spesifik bir foton ile üst enerji seviyesindeki iyonlar daha düşük bir enerji seviyesine indirilerek uyarımlı yayınım olayı gerçekleştirir. Burada elde edilen fotonların bir

kısmı, kısmi geçirgen ayna tarafından geçirilir, diğer kısmı lazer aktif ortamına geri yansıtılır böylece kalıcı bir dalgaboyunda ışınım sağlanmış olur [19].

Q anahtarlı deklanşör sayesinde ise yüksek güçlü ve kısa atım genişliğine sahip lazer atımları üretilmiş olur. Q anahtarlı Nd:YAG lazerleri için tipik atım süreleri onlarca nanosaniyedir [20].

İlk olarak flaş lamba ile optik pompalama sonucu kazanç ortamı elektronları Şekil 2.6'daki [18] 3. enerji seviyelerinden birine uyarılır. Bu seviyedeki enerji düzeylerinin yakınlığı 300-800 nm gibi geniş bir dalgaboyu aralığında pompalamaya izin verir. Ardından ışınım yapmayan geçişlerle, uyarılmış iyonlar, meta kararlı düzey olan 2. enerji seviyesine ulaşana kadar kademeli olarak bir alt enerji düzeyine inerler. Lazer ışını üretebilmek için nüfus terslemesi olmazsa olmazdır ve bunun olması için lazer aktif ortamındaki atomların çoğunluğu meta enerji düzeyinde olması gerekmektedir. Yalnızca spesifik bir foton ile iyonlar 1. enerji seviyesine uyarımlı ışınım yoluyla indirilirler [21, 22] ve 1064 nm dalgaboyunda eş fazlı fotonlar üretilir. 1. enerji düzeyi ve taban enerji düzeyi birbirine çok yakın olduğu için ışınım olmadan elektronlar taban enerji düzeyine inerler.



Şekil 2.6: Nd:YAG kristali enerji bantları ve 1064 nm dalgaboylu ışının salınımı

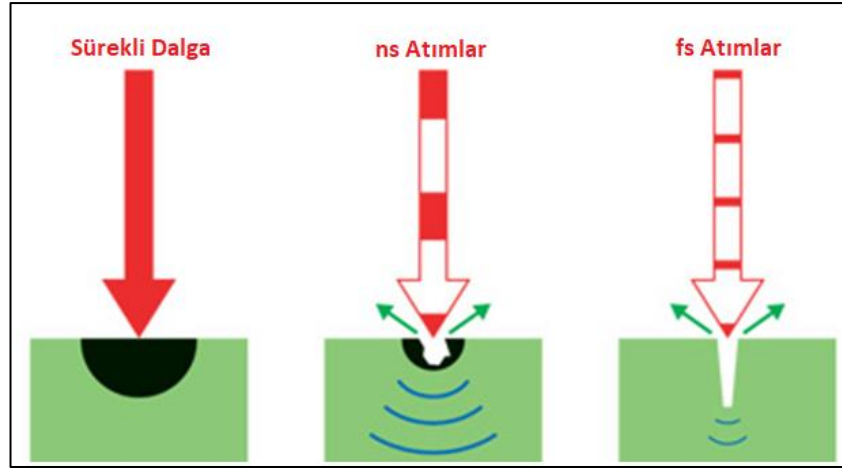
1064 nm dalgaboyunda Nd:YAG lazer ışını bu şekilde elde edilir . Elde edilen ışını atımlı hale getirmek için q anahtarlama kullanılır.

2.2.2. Q Anahtarlama

Q anahtarlama, yüksek enerjili kısa atımlar elde etmek için kullanılır ancak ultra kısa darbeler (ps, fs mertebeleri) ile karıştırmamak gerekir. Bu yöntemle; bir ile birkaç yüz nanosaniye aralığında atımlar elde edilebilir. Bir q anahtarlama kullanarak, sürekli dalga lazerleri tarafından üretilen ortalama güçlerden birçok kez daha büyük piklere sahip atımlar üretmek mümkündür. Mekanizma, lazer rezonatöründe oluşan kayıpların azaltılıp artırılması yöntemiyle çalışır. Kazanç ortamında yeterli miktarda enerji depolanana kadar rezonatordeki kayıplar yüksek düzeydedir. Bu esnada lazer ışını oluşumu gerçekleşmediği için flaş lamba ile pompalama sonucu kazanç ortamına beslenen enerji burada birikir. Depolanan enerji kendiliğinden ışıma tarafından sınırlandırılır. Rezonatordeki yüksek tutulan kayıplar aniden küçük bir değere düşürüldüğünde ise lazer ışınının gücü artar ve bu artışın sonunda rezonatörden kısa süreli atımlar halinde çıkartılır. Böylece lazer atımları elde edilmiş olur.

2.3. Lazer Ablasyon

Ablasyon; odaklanmış lazer ışını enerjisi yardımıyla ısınma, erime ve buharlaşma işlemlerinden dolayı katı bir malzemenin yüzeyinden bir kısmının uzaklaştırılması olayıdır. Lazer atım genişlikleri, ablasyon yapılan kısmı ve ablasyonun türünü belirler. Mikrosaniye ve nanosaniye mertebelerinde yayılım yapan atımlı lazerler; ısıtma, erime ve buharlaşma işlemlerinin tamamını gerçekleştirirler. Ultra kısa atımlar olarak nitelendirilen femtosaniye atımlı lazerler ise ilk iki adımı atlayarak doğrusal olmayan etkilerle bu işlemi gerçekleştirmektedir.



Şekil 2.7: Farklı atım genişliğine sahip lazer ablasyonları

Şekil 2.7’te farklı atım sürelerine sahip lazerlerin ablasyon etkileri görülmektedir. Yeşil ile gösterilen hedef malzemeyi, siyah alanlar ısı etkisiye maruz kalan alanları, mavi eğriler ise oluşan şok dalgalarını ve şiddetlerini göstermektedir. Sürekli dalga lazerleri, hedef malzemeyi ısıtırken malzeme üzerinden net bir kütle aşındırmazlar, ns atımlı lazerlerde ısı etkilerine maruz kalan alan sürekli dalga lazerlerinden daha az olmasına karşın hedef malzeme üzerinden malzeme aşındırabilmektedir. Fakat bu aşındırma krater şeklinde olmaktadır bu da kontrol edilmesi gerektiği anlamına gelir çünkü ablasyon gerçekleştirilirken hedef malzemenin mümkün olduğunca az zarar görmesi gerekmektedir. Eğer ablasyon eşik enerji yoğunluğu biliniyorsa, ablasyon sonucu yüzeyde oluşacak kraterin çapı Eşitlik (2.3) ile belirlenebilir.

$$D^2 = 2w_0^2 \ln\left(\frac{F}{F_{th}}\right) \quad (2.3)$$

Lazer ablasyon süreçlerinde termal giricilik göz önünde bulundurulması gereken parametrelerden birisidir ve lazer enerjisinin malzemede ne kadar derine nüfuz edeceğini belirtir malzemenin ısı iletim katsayısına, yoğunluğuna ve ısı kapasitesine bağlı bir ifadedir.

Termal giricilik bağıntısı Eşitlik (2.4)'de verilmektedir.

$$a = \frac{k}{\rho C_p} \quad (2.4)$$

fs atım genişliğine sahip lazerler hedef malzeme üzerinde ısı etki yaratmazlar bunun sebebi bir malzemeye ısı transferi gerçekleşmesi için yaklaşık on pikosaniyeden daha uzun bir süreye ihtiyaç duymaktadır [23] malzeme üzerinden aşındırılan kütle ise daha hassas ve kontrollüdür. Benzer bir inceleme şok dalgaları için yapıldığı zaman sürekli dalga lazerleri hedef malzeme üzerinde şok dalgası oluşturmazken, atımlı lazerler oluştururlar. Ns atımlı lazerlerde, fs lazerlere göre daha şiddetli şok dalgası oluşturmaktadır şok dalgaları ablasyona üzerinde etkili bir parametre olmasına karşın mekanik bir etki olduğu için hedef malzemenin fiziksel özelliklerine bağlı olarak malzemeye zarar verme ihtimali vardır. Şok dalgalarına, lazer temizleme mekanizmaları kısmında daha detaylı olarak değinilmiştir. Hedef malzemenin lazer ışınına vereceği tepki ablasyon işleminde önemlidir. Bu durumda malzemenin; optik soğuruculuğu, yansıtıcılığı, ısı kapasitesi, termal iletkenlik katsayısı, yoğunluğu gibi bir takım fiziksel özellikleri önem kazanmaktadır [24].

2.3.1. Doğrusal Soğurma

Bir elektromanyetik dalga veya foton bir malzeme üzerine geldiği zaman yansiyabilir, geçebilir veya soğurulur. İdeal olarak malzemeler işlenirken veya temizlenirken soğurmanın mümkün olduğunca yüksek olması istenilmektedir. Sürekli dalga lazer ışınlarında ve 50 pikosaniyeden daha geniş lazer atımları malzeme ile etkileştiğinde doğrusal soğurma gerçekleşir.

Doğrusal soğurmada ışık, bir malzemenin yüzeyine çarptığında, malzemenin ince bir katmanına emilecektir, ışık ortamdan geçerken lazer atımın ışınım yoğunluğu mesafeye göre eksponansiyel olarak azalacaktır. Işınım yoğunluğundaki bu azalış soğurma katsayısı α 'ya ve malzeme içerisinde kat ettiği yola bağlıdır. Bu durumu Beer-Lambert yasası ile açıklamak mümkündür. Bu yasa; malzeme içinden geçen ışık ile malzeme tarafından soğurulan ışık arasındaki logaritmik bağıllıkla ilgilidir ve kısaca ışığın soğurulmasının, içinden geçtiği malzemenin özelliklerine bağlı olduğunu söyler. Eşitlik (4.3) Beer-Lambert denklemdir.

$$I = I_0 e^{-\alpha z} \quad (2.5)$$

Bu denklemi kullanarak, farklı malzemelerin işlenmesi için hangi dalga boyunun en uygun olacağını belirlemek mümkündür. Bir malzemenin içindeki soğurma derinliği ise Eşitlik (4.4) ile yaklaşık olarak bulunabilmektedir.

$$d = \frac{1}{\alpha} \quad (2.6)$$

2.4. Lazer Temizleme

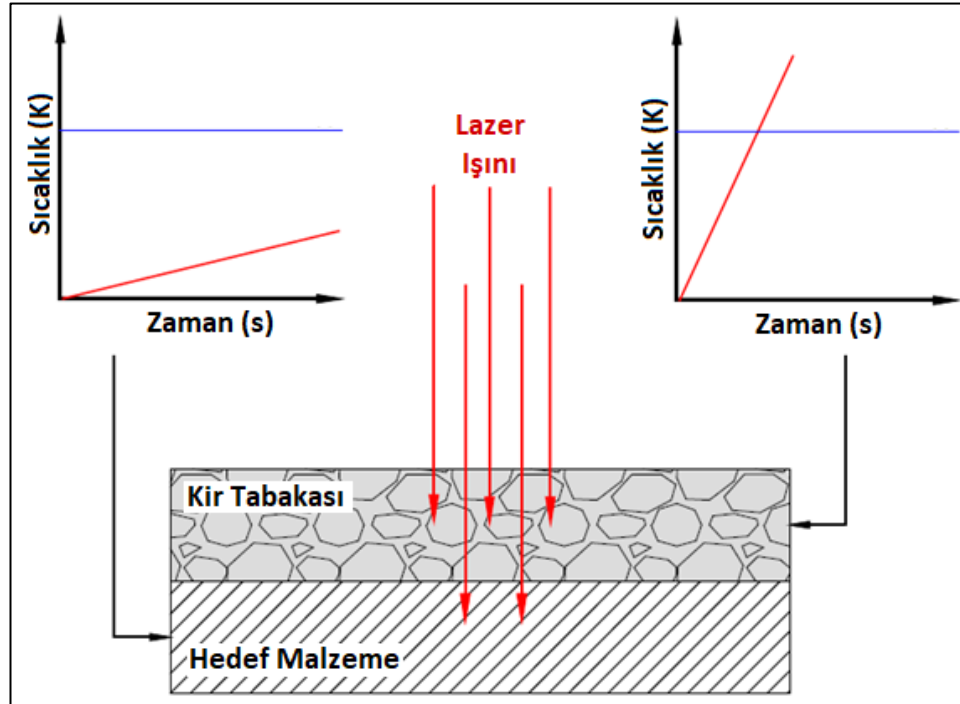
Bir hedef malzeme üzerinden istenmeyen tabakanın veya kontaminasyonun, hedef malzemeye zarar vermeden uzaklaştırılması işlemidir. Temelde lazer ablasyondan çok farklı bir kavram değildir. Tekstiller üzerinde en büyük uygulama alanları sanat eserleri ve tarihi eserlerin restorasyon maksatlı temizlik işlemleridir. Temizliği yapılan eserler genelde; heykeller [25], resimler [26] ve hatta bazı binaları [27] içermektedir. Lazerler ilk olarak 1972’de Venedik’te lazer holografisi üzerinde çalışırken John Asmus tarafından keşfedildi [28]. Asmus üzerinde çalıştığı heykellerin, üzerindeki daha koyu renkli kirlerin heykellere zarar vermeden kalktığını fark etmesi üzerine lazer ile tarihi eser temizlemenin temelleri atılmış oldu.

2.4.1. Lazer Temizleme Mekanizmaları

Lazer temizlemenin ilk keşfinden bu yana kirliliğin malzemenin yüzeyinden uzaklaştırılmasını sağlayan çeşitli mekanizmalar belirlenmiştir. Genel olarak üç gruba ayrılmasına karşın temizleme sadece tek bir mekanizmayla gerçekleşmek zorunda değildir iki veya üç mekanizmanın birleşimi de olabilmektedir. Bu mekanizmalar; buharlaşma prosesleri, darbe prosesleri ve titreşim prosesleri olarak sınıflandırılmaktadır. Bu mekanizmalardan ns lazer ile temizleme işleminde kullanılanlar aşağıda detaylandırılmıştır.

2.4.1.1. Seçici Buharlaştırma

Bu lazer ile temizleme mekanizması Asmus'un, Venedik'teki orijinal çalışması sırasında ortaya çıkmıştır [29]. Bu mekanizma, görece uzun lazer atımları (μm , nm) ile nispeten düşük atım güç yoğunluklarında (10^3 - 10^5 W.m^{-2}) çalıştırılarak, hedef malzeme neredeyse hiç etkilenmeden yüzey kirlerini temizlemesine karşın yeterince agresif bir yöntem değildir. Bu işlemin altında yatan ilke genellikle kirlenen malzemenin üzerindeki kirliliğin, malzemenin asıl renginden daha koyu olmasından kaynaklı, malzeme ile kirlilik tabakası arasındaki doğrusal soğurma katsayıları arasındaki farka bağlanmıştır. Şekil 2.8'de [18] de görüldüğü üzere Lazer ışınları sonucu daha koyu olan katman gelen ışının daha büyük bir kısmını soğurur ve daha fazla sıcaklık artışı meydana gelir, alttaki daha açık renkli katman ise daha azını soğurur ve daha az sıcaklık artışı meydana gelir. Daha fazla enerji soğuran kirlilik tabakası, buharlaşma sıcaklığının üzerine çıkar ve buharlaşır. Daha az enerji soğuran hedef malzeme ise daha az enerji soğurarak buharlaşma sıcaklığının altında kalacak şekilde ısınır. Böylece yüzeyden kirlilik kaldırılmış olur.



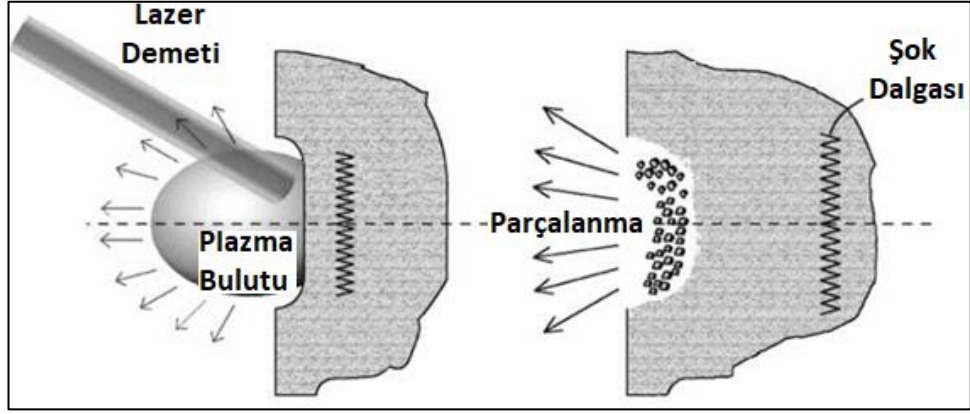
Şekil 2.8: Seçici buharlaştırma mekanizması

2.4.1.2. Parçalanma (Spallation)

Asmus'un sonraki makalelerinde kirletici maddenin yüksek yoğunluklu ns atımlı lazer ile parçalanabileceği de gösterildi [30]. Bir q anahtarlama ile elde edilen ns genişliğindeki atımlar (1-100ns), malzemeyi buharlaşma sıcaklığının üstüne yükseltmek için yeterlidir. Bu buharlaştırılmış malzemede yüksek sıcaklıklar (10^4 - 10^5 K) oluşur. Sıcak buhar kısmen iyonlaşmış hale gelir ve gelen lazer atımını güçlü bir şekilde soğurmaya başlar, bu sayede yüzeyin hemen üzerinde bir plazma bulutu oluşur ve hedef malzeme yüzeyinde adeta bir koruyucu kalkan görevi görür. Buna Knudsen Tabakası denir. Bu oluşan tabaka lazer enerjisinin yüzeye tamamen aktarılmasını engeller çünkü gelen lazer atımları bu tabakada soğurulur [23]. Plazmanın soğurma katsayısı lazer dalgaboyuyla ilişkilidir [31]. Lazer dalgaboyu arttıkça soğurma artar [31, 32]. Plazma oluşumu ilk adım olarak malzeme yüzeyinin buharlaşmasını gerektirir. Tabakanın buharlaşması, hedefte biriken enerji, hedefin buharlaşma ısını aştığında meydana gelmektedir Eşitlik (2.7)'de plazmanın oluşmayacağı lazer enerji yoğunluğu eşik değeri ifadesi verilmektedir.

$$F_{th} = \rho L_v \alpha^{1/2} \tau^{1/2} \quad (2.7)$$

Oluşan plazma, normal şartlarda yüzeyin soğurması gereken lazer enerjisini soğurarak yüzeyin ısınmasını engellerken kendisi ısınmaya devam eder. Plazma bulutu daha fazla ısındığında, yüzeyin yakınında (1-100 kbar) yüksek lokalize basınçlar üretir. Bu sebeple hedef malzeme yüzeyinde mikroskobik sıkışmalara sebep olur. Atım sona erdiğinde ise bu basınç serbest kalır ve yüzeydeki kirlilik gevşer, bu ani sıkışma ve gevşeme, yüzeyden ince bir katmanı (1-100 μ m) hedef malzemeden ayırır Şekil 2.9'da [18] detaylı görsel verilmektedir.. Bu mekanizma ile önemli ölçüde leke çıkartılabilir fakat temizlik işlemini dikkatli bir şekilde kontrol etmek gerekir, çünkü yüksek yoğunluklu lazer atımları temizlenen malzemeye zarar verebilir.



Şekil 2.9: Lazer etkisi ile parçalanma

2.4.1.3. Şok Dalgası

Şok Dalgaları [33] ns lazer atımlarının hedef malzeme üzerinde oluşturduğu yüksek basınçlar ile temizleme işlemidir. Lazer atımlarının enerji yoğunluğunun, parçalanma ile temizlemedeki enerji yoğunluğundan daha yüksek seviyeye çıkarılması, oluşan şok dalgalarının şiddetini arttıracak için, daha etkin bir temizleme elde edilebilir. Fakat bu işlemin, hedef malzemeye daha fazla zarar verme ihtimali vardır.

2.4.1.4. İnkübasyon Etkisi

Birden fazla atımlı ablasyon işlemlerinde, atım sayısı arttıkça ablasyon için gerekli eşik değeri düşer. Buna inkübasyon etkisi denir. İnkübasyon etkisi metallerde, dielektriklere ve polimerlere göre daha baskın görülür [18]. Ayrıca atım tekrarlama frekansı artırılarak hedef malzeme üzerine gönderilen atımlar arası süreyi azaltmak mümkündür. Hedef malzemeye gönderilen lazer atımları arasındaki süre hedef malzemenin lazer atım enerjisini soğurup, ısınıp, termal dengeye ulaşması için gereken süreden daha kısa tutulursa, malzemenin termal olarak dengeye ulaşmasına izin vermeden ikinci kere lazer atımı gönderilerek ısı birikimleri meydana getirilebilir [34], bunun da inkübasyon etkisine katkısı vardır. İnkübasyon etkisi temelde ısı

birikmelerin sonucunda ortaya çıkmaktadır. Eğer malzeme artarda gelen iki atım arasındaki sürede ısı dengeye ulaşmazsa geriden gelen atımlar için daha düşük atım enerjilerinde ablasyon gerçekleşebilmektedir [24, 34, 35]. İnkübasyon etkisi Eşitlik (2.8)'de verilmiştir ve ifadeden görüldüğü üzere çok atımlı ablasyon işlemlerinde ablasyon eşik enerji yoğunluğu azalmaktadır.

$$F_{th}(N) = F_{th}(1)N^{\zeta-1} \quad (2.8)$$

Bu sayede inkübasyon etkisi ablasyon işlemine katkı sağlamaktadır. Ancak ısı birikmeler sonucu hedef malzemenin fazla ısınarak hasar görmesinden kaçınılması gerekmektedir.

2.5. Lazer ile Temizleme İşlemindeki Etkin Parametreler

Lazer ile temizlemede bazı parametreler etkin rol oynar. Bunlar lazere bağlı olduğu gibi temizlenecek malzemeye ve yüzeyindeki kirliliğe de bağlıdır. Lazere bağlı parametreler atım genişliği, atım sayısı, atım tekrarlama frekansı, atım enerjisi ve gücü, lazer spot alanı ve lazer spot alanına bağlı olarak değişen lazer enerji ve güç yoğunluğudur. Malzemeye bağlı parametreler ise; malzemenin ısı iletkenlik katsayısı ve optik soğurma katsayısı, optik soğurma katsayısına bağlı olarak ise lazer dalga boyu etkin parametreler olarak gösterilebilir.

2.5.1. Atım Genişliği

Bir lazer atımının yarı yükseklikteki tam genişliğinin (FWHM) zaman cinsinden ölçüsüdür. Q anahtarlmalı bir Nd:YAG lazer için bu değer 1-100 ns'dir. Lazer enerjisini malzemeye aktarırkenki soğurma mekanizmaları bu parametreye bağlıdır. Lazer ablasyon başlığı altında aktarıldığı üzere; ns genişliğinde bir atım için ısı etkiler ön plana çıkarken, fs genişliğinde bir atım için doğrusal olmayan etkiler ön plana çıkar.

2.5.2. Atım Sayısı

Temizleme işleminde hedef malzeme üzerine gönderilen lazer atımlarının sayısı önemlidir. Daha önce inkübasyon etkisi kısmında bahsedildiği üzere birden fazla atımlı temizleme işlemleri daha az enerji ile yapılabilir.

2.5.3. Atım Tekrarlama Frekansı

Bir atımlı lazerin bir saniyede göndereceği atım sayısıdır. Daha önce inkübasyon etkisi kısmında bahsedildiği üzere birden fazla atım ile yapılan temizleme işlemlerinde ardışık atımlar arasındaki geçen süre, lazer temizleme için değiştirilebilen etkin parametrelerden biridir.

2.5.4. Atım Enerjisi ve Gücü

Fotonlar için enerji ifadesi Eşitlik (2.9)'deki gibidir.

$$E = \frac{hc}{\lambda} \quad (2.9)$$

Bu ifadeye göre c ve h sabit olduğu için foton enerjisi doğrudan dalga boyuna bağlıdır. Fotonlar birleşerek bir lazer ışını oluşturur bir lazer ışınında ne kadar çok foton varsa lazer enerjisi o kadar yüksek olur. Lazer ile temizleme işlemi de lazer atımlarının enerjilerini kirli bir yüzeye aktarması işlemidir. Ortamda bir enerji aktarımı var ise güç kavramının da tanımını yapmak gerekir. Bir lazer için güç (P) ifadesi birim zamanda aktarılan atım enerjisidir (E).

$$P_{ort} = \frac{E}{T} \quad (2.10)$$

Enerji birimi olarak joule (J) ve periyot birimi olarak saniye (s) kullanılırsa gücün birimi watt (W) olur. Atımlı lazerler söz konusu olduğunda tepe gücü (peak power) ifadesinden de bahsetmek gerekir. Tepe gücü ifadesi Eşitlik (2.11)'te verilmektedir.

$$P_{tepe} = \frac{E}{\tau} \quad (2.11)$$

2.5.5. Lazer Demeti Alanı

Lazerlerin özelliklerinin anlatıldığı bölümde, lazerlerin kolime olduğu yazılmıştı. Bir lazer, atımlar halinde gönderdiği enerjiyi malzemeye aktarırken demet alanı kadarlık bir bölgeye aktarır. Burada demet alanı cm^2 cinsinden ne kadar küçükse o bölgeye aktarılabilecek enerji miktarı o kadar yüksek olur. Enerji yoğunluğu ifadesi;

$$F = \frac{E}{\pi r^2} \quad (2.12)$$

şeklindedir ve birimi $(\text{J} \cdot \text{cm}^{-2})$ 'dir.

Aynı yaklaşımlar lazer atımı gücü için de yapılabilir. Bu sefer güç yoğunluğu ifadesi karşımıza çıkacaktır.

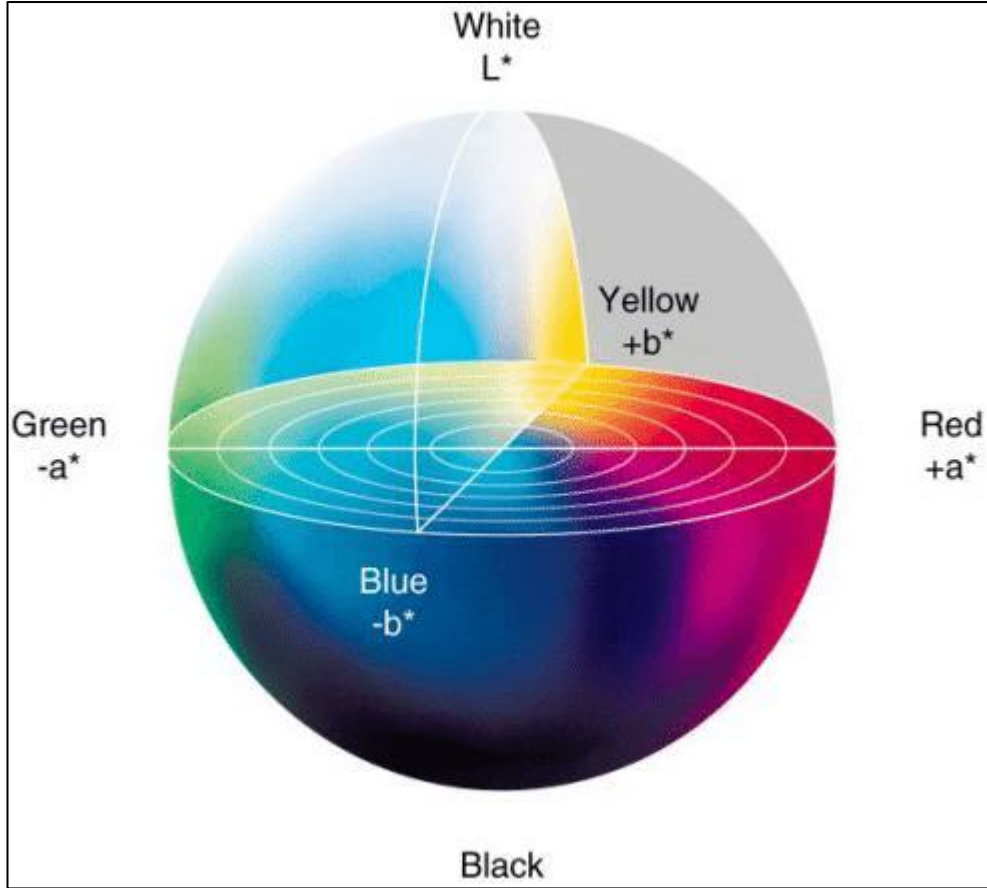
$$I = \frac{P}{\pi r^2} \quad (2.13)$$

şeklinde ifade edilir ve birimi ise $\text{W} \cdot \text{cm}^{-2}$ dir.

Lazer demet alanı; lazer atımlarının, güç yoğunluğunu ve enerji yoğunluğunu değiştirdiği için, lazer temizlemede etkin bir parametredir. Lazer demetinin alanını mercekler ile artırıp azaltmak mümkündür. Fakat bu şartlar altında güç ve enerji yoğunluğu değerleri de değişecektir.

2.6. Renk Uzayı

Renk uzayı, kısaca CIE Lab, Uluslararası Aydınlatma Komisyonu (Commission Internationale de L'eclairage) tarafından 1976 yılında tanımlanmıştır. Rengi üç değer olarak ifade eder. 3 boyutlu renk uzayı şekilde görülmektedir (Şekil 2.10).



Şekil 2.10: CIE L*a*b* renk uzayı

Rengi üç değer olarak ifade eder L* ile gösterilen eksen siyahlık beyazlık ya da açıklık koyuluğu ifade eder, a* ile gösterilen eksen de ise -a* rengin yeşilliğini +a* ise yeşilin negatifi olan kırmızılığı ifade eder. Aynı şekilde b* eksenini de mavilik ve sarılığı ifade eder. Bu renk skalası, iki rengin aynı anda hem yeşil hem de kırmızı olamayacağını ve aynı anda mavi ve sarı olamayacağını söyleyen karşıt proses teorisine (opponent-process theory) dayanmaktadır. Ewald Hering tarafından geliştirilen bu teori insan gözündeki konik fotoreseptörlerin birbirine zıt üç renk çifti

oluşturacak şekilde birbirine bağlandığını belirtir. Bu zıt renk çiftleri renk uzayındaki L^* , a^* , ve b^* eksenlerine karşılık gelen mavi/sarı, kırmızı/yeşil, siyah/beyaz renkleridir. Bu renk çiftlerinin hiçbir üyesinin aynı anda görülemeyeceğini ileri sürer. Yani bir rengin aynı anda hem yeşil hem kırmızı hem sarı hem mavi veya hem siyah hem de beyaz olamayacağını ifade eder.

Spektrofotometreler dalgaboyuna karşı ışık miktarını ölçmektedir. X, Y, Z tristimulus değerleri spektral tepki açısından türetilir [36]. X değeri renk uzayında a^* eksenine, Y değeri L^* eksenine ve Z değeri de b^* eksenine karşılık gelmektedir. Tekstil sektöründe tekstil beyazlığına çoğunlukla Y tristimulus değerine bakılarak karar verilmesi yeterlidir [37, 38]. Bunun sebebi ise tekstil temizleme işleminde tekstildeki renk değişimi değil tekstil beyazlamasıyla ilgilenilmesi olarak gösterilebilir.

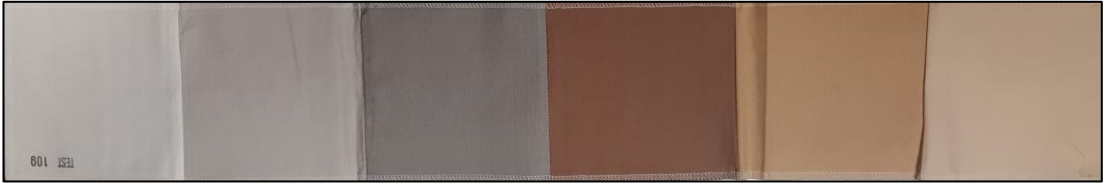
3. MATERYAL VE METOT

Tez kapsamında yapılan çalışmalar sırasıyla aşağıda verilmiştir.

- Lazer ile temizleme işleminin yapılacağı referans beyaz kumaş ve lekeli kumaşların fiziksel özelliklerini anlaşılması için UV-VIS-NIR spektrofotometre ile optik özelliği olan absorbans değerlerinin tespiti, termal iletkenlik ölçüm cihazı ile termal özellikleri olan termal iletim katsayısı ölçümü
- Lazer ile temizleme işlemi uygulanacak lekeli kumaşların datacolor spektrofotometre ile ışınlanmadan önceki Y değerleri ölçümü
- Lazer ile temizleme çalışmalarında kullanılacak parametreler üzerinden temizleme çalışmaları yapılması
- Lazer uygulaması yapıldıktan sonra datacolor spektrofotometre ile temizleme işlemi sonrasındaki Y değerlerinin ölçümü ve öncesi ile sonrası arasındaki değerlerin karşılaştırılarak leke giderim oranına bakılması
- Yapılan temizleme işleminin etkinliğini belirlemek için, performansı bilinen bir yöntem olan çamaşır makinesi standart programı olan deklerasyon programının yıkama etkinlikleri ile kıyaslanması
- Tekstilde oluşan hasarlanmalar tespit edilmesi
- Optik mikroskop altında tekstillerin iplik yapısında deformasyon olup oluşmadığına bakılması ve standart sebum lekesi üzerinde lazer uygulanan ve uygulanmayan bölgelerin tekstil mukavemetlerinin kıyaslanması için yırtılma testinin yapılması
- Işınlanmış ve ışınlanmamış kumaşlar arasındaki mukavemet değerlerinin karşılaştırılması sonucunda tekstil hasarlanması olup olmadığına karar verilmesi.

3.1. Leke Şeritlerinin Fiziksel Özelliklerinin Ölçümü

Lazer ile tekstil leke giderimi çalışmalarında, hedef malzeme olarak standart, altı parçalı leke şeridi (EMPA Swisstatest 109, İsviçre) kullanılmıştır. Bu leke şeritleri; standart beyaz pamuklu kumaş ve bu kumaşın lekelenmesi ile elde edilen dört farklı tipte beş adet lekeli kumaş içermektedir. İçerdiği lekeler Şekil 3.1’de verildiği gibi soldan sağa doğru sırasıyla; referans beyaz kumaş, yağ bazlı sebum, yağ bazlı partiküler karbon siyahı, ağartılabilir ve enzimatik kan, ağartılabilir ve enzimatik kakao, ağartılabilir şarap şeklindedir.



Şekil 3.1: Standart leke şeridi

Lazer ile temizleme işlemi yapılan leke şeritlerinin, mukavemet testleri için gerekli ebatlarda olmaması sebebiyle mukavemet testleri, yine standart beyaz pamuklu kumaş üzerine lekelenirilmiş standart sebum lekeli kumaşlar (EMPA Swisstatest 118, İsviçre) ile yapılmıştır. Deneylerde kullanılan leke şeritlerinin absorbans değerleri, termal iletkenlik katsayıları ve yoğunluk ölçümleri yapılmıştır.

3.1.1. Absorbans Ölçümü

Ölçümler UV, VIS, NIR bölgelerinde çalışan spektrofotometre (Shimadzu UV-3600 Plus, Japonya) cihazı ile 220 – 1200 nm aralığındaki dalga boylarında incelenmiştir. Bir Nd:YAG lazer ve dört harmoniği ile 266, 355, 532 ve 1064 nm dalga boylarında lazer atımları üretilebileceği için ölçümler alınırken 220-1200 nm dalgaboyu aralığı seçilmiştir. Lekesiz beyaz pamuklu kumaşın absorbans değeri ölçülerek referans olarak kabul edilmiştir. Diğer bölgelerin absorbans değerleri

bulunurken, ölçüm sonucunda elde edilen değer ile referans değeri arasındaki fark kullanılmıştır. Bu sayede pamuklu kumaşın absorbands değeri üzerindeki etkisinin ortadan kaldırılması hedeflenmiştir. Şekil 3.2’de kullanılan spektrofotometre verilmiştir.



Şekil 3.2: Shimadzu UV-3600 Plus Spektrofotometresi

3.1.2. Termal İletkenlik Katsayısı Ölçümü

Deneyde kullanılan standart leke şeritlerinin ve referans beyaz kumaşın termal iletkenlik katsayıları, termal iletkenlik ölçüm cihazı (Hot Disk TPS2500, İsveç) (Şekil 3.3) ile ölçülmüştür.



Şekil 3.3: Hot Disk TPS2500 Termal iletkenlik ölçüm cihazı

3.1.3. Yoğunluk Ölçümü

Deneyde kullanılan standart leke şeritlerinin ve pamuklu beyaz kumaşın yoğunlukları piknometre (Micromeritics AccuPyc 1330, A.B.D.) ile ölçülmüştür.



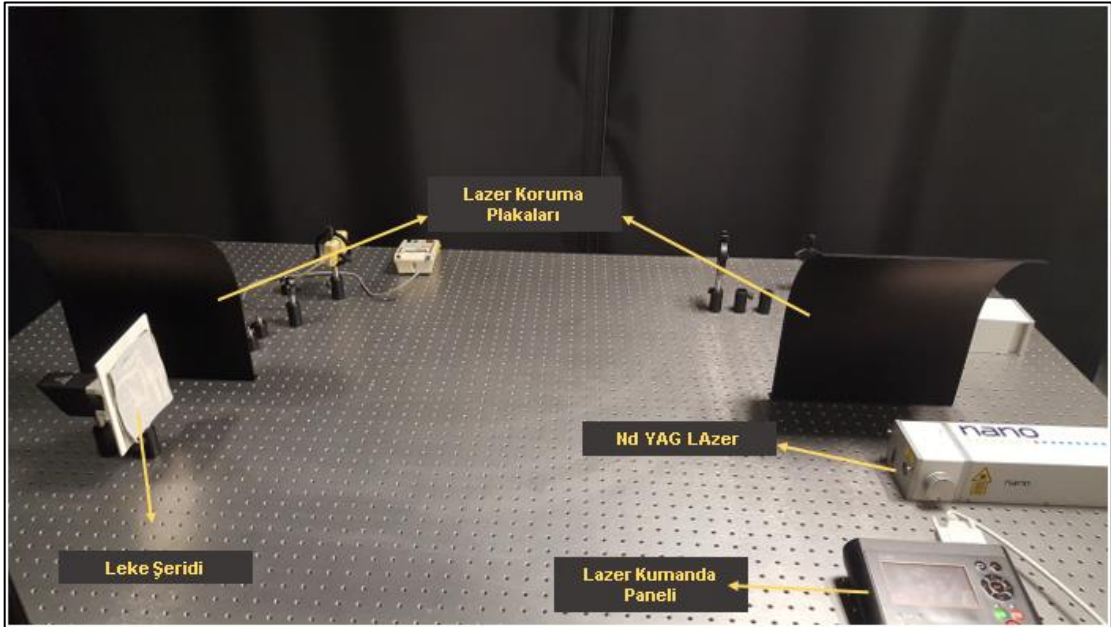
Şekil 3.4: Micromeritics AccuPyc Piknometre cihazı

3.2. Leke Giderim Çalışmaları

Standart leke şeritleri üzerinde atımlı lazerler ile temizleme çalışmaları, q-anahtarlamalı Nd:YAG Lazer (Litron Nano LG 150-30, İngiltere) ile yapılmıştır. Lazer özellikleri Tablo 3-1’de verilmektedir. Tablo 3-1: Litron Nano LG 150-30 Nd:YAG Lazerin Teknik Özellikleri

Tablo 3-1: Litron Nano LG 150-30 Nd:YAG Lazerin Teknik Özellikleri

Dalgaboyu	1064 nm, 532 nm
Atım Tekrarlama Frekansı	1-30 Hz
Atım Enerjisi	≥ 160 mJ
Lazer Demet Çapı	4 mm
Atım Genişliği	6 ns
Kutuplanma	1064 yatay, 532 dikey
Demet Iraksaması	0.5 mrad



Şekil 3.5: Atımlı lazer temizleme deney düzeneği

Nd:YAG lazer ile hedef leke şeritleri, optik masa üzerinde aralarında 1 m olacak şekilde aynı düzlem üzerine yerleştirilmiştir. Böylece 4 mm olan lazer demetinin çapı,

0.5 mrad demet ıraksamasıyla beraber 1 metre mesafede 5 mm olmuştur. Lazer koruma plakaları ile, olası ışın yansıma etkilerinden korunmak amaçlanmıştır ve ölçümler esnasında lazer özelliklerine uygun koruma gözlükleri kullanılmıştır. Deney düzeneği Şekil 3.5'te verilmektedir.

3.3. Leke Giderim Tespiti

Lazer uygulaması yapılan tekstiller üzerinde, leke giderimi tespiti Şekil 3.6'da verilen, spektrofotometre (Datacolour 600, ABD) cihazı ile yapılmıştır. Lekeli tekstillerin; ışınlanmadan önce ve ışınlanmadan sonraki bölgelerin durumlarına bakılarak temizleme performansına karar verilmiştir. Bu çalışmada kullanılan standart lekeler, standart beyaz kumaş üzerine oluşturulduğu için, rengin tristimulus değerlerinden yalnızca "Y" değerine, yani açıklık-koyuluk parametresine bakılarak karar verilmiştir.



Şekil 3.6: Datacolor 600 spektrofotometre

3.4. Tekstil Hasar Tespiti

Lazer temizleme işleminin, tekstil üzerinde meydana getirdiği hasarlar çeşitli yöntemler kullanılarak tespit edilmiştir.

3.4.1. İplik Yapısının İncelenmesi

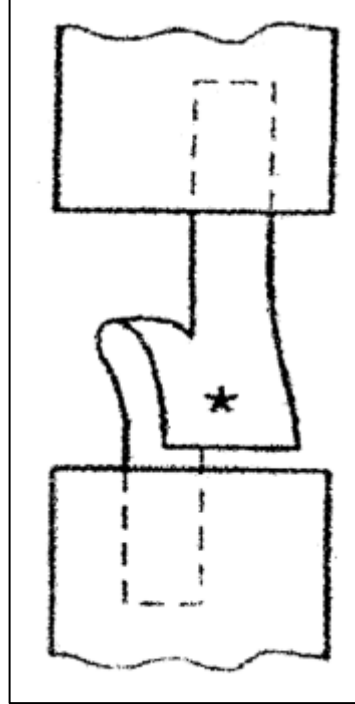
Tekstil hasarlanmasını tespit etmek için optik mikroskop ile tekstilin iplik yapısındaki bozulmalar incelenmiştir. Karbon siyahı ve sebum lekeleri üzerinde yapılan bu çalışmada lekeli kumaşların iplik yapıları çeşitli parametrelerde lazer ile ışınlanmadan önce ve ışınlandıktan sonra optik mikroskop (Olympus BX43, Japonya) ile 4x ve 10x yakınlaştırılarak incelenmiştir.



Şekil 3.7: Olympus BX43 Optik mikroskop

3.4.2. Tekstil Mukavemet Testi

Temizleme esnasında lazerden transfer edilen elektromanyetik enerjinin tekstil dokusunda fiziksel bir hasar oluşturup oluşturmadığı tekstil mukavemet testleri ile belirlenmiştir. Testler tek yırtma pantolon metodu [39] ile analiz edilmiştir. Şekil 3.8’da tek yırtma pantolon metodu verilmiştir. Bu metotta tekstil ortasından belirli bir mesafeye kadar kesik açılır ve kesilen uçlar mukavemet cihazının iki koluna tutturulur. Daha sonra cihaz çalıştırılarak tekstil yırtılır. Tekstilin yırtılması için gereken kuvvet değeri ölçülür.



Şekil 3.8: Tek yırtma pantolon metodu

Cihazın test standardına uygun ebatlarda sadece standart sebum lekeli kumaş olduğu için mukavemet testleri sadece bu leke için yapılmıştır. Testler, Şekil 3.9’da verilen mukavemet test cihazı (James Heal Titan2, İngiltere) ile yapılmıştır.



Şekil 3.9: James Heal Titan² Tekstik mukavemet cihazı

4. BULGULAR

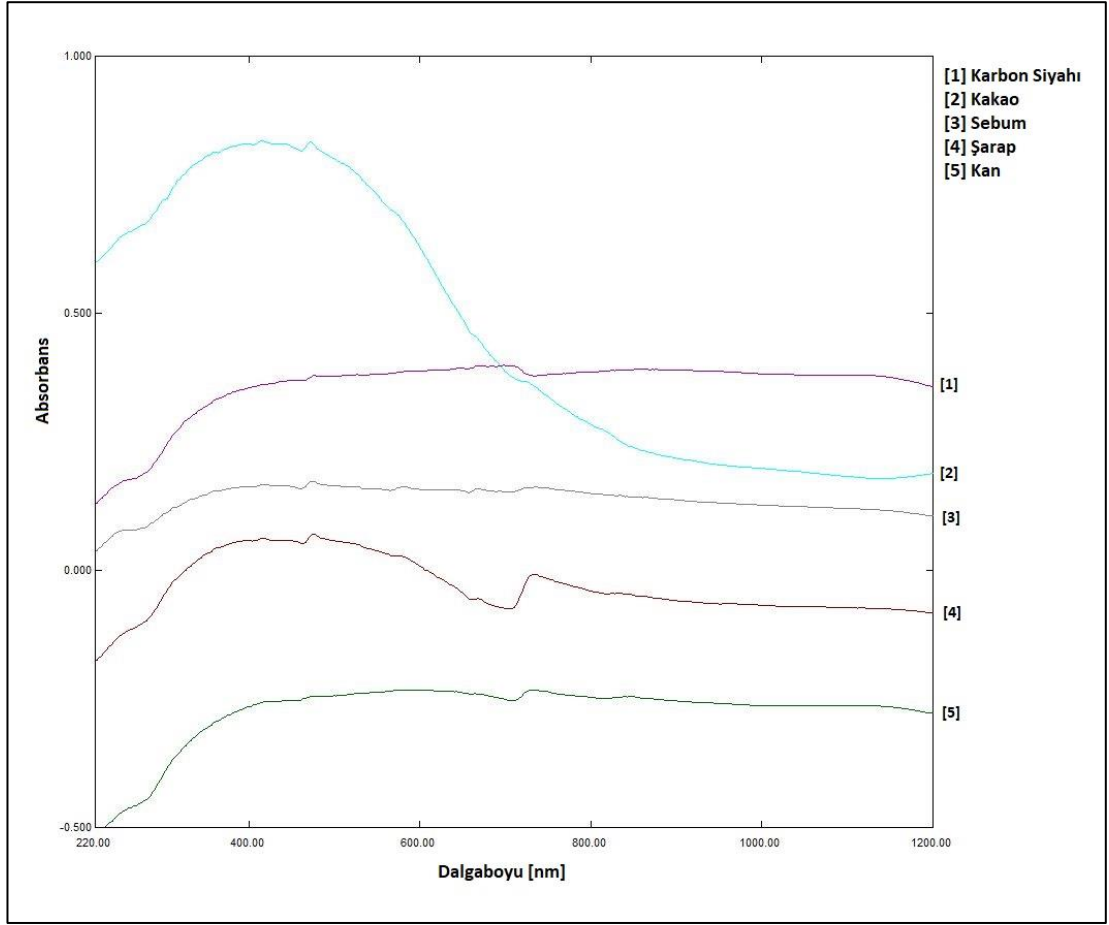
4.1. Leke Şeritlerinin Fiziksel Özelliklerinin Tespiti

Lazer atımları ile tekstil temizleme işleminde amaç, lekeyi tekstil üzerinden uzaklaştırırken tekstile verilen zararı minimumda tutmaktır. Bu sebeple ablasyon eşik enerji yoğunluğu değerini bilmek önem arz etmektedir. Kullanılan lekeli kumaşlar metal veya kristal yapıda olmadığı için net bir ablasyon eşik enerji yoğunluğu değeri hesaplanamamaktadır. Bu sebeple tekstile hasar vermeden temizleme işlemlerinin yapılabilmesi ve lekeli kumaşların lazer atımına karşı davranışlarının anlaşılabilmesi için lekeli kumaşların bazı fiziksel özellikleri ölçülmüştür.

4.2. Absorbans Değer Tespiti

Şerit üzerinde bulunan lekeli bölgelerin lazer ışınına vereceği tepkiyi anlamak için beyaz referans kumaş ve lekeli kumaşların absorbans değerleri ölçülmüştür. Absorbans değeri yüksek olan yüzeyler lazer ışınına daha iyi soğuracağı için absorbans değerlerinin ölçülmesi önem teşkil etmektedir.

Standart leke şeridi üzerinde bulunan bütün lekeli kumaşlar için absorbans değerleri 220–1200 nm aralığında ölçülmüştür. Nd:YAG lazerlerin, harmonik üreteçlerle beraber elde edilebilecek olan dalga boyları 1064, 532, 355, 266 nm olduğu için absorbans değerleri 1200-220 nm aralığında ölçülmüştür. Kullanılan lekeli kumaşlar, standart pamuklu beyaz kumaşın standart bir şekilde lekelenmesiyle oluşturulduğu için lekeli kumaşlardan alınan veriler üzerinde, standart pamuklu beyaz kumaşın absorbans etkisi de olacaktır. Bu durumda beyaz kumaşın absorbans değeri referans alınarak lekeli kumaşların absorbans değerleri ölçülmüştür. Bu şekilde pamuklu kumaşın absorbans etkisi bertaraf edilerek yalnızca lekelerin absorbansları ölçülmesi amaçlanmıştır.



Şekil 4.1: Lekeli kumaşların absorbans değerleri

Alınan ölçüm sonucunda sadece şarap ve kakao lekeleri için görünür bölgede pik gözlenmiştir. Diğer leke türleri için taranan bütün dalga boylarında herhangi bir pik gözlenmemiştir. Bu nedenle deneylerin 532 nm ve 1064 nm’de devam edilmesine karar verilmiştir. UV bölgesinde absorbans değerinde azalış olduğu için ve literatürde UV lazer ışınların bitkisel veya hayvansal kökenli lifli organik yapılara zarar verdiği bilindiği [10] için bu bölgede temizleme çalışmaları yapılmamıştır.

4.3. Termal İletkenlik Katsayısı Ölçümü

Termal iletkenlik katsayısı, termal giricilik ile doğru orantılı bir parametre olduğu için lazer temizleme işlemlerinde bu değerin bilinmesi, lazer atımlarının ne kadar derine nüfus edeceğini anlamak adına önemlidir. Alınan ölçüm sonucunda referans beyaz kumaş ve lekelerin termal iletkenlikleri (W/m.K) Tablo 4-1’de verilmiştir.

Tablo 4-1: Lekeli kumaşların termal iletkenlik değerleri

Kumaş	Termal İletkenlik (W/m.K)
Referans Beyaz	0.2673
Sebum Lekesi	0.2660
Karbon Siyahı Lekesi	0.2846
Kan Lekesi	0.2313
Kakao Lekesi	0.2613
Şarap Lekesi	0.2870

4.3.1. Yoğunluk Ölçümü

Yoğunlukta, ısı kapasitesi gibi termal giricilikle ters orantılı bir parametredir.

Tablo 4-2: Deneylerde kullanılan lekeli kumaşların yoğunluk ölçüm sonuçları

Kumaş	Yoğunluk (g/cm ³)
Referans Beyaz	1.56
Sebum Lekesi	1.55
Karbon Siyahı Lekesi	1.54
Kan Lekesi	1.49
Kakao Lekesi	1.54
Şarap Lekesi	1.55

4.4. Lazer Temizleme Çalışmaları

Ölçümler esnasında Nd:YAG lazerin özgün dalgaboyu olan 1064 nm ve ikinci harmonik üreteç kullanılarak elde edilen 532 nm dalgaboylarında ölçümler alınmıştır. Atım tekrarlama frekansı, lazer enerjisi, atım sayısı değiştirilerek bu parametrelerin temizleme performansına etkisi ve leke şeritlerinin fiziksel bir takım özelliklerinin temizleme üzerindeki etkisi incelenmiştir. Bu amaçla yapılan deney planında lazer dalgaboyu, atım tekrarlama frekansı, lazer atımlarının enerji yoğunluğu ve atım sayısı gibi parametreleri değiştirilerek çeşitli ölçümler, farklı leke tipleri için alınmıştır. Lekelerin farklı özelliklerde olması nedeniyle ve lazer atımlarına verdiği tepkilerin farklı olması sebebiyle sadece sebum ve karbon siyahı lekeleri için aynı parametreler kullanılmıştır. Bu iki leke tipinde etkin olan parametreler, şarap lekesinde etkin olmadığı için, şarap lekeli için temizleme çalışmaları farklı lazer parametreleri kullanılarak yapılmıştır.

4.4.1. Sebum Lekesi

Standart sebum lekesi üzerine 1064 ve 532 nm dalgaboylarında temizleme çalışmaları yapılmıştır.

4.4.1.1. 1064 nm Dalga Boyu

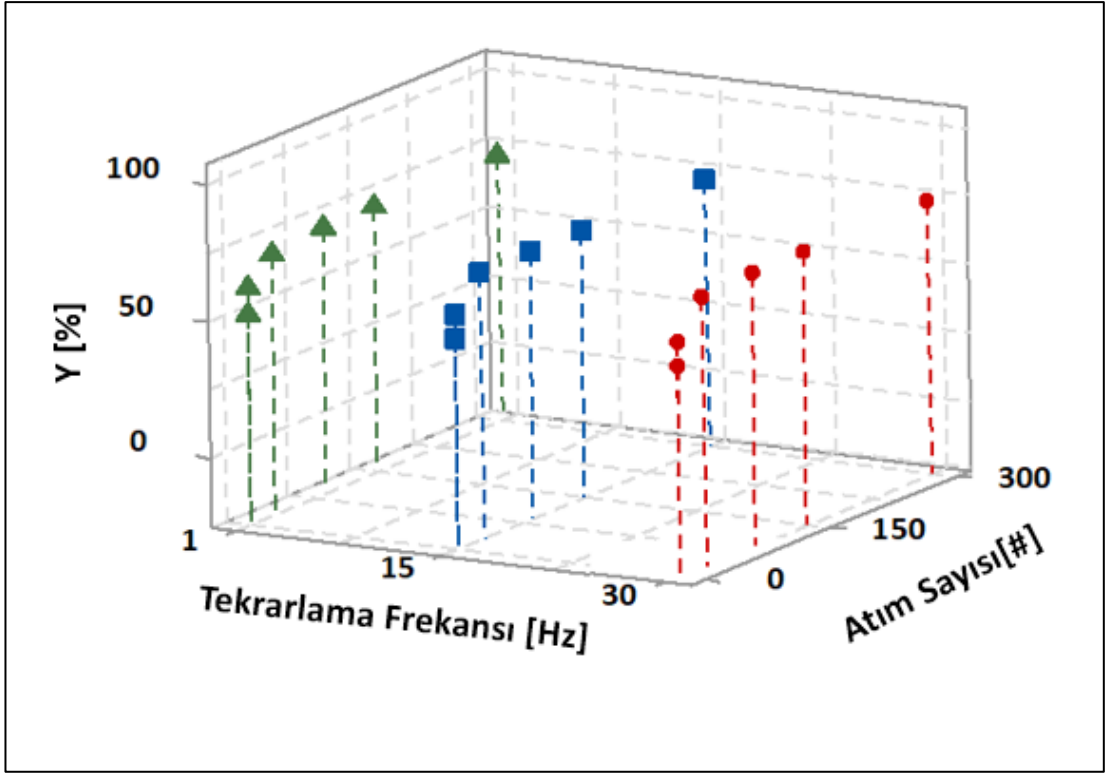
Standart sebum lekesi üzerine Tablo 4-3'te verilen parametrelerde lazer temizleme işlemleri uygulanmıştır.

Tablo 4-3: Sebum lekesi $\lambda=1064$ nm dalgaboyunda temizleme yapılan lazer parametreleri

Dalgaboyu λ (nm)	1064
Enerji yoğunluğu F (mJ.cm^{-2})	815, 385, 127
Atım Tekrarlama Frekansı (Hz)	1, 15, 30
Atım Sayısı (#)	0, 1, 30, 90, 150, 300

Tablo 4-4: Sebum lekesi; $\lambda=1064$ nm dalgaboyu, $F= 815 \text{ mJ.cm}^{-2}$ enerji yoğunluğu ve farklı atım sayısı ve tekrarlama frekanslarında yapılan temizleme çalışmalarının Y değerleri

$\lambda= 1064 \text{ nm}, F= 815 \text{ mJ.cm}^{-2}$			
	Atım Tekrarlama Frekansı (Hz)		
Atım Sayısı (#)	1	15	30
0	51,53	51,53	51,53
1	60,71	60,71	60,71
30	69,52	71,86	73,19
90	71,88	72,59	74,08
150	71,60	73,08	74,30
300	71,96	72,13	74,19

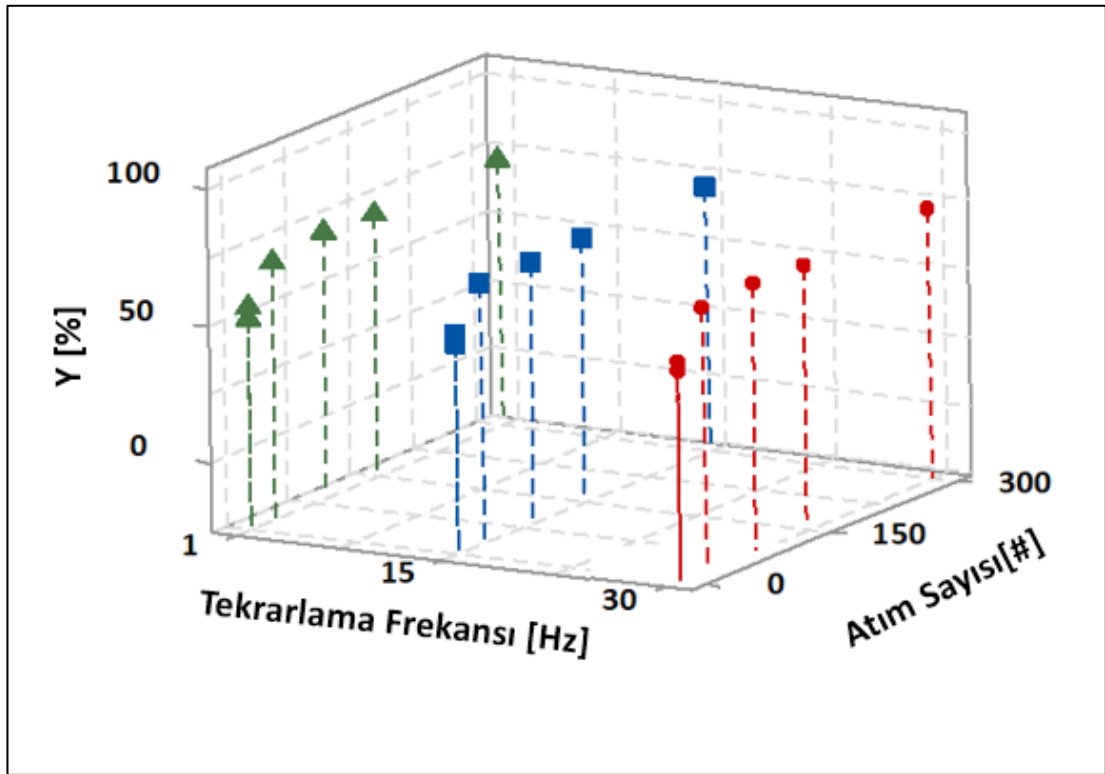


Şekil 4.2: Sebum lekesi; $\lambda=1064$ nm dalgaboyu, $F= 815$ mJ.cm⁻² enerji yoğunluğu ve farklı atım sayısı ve tekrarlama frekanslarında yapılan temizleme çalışmalarının Y değerleri

Deney sonuçlarında, yüksek atım sayısı ile yapılan temizleme işleminin tek atımla yapılana göre daha etkin olduğu görülmüştür. Atım sayısı arttıkça tekstilde daha fazla beyazlama olmaktadır. Fakat atım tekrarlama frekansı 1 Hz için N=90, 15 ve 30 Hz için N=30 atımdan sonraki atımlarda, atım sayısı ne kadar artarsa artsın beyazlamanın artmadığı görülmüştür. Tekstil temizleme işlemlerinde Y değerinde 2 birimden daha az farklılıklar çok anlamlı olmadığı için bu değerlerden sonra yapılan ekstra atımlar etkisizdir denilebilir. Atım tekrarlama frekansının etkinliği incelenecek olursa eğer; frekans arttıkça temizleme etkinliğinin arttığı görülmüştür.

Tablo 4-5: Sebum lekesi; $\lambda=1064$ nm dalgaboyu, $F= 385$ mJ.cm⁻² enerji yoğunluğu ve farklı atım sayısı ve tekrarlama frekanslarında yapılan temizleme çalışmalarının Y değerleri

$\lambda= 1064$ nm, $F= 385$ mJ.cm ⁻²			
	Atım Tekrarlama Frekansı (Hz)		
Atım Sayısı (#)	1	15	30
0	51,53	51,53	51,53
1	55,25	55,25	55,25
30	68,24	70,52	71,23
90	71,65	70,56	72,43
150	71,46	70,94	71,93
300	71,54	70,82	72,86

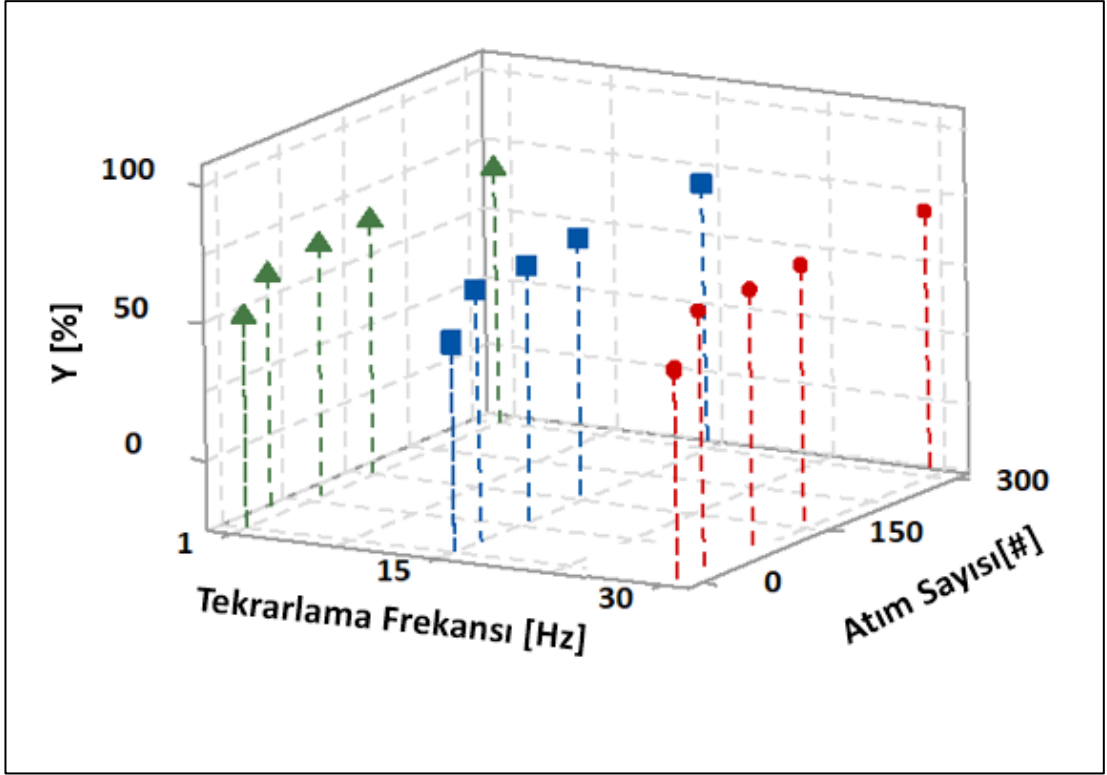


Şekil 4.3: Sebum lekesi; $\lambda=1064$ nm dalgaboyu, $F= 385$ mJ.cm⁻² enerji yoğunluğu ve farklı atım sayısı ve tekrarlama frekanslarında yapılan temizleme çalışmalarının Y değerleri

Deney sonuçlarında, yüksek atım sayısı ile yapılan temizleme işleminin tek atımla yapılana göre daha etkin olduğu görülmüştür. Atım sayısı arttıkça tekstilde daha fazla beyazlama olmaktadır. Fakat atım tekrarlama frekansı 1 Hz için N=90, 15 ve 30 Hz için N=30 atımdan sonraki atımlarda, atım sayısı ne kadar artarsa artsın beyazlamanın artmadığı görülmüştür. Tekstil temizleme işlemlerinde Y değerinde 2 birimden daha az farklılıklar çok anlamlı olmadığı için bu değerlerden sonra yapılan ekstra atımlar etkisizdir denilebilir. Atım tekrarlama frekansının etkinliği incelenecek olursa eğer; frekans arttıkça temizleme etkinliğinin arttığı görülmüştür.

Tablo 4-6: Sebum lekesi; $\lambda = 1064$ nm dalgaboyu, $F = 127$ mJ.cm⁻² enerji yoğunluğu ve farklı atım sayısı ve tekrarlama frekanslarında yapılan temizleme çalışmalarının Y değerleri

$\lambda = 1064$ nm, $F = 127$ mJ.cm ⁻²			
	Atım Tekrarlama Frekansı (Hz)		
Atım Sayısı (#)	1	15	30
0	51,53	51,53	51,53
1	51,68	51,68	51,68
30	63,05	66,7	68,88
90	66,99	68,36	69,53
150	67,46	69,88	70,13
300	67,46	70,87	71,44



Şekil 4.4: Sebum lekesi; $\lambda=1064$ nm dalgaboyu, $F= 127 \text{ mJ.cm}^{-2}$ enerji yoğunluğu ve farklı atım sayısı ve tekrarlama frekanslarında yapılan temizleme çalışmalarının Y değerleri

Deney sonuçlarında, yüksek atım sayısı ile yapılan temizleme işleminin tek atımla yapılanlara göre daha etkin olduğu görülmüştür. Atım sayısı arttıkça tekstilde daha fazla beyazlama olmaktadır. Fakat atım tekrarlama frekansı 1 ve 15 Hz için $N=90$, 30 Hz için $N=30$ atımdan sonraki atımlarda, atım sayısı ne kadar artarsa artsın beyazlamanın artmadığı görülmüştür. Tekstil temizleme işlemlerinde Y değerinde 2 birimden daha az farklılıklar çok anlamlı olmadığı için bu değerlerden sonra yapılan ekstra atımlar etkisizdir denilebilir. Atım tekrarlama frekansının etkinliği incelenecek olursa eğer; frekans arttıkça temizleme etkinliğinin arttığı görülmüştür.

4.4.1.2. 532 nm Dalga Boyu

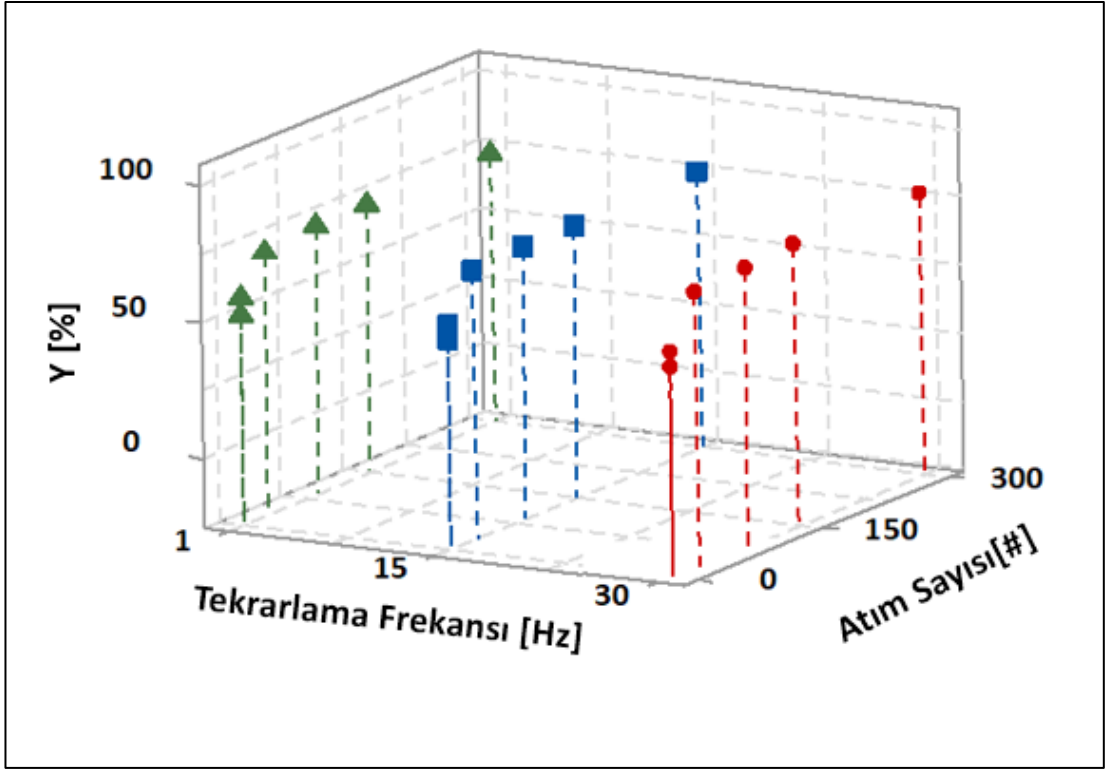
Standart sebum lekesi üzerine Tablo 4-7’de verilen parametrelerde lazer temizleme işlemleri uygulanmıştır.

Tablo 4-7: Sebum lekesi $\lambda=532$ nm dalgaboyunda temizleme yapılan lazer parametreleri

Dalgaboyu λ (nm)	532
Akı F (mJ.cm^{-2})	385, 255, 127
Atım Tekrarlama Frekansı (Hz)	1, 15, 30
Atım Sayısı (#)	0, 1, 30, 90, 150, 300

Tablo 4-8: Sebum lekesi; $\lambda=532$ nm dalgaboyu, $F= 385 \text{ mJ.cm}^{-2}$ enerji yoğunluğu ve farklı atım sayısı ve tekrarlama frekanslarında yapılan temizleme çalışmalarının Y değerleri

$\lambda= 532 \text{ nm}, F= 385 \text{ mJ.cm}^{-2}$			
	Atım Tekrarlama Frekansı (Hz)		
Atım Sayısı (#)	1	15	30
0	51,53	51,53	51,53
1	57,43	57,43	57,43
30	71,09	73,33	75,26
90	72,81	74,18	76,84
150	72,79	74,51	78,39
300	72,91	75,67	78,18

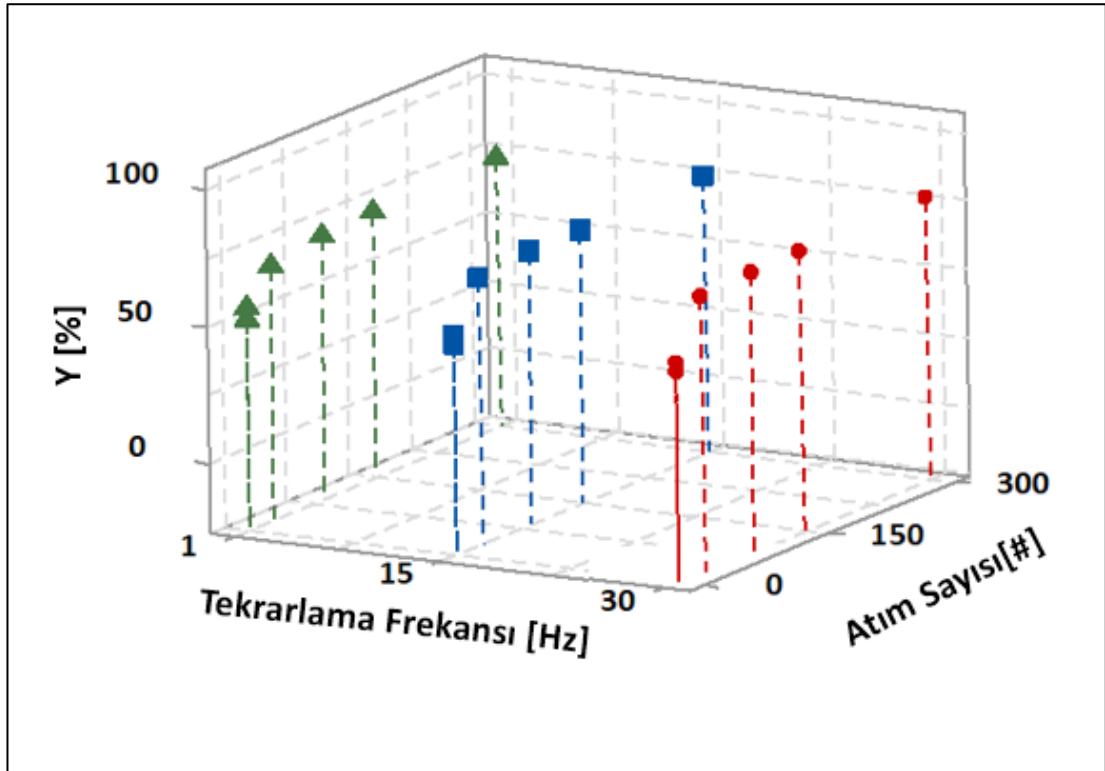


Şekil 4.5: Sebum lekesi; $\lambda=532$ nm dalgaboyu, $F= 385$ mJ.cm⁻² enerji yoğunluğu ve farklı atım sayısı ve tekrarlama frekanslarında yapılan temizleme çalışmalarının Y değerleri

Deney sonuçlarında yüksek atım sayısı ile yapılan temizleme işleminin tek atımla yapılanlara göre daha etkin olduğu görülmüştür. Atım sayısı arttıkça tekstilde daha fazla beyazlama olmuştur. Fakat bütün atım tekrarlama frekansı değerleri için N=90 atımdan sonraki atımlarda atım sayısı ne kadar artarsa artsın beyazlamanın artmadığı görülmüştür. Tekstil temizleme işlemlerinde Y değerinde 2 birimden daha az farklılıklar çok anlamlı olmadığı için bu değerlerden sonra yapılan ekstra atımlar etkisizdir denilebilir. Atım tekrarlama frekansının etkinliği incelenecek olursa eğer; frekans arttıkça temizleme etkinliğinin arttığı görülmüştür.

Tablo 4-9: Sebum lekesi, $\lambda=532$ nm dalgaboyu, $F= 255$ mJ.cm⁻² enerji yoğunluğu ve farklı atım sayısı ve tekrarlama frekanslarında yapılan temizleme çalışmalarının Y değerleri

$\lambda= 532$ nm, $F= 255$ mJ.cm ⁻²			
	Atım Tekrarlama Frekansı (Hz)		
Atım Sayısı (#)	1	15	30
0	51,53	51,53	51,53
1	55,56	55,56	55,56
30	67,65	72,53	75,53
90	71,06	74,19	76,38
150	72,31	75,08	77,23
300	72,86	75,39	77,59



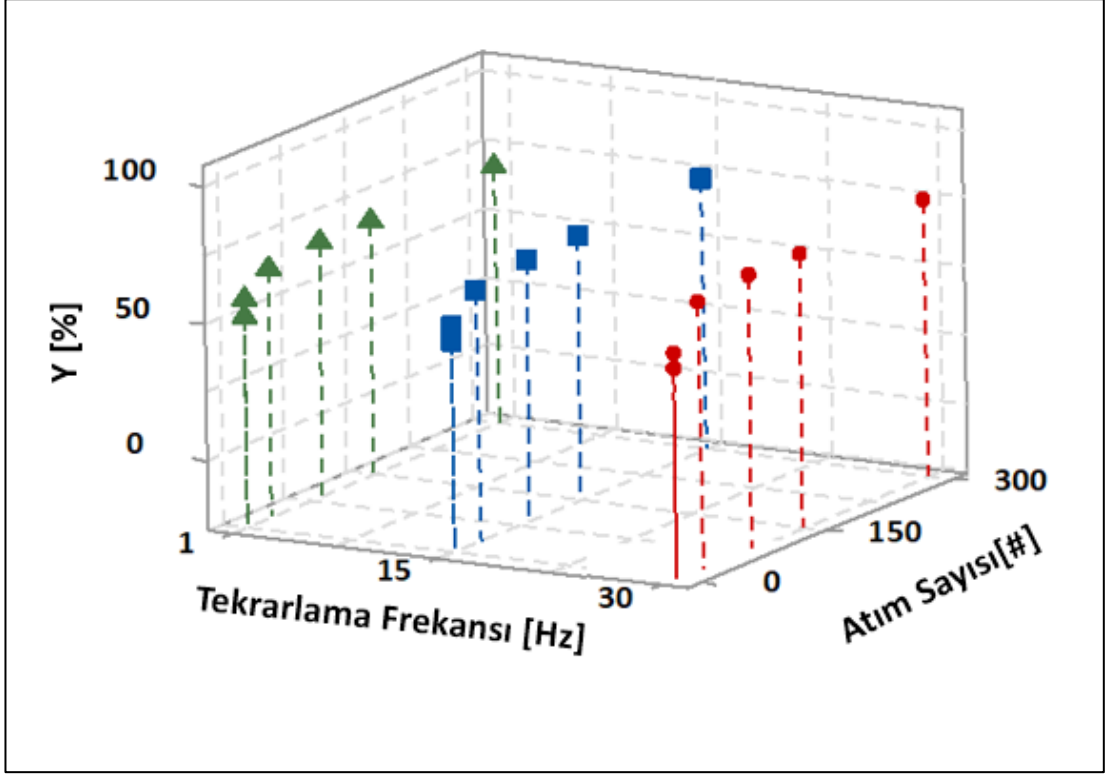
Şekil 4.6: Sebum lekesi, $\lambda=532$ nm dalgaboyu, $F= 255$ mJ.cm⁻² enerji yoğunluğu ve farklı atım sayısı ve tekrarlama frekanslarında yapılan temizleme çalışmalarının Y değerleri

Deney sonuçlarında yüksek atım sayısı ile yapılan temizleme işleminin tek atımla yapılanlara göre daha etkin olduğu görülmüştür. Atım sayısı arttıkça tekstilde

daha fazla beyazlama olmaktadır. Fakat bütün tekrarlar frekansı değerlerinde N=90 atımdan sonraki atımlarda atım sayısı ne kadar artarsa artsın beyazlamanın artmadığı görülmüştür. Tekstil temizleme işlemlerinde Y değerinde 2 birimden daha az farklılıklar çok anlamlı olmadığı için bu değerlerden sonra yapılan ekstra atımlar etkisizdir denilebilir. Atım tekrarlama frekansının etkinliği incelenecek olursa eğer; frekans arttıkça temizleme etkinliğinin arttığı görülmüştür.

Tablo 4-10: Sebum lekesi, $\lambda=532$ nm dalgaboyu, $F= 127$ mJ.cm⁻² enerji yoğunluğu ve farklı atım sayısı ve tekrarlama frekanslarında yapılan temizleme çalışmalarının Y değerleri

$\lambda= 532$ nm, $F= 127$ mJ.cm ⁻²			
	Atım Tekrarlama Frekansı (Hz)		
Atım Sayısı (#)	1	15	30
0	51,53	51,53	51,53
1	57,67	57,67	57,67
30	65,21	66,42	72,82
90	68,07	70,12	74,53
150	68,07	71,85	75,06
300	68,07	73,38	75,82



Şekil 4.7: Sebum lekesi, $\lambda=532$ nm dalgaboyu, $F= 127 \text{ mJ.cm}^{-2}$ enerji yoğunluğu ve farklı atım sayısı ve tekrarlama frekanslarında yapılan temizleme çalışmalarının Y değerleri

Deney sonuçlarında yüksek atım sayısı ile yapılan temizleme işleminin tek atımla yapılanlara göre daha etkin olduğu görülmüştür. Atım sayısı arttıkça tekstilde daha fazla beyazlama olmaktadır. Fakat bütün tekrarlama frekansı değerlerinde $N=90$ atımdan sonraki atımlarda atım sayısı ne kadar artarsa artsın beyazlamanın artmadığı görülmüştür. Tekstil temizleme işlemlerinde Y değerinde 2 birimden daha az farklılıklar çok anlamlı olmadığı için bu değerlerden sonra yapılan ekstra atımlar etkisizdir denilebilir. Atım tekrarlama frekansının etkinliği incelenecek olursa eğer; frekans arttıkça temizleme etkinliğinin arttığı görülmüştür.

Sebum lekesi için dalgaboyu etkisi incelenirse eğer $\lambda= 532$ nm dalgaboyu ile yapılan temizleme çalışmalarının $\lambda= 1064$ nm dalgaboyunda yapılan temizleme çalışmalarından daha etkin olduğu görülmektedir.

4.4.2. Karbon Siyahı

Standart Karbon siyahı lekesi üzerine Tablo 4-11’de verilen parametrelerde lazer temizleme işlemleri uygulanmıştır.

Tablo 4-11: Karbon siyahı lekesi $\lambda=1064$ nm dalgaboyunda temizleme yapılan lazer parametreleri

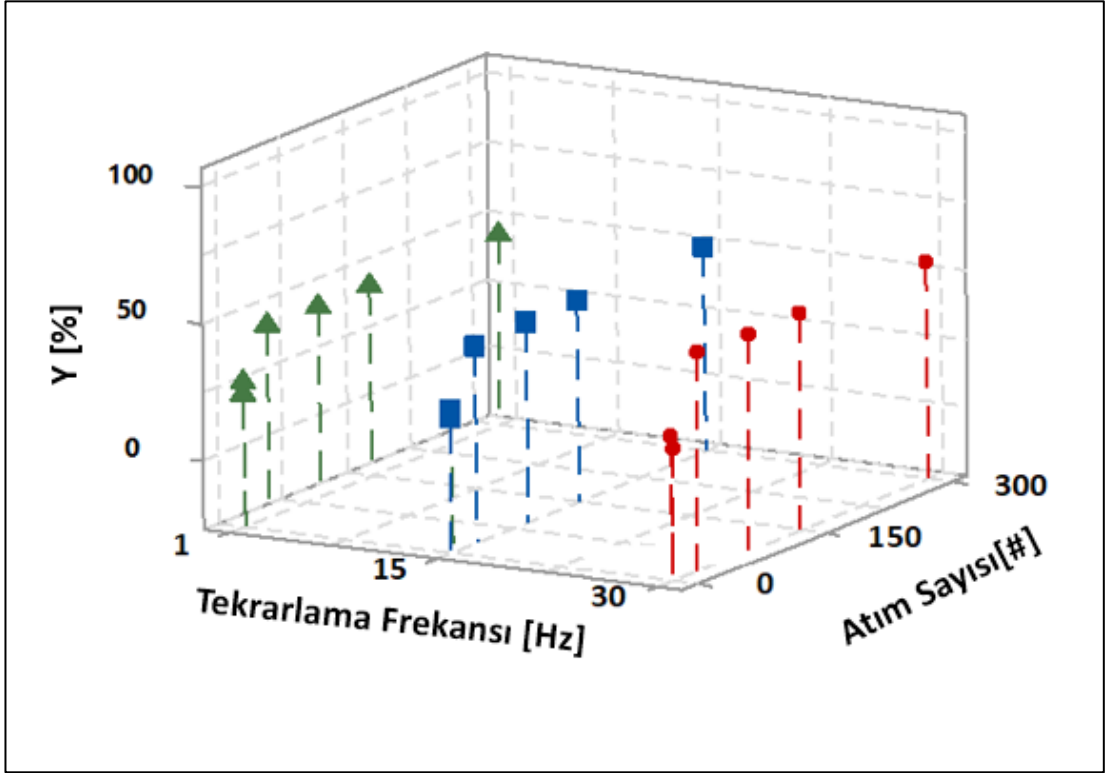
Dalgaboyu λ (nm)	1064
Enerji Yoğunluğu F (mJ/cm ²)	815, 385, 127
Atım Tekrarlama Frekansı (Hz)	1, 15, 30
Atım Sayısı (#)	0, 1, 30, 90, 150, 300

Tablo 4-11’te verilen değerler spektrofotometreden alınan Y (açıklık-koyuluk) değerleridir.

4.4.2.1. 1064 nm Dalga Boyu

Tablo 4-12: Karbon siyahı lekesi $\lambda=1064$ nm dalgaboyu, $F=815$ mJ.cm⁻² enerji yoğunluğu ve farklı atım sayısı ve tekrarlama frekanslarında yapılan temizleme çalışmalarının Y değerleri

$\lambda= 1064$ nm, $F= 815$ mJ.cm ⁻²			
	Atım Tekrarlama Frekansı (Hz)		
Atım Sayısı (#)	1	15	30
0	27,55	27,55	27,55
1	23,59	23,59	23,59
30	44,65	46,73	54,36
90	43,96	47,84	54,41
150	44,23	48,12	54,26
300	44,47	49,73	53,87



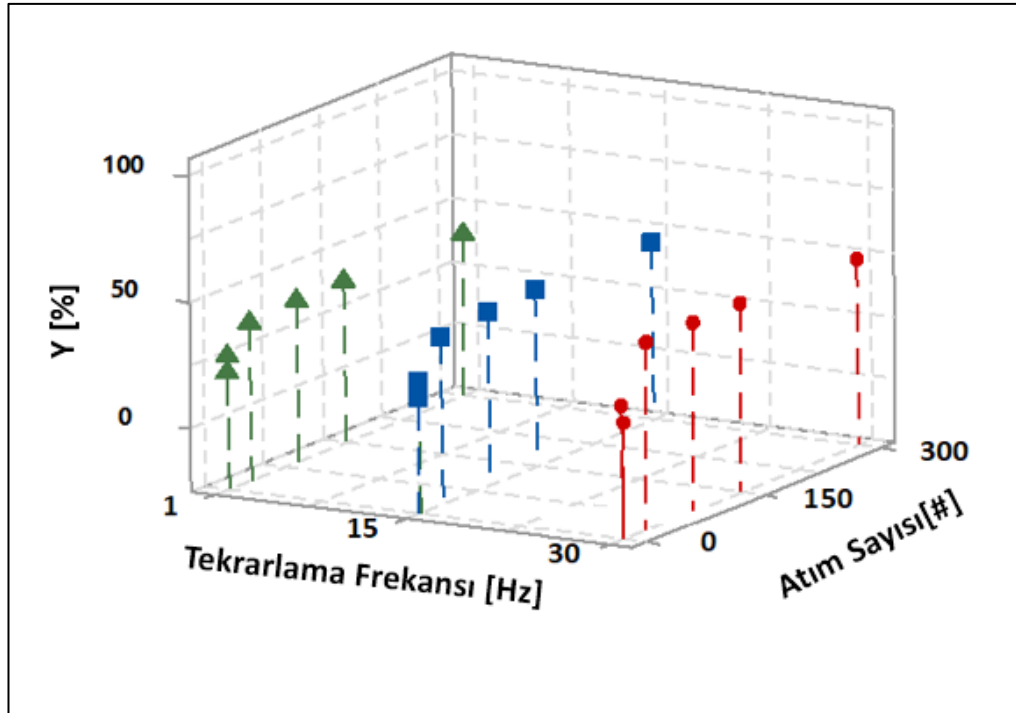
Şekil 4.8: Karbon siyahı $\lambda=1064$ nm dalgaboyu, $F= 815$ mJ.cm⁻² enerji yoğunluğu ve farklı atım sayısı ve tekrarlama frekanslarında yapılan temizleme çalışmalarının Y değerleri

Deney sonuçlarında yüksek atım sayısı ile yapılan temizleme işleminin tek atımla yapılanlara göre daha etkin olduğu görülmüştür. Atım sayısı arttıkça tekstilde daha fazla beyazlama olmaktadır. Fakat atım tekrarlama frekansı 15 Hz için N=90, 1 ve 30 Hz için N=30 atımdan sonraki atımlarda atım sayısı ne kadar artarsa artsın beyazlamanın artmadığı görülmüştür. Tekstil temizleme işlemlerinde Y değerinde 2 birimden daha az farklılıklar çok anlamlı olmadığı için bu değerlerden sonra yapılan ekstra atımlar etkisizdir denilebilir. Atım tekrarlama frekansının etkinliği incelenecek olursa eğer; frekans arttıkça temizleme etkinliğinin arttığı görülmüştür.

Tablo 4-13'te verilen değerler spektrofotometreden alınan Y (açıklık-koyuluk) değerleridir.

Tablo 4-13: Karbon siyahı lekesi $\lambda=1064$ nm dalgaboyu, $F=385$ mJ.cm⁻² enerji yoğunluğu ve farklı atım sayısı ve tekrarlama frekanslarında yapılan temizleme çalışmalarının Y değerleri

$\lambda= 1064$ nm, $F= 385$ mJ.cm ⁻²			
	Atım Tekrarlama Frekansı (Hz)		
Atım Sayısı (#)	1	15	30
0	27,55	27,55	27,55
1	20,66	20,66	20,66
30	36,85	41,26	49,43
90	38,23	43,68	49,58
150	38,64	45,07	49,39
300	38,51	45,41	48,40



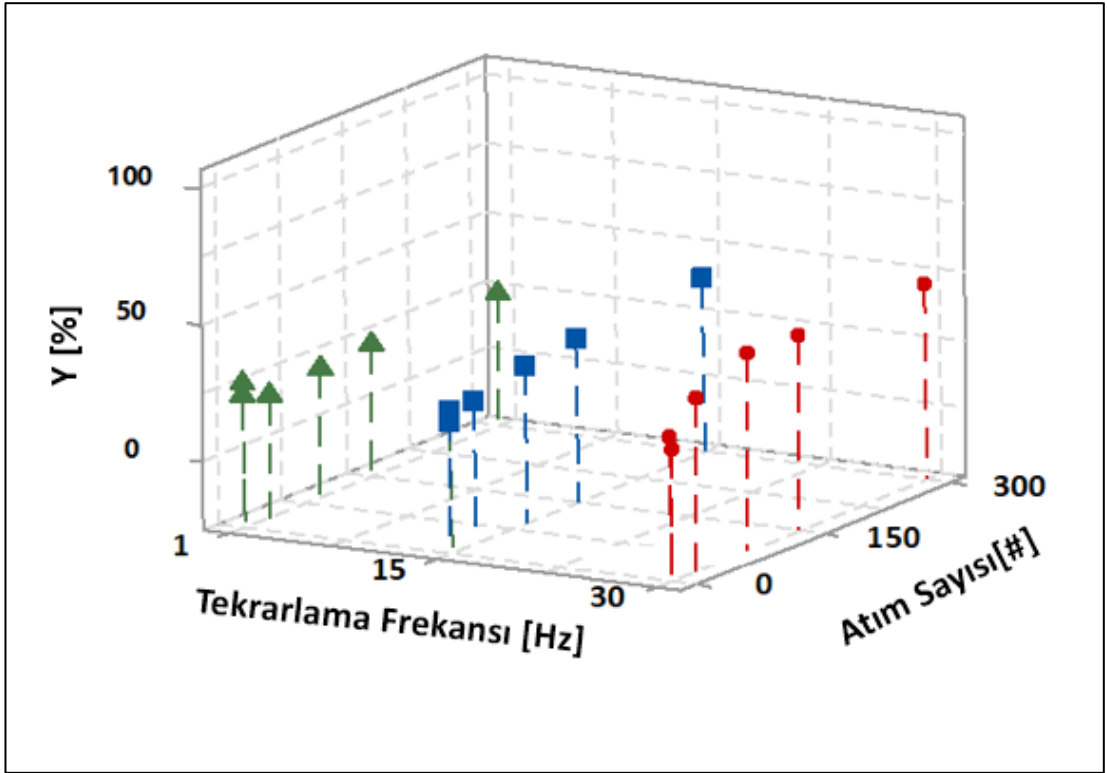
Şekil 4.9: Karbon siyahı lekesi $\lambda=1064$ nm dalgaboyu, $F=385$ mJ.cm⁻² enerji yoğunluğu ve farklı atım sayısı ve tekrarlama frekanslarında yapılan temizleme çalışmalarının Y değerleri

Deney sonuçlarında yüksek atım sayısı ile yapılan temizleme işleminin tek atımla yapılanlara göre daha etkin olduğu görülmüştür. Atım sayısı arttıkça tekstilde daha fazla beyazlama olmaktadır. Fakat atım tekrarlama frekansı 30 Hz için N=30, 1 ve 15 Hz için N=90 atımdan sonraki atımlarda atım sayısı ne kadar artarsa artsın beyazlamanın artmadığı görülmüştür. Tekstil temizleme işlemlerinde Y değerinde 2 birimden daha az farklılıklar çok anlamlı olmadığı için bu değerlerden sonra yapılan ekstra atımlar etkisizdir denilebilir. Atım tekrarlama frekansının etkinliği incelenecek olursa eğer; frekans arttıkça temizleme etkinliğinin arttığı görülmüştür.

Tablo 4-14'te verilen değerler spektrofotometreden alınan Y (açıklık-koyuluk) değerleridir.

Tablo 4-14: Karbon siyahı, lekesi $\lambda=1064$ nm dalgaboyu, $F=127$ mJ.cm⁻² enerji yoğunluğu ve farklı atım sayısı ve tekrarlama frekanslarında yapılan temizleme çalışmalarının Y değerleri

$\lambda= 1064$ nm, $F= 127$ mJ.cm ⁻²			
	Atım Tekrarlama Frekansı (Hz)		
Atım Sayısı (#)	1	15	30
0	27,55	27,55	27,55
1	23,41	23,40	23,40
30	20,23	26,42	37,80
90	21,85	33,23	46,82
150	23,44	35,61	46,61
300	23,44	38,83	46,15



Şekil 4.10: Karbon siyahı lekesi $\lambda=1064$ nm dalgaboyu, $F=127$ mJ.cm⁻² enerji yoğunluğu ve farklı atım sayısı ve tekrarlama frekanslarında yapılan temizleme çalışmalarının Y değerleri

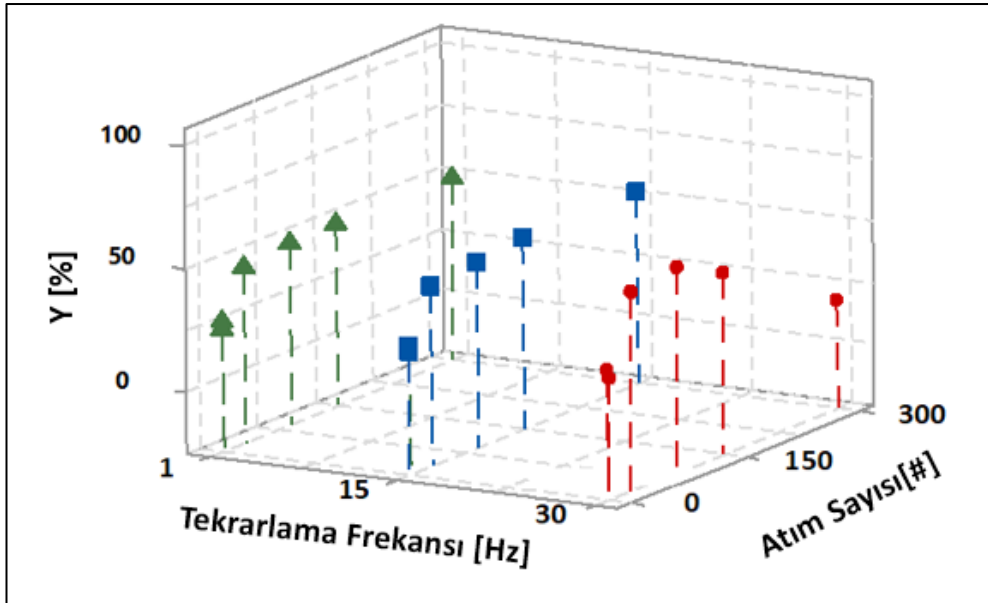
Deney sonuçlarında yüksek atım sayısı ile yapılan temizleme işleminin tek atımla yapılanlara göre daha etkin olduğu görülmüştür. Atım sayısı arttıkça tekstilde daha fazla beyazlama olmaktadır. Fakat atım tekrarlama frekansı 15 Hz için N=150, 1 ve 30 Hz için N=90 atımdan sonraki atımlarda atım sayısı ne kadar artarsa artsın beyazlamanın artmadığı görülmüştür. Tekstil temizleme işlemlerinde Y değerinde 2 birimden daha az farklılıklar çok anlamlı olmadığı için bu değerlerden sonra yapılan ekstra atımlar etkisizdir denilebilir. Atım tekrarlama frekansının etkinliği incelenecek olursa eğer; frekans arttıkça temizleme etkinliğinin arttığı görülmüştür.

4.4.2.2. 532 nm Dalga Boyu

Tablo 4-15'te verilen değerler spektrofotometreden alınan Y (açıklık-koyuluk) değerleridir.

Tablo 4-15: Karbon siyahı lekesi, $\lambda=532$ nm dalgaboyu, $F=385$ mJ.cm⁻² enerji yoğunluğu ve farklı atım sayısı ve tekrarlama frekanslarında yapılan temizleme çalışmalarının Y değerleri

$\lambda= 532$ nm, $F= 385$ mJ.cm ⁻²			
Atım Sayısı (#)	Atım Tekrarlama Frekansı (Hz)		
	1	15	30
0	27,55	27,55	27,55
1	24,72	24,72	24,72
30	45,86	47,68	55,31
90	48,20	50,19	57,77
150	49,12	52,39	48,54
300	48,67	52,71	19,24



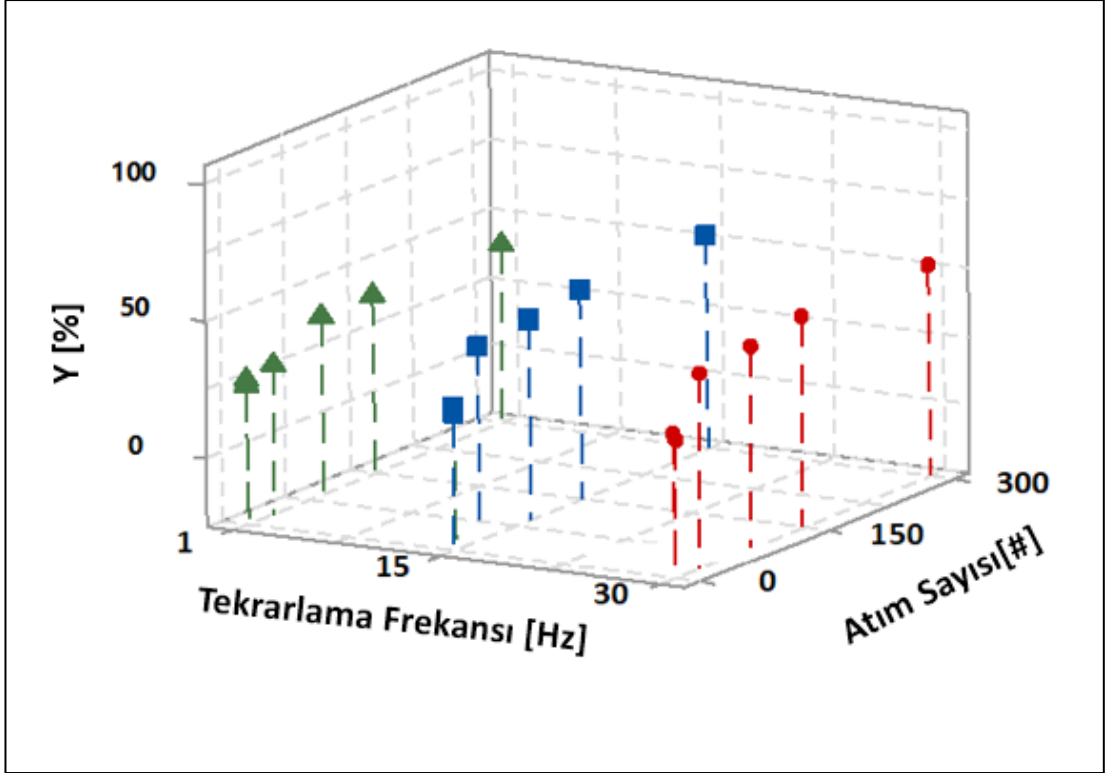
Şekil 4.11: Karbon siyahı lekesi, $\lambda=532$ nm dalgaboyu, $F=385$ mJ.cm⁻² enerji yoğunluğu ve farklı atım sayısı ve tekrarlama frekanslarında yapılan temizleme çalışmalarının Y değerleri

Deney sonuçlarında yüksek atım sayısı ile yapılan temizleme işleminin tek atımla yapılanlara göre daha etkin olduğu görülmüştür. Atım sayısı arttıkça tekstilde daha fazla beyazlama olmaktadır. Fakat atım tekrarlama frekansı 1 Hz için N=90, 15 Hz için N=150 atımdan sonraki atımlarda atım sayısı ne kadar artarsa artsın beyazlamanın artmadığı görülmüştür. Tekstil temizleme işlemlerinde Y değerinde 2 birimden daha az farklılıklar çok anlamlı olmadığı için bu değerlerden sonra yapılan ekstra atımlar etkisizdir denilebilir. Frekans değeri 30 Hz için N=90 atımdan sonra testilde yanmaların başladığı görülmüştür. Atım tekrarlama frekansının etkinliği incelendiğinde; frekans arttıkça temizleme etkinliğinin arttığı görülmüş, ancak tekstilde yanma da meydana getirdiği tespit edilmiştir.

Tablo 4-16’te verilen değerler spektrofotometreden alınan Y (açıklık-koyuluk) değerleridir.

Tablo 4-16: Karbon siyahı lekesi $\lambda=532$ nm dalgaboyu, $F=255$ mJ.cm⁻² enerji yoğunluğu ve farklı atım sayısı ve tekrarlama frekanslarında yapılan temizleme çalışmalarının Y değerleri

$\lambda= 532$ nm, $F= 255$ mJ.cm ⁻²			
	Atım Tekrarlama Frekansı (Hz)		
Atım Sayısı (#)	1	15	30
0	27,55	27,55	27,55
1	25,39	25,39	25,39
30	29,09	46,03	46,41
90	39,55	47,59	48,91
150	39,90	51,59	51,65
300	39,58	52,86	52,45



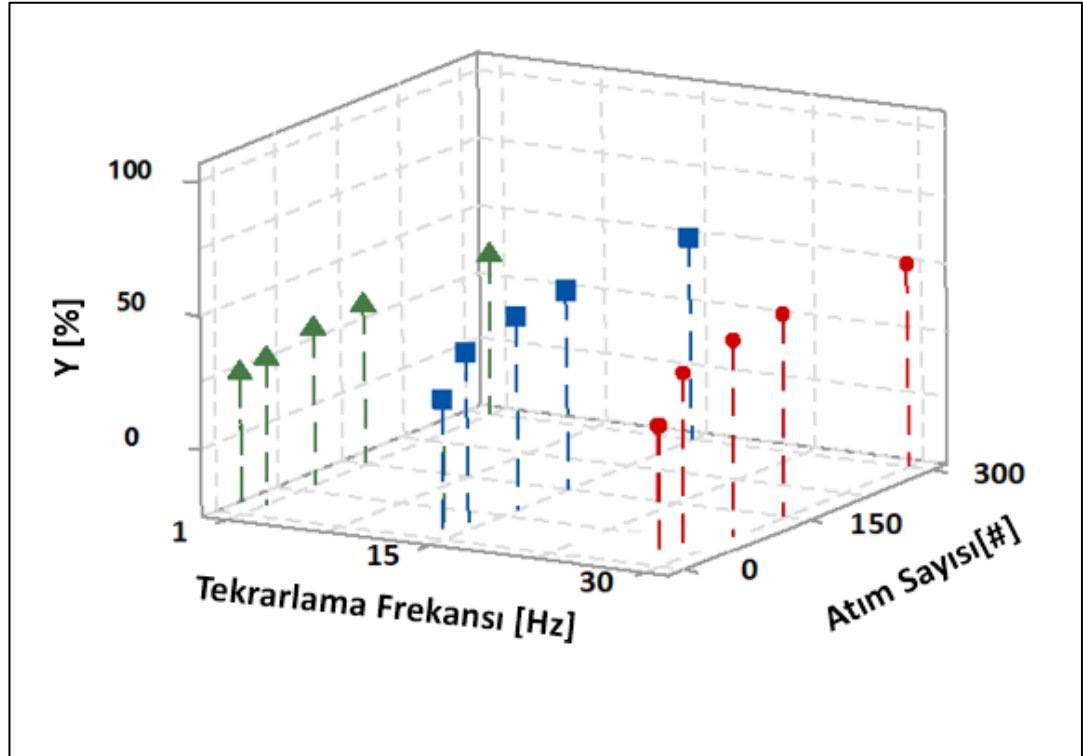
Şekil 4.12: Karbon siyahı lekesi $\lambda=532$ nm dalgaboyu, $F=255$ mJ.cm⁻² enerji yoğunluğu ve farklı atım sayısı ve tekrarlama frekanslarında yapılan temizleme çalışmalarının Y değerleri

Deney sonuçlarında yüksek atım sayısı ile yapılan temizleme işleminin tek atımla yapılana göre daha etkin olduğu görülmüştür. Atım sayısı arttıkça tekstilde daha fazla beyazlama olmaktadır. Fakat atım tekrarlama frekansı 1 Hz için N=90, 15 ve 30 Hz için N=150 atımdan sonraki atımlarda atım sayısı ne kadar artarsa artsın beyazlamanın artmadığı görülmüştür. Tekstil temizleme işlemlerinde Y değerinde 2 birimden daha az farklılıklar çok anlamlı olmadığı için bu değerlerden sonra yapılan ekstra atımlar etkisizdir denilebilir. Atım tekrarlama frekansının etkinliği incelendiğinde; $f=1$ Hz'e göre $f=15$ ve 30 Hz için etkinin daha yüksek olduğu görülmüştür.

Tablo 4-17’te verilen değerler spektrofotometreden alınan Y (açıklık-koyuluk) değerleridir.

Tablo 4-17: Karbon siyahı $\lambda=532$ nm dalgaboyu, $F=127$ mJ.cm⁻² enerji yoğunluğu ve farklı atım sayısı ve tekrarlama frekanslarında yapılan temizleme çalışmalarının Y değerleri

$\lambda= 532$ nm, $F= 127$ mJ.cm ⁻²			
	Atım Tekrarlama Frekansı (Hz)		
Atım Sayısı (#)	1	15	30
0	27,55	27,55	27,55
1	27,21	27,21	27,21
30	29,28	40,96	43,20
90	33,08	46,51	47,91
150	34,16	49,50	50,83
300	34,64	50,12	51,16



Şekil 4.13: Karbon siyahı lekesi $\lambda=532$ nm dalgaboyu, $F=127$ mJ.cm⁻² enerji yoğunluğu ve farklı atım sayısı ve tekrarlama frekanslarında yapılan temizleme çalışmalarının Y değerleri

Deney sonuçlarında yüksek atım sayısı ile yapılan temizleme işleminin tek atımla yapılanlara göre daha etkin olduğu görülmüştür. Atım sayısı arttıkça tekstilde daha fazla beyazlama olmaktadır. Fakat atım tekrarlama frekansı 1 Hz için N=90, 1 ve 30 Hz için N=150 atımdan sonraki atımlarda atım sayısı ne kadar artarsa artsın beyazlamanın artmadığı görülmüştür. Tekstil temizleme işlemlerinde Y değerinde 2 birimden daha az farklılıklar çok anlamlı olmadığı için bu değerlerden sonra yapılan ekstra atımlar etkisizdir denilebilir. Atım tekrarlama frekansının etkinliği incelendiğinde; frekans arttıkça temizleme etkinliğinin arttığı görülmüştür.

Karbon siyahı için dalgaboyu etkisine bakacak olursak $\lambda=532$ nm dalgaboyunda yapılan çalışmalar 1064 nm’de yapılan çalışmalara göre daha etkin sonuç vermiştir.

4.4.3. Şarap

Standart şarap lekesi üzerine Tablo 4-18’de verilen parametrelerde lazer temizleme işlemleri uygulanmıştır. Şarap lekesi 1064 nm dalgaboylu lazer ışınına tepki vermediği için ölçümler sadece 532nm dalgaboyunda yapılmıştır.

4.4.3.1. 532 nm Dalga Boyu

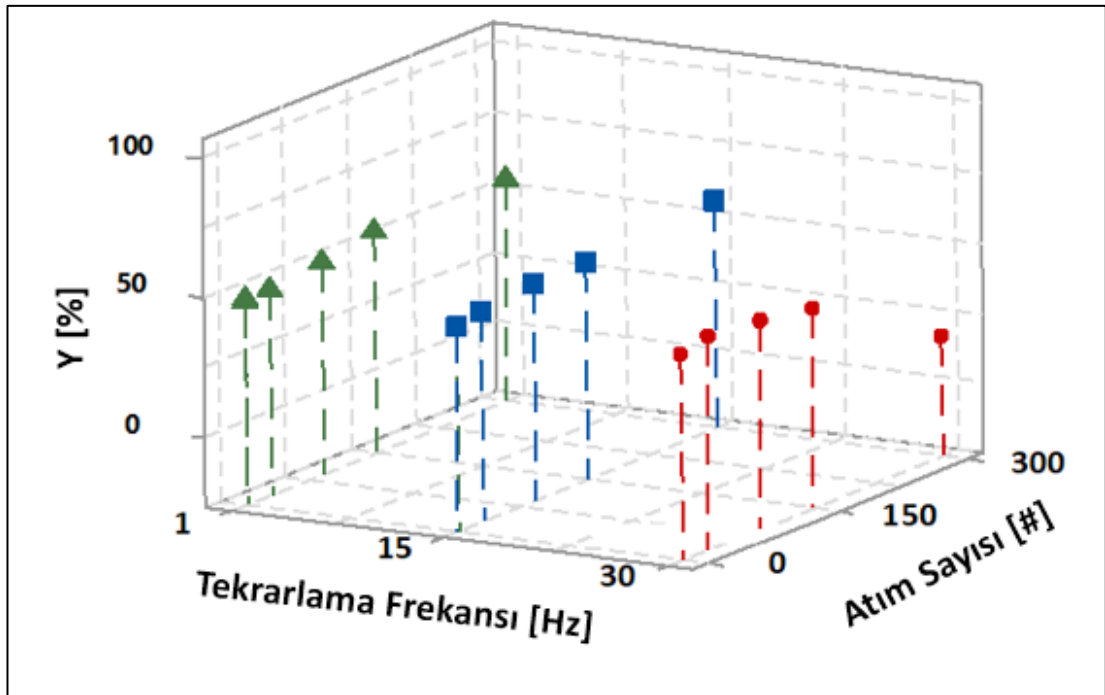
Tablo 4-18: Şarap lekesi, $\lambda=1064$ nm dalgaboyunda temizleme yapılan lazer parametreleri

Dalgaboyu λ (nm)	532
Enerji Yoğunluğu F (mJ/cm ²)	385, 255
Atım Tekrarlama Frekansı (Hz)	1, 15, 30
Atım Sayısı (#)	0, 1, 30, 90, 150, 300

Tablo 4-18’te verilen değerler spektrofotometreden alınan Y (açıklık-koyuluk) değerleridir.

Tablo 4-19: Şarap lekesi $\lambda=532$ nm dalgaboyu, $F=385$ mJ.cm⁻² enerji yoğunluğu ve farklı atım sayısı ve tekrarlama frekanslarında yapılan temizleme çalışmalarının Y değerleri

$\lambda= 532$ nm, $F= 385$ mJ.cm ⁻²			
	Atım Tekrarlama Frekansı (Hz)		
Atım Sayısı (#)	1	15	30
0	48.01	48.01	48.01
1	48.01	48.01	48.01
30	48.01	50.24	51.98
90	51,46	53,31	49,13
150	53,90	55,65	46,05
300	54,8	55,49	18,21



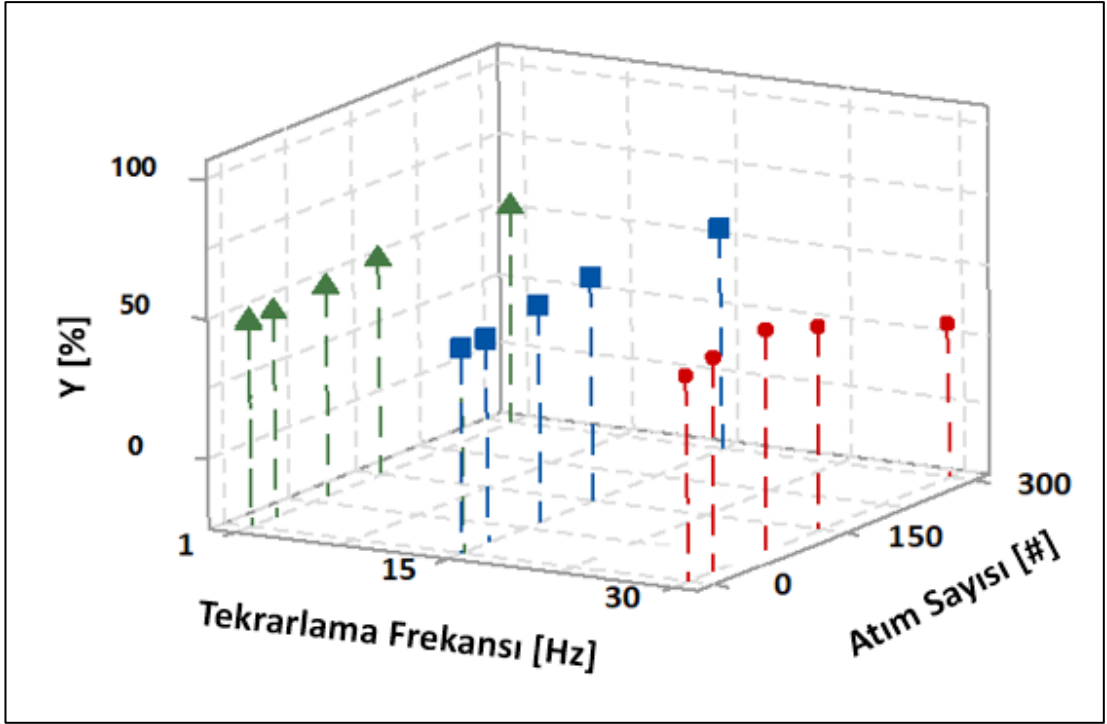
Şekil 4.14: Şarap lekesi $\lambda=532$ nm dalgaboyu, $F=385$ mJ.cm⁻² enerji yoğunluğu ve farklı atım sayısı ve tekrarlama frekanslarında yapılan temizleme çalışmalarının Y değerleri

Deney sonuçlarında yüksek atım sayısı ile yapılan temizleme işleminin tek atımla yapılanlara göre daha etkin olduğu görülmüştür. Atım sayısı arttıkça tekstilde daha fazla beyazlama olmaktadır. Fakat atım tekrarlama frekansı 1 ve 15 Hz için

N=150, atımdan sonraki atımlarda atım sayısı ne kadar artarsa artsın beyazlamanın artmadığı tespit edilmiştir. Tekstil temizleme işlemlerinde Y değerinde 2 birimden daha az farklılıklar çok anlamlı olmadığı için bu değerlerden sonra yapılan ekstra atımlar etkisizdir denilebilir. $f=30$ Hz için N=30 atımdan sonra tekstilin Y değerinde bir azalış görülmüştür. Bunun sebebi tekstilin artık kararıp ve nihayetinde yanmasıdır. Atım tekrarlama frekansının etkinliği incelendiğinde; frekans arttıkça temizleme etkinliğinin arttığı görülmüştür.

Tablo 4-20: Şarap lekesi $\lambda=532$ nm dalgaboyu, $F=255$ mJ.cm⁻² enerji yoğunluğu ve farklı atım sayısı ve tekrarlama frekanslarında yapılan temizleme çalışmalarının Y değerleri

$\lambda= 532$ nm, $F= 255$ mJ.cm ⁻²			
	Atım Tekrarlama Frekansı (Hz)		
Atım Sayısı (#)	1	15	30
0	48.01	48.01	48.01
1	48.01	48.01	48.01
30	48.01	49.29	51.56
90	50.12	52.51	53.85
150	52,24	54.40	48.14
300	52.24	54.68	30.64



Şekil 4.15: Karbon siyahı lekesi $\lambda=532$ nm dalgaboyu, $F=255$ mJ.cm⁻² enerji yoğunluğu ve farklı atım sayısı ve tekrarlama frekanslarında yapılan temizleme çalışmalarının Y değerleri

Deney sonuçlarında yüksek atım sayısı ile yapılan temizleme işleminin tek atımla yapılana göre daha etkin olduğu görülmüştür. Atım sayısı arttıkça tekstilde daha fazla beyazlama olmaktadır. Fakat atım tekrarlama frekansı 1 ve 15 Hz için N=150, atımdan sonraki atımlarda atım sayısı ne kadar artarsa artsın beyazlamanın artmadığı görülmüştür. Tekstil temizleme işlemlerinde Y değerinde 2 birimden daha az farklılıklar çok anlamlı olmadığı için bu değerlerden sonra yapılan ekstra atımlar etkisizdir denebilir. f=30 Hz için N=90 atımdan sonra tekstilin Y değerinde bir azalış görülmüştür. Bunun sebebi tekstilin artık kararıp yanmaya başlamasıdır. Atım tekrarlama frekansının etkinliği incelendiğinde; frekans arttıkça temizleme etkinliğinin arttığı görülmüştür. Fakat tekstilin yanmasına sebep olan parametre de tekrarlama frekansıdır.

Tablo 4-21: Lazer temizleme ile çamaşır makinası temizleme beyazlatma performans karşılaştırması

Leke Tipi	Temizlenmemiş	Lazer Uygulanmış	amaşır makinesi
Lekesiz Beyaz	88	-	-
Sebum	51.53	78.39	77
Karbon Siyahı	27.55	57.77	55
Kan	15.40	15.40	87
Kakao	37.45	37.45	64
şarap	48.17	55.65	70

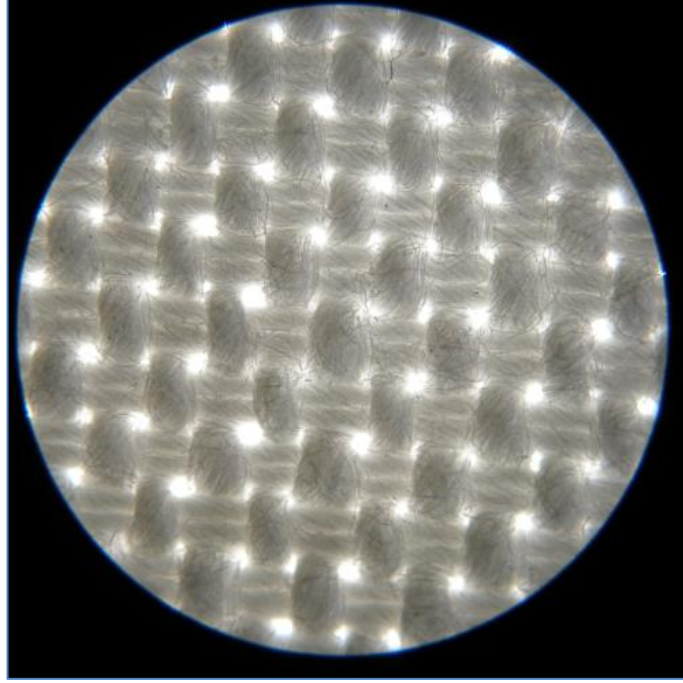
4.5. Tekstil Hasarlanma alışmaları

Lazer ile temizleme işleminde asıl hedef tekstile hasar vermeden lekeyi gidermektir. Bu sebeple tekstil hasarlanma miktarını incelemek önem teşkil etmektedir.

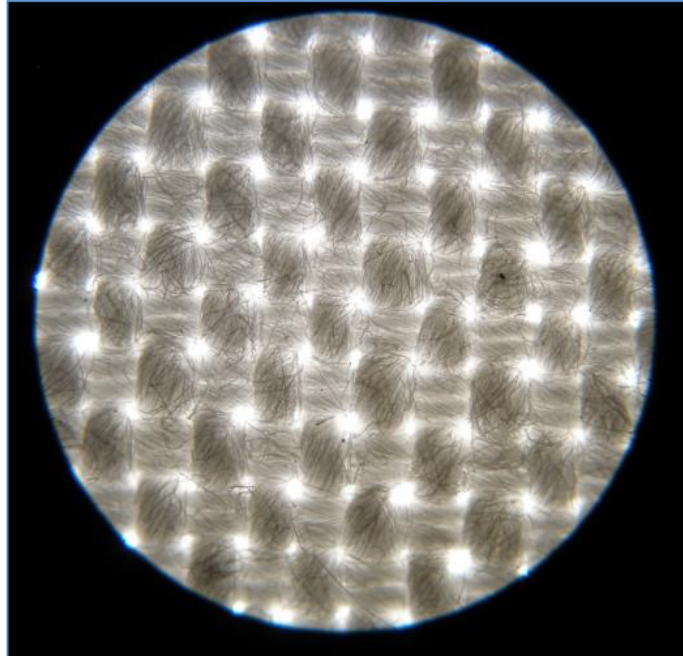
4.5.1. Optik Mikroskop Görüntüleri

Sebum ve karbon siyahı lekeleri için, lazer parametrelerinin u değerleriyle temizleme işlemi yapılan bölgelerin ve ışınlanmamış bölgelerin iplik yapısı optik mikroskopla incelenmiştir.

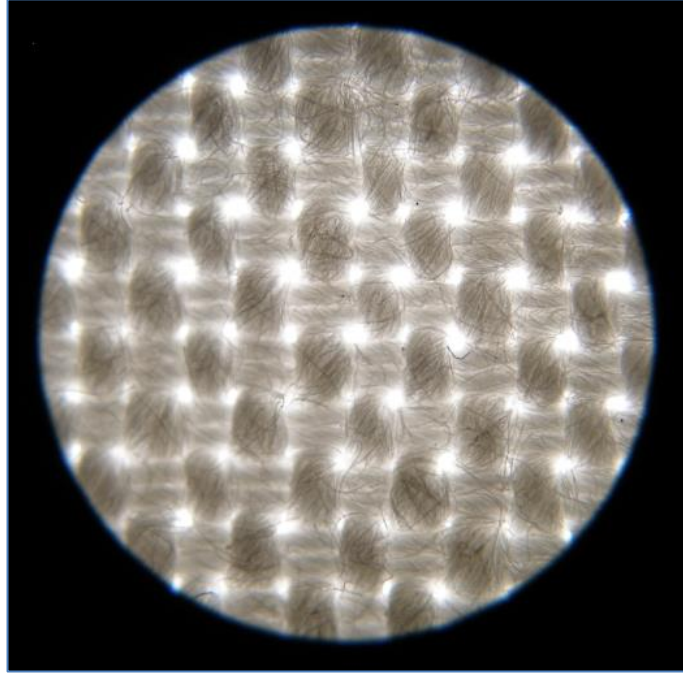
4.5.1.1. Sebum Lekesi



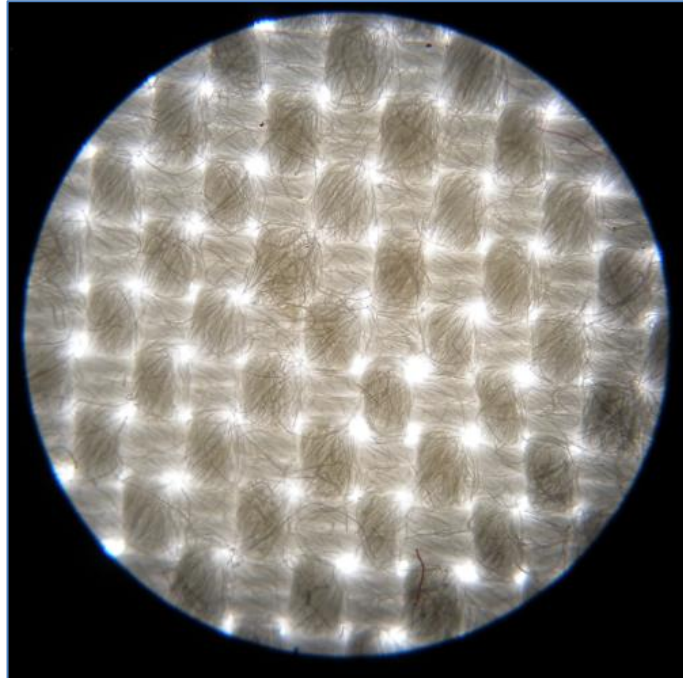
Şekil 4.16: Işınlanmamış sebum lekesi optik mikroskop görüntüsü



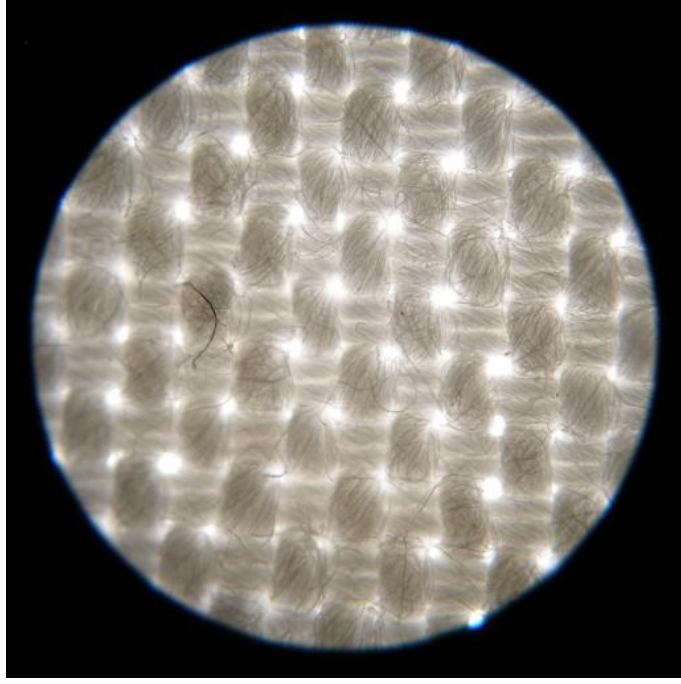
Şekil 4.17: $\lambda=1064$ nm, $J=385\text{mJ/cm}^2$, $N=1$ atım lazer uygulanmış sebum lekesi optik mikroskop görüntüsü



Şekil 4.18: $\lambda=1064$ nm, $J=385\text{mJ/cm}^2$, $N=300$ atım lazer uygulanmış sebum lekesi optik mikroskop görüntüsü

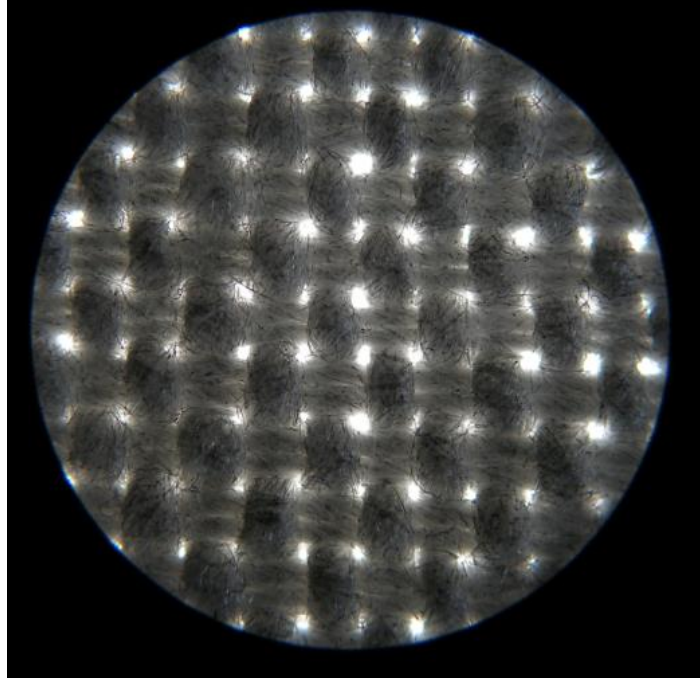


Şekil 4.19: $\lambda=532$ nm, $J=385\text{mJ/cm}^2$, $N=1$ atım lazer uygulanmış sebum lekesi optik mikroskop görüntüsü

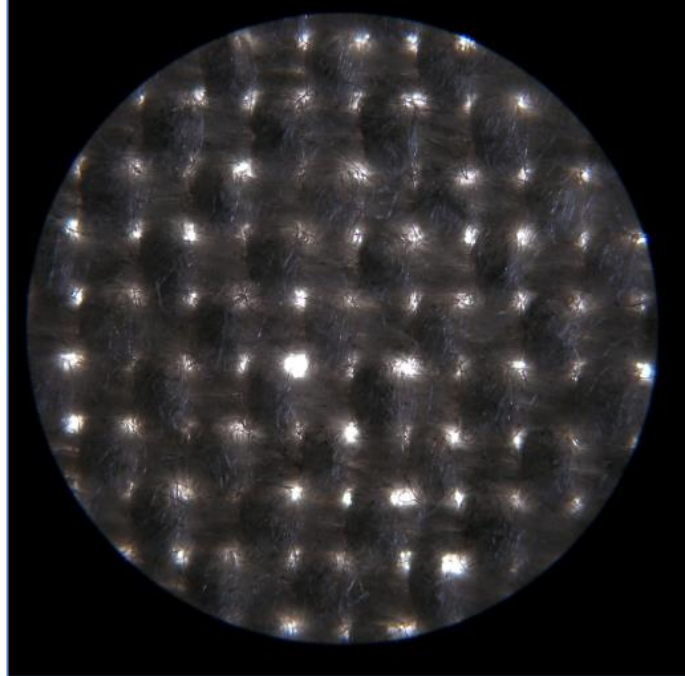


Şekil 4.20: $\lambda=532$ nm, $J=385\text{mJ}/\text{cm}^2$, $N=300$ atım lazer uygulanmış sebum lekesi optik mikroskop görüntüsü

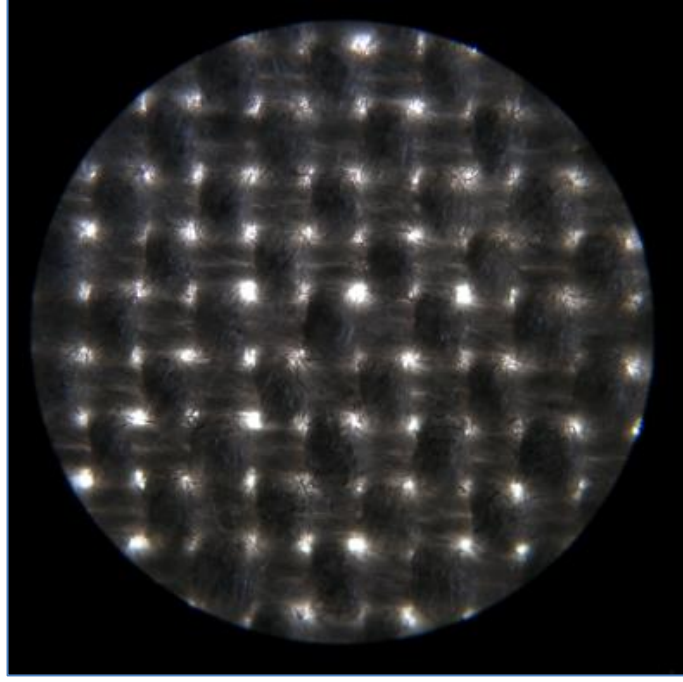
4.5.1.2. Karbon Siyahı



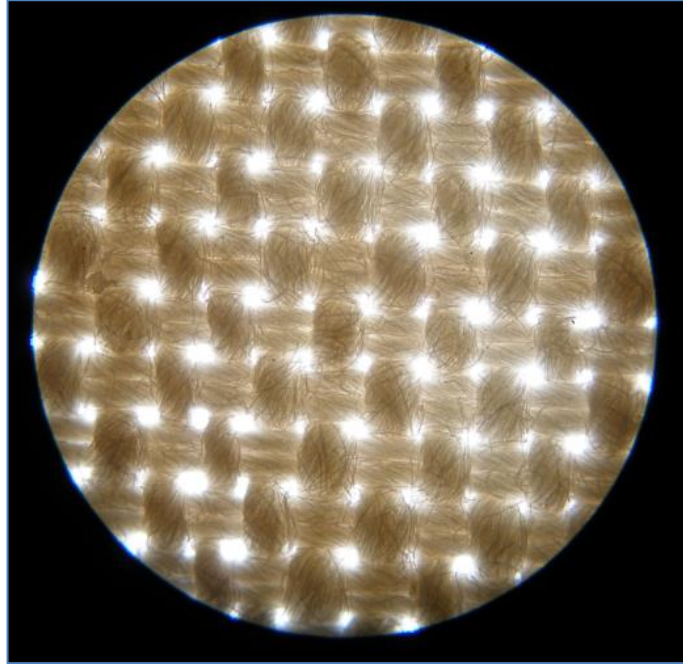
Şekil 4.21: Işınlanmamış karbon siyahı lekesi optik mikroskop görüntüsü



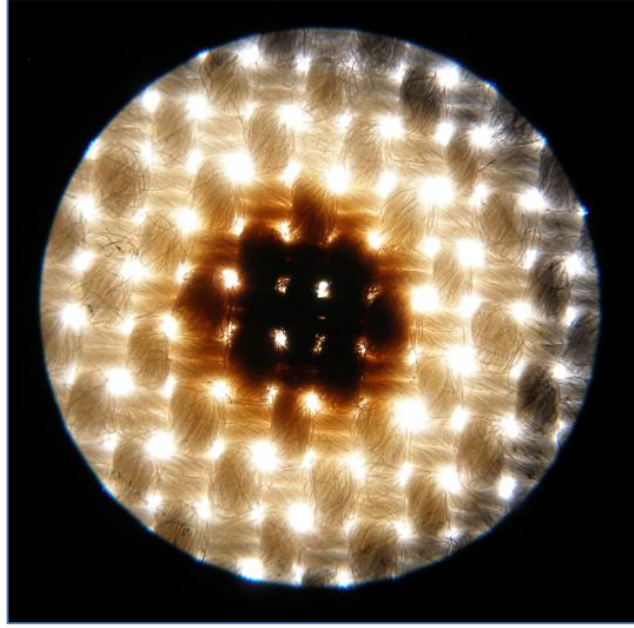
Şekil 4.22: $\lambda=1064$ nm, $J=385\text{mJ/cm}^2$, $N=1$ atım lazer uygulanmış karbon siyahı lekesi optik mikroskop görüntüsü



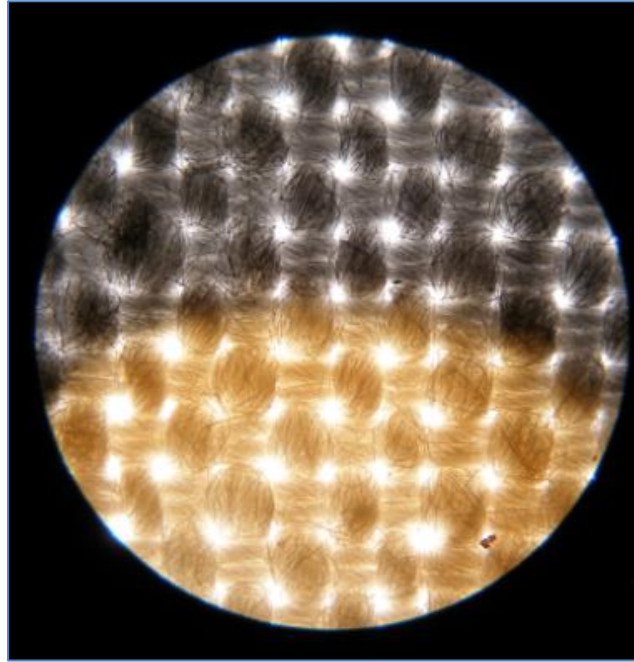
Şekil 4.24: $\lambda=532$ nm, $J=385\text{mJ}/\text{cm}^2$, $N=1$ atım lazer uygulanmış karbon siyahı lekesi optik mikroskop görüntüsü



Şekil 4.23: $\lambda=1064$ nm, $J=385\text{mJ}/\text{cm}^2$, $N=300$ atım lazer uygulanmış karbon siyahı lekesi optik mikroskop görüntüsü



Şekil 4.26: $\lambda=532$ nm, $J=385\text{mJ/cm}^2$, $N=300$ atım lazer uygulanmış skarbon siyahı lekesi optik mikroskop görüntüsü



Şekil 4.25: Lazer ışınlanan ve ışınlıan bölgeler

Yapılan incelemeler sonunda, 1 tekrar ile yapılan temizleme işleminde lazerin, tekstileki iplik yapısına zarar vermediği görülmüştür. Çok tekrarlı deneyler yapmak önemlidir, fakat temizlenmiş bir tekstil tekrardan standart olarak lekelenilemeyeceği için sadece tek seferlik lazer ile temizleme işleminden sonra mikroskop incelemesi yapılabilmektedir.

4.5.2. Tekstil Mukavemet Testleri

Tekstil mukavemet deneyleri birbirine özdeş 6 numune üzerinde yapılmış ve numunelerden 3 tanesi hiç ışınlamaya maruz bırakılmadan referans olarak kullanılmıştır. Diğer 3 numune ise $\lambda=1064$ nm dalgaboyunda, $f=30$ Hz tekrarlama frekansında, 815mJ.cm^{-2} enerji yoğunluğunda ve $N=300$ atım sayısı ile ışınlanmıştır.

Mukavemet değerleri Tablo 4-22’te verilmiştir.

Tablo 4-22: Mukavemet test sonuçları

	Referans Kumaşlar	Lazer Uygulanmış Kumaşlar
Mukavemet Değerleri (N)	19.11	17.92
	17.36	17.52
	17.36	16.41
Ortalama Değerler (N)	17.94	17.28

Yapılan incelemeler sonunda tek sefer yapılan temizleme işlemi için lazerin tekstil mukavemet kaybına olumsuz etkisi olmadığı görülmüştür. Çok tekrarlı deneyler yapmak önemlidir, fakat temizlenmiş bir tekstil tekrardan standart olarak lekelenilemeyeceği için sadece tek seferlik lazer ile temizleme işleminden sonra mikroskop incelemesi yapılabilmektedir.

5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Yapılan tekstil temizleme çalışmalarının sonuçlarına göre lazer parametrelerinin etkinlikleri aşağıda tartışılmıştır.

Dalgaboyları arasında yapılan inceleme sonucu 532 nm dalgaboylu lazer ışınlarının, 1064 nm dalgaboyuna göre daha etkin bir beyazlatma, başka bir deyişle leke giderimi ortaya koyduğu görülmüştür. Literatürde; lazer dalgaboyu küçüldükçe, lazer atımı başına yüzeyden uzaklaştırılan malzeme miktarı olarak tanımlanan ablasyon oranının arttığı bilgisi bulunmaktadır [24].

Benzer bir inceleme atım sayısı için de yapılmıştır. Literatürde atım sayısı arttıkça inkübasyon etkisinden dolayı ablasyon eşik enerji yoğunluğunun azaldığı verilmiştir [18]. Yapılan deneyler sonucunda; birden fazla atımlı temizleme işlemlerinde, yüksek enerji yoğunluğuna sahip atımların, düşük enerji yoğunluklarına sahip çok sayıda atım kadar etkili bir temizleme ortaya koymadığı görülmüştür. Atım sayısı arttırıldığında, belli bir atım sayısı değerinden sonra leke gideriminin artmadığı tespit edilmiştir.

Bu durumda artık tekrarlama frekansını veya lazer atımlarının enerji yoğunluklarını artırmak gerekmektedir. Tekrarlama frekansı leke giderimi konusunda etkin bir parametre olmasına karşın tekstil üzerinde yanmaya sebebiyet verebilmektedir. Bunun sebebi olarak ise tekstil üzerine düşen bir atımdan sonra lazer enerjisi ile tekstilin ısıtılıp daha sonra soğuyup termal dengeye ulaşması için geçmesi gereken süreyi tanımayıp artarda lazer atımları ile ısı birikmelerin oluşmasıdır [23]. Kullandığımız lazer atımlarının enerji yoğunlukları yeterince yüksek olmadığı için tekstili yakmayacak bir tekrarlama frekansında enerji yoğunluğunu, 815mJ/cm^2 'den daha fazla artırarak temizleme çalışmaları yapılamamıştır fakat lazer parametrelerinin izin verdiği aralıklarda yapılan çalışmalar sonucu görüldüğü kadarı ile lazer atımlarının enerji yoğunluklarının artmasıyla temizleme performansı artmaktadır.

Deneyde kullandığımız ns atım genişliğine sahip lazer ışınları farklı leke tiplerine göre farklı davranışlar sergilemiştir. Karbon siyahı ve sebum lekelerinde 1064 ve 532 n dalgaboyuna sahip lazer atımları etkili bir temizleme ortaya koymasına karşın, 1064

nm dalgaboylu lazer atımları kakao ve şarap lekesi üzerinde hiçbir etki göstermemiştir. Kan lekesinde ise tekrarlama frekansı 30Hz iken 150 atımdan itibaren yanma gözlemlenmiştir. 532 nm dalgaboyunda yapılan çalışmalarda ise şarap lekesi üzerinde leke giderimi sağlanmıştır. Kakao lekesinde 15 Hz tekrarlama frekansında 90 atımda tekstil üzerinde yanma başlangıcı olarak kabul edilebilecek kararmalar görülmüştür. Kan lekesi üzerinde yapılan 532 nm dalgaboylu lazer temizleme çalışmalarında ise 15 Hz tekrarlama frekansında 90 atımda tekstil üzerinde kararma başlamaktadır. Bu farklılıkların sebepleri ise lekelerin birbirinden farklı özelliklerde olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Karbon siyahı partiküler-yağ bazlı, sebum yağ bazlı, şarap ağartılabilir, kan ve kakao ise enzimatik lekelerdir. Burdan yola çıkarak ns atım genişliğine sahip lazer atımlarının yağ bazlı lekelerde etkin olduğu, enzimatik lekelerde ise etkisiz olduğu sonucu çıkartılabilir. Yanma görülen kakao lekesinde 532 nm dalgaboyunda 385 mJ/cm² enerji yoğunluğunda tekstil kuru hava tabancasıyla soğutulularak temizleme işlemi yapıldığında tekstilde temizleme etkinliği görülmüştür. Burdan; ns atım genişliğine sahip lazer atımları ile sadece ısı etkileriyle temizleme değil aynı zamanda mekanik etkilerle de temizleme işlemi gerçekleştirildiği sonucu çıkartılabilir.

Lazer temizleme ve ablasyon işlemlerinde ise en etkin parametre lazer atım genişliğidir. Literatürde fs veya ps atım genişliğine sahip lazer atımlarının daha etkili temizleme ve ablasyon yaptığı bilinmektedir.

Temizleme işlemlerinden sonra yapılan tekstil analizleri sonucunda tekstilde oluşan yanmalar haricinde temizleme etkinliği görülen durumlarda, ns atım genişliğine sahip lazer atımlarının tekstilde mukavemet kaybına veya iplik yapısında deformasyona sebep olmadığı, özetle tekstile hasar vermediği görülmektedir. Bu deneyler çok tekrarlı yapmak önemlidir fakat temizleme işlemi uygulanmış tekstiller aynı şekilde tekrardan lekelenilemeyeceği için tek seferlik temizleme işlemi sonrası tekstil hasarına bakılmıştır.

KAYNAKLAR

- [1] Wolf K., Morris M., (2007), "Spotting Chemicals: Alternatives to Perchloroethylene and Trichloroethylene in the Textile Cleaning Industry", Institute for Research and Technical Assistance: Los Angeles, CA, USA.
- [2] Johnson P. D., Goldberg S. J., Mays M. Z., Dawson B. V., (2003), "Threshold of trichloroethylene contamination in maternal drinking waters affecting fetal heart development in the rat", Environmental health perspectives, 111 (3), 289-292.
- [3] Degriigny C., Tanguy E., Le Gall R., Zafirooulos V., Marakis G., (2003), "Laser cleaning of tarnished silver and copper threads in museum textiles", Journal of Cultural Heritage, 4, 152-156.
- [4] Sutcliffe H., Cooper M., Farnsworth J., (2000), "An initial investigation into the cleaning of new and naturally aged cotton textiles using laser radiation", Journal of Cultural Heritage, 1, S241-S246.
- [5] von Lerber K., Pentzien S., Strlic M., Kautek W., (2005). "Laser cleaning of silk: a first evaluation", Triennial meeting (14th), The Hague, 12-16 September 2005: preprints, 978-988, figs.
- [6] Simileanu M., Striber J., Radvan R., (2008), "ASPECTS CONCERNING LASER CONSERVATION OF ORGANIC ART WORKS", Romanian Reports in Physics, 60 (1), 105-110.
- [7] Abdel-Kareem O., Harith M., (2008), "Evaluating the use of laser radiation in cleaning of copper embroidery threads on archaeological Egyptian textiles", Applied Surface Science, 254 (18), 5854-5860.
- [8] Belli R., Miotello A., Mosaner P., Toniutti L., (2005), "Laser cleaning of ancient textiles", Applied Surface Science, 247 (1-4), 369-372.
- [9] Ferrero F., Testore F., Tonin C., Innocenti R., (2002), "Surface degradation of linen textiles induced by laser treatment: comparison with electron beam and heat source", Autex Res. J, 2 (3), 109-114.
- [10] Londero P., Corda L., Ciofini D., Giuntini C., Leona M., "Laser Cleaning of a First Phase Navajo Wool Chief's Blanket by Nd: YAG", Studies, 2 (9), 10.
- [11] Web,(2019),"http://www.zamandayolculuk.com/html3/em_spektrum.htm", (Erişim Tarihi: 25.06.2019).

- [12] Kasap S. O., Sinha R. K., (2001), "Optoelectronics and photonics: principles and practices", Edition, Prentice Hall New Jersey.
- [13] Park S., Zapasskii V., Wick D., Nelson T., Ell C., Gibbs H., Khitrova G., Schülzgen A., Kira M., Jahnke F., (1999), "Spontaneous emission lifetime of carriers in a semiconductor microcavity measured by photoluminescence without distortion by reabsorption", Optics express, 4 (13), 512-524.
- [14] Einstein A., (1917), "Zur quantentheorie der strahlung", Phys. Z., 18, 121-128.
- [15] Ladenburg R., (1928), "Untersuchungen über die anomale Dispersion angeregter Gase", Zeitschrift für Physik, 48 (1-2), 15-25.
- [16] Maiman T. H., (2000), "The laser odyssey", Edition, Laser Press.
- [17] Bordui P. F., Fejer M. M., (1993), "Inorganic crystals for nonlinear optical frequency conversion", Annual Review of Materials Science, 23 (1), 321-379.
- [18] Fitzsimons P., Gh L., (2012), "Department of Engineering", University of Liverpool.
- [19] Kiss Z., Pressley R., (1966), "Crystalline solid lasers", Applied optics, 5 (10), 1474-1486.
- [20] Miziolek A. W., Palleschi V., Schechter I., (2006), "Laser induced breakdown spectroscopy", Edition, Cambridge University Press.
- [21] Kane D. M., (2006), "Laser cleaning II", Edition, World Scientific.
- [22] Malinauskas M., Danilevičius P., Juodkasis S., (2011), "Three-dimensional micro-/nano-structuring via direct write polymerization with picosecond laser pulses", Optics express, 19 (6), 5602-5610.
- [23] Bäuerle D., (2013), "Laser processing and chemistry", Edition, Springer Science & Business Media.
- [24] Bayır S., (2018), "Bulk malzemelerin ve ince filmlerin lazer ablasyon eşik enerji yoğunluklarının d-scan yöntemi ile belirlenmesi", Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [25] Cooper M., Emmony D., Larson J., (1995), "Characterization of laser cleaning of limestone", Optics & Laser Technology, 27 (1), 69-73.
- [26] Georgiou S., Zafiropulos V., Anglos D., Balas C., Tornari V., Fotakis C., (1998), "Excimer laser restoration of painted artworks: procedures, mechanisms and effects", Applied Surface Science, 127, 738-745.

- [27] Moropoulou A., Polikreti K., Ruf V., Deodatis G., (2003), "San Francisco Monastery, Quito, Equador: characterisation of building materials, damage assessment and conservation considerations", *Journal of Cultural Heritage*, 4 (2), 101-108.
- [28] Asmus J. F., Murphy C. G., Munk W. H., (1974). "Studies on the interaction of laser radiation with art artifacts", *Developments in laser Technology II*, 19-31.
- [29] Asmus J. F., (1978), "Light cleaning: laser technology for surface preparation in the arts", *Technology and Conservation*, 3 (3), 14-18.
- [30] Asmus J. E., (1986), "More light for art conservation", *IEEE Circuits and Devices Magazine*, 2 (2), 6-15.
- [31] Russo R. E., Mao X., Liu H., Gonzalez J., Mao S. S., (2002), "Laser ablation in analytical chemistry—a review", *Talanta*, 57 (3), 425-451.
- [32] Liu H., Mao X., Yoo J., Russo R., (1999), "Early phase laser induced plasma diagnostics and mass removal during single-pulse laser ablation of silicon", *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*, 54 (11), 1607-1624.
- [33] Lee J., Watkins K., (2001), "Removal of small particles on silicon wafer by laser-induced airborne plasma shock waves", *Journal of applied physics*, 89 (11), 6496-6500.
- [34] Brygo F., Dutouquet C., Le Guern F., Oltra R., Semerok A., Weulersse J., (2006), "Laser fluence, repetition rate and pulse duration effects on paint ablation", *Applied Surface Science*, 252 (6), 2131-2138.
- [35] Rosenfeld A., Lorenz M., Stoian R., Ashkenasi D., (1999), "Ultrashort-laser-pulse damage threshold of transparent materials and the role of incubation", *Applied Physics A*, 69 (1), S373-S376.
- [36] CIE C., (1932), "Commission internationale de l'eclairage proceedings, 1931", Cambridge University, Cambridge.
- [37] Bechtold T., Pham T., (2019), "Textile Chemistry", Edition, De Gruyter.
- [38] "COLOR TECHNOLOGY in the textile industry Second Edition", Edition, Aatcc.
- [39] Özdil N., Özçelik G., (2006), "Kumaşlarda Yırtılma Mukavemeti Test Yöntemlerinin Karşılaştırılması Üzerine Bir Çalışma", *TEKSTİL VE KONFEKSİYON*, 16 (3), 174-179.

ÖZGEÇMİŞ

1989 yılında Adana’da doğdu. 2007 yılında Seyhan Rotary Anadolu Lisesinden mezun oldu. 2016 yılında Hacettepe Üniversitesi Fizik Mühendisliği Bölümünden mezun oldu. 2016 yılında Arçelik A.Ş. Ar-Ge departmanında Fizik Mühendisi olarak çalışmaya başladı. 2018 yılında Gebze Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalı’nda yüksek lisans eğitimine başladı.