

T.C.

AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ



**KUARTZ OPTİK FİBERLERİN VE Ce KATKILI SİNTİLAYON
FİBERLERİN RADYASYON ALTINDA OPTİK VE YAPISAL
ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

Esra KENDİR

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

FİZİK ANABİLİM DALI

DOKTORA TEZİ

Ocak 2019

ANTALYA

T.C.

AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ



**KUARTZ OPTİK FİBERLERİN VE Ce KATKILI SİNTİLASYON
FİBERLERİN RADYASYON ALTINDA OPTİK VE YAPISAL
ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

Esra KENDİR

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

FİZİK ANABİLİM DALI

DOKTORA TEZİ

Ocak 2019

ANTALYA

T.C.

AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ



**KUARTZ OPTİK FİBERLERİN VE Ce KATKILI SİNTİLASYON
FİBERLERİN RADYASYON ALTINDA OPTİK VE YAPISAL
ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

Esra KENDİR

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

FİZİK ANABİLİM DALI

DOKTORA TEZİ

Bu tez TÜBİTAK tarafından 1059B141601412 nolu proje ile ve FDK-2017-2461 no'lu tez projesi olarak Akdeniz Üniversitesi Bilimsel Araştırmalar Birimi (BAP) tarafından desteklenmiştir.

Ocak 2019

ANTALYA

T.C.

AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

KUARTZ OPTİK FİBERLERİN VE Ce KATKILI SİNTİLASYON FİBERLERİN
RADYASYON ALTINDA OPTİK VE YAPISAL ÖZELLİKLERİNİN
İNCELENMESİ

Esra KENDİR

FİZİK ANABİLİM DALI

DOKTORA TEZİ

Bu tez 24/01/2019 tarihinde jüri tarafından oy birliği/oy çokluğu ile kabul edilmiştir.

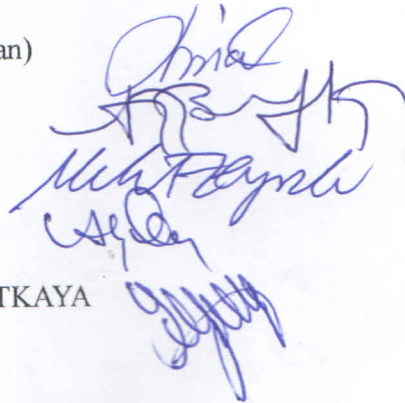
Prof. Dr. Nuri ÜNAL (Danışman)

Prof. Dr. Ahmet BOZKURT

Prof. Dr. Mehmet T. ZEYREK

Prof. Dr. Abdullah KAPLAN

Dr. Öğr. Üyesi Şerafettin YALTKAYA



ÖZET

KUARTZ OPTİK FİBERLERİN VE Ce KATKILI SİNTİLASYON FİBERLERİN RADYASYON ALTINDA OPTİK VE YAPISAL ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Esra KENDİR

Doktora Tezi, Fizik Anabilim Dalı

Danışman : Prof. Dr. Nuri ÜNAL

İkinci Danışman : Prof. Dr. Nural AKÇURİN

Ocak 2019, 95 sayfa

Bu tez çalışmasında kuartz ve Ce katkılu optik fiberlerin Co-60 gama radyasyonuna karşı göstermiş oldukları davranışlar incelenmiştir. Bu çalışmada, farklı kor yapıları ve çeşitli element katkıları olan dört kuartz ve altı Ce katkılu optik fiber kullanılmıştır. Bu optik fiberler eş zamanlı ve eş zamanlı olmayan ölçüm yöntemleriyle düşük ve yüksek doz radyasyona maruz bırakılmıştır. Bu ölçümlerde 400-1000 nm dalgaboyu aralığında spektrumlar elde edilmiştir. Spektrumlardan belirli dalgaboyları seçilerek optik fiberlerin radyasyona bağlı zayıflamaları (Radiation-Induced Attenuation-RIA) ve iyileşme süreçleri elde edilmiştir. RIA ve iyileşme süreçleri optik fiberin yapısı, Ce katkı konsantrasyonları, radyasyon doz hızları ve toplam doz miktarları gibi parametrelere bağlı olarak değerlendirilmiştir. Deneyde kullanılan kuartz optik fiberlerin uygulanan radyasyona karşı dayanıklı olduğu görülmüştür ve bu dayanıklılığın kaynağının yapısındaki yüksek miktardaki OH⁻ iyonlarından olduğu belirlenmiştir. Kullanılan Ce katkılu optik fiberlerin yapısında Al ve P elementlerinin bulunmasının radyasyona karşı direncin azalmasına neden olduğu sonucuna varılmıştır. Ölçümü gerçekleştirilen optik fiberlerden elde edilen sonuçlar kapsamında tarafımızca bir optik fiber önerilmiştir ve bu optik fiberin üretimi Polymicro Technologies firması tarafından gerçekleştirilmiştir. Bu optik fiberin ölçümleri, bu tez kapsamında sunulmuştur ve çalışmadaki Ce katkılu diğer optik fiberlerden daha iyi bir radyasyon direnci göstermiştir. Optik fiberlerin iyileşme süreçleri, ikinci dereceden büyüme kinetiği modeli ile belirlenmiş ve

modelin öngörülerinin deneysel sonuçlar ile tutarlılığı gösterilmiştir. Ayrıca optik fiberlerin fotoluminesans ve nümerik açıklık (NA) ölçümlerinde radyasyon etkisi araştırılmıştır.

ANAHTAR KELİMELEER: Fotoluminesans, Kuartz optik fiber, Nümerik açıklık, Radyasyona bağı zayıflama, Seryum

JÜRİ: Prof. Dr. Nuri ÜNAL

Prof. Dr. Ahmet BOZKURT

Prof. Dr. Mehmet T. ZEYREK

Prof. Dr. Abdullah KAPLAN

Dr. Öğr. Üyesi Şerafettin YALTKAYA

ABSTRACT

INVESTIGATION OF OPTICAL AND STRUCTURAL PROPERTIES OF QUARTZ OPTICAL FIBERS AND Ce DOPED SCINTILLATION FIBERS UNDER RADIATION

Esra KENDİR

PhD Thesis, in Physics Department

Supervisor : Prof. Dr. Nuri ÜNAL

Second Supervisor : Prof. Dr. Nural AKÇURİN

January 2019, 95 pages

In this thesis, the behavior of quartz and Ce doped optical fibers under Co-60 gamma radiation was investigated. In this study, we used four quartz and six Ce doped optical fibers which have different core structures and various elemental contributions. These optical fibers were irradiated with low and high dose radiation by on-line and off-line measurement methods. In these measurements, the spectra were obtained in the wavelength range of 400-1000 nm. Radiation-attenuated attenuation (RIA) and the recovery processes of the optical fibers were achieved by selecting specific wavelengths from the spectra. RIA and the recovery processes were evaluated according to parameters such as the structure of the optical fiber, Ce doped concentrations, radiation dose rates and total dose amounts. The quartz optical fibers used in the experiment were found to be resistant to the applied radiation, and it was determined that this strength was due to the high amount of OH⁻ ions in their structure. It was concluded that the presence of Al and P elements in the structure of the Ce doped optical fibers caused a decrease in their radiation hardness. An optical fiber has been proposed by us within the scope of the results obtained from the measurements of the optical fibers, and was manufactured by Polymicro Technologies. The analyses of this optical fiber are presented in this thesis and indicate better radiation hardness than other optical fibers with Ce doped in the study. The recovery processes of the optical fibers were determined by the second order growth kinetic model, and the consistency of the predictions of the model with the experimental results was shown. In addition, the radiation effect in the optical

fibers with the photoluminescence and the numerical aperture (NA) measurements were investigated.

KEYWORDS: Photoluminescence, Quartz optical fiber, Numerical aperture, Radiation induced attenuation, Cerium

COMMITTEE: Prof. Dr. Nuri ÜNAL

Prof. Dr. Ahmet BOZKURT

Prof. Dr. Mehmet T. ZEYREK

Prof. Dr. Abdullah KAPLAN

Asst. Prof. Dr. Şerafettin YALTKAYA

ÖNSÖZ

Doktora tez çalışmalarım kapsamında gerek teorik gerekse deneysel ortam hazırlanmasında göstermiş olduğu katkılarından dolayı ve çalışmam sırasında desteğini esirgmeden, bilgi ve tecrübeleri ile beni yönlendiren Akdeniz Üniversitesi Fizik Bölümündeki Sayın Dr. Öğr. Üyesi Şerafettin YALTKAYA'ya içten teşekkür ve saygılarımı sunarım.

Doktora tez aşaması sürecimde Akdeniz Üniversitesi Fizik Bölümünde danışmanım olan Sayın Prof. Dr. Nuri ÜNAL'a bilimsel ve akademik desteğinden dolayı teşekkürü bir borç bilirim.

Bu tez çalışmasını gerçekleştirmemi sağlayan, tüm bilimsel birikimlerini benimle paylaşan ve 9 aylık TÜBİTAK 2214-A doktora sırası projesi kapsamında beni Texas Lubbock'ta misafir ederek çalışmalarında bana sağladığı olanaklar için Texas Tech Üniversitesi'ndeki danışmanım Sayın Prof. Dr. Nural AKÇURİN'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Tez savunma jürilerim sayın Prof. Dr. Ahmet BOZKURT'a, Prof. Dr. Mehmet T. ZEYREK'e ve Prof. Dr. Abdullah KAPLAN'a tezimde yapmış oldukları değerli yorum ve katkılarından dolayı teşekkür ederim.

Texas Lubbock'ta göstermiş oldukları dostluk ve destekleri için sevgili Ceren UZUN'a ve sevgili Leslie AKÇURİN'e,

Her zaman yanımda olan ve manevi desteğini esirgemeyen sevgili dostum Semra GÜRTAŞ'a ve tezimin yazım aşamasında yapmış olduğu teknik destek için Dr. Atakan TEKGÜL'e sevgi ve teşekkürlerimi sunarım.

Beni bu çetin yolda yalnız bırakmayarak sonsuz destekleri ile onurlandıran "AİLEME" teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

ÖZET	i
ABSTRACT.....	iii
ÖNSÖZ.....	v
AKADEMİK BEYAN	ix
SİMGELER VE KISALTMALAR	x
ŞEKİLLER DİZİNİ	xii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xvii
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK TARAMASI.....	6
2.1. Optik Fiber	6
2.1.1. Kabul açısı, nümerik açıklık ve bağıl kırılma indisi farkı	6
2.1.2. Normalize frekans (V)	8
2.2. Optik Fiber Türleri	8
2.2.1. Cam optik fiberler	8
2.2.2. Plastik optik fiberler	9
2.2.3. Basamak indisli optik fiberler	10
2.2.4. Dereceli indisli optik fiberler	11
2.3. Sintilasyon, Sintilasyon Detektörleri ve Sintilasyon Fiberleri	12
2.4. Optik Fiber Kayıpları	13
2.4.1. Saçılma kayıpları	14
2.4.2. Soğurma kayıpları.....	14
2.4.3. Eğilme (bükülme) kayıpları.....	15
2.4.4. Optik fiber kayıp grafiği	16

2.5. Radyasyon ve Türleri	17
2.5.1. Co-60 radyasyon kaynağı	18
2.6. Radyasyonun Madde ile Etikileşimi	19
2.6.1. Fotoelektrik olay	19
2.6.2. Compton saçılması.....	20
2.6.3. Çift oluşum	21
2.7. Radyasyonun Optik Fiber Üzerine Etkisi.....	22
2.7.1. Radyasyona bağlı zayıflamalar (RIA).....	22
2.7.2. Renk merkezleri	22
2.7.2.1. İçsel kusurlar	24
2.7.2.2. Dışsal kusurlar	26
2.8. Fotoluminesans.....	29
3. MATERYAL VE METOT	32
3.1. Kullanılan Optik Fiberlerin Özellikleri.....	32
3.2. Optik Fiberlerin Element Analizleri	34
3.3. Optik Fiberlerin Co-60 Radyasyon Kaynağı ile Işınlanmasında Kullanılan Deney Düzenegi	34
3.4. Nümerik Açıklık (NA) Ölçümü için Kurulan Deney Düzenegi	37
3.5. Fotoluminesans için Kurulan Deney Düzenegi.....	37
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	39
4.1. Optik Fiberlerin Kütle Spektrometresi Sonuçları	39
4.2. Co-60 Radyasyon Kaynağının Kuartz Optik Fiberlere Etkisi.....	43
4.2.1. T3 (Clear fused-silica) kuartz optik fiber	43
4.2.2. T4 (Cern-01A) ve T5 (Cern-02A) kuartz optik fiber	45
4.2.3. T7 (KOg-02A) kuartz optik fiber	48
4.2.4. T3, T4, T5 ve T7 kuartz optik fiberlerin karşılaştırılması	50

4.3. Co-60 Radyasyon Kaynağının Ce Katkılanmış Sintilasyon Fiberlerine Etkisi.....	51
4.3.1. T1 (Phase-I) ve T2 (Phase-II) Ce katkılanmış sintilasyon fiberleri ...	52
4.3.2. T9 (Clear) Ce katkılanmış sintilasyon fiberleri	56
4.3.3. T10 (Phase-III) ve T14 Ce katkılanmış sintilasyon fiberleri	57
4.4. Optik Fiberlerin İyileşme Sürecinin Teorik Hesaplanması	61
4.4.1. T1 optik fiberinin iyileşme süreci	63
4.4.2. T2 optik fiberinin iyileşme süreci	66
4.4.3. T3 kuartz optik fiberinin iyileşme süreci	67
4.4.4. T10 optik fiberinin iyileşme süreci.....	68
4.4.5. T14 optik fiberinin iyileşme süreci.....	69
4.5. Yüksek Dozlarda Radyasyon Öncesi ve Sonrası RIA Değişimleri	71
4.6. Optik Fiberlerin <i>NA</i> Ölçümleri	73
4.7. Fotolüminesans Ölçümleri	74
5. SONUÇLAR	78
5.1. Optik Fiberlerin Element Analizi	78
5.2. Düşük Dozlarda Optik Fiberlerin Eş zamanlı Ölçümleri.....	79
5.2.1. Kuartz optik fiberlerin eş zamanlı ölçümleri.....	79
5.2.2. Ce katkılı optik fiberlerin eş zamanlı ölçümleri.....	79
5.3. Optik Fiberlerin Hasar-İyileşme Kinetiği.....	80
5.4. Yüksek Dozlarda Optik Fiberlerin Eş zamanlı Olmayan Ölçümleri	81
5.5. Optik Fiberlerin <i>NA</i> Değişimi	82
5.6. Optik Fiberlerin Fotolüminesans Ölçümleri	82
5.7. Son Değerlendirme	83
6. KAYNAKLAR.....	85
ÖZGEÇMİŞ	

AKADEMİK BEYAN

Doktora Tezi olarak sunduğum "Kuartz Optik Fiberlerin ve Ce Katkılı Sintilasyon Fiberlerin Radyasyon Altında Optik ve Yapısal Özelliklerinin İncelenmesi" adlı bu çalışmanın, akademik kurallar ve etik değerlere uygun olarak bulunduğunu belirtir, bu tez çalışmasında bana ait olmayan tüm bilgilerin kaynağını gösterdiğimi beyan ederim.

24 / 01 / 2019

Esra KENDİR



SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

a	: Kor ve yeleği belirleyen parametre
e	: Euler sayısı
h	: Planck sabiti
k_B	: Boltzman sabiti
kGy	: KiloGray
L	: Optik fiber uzunluğu
MeV	: Mega elektron volt
n_f, n_1	: Kor kırılma indisi
n_c, n_2	: Yelek kırılma indisi
n_i	: Yoğun ortamın kırılma indisi
n_t	: Az yoğun ortamın kırılma indisi
n_0	: Hava ortamının kırılma indisi
nm	: Nanometre
P	: Optik güç
p	: Fotoelastik katsayısı
$P_{giriş}$: Giriş gücü
$P_{çıkış}$: Çıkış gücü
ppm	: Milyonda bir birim (Parts per million)
r	: Kor yarıçapı, yelek yarıçapı
S_0	: Temel hal
S_1, S_2	: Uyarılmış singlet enerji düzeyleri
$T(\lambda)$: Rasyasyon öncesi ışığın şiddeti
$T_0(\lambda)$: Rasyasyon sonrası ışığın şiddeti
T_1	: Uyarılmış triplet enerji düzeyi
T_F	: Optik fiberin donma sıcaklığı
V	: Normalize frekans
α	: Zayıflama katsayısı
α_R	: Soğurma sabiti
α_r	: Eğilme kaybı
β_T	: Sabit sıcaklıkta maddenin sıkıştırılabilirliği
Δ	: Bağlı kırılma indisi farkı
θ_r	: Yansıma açısı
θ_i	: Geliş açısı
θ_t	: Kırılma açısı
θ_c	: Kritik açı
θ_a	: Kabul açısı
λ	: Dalgaboyu
μm	: Mikrometre
ν	: Frekans
τ_c	: Yayınlanma ömrü

Kısaltmalar

ADC	: Analog-dijital dönüştürücü (Analog Digital Converter)
Al-OHC	: Al Oksijen boşluğu merkezi
CERN	: Avrupa Nükleer Araştırma Merkezi
DO	: Dijital çıkış ünitesi
EDS	: Enerji dağılımlı spektrometre (Energy Dispersive Spectrometer)
ESR	: Elektron spin rezonans spektroskopisi
IR	: Kızılötesi (Infrared)
LED	: Işık yayan diyot (Light Emitted Diode)
MM	: Çok kipli (Multi Mod)
<i>NA</i>	: Nümerik açıklık
NASA	: ABD Ulusal Havacılık ve Uzay Dairesi
NBOHC	: Köprüsüz oksijen boşluğu merkezi (Non-bridging oxygen hole center)
ODC	: Doğal oksijen boşluğu merkezi (Neutral oxygen vacancy center)
OH ⁻	: Hidroksil iyonu
PL	: Fotoluminesans (Photoluminescence)
POHC	: Fosfor oksijen boşluğu merkezi
POR	: Peroksi radikali
RIA	: Radyasyona bağlı zayıflamalar (Radiation-Induced Attenuation)
SM	: Tek kipli (Single mode)
UV	: Ultraviyole

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1.	Optik fiberin genel yapısı	6
Şekil 2.2.	a) Bir ışık ışınının çok yoğun ortamdan az yoğun ortama geçerken izlediği yolların gösterimi; b) Optik fiberde ışık iletimi	7
Şekil 2.3.	Silika camının kırılma indisinin katkı yüzdesi ile değişimi (Keiser 1991)	9
Şekil 2.4.	Basamak indisli optik fiberde kırılma indisi profili ve ışın iletimi a) Çok kipli; b) Tek kipli	11
Şekil 2.5.	Çok kipli dereceli indisli optik fiberlerde kırılma indis profili ve ışın iletimi	12
Şekil 2.6.	Sintilasyon fiberlerinin yapısı	13
Şekil 2.7.	a) Makro bükülme; b) mikro bükülme ile optik fiberde oluşan kaybın örnekleri (John 2009).....	15
Şekil 2.8.	Silika optik fiberinin bazı temel kayıp mekanizmalarının dalgaboyu bağımlılığına göre kayıp spektrumu (Kapron vd. 1970)	17
Şekil 2.9.	Radyasyonun türleri	18
Şekil 2.10.	Co-60 bozunum şeması (Khan 2010)	18
Şekil 2.11.	Fotonların enerjilerine bağlı olarak farklı maddeler ile etkileşimi (Knoll 2010).....	19
Şekil 2.12.	a) Fotoelektrik olay için deneysel bir düzenek ve b) Fotoelektrik olay	20
Şekil 2.13.	Compton saçılması (Lilley 2018).....	21
Şekil 2.14.	Çift oluşum (Martin 2013)	21
Şekil 2.15.	Kalsiyum florürün şematik yapısı. a) normal; b) bir florin iyonunun elektron ile değiştirildiği bir "F-merkezi"	23
Şekil 2.16.	Kuartz şematik yapısı. a) normal; b) radyasyona maruz kaldıktan sonra boşluk merkezi oluşumu	24
Şekil 2.17.	a) SiO ₂ yapısı; b) E' merkezi ve c) doğal oksijen boşluğu	

merkezler (ODC) modelleri	25
Şekil 2.18. a) NBOHC merkezi; b) peroksi radikal (POR) ve c) peroksi köprü modelleri.....	26
Şekil 2.19. P-katkılı silika optik fiberlerde radyasyonun neden olduğu ana fosfor ilişkili paramanyetik kusur merkezleri (Griscom vd. 1983).....	27
Şekil 2.20. Farklı P ile ilgili kusur yapıları ile ilişkili soğurma bantları (Girard vd. 2013).....	27
Şekil 2.21. Jablonski diyagramı ile Floresans, Fosforesans ve soğurma geçişleri	30
Şekil 2.22. Ce^{+3} iyonunun soğurma enerji seviyelerinin diyagramı (Sun vd. 2017).....	31
Şekil 3.1. a) T1; b) T2; c) T3; d) T10; e) T14 ve f) T15 optik fiberlerin enine ara kesitlerinin SEM görüntüleri	33
Şekil 3.2. Deney düzeneğinin şematik gösterimi	35
Şekil 3.3. Tungsten Halojen lamba kullanılarak T1, T2, T3, T10 ve T14 optik fiberlerden elde edilen çıkış spektrumları ve seçilen dalgaboyları	36
Şekil 3.4. T1, T2, T3, T10, T14 ve T15 optik fiberlerden ksenon ışık kaynağı kullanılarak elde edilen spektrumlar	36
Şekil 3.5. NA ölçümü için kurulan deney düzeneğinin şeması	37
Şekil 3.6. Fotoluminesans ölçümleri için kurulan düzeneğin şematik gösterimi	38
Şekil 4.1. T1, T2, T3, T10, T14 ve T15 optik fiberlerin farklı kısımlarındaki Si, Al, P ve Ce konsantrasyonları optik fiberler boyunca belirli bölgelerde olduğu için lazer ablasyon yöntemi ile açıkça görülmektedir. Ce'nin varlığı ve yeri, sürekli turuncu çizgilerle gösterilmiştir. Ayrıca Al'in varlığı T1, T2 ve T14 optik fiberlerinde de görülmektedir. T3, T10, ve T15 optik fiberlerinde ölçülebilir miktarda Al bulunmamaktadır. P konsantrasyonu akrilat yelek ve cekette bulunmaktadır. Sinyal asimetrisinden çıkarılabileceği gibi, lazer tarama yönü soldan sağa doğrudur ve sağ taraftaki kuyruk, lazer spotunun optik fiberler boyunca sabit hızda hareket etmesinden ötürü, ablasyonlanmış materyalin sürekli olarak spektrometreye aktığını göstermektedir. Dikey eksen, Al ve Si için molar ağırlıkların yüzdesini, P ve Ce için ise ppm'i göstermektedir.....	41

- Şekil 4.2.** T1, T2, T14 ve T15 optik fiberlerinin kesit alanlarından alınan EDS görüntüleri. Si, O, F ve Al elementlerinin yoğunlukları bölgesel olarak sırasıyla mavi, yeşil, sarı ve mor renkte sunulmuştur 42
- Şekil 4.3.** T3.1 optik fiberlerinin 2 saat 40 dakikalık ışınlama sürecinde 20 dakikalık aralıklarla alınan spektrumları 43
- Şekil 4.4.** 106 Gy/sa doz hızında T3 optik fiberin a) 575 nm; b) 635 nm; c) 675 nm ve d) 750 nm dalgaboylarındaki doz miktarına karşı RIA değişimleri. Burada kırmızı noktalarla gösterilen 247 Gy, siyah noktalarla gösterilen 1484 Gy toplam doz miktarında alınan ölçümleri göstermektedir 44
- Şekil 4.5.** 106 Gy/sa ve 402 Gy/sa doz hızında T4 optik fiberin a) 575 nm; b) 635 nm; c) 675 nm ve d) 750 nm dalgaboylarındaki doz miktarına karşı RIA değişimleri. Burada siyah, kırmızı ve mavi noktalarla gösterilen ölçümler sırasıyla 318 Gy, 1942 ve 1206 Gy toplam doz miktarlarıdır 45
- Şekil 4.6.** 106 Gy/sa ve 402 Gy/sa doz hızında T5 optik fiberin a) 575 nm; b) 635 nm; c) 675 nm ve d) 750 nm dalgaboylarındaki doz miktarına karşı RIA değişimleri. Burada siyah kırmızı ve mavi noktalarla gösterilen ölçümler sırasıyla 318, 1206 ve 804 Gy toplam doz miktarlarıdır 46
- Şekil 4.7.** T4.4 kuartz optik fiberinde üç hasar (60 dk) seti ve üç iyileşme (60 dk) setinin zamana bağlı olarak değişimi 46
- Şekil 4.8.** T5.4 kuartz optik fiberinde 603 Gy toplam doza maruz bırakıldıktan sonra 30 dk iyileşme sürecinin zamana bağlı olarak değişimi 47
- Şekil 4.9.** 106 ve 402 Gy/sa doz hızında T7 optik fiberin a) 575 ve b) 635 nm dalgaboylarındaki doz miktarına karşı RIA değişimleri. Burada siyah noktalarla gösterilen 318 Gy ve kırmızı noktalarla gösterilen 1206 Gy toplam doz miktarında alınan ölçümleri göstermektedir 49
- Şekil 4.10.** T7.2 kuartz optik fiberin 1206 Gy toplam doza maruz bırakıldıktan sonra 55 dk iyileşmenin zamana bağlı olarak değişimi (doz hızı 402 Gy/sa) 49
- Şekil 4.11.** 106 Gy/sa doz hızında kuartz optik fiberlerin farklı dalgaboyundaki RIA değişimleri. a) 575 nm; b) 635 nm; c) 675 nm ve d) 750 nm 50
- Şekil 4.12.** Farklı doz hızlarındaki gama ışını radyasyonu altında kuvars optik fiberlerin 575 nm dalgaboyundaki RIA değişimleri. Kırmızı ve siyah noktalar sırasıyla 106 ve 402 Gy/sa doz hızlarını göstermektedir 51

- Şekil 4.13.** Ce katkılı a) T1.2 ve b) T2.2 optik fiberlerinin ilk 11 dakikalık ışınlama sürecinde bir dakikalık aralıklarla alınan spektrumları. Bu spektrumlarda her bir dakika yaklaşık olarak 17 Gy değerine denk gelmektedir 53
- Şekil 4.14.** T1.2 (kırmızı nokta), T1.3 (yeşil nokta), T1.4 (mavi nokta) ve T2.2 (mor nokta) fiberlerinin a) 470nm; b) 575 nm; c) 635 nm; d) 675 nm ve e) 750 nm dalgaboylarının doza bağlı RIA değişimleri..... 54
- Şekil 4.15.** T1.3 sintilasyon fiberinde 1007 Gy/sa doz hızında üç hasar (10 dk-168 Gy) seti ve iki iyileşme (10 dk) setinin zamana bağlı olarak değişimi 55
- Şekil 4.16.** T2.3 optik fiberi 1007 Gy/sa doz hızında 30 s (8,4 Gy) ışınlama 5 dk iyileşme setinin zamana bağlı olarak değişimi (20 kez tekrarlanmıştır) 55
- Şekil 4.17.** 106 Gy/sa doz hızında T9.2 (siyah nokta), T9.3 (kırmızı nokta) ve T9.4 (mavi nokta) opti fiberlerinin a) 575 nm; b) 635 nm; c) 675 nm ve d) 750 nm dalgaboylarının doza bağlı RIA değişimleri 56
- Şekil 4.18.** T10.1 optik fiberinin 4 dakikalık ışınlama sürecinde 5 saniye aralıklarla alınan spektrumları 58
- Şekil 4.19.** T10 Ce katkılanmış optik fiberin a) 575 nm; b) 635 nm; c) 675 nm ve d) 750 nm dalgaboylarındaki doz miktarına karşı RIA değişimleri. Burada kırmızı, siyah, mavi ve yeşil noktalar sırasıyla 1007, 106, 25 ve 5 Gy/sa doz hızlarında alınan ölçümlerdir..... 59
- Şekil 4.20.** T14.1 optik fiberinin 11 dakikalık ışınlama sürecinde 50 saniye aralıklarla alınan spektrumları 60
- Şekil 4.21.** Dört farklı doz oranında gama ışını radyasyonu altında dört farklı dalgaboyunda zayıflama gösterilmektedir: a) 575 nm; b) 635 nm; c) 675 nm ve d) 750 nm. Sırasıyla siyah, yeşil ve mavi katı noktalar 402, 106 ve 5Gy/sa'lık doz hızlarını göstermektedir. Kırmızı düz çizgiler fit eğrileridir..... 60
- Şekil 4.22.** T1 optik fiberinin radyasyon dozuna karşılık a) 445 ve 460 nm; c) 675 ve 750 nm dalgaboylarındaki RIA değişimleri ve b ile d) bu dalgaboylarındaki 1007 Gy/sa doz hızında iyileşme süreçleri gösterilmektedir. Kırmızı çizgilerle gösterilen Denklem 4.9 ile elde edilen fit eğrileri ile hesaplanan teorik iyileşme süreçleridir 64
- Şekil 4.23.** a, c) Gama ışını radyasyonu altında dört farklı dalgaboyunda 1007 Gy/sa doz hızında RIA değişimi ve kırmızı düz çizgiler fit eğrileridir; b, d) Kırmızı düz çizgiler, 10,5 Gy ışınımından sonra T2 fiberi için Denklem 4.9 ile hesaplanan iyileşme değerleridir. Siyah, yeşil, mavi ve pembe noktalar

sırasıyla 445 nm, 460 nm, 675 nm ve 750 nm dalgaboylarını göstermektedir 66

Şekil 4.24. T3 fiberi için 106 Gy/sa doz hızında radyasyon altında dört farklı dalgaboyundaki RIA değişimi gösterilmiştir. a, c) 250 Gy toplam dozda RIA değişimi; b, d) Işınlamadan sonra 73 dakikalık iyileşme sürecidir. Siyah, yeşil, mavi ve gri noktalar sırasıyla 445, 460, 470 ve 575 nm dalgaboylarını gösterir..... 67

Şekil 4.25. T10 Ce katkılandırılmış fiberin 25 Gy/sa doz hızında a) 445 ve 460 nm dalgaboylarındaki; c) 675 ve 750 nm dalgaboylarındaki RIA değişimleri ve kırmızı çizgiler fit eğrileri. b) ve d) sırasıyla bu dalgaboylarındaki 20 saatlik iyileşme süreci ve kırmızı çizgiler ile ikinci dereceden kinetik denklemden hesaplanan eğrileridir..... 68

Şekil 4.26. T14 optik fiberinin gama ışını radyasyonu altında a) 445 nm ve c) 670 nm dalgaboyunun RIA değişimleri. b) ve d) radyasyon uygulandıktan sonra 80 dakika ve 3'er saatlik iyileşme süreçleridir. Siyah, yeşil ve mavi katı noktalar sırasıyla 402, 106 ve 5 Gy/sa doz hızlarını göstermektedir 70

Şekil 4.27. T14 optik fiberinin gama ışını radyasyonu altında a) 675 nm ve c) 750 nm dalgaboyunun RIA değişimleri. b) ve d) radyasyon uygulandıktan sonra 80 dakika ve 3'er saatlik iyileşme süreçleridir. Siyah, yeşil ve mavi katı noktalar sırasıyla 402, 106 ve 5 Gy/sa doz hızlarını göstermektedir 71

Şekil 4.28. Sırasıyla 0,05, 0,5, 1 ve 10 kGy/sa'lik bir doz oranlarında 0,5, 5, 10 ve 100 kGy toplam dozlarda gama ışını radyasyonu altında optik fiberlerin farklı dalgaboylarında zayıflama değişimi: a) 430 nm; b) 470 nm; c) 500 nm; d) 600 nm. Siyah, kırmızı, yeşil, mavi ve mor noktalar sırasıyla T1, T2, T3, T14 ve T15 optik fiberlerini göstermektedir..... 72

Şekil 4.29. Işınlanmadan öncesi (siyah daireler) ve sonrası (yeşil daireler) altı fiber için radyasyona bağlı olarak NA'daki değişimleri göstermektedir. Katı kırmızı çizgiler, gauss fit eğrilerine uymaktadır..... 74

Şekil 4.30. Gama radyasyonu ile ışınlanmamış ve ışınlanmış T1, T2, T3, T10, T14 ve T15 optik fiberleri, 337 nm dalgaboyuna sahip N₂ lazer ışığı (fiberlere aynı eksen üzerinde gönderilmiştir) ile uyarıldığında, fotoluminesans ve RIA kaybının farklı toplam radyasyon dozlarındaki düzeylerini göstermektedir 76

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 3.1. Kuartz optik fiberlerin ve Ce katkılanmış sintilasyon optik fiberlerin kor, ceket ve yelek çapları	32
Çizelge 4.1. Optik fiberlerin farklı bölgelerinden kütle spektrometresi ile elde edilmiş element konsantrasyonlarıdır. Birimler ppm ("Parts per million"-milyon başına parça) cinsinden verilmiştir. Ölçüm, algılama eşik seviyesinin altındaysa sayısal veri yoktur	40
Çizelge 4.2. T10 ve T14 Ce katkılanmış fiberlerin ışınlama doz hızları ve toplam doz miktarları	57
Çizelge 4.3. T1, T2, T3, T10 ve T14 fiber optikler için ikinci mertebeden büyüme kinetiği denkleminde elde edilen fit parametreleri	65

1. GİRİŞ

Işığın haberleşmede kullanılması yıllar öncesine dayanmaktadır. İlk çağlarda kızılderililerin dumanla haberleşmesi ışığın haberleşmede kullanılmasının ilk örneklerinden birisidir. 1790 yılında Fransız Chappe kardeşler, ateşi bir ışık kaynağı olarak kullanarak, iki kule arasında bilgiyi bir noktadan başka bir noktaya aktarmışlardır (Selleri 2017). "Optik Telgraf" adını verdikleri bu sistemin dezavantajları haberleşme mesafesinin sınırlı olması ve aktarılan bilginin büyüklüğünün az olmasıdır. Optik fiber teknolojisi olarak nitelendirilebilen ilk tanımlama 1842 yılında hafif kablo olarak isimlendirilen sistemdir. Bu sistem bir kablonun yansımalar yaparak başka bir kablo içerisinden akması şeklinde çalışmaktadır. 1884 yılında Collado'nun hazırlamış olduğu makalede de bu tanıma yer verilmiştir (John 2009).

Gerçek anlamda optik fiber teknolojisinin ilk adımı 1854'te John Tyndall tarafından atılmıştır. Tyndall ışığı bükülmüş bir boru benzeri malzeme kullanarak su ortamından geçirilebileceğini göstermiş ve ışığın eğilebileceği sonucuna varmıştır (Hecht 2004). Tyndall 1870 yılında yapmış olduğu bir deneyde bir silindirik kabın yan yüzeyine delik açarak suyun akmasını sağlamıştır. Silindirik kabın arka yüzünden açılan deliğe denk gelecek şekilde bir ışık kaynağı yerleştirmiştir. Tyndall bu deney sonucunda ışığın akan suyun içerisinden tam yansıma yaparak geçtiğini gözlemlemiştir (Tyndall 1870, 1886). Işığın cam içerisinde iletilmesi ile ilgili bu ilk deneyin, cam-hava ara yüzeyinde meydana gelen kayıplardan dolayı verimli olmadığı görülmüş ve bunun bilgi aktarımına uygun olmadığı sonucuna varılmıştır.

Graham Bell 1880 yılında hafif kabloya alternatif olarak Photophone ismini verdiği bir aygıt geliştirmiştir (Mims 1980). Bu aygıt ses dalgalarını bir ışık huzmesi üzerinden ileten, aynalardan ve selenyumlu detektörlerden oluşan bir sistemdi. Bell bu sistem ile gün ışığını taşıyıcı sinyal olarak kullanmış ve telefon sinyallerini yaklaşık 200 metrelik bir uzaklığa göndermeyi başarmıştır. Ancak bu buluş teknolojik yetersizlik ve hava koşullarının olumsuz etkisinden dolayı yaygınlaşamamıştır.

Bir diğer geliştirilen cihazda 1910 yılında iç yüzeyi metal kaplamalı ve yüksek yansıtma özelliğine sahip Hallow tüpü (Hallow lambası)'dür (Hecht 2004). Hallow lambası elektromanyetik dalgaları geniş alanda kontrol edebilmekteydi. Bununla birlikte sinyal kayıplarının yüksek ve özellikle yön değiştirme eğilimlerinin olması yüzünden uygulamaya geçememiştir.

1950'li yıllarda, bir cam kor etrafı yeterince kalınlıktaki bir tabaka ile kaplanarak ve tam iç yansıma prensibi kullanılarak ışık bir noktadan diğerine verimli bir şekilde iletilmiştir (Hecht 2004). Günümüz optik fiber yapısının ilk temelleri bu deney ile atılmıştır ve bir optik fiberin kor çevresine sarılı yelekten oluşması gerektiği açıkça ortaya koyulmuştur. Kapany 1960 yılında yazmış

olduğu makalesinde optik fiber deyimini ilk kez kullanarak geniş bir okuyucu kitlesine optik fiberi tanıtmıştır (Hecht 2004). Bu gelişmeden sonra Alman fizikçi Manfred Börner 1965 yılında Telefunken araştırma laboratuvarında ilk optik fiber iletim sistemini geliştirmiştir. Bununla ilgili ilk patent 1966 yılında alınmıştır (Börner 1967a,b). Aynı yıl içerisinde İngiliz Standart Telefon ve Kablolar (STC) Şirketinde çalışan Charles K. Kao ve George A. Hockham, optik fiberlerdeki ışığın zayıflamasının kilometrede 20 desibel (dB/km) altına düşürülerek pratik bir iletişim aracı haline getirilebileceği fikrini destekleyen ilk kişiler olmuşlardır (Hecht 2004). O yıllarda optik fiberlerdeki ışığın zayıflamasının saçılma gibi temel fiziksel etkilerden oluştuğu düşünülmekteydi. Charles K. Kao ve George A. Hockham, zayıflamanın bu fikrin aksine optik fiberin yapısındaki safsızlıklardan kaynaklandığını ileri sürmüş ve bu zayıflamayı teorik olarak incelemişlerdir. Kao ve Hockham bu tür optik fiberler için kullanılacak doğru malzemenin, yüksek saflıkta silika camın olması gerektiği sonucuna varmışlardır. Kao bu keşfi ile 2009 yılında Nobel fizik ödülü'ne layık görülmüştür (Kao ve Hockham 1986). Bu büyük keşiften sonra hızlı bir şekilde gelişmeye başlayan optik fiber üretimi küçük ölçekte yapılabilmekteydi. Yüksek kaliteli optik fiberler saniyede 2 metre kadar üretilmekteydiler. Kimya mühendisi olan Thomas Mensah 1983 yılında üretim hızını saniyede 50 metreye çıkarmayı başarmıştır ve böylece optik fiber kablolar geleneksel bakır kablolarla göre daha ucuz hale gelmiştir (Deneka vd. 1988). Bu yenilikler optik fiber iletişim çağının başlamasını sağlamıştır.

Günümüzde ise modern teknoloji ürünlerinde kullanılan optik fiberler; görüntü ve veri transferinde büyük bir yere sahiptirler. Genellikle veri transferinde kullanılan bu optik fiberler havacılık alanında, su altı ve endüstriyel uygulamalarda sıklıkla kullanılmaktadırlar. Bu tür uygulamalarda algılayıcı olarak da kullanılan optik fiberler sıcaklık, basınç, dönme, titreşim, burulma ve manyetik alan ölçümleri için ideal bir alternatiftir (Kendir 2012). Bunun yanında CERN (Avrupa Nükleer Araştırma Merkezi), NASA (Ulusal Havacılık ve Uzay Dairesi), nükleer santraller, radyoloji ve tıp teknolojileri gibi radyasyon içeren birçok ortamlarda da kullanım alanına sahiptirler.

Bir ortamdaki radyasyonu algılamak için sezyum iyodür (CsI) ve sodyum iyodür (NaI) gibi inorganik tuz kristalleri gama katı sintilasyon dedektörlerinde yaklaşık 50 yıldır kullanılmaktadırlar (Guo vd. 2013; Tao ve Jayaprakash 2009). Doğal ortamlarda bu tuz kristalleri kolaylıkla sulanabilmektedirler ve bunun sonucunda işlevlerini yitirebilmektedirler. Böyle bir durumun önüne geçebilmek için tuz kristallerinin koruyucu bir katman ile kaplanmaları gerekmektedir. Bu hem maliyet artışına hem de ölçüm hassasiyetinde azalmalara neden olabilmektedir. Optik fiberler ile yapılan radyasyon çalışmaları sonucunda fiberlerin bir radyasyon algılayıcısı olarak da kullanılabilmesi görülmüştür (Guo vd. 2013; Jang vd. 2011). Bilgi transferinde büyük avantaj sağlayan optik fiberlerin yanında radyasyon algılaması için kullanılacak nadir toprak elementi ile katkılı sintilasyon optik fiberleri de geliştirilmeye başlanmıştır (Park ve Kim 2004; Simon 1992). Bu

tür fiberler elektromanyetik alan altında, geniş band aralığında çalışabilme, düşük kayıplarla çoklu sinyal iletimi yapabilme yeteneklerinin yanında küçük boyutlu, hafif olmaları gibi birçok avantaja sahiptir. Bu avantajlarından dolayı Geiger Müller ve yarı iletken dedektörler gibi radyasyon algılama işlemi yapan cihazlara bir alternatif olarak üretilmektedirler.

Optik fiberlerin radyasyonlu ortamlarda veri iletimi ve sintilasyon optik fiberlerinin radyasyon ölçümünde dedektör olarak kullanılmaları içsel ve dışsal birçok parametreye göre araştırılmalarını gerektirmektedir. Bu parametreler optik fiberin tipi, koruna ve yeleğe katkılanırılan elementler, maruz kaldığı radyasyon türü ile radyasyon doz miktarı, doz hızı vb. dir. Bu parametrelerin bir optik fiberin kullanılma amacına ve ortamına bağlı olarak uygun seçimleri verimliliği yüksek bir optik sistemin üretiminde büyük bir pay sahibidir. Radyasyona dayanıklılığı bakımından birçok katkılanırılmış optik fiber türüne göre iyi sonuçlar alınan kuartz (silika) optik fiberler üzerine bir çok çalışma yapılmıştır (Akchurin vd. 2008; Dumanoglu vd. 2002; Girard vd. 2004). Bu optik fiberlerin korundaki hidroksil iyon (OH^-) konsantrasyonunun, optik fiberi radyasyona daha dayanıklı hale getirdiği bulunmuştur (Gavrilov vd. 1994; Kaya vd. 1984). Kuartz optik fiberlerinin kullanım alanları gün geçtikçe artmaktadır ve bunun için optik fiberlerin kor ve yelek yapılarına çeşitli metal, yarı-metal ve ametal elementlerin katkıları yapılarak geliştirilmek istenmiştir. Girard vd. 2004'de yaptıkları çalışmada silika optik fibere germanyum (Ge), fosfor (P) ve flor (F) katkılanmaları yapmışlardır. Ge ve F katkılanırılmış optik fiberin saf silikaya göre radyasyondan daha çok etkilendiği görülmüştür. Ge ve F elementi ile birlikte P katkılanırıldığında da optik fiberin radyasyondan etkilenmesinin giderek arttığı gözlenmiştir (Girard vd. 2004). 2007 yılında yapılan bir diğer çalışmada nadir toprak elementi terbiyum (Yb) ile katkılı optik fibere alüminyum (Al), Ge ve P katkıları yapılarak radyasyona karşı tepkisi incelenmiştir. Yb katkılı optik fiberin radyasyona dayanıklı olduğu fakat Al, Ge ve P katkıları eklendiğinde radyasyona karşı direncinin azaldığı görülmüştür (Agnello vd. 2013; Fox vd. 2007). Bu tür katkılanmalar, kullanım alanı için uygun optik fiberlerin üretiminde başarılı olsa da radyasyonlu ortamlarda dezavantajlara da sahip olabilmektedir.

Nadir toprak elementi katkılı sintilasyon optik fiber çalışmalarında en dikkat çekici sonuçlar Ce katkılı olanlarda görülmüştür. Bu çalışmalarda, Xing vd.'nin 2012 yılında erbiyum (Er) ve Er/Ce katkılı fiberleri 5 kGy toplam dozda radyasyona maruz bırakmışlardır ve Er/Ce katkılı fiberlerin Er katkılı fiberlere göre daha dayanıklı olduğu gözlemlenmiştir. Xing vd.'nin elde ettiği bir diğer sonuç da nadir toprak elementleri ile katkılanmış fiberlerin gama ışınımına nadir toprak elementi içermeyen fiberlere göre daha duyarlı olduklarıdır (Xing vd. 2012). Kiryanov vd. 2014 yılında Ce ve Ce/altın (Au) katkılanırılmış optik fiberleri incelemişlerdir. Yapmış oldukları bu çalışmada Ce katkılı fiberin, Ce katkısı olmayan optik fibere göre daha dayanıklı olduğu sonucuna varmışlardır (Kiryanov vd. 2014). Ce katkısının optik fiberleri radyasyona karşı sağlaılaştırıldığı bu çalışmalarda net

bir şekilde görülmüştür. Bu tür çalışmaların çeşitlendirilmesi, daha iyi özelliklere sahip, radyasyona direnci yüksek optik fiberlerin üretilmesine olanak sağlayacaktır.

Bu tez çalışmasında Texas Tech üniversitesi adına ve bu çalışmada kullanılmak üzere özel olarak üretilen dört adet kuartz optik fiber ile altı adet tek veya iki kora sahip Ce katkılı sintilasyon optik fiberlerinin Co-60 radyasyonuna karşı göstermiş oldukları tepkiler eş zamanlı ve eş zamanlı olmayan ölçümler gerçekleştirilerek detaylı bir şekilde incelenmiştir.

Konunun teorik kapsamında optik fiberler ve türleri tanımlanmış, ışığın optik fiber içerisindeki ilerleme mekanizması anlatılmıştır. İlerleyen bölümlerde özellikle çalışmanın temelini oluşturan radyasyon kaynağı Co-60 tanımlanarak optik fiberlerde meydana gelen kayıp mekanizmaları ve radyasyonun optik fiber üzerindeki etkilerinden bahsedilmiştir. Materyal ve metod kısmında eş zamanlı ölçüm, iyileşme süreci, nümerik açıklık (NA) ve fotoluminesans ölçümlerinin deney düzenekleri detaylı bir şekilde anlatılmıştır. Radyasyona bağlı zayıflamalar (Radiation-Induced Attenuation-RIA) ve iyileşme süreci hesaplamaları ile ilgili gerekli bilgiler verilmiştir.

Bulgular ve tartışma kısmında kullanılan optik fiberlerin ilk olarak kimyasal yapılarındaki element analizleri enerji dağılımlı spektrometre (Energy Dispersive Spectrometer-EDS) ve kütle spektrometresi ölçümleri ile doğrulanmıştır. Optik fiberlerin kor, yelek ve ceket kısımlarındaki element yüzdeleri sunulmuştur. Daha sonraki aşamada düşük ve yüksek toplam doz miktarlarında yapılan ölçümler sonucunda meydana gelen hasar ve iyileşme süreçleri tartışılmıştır. Işık şiddetinin maksimum olduğu dalgaboylarında optik fiberlerin RIA'ları hesaplanarak karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. İyileşme, NA ve fotoluminesans ölçüm sonuçları literatürde bulunan çalışmalar ile değerlendirilerek sunulmuştur. Aynı zamanda, optik fiberlerin hasar ve iyileşme süreçleri için ikinci dereceden hasar ve iyileşme kinetiği denklemleri kullanılarak teoriksel bir yaklaşım yapılmıştır. Ölçümü gerçekleştirilen optik fiberlerin deneysel sonuçları ile teorik sonuçların tutarlılığı gösterilmiştir.

Sonuç bölümünde kuartz ve Ce katkılı optik fiberler ile yapılan çalışmadan elde edilen bulgular ışığında kuartz optik fiberlerin radyasyona karşı dayanıklı olduğu gösterilmiştir. Fe, Mg elementi katkılarının kuartz fiberleri, saf kuartzta göre göreceli olarak radyasyona karşı zayıflattığı tespit edilmiştir. Ce katkılı optik fiberlerin merkezindeki kor-1'e katılanan Ce elementi yerine halka şeklinde kuartz kor-1 etrafına yerleştirilen Ce elementinin optik fiberi radyasyona karşı daha dirençli hale getirdiği görülmüştür. Ayrıca Al, P elementlerinin katılanması optik fiberlerin radyasyona karşı direncini büyük ölçüde düşürdüğü gözlemlenmiştir.

Elde edilen sonuçlar doğrultusunda yapısal ve kimyasal olarak tarafımızca önerilen Ce katkılanmış bir sintilasyon fiber üretimi gerçekleştirilmiştir. Testleri gerçekleştirilen bu optik fiberin bu tez çalışmasında ölçümleri

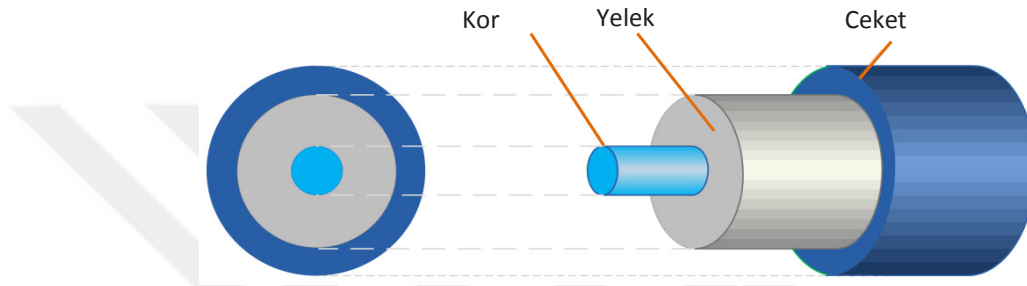
gerçekleştirilen Ce katkılı tüm optik fiberler arasında en iyi radyasyon direncine sahip optik fiber olduğu görülmüştür (uygun üretim tekniği ve geometrilerde). Bu optik fiberin yüksek dozlardaki hasar ve iyileşme süreçleri, NA ve fotoluminesans ölçümleri bu çalışmada paylaşılmıştır.



2. KAYNAK TARAMASI

2.1. Optik Fiber

Optik fiberler 300 ile 2000 nm dalgaboyu aralığında çalışabilen, genel olarak bilgi aktarımı için kullanılan silindirik bir yapıya sahip elektromanyetik dalga kılavuzlarıdır. Optik fiberler büyük bant genişliği, küçük hacim ve ağırlık, elektiksel yalıtım, düşük iletim kaybı, gerilme ve bükülmeye karşı dayanıklılık, düşük maliyet gibi avantajlara sahiptirler.

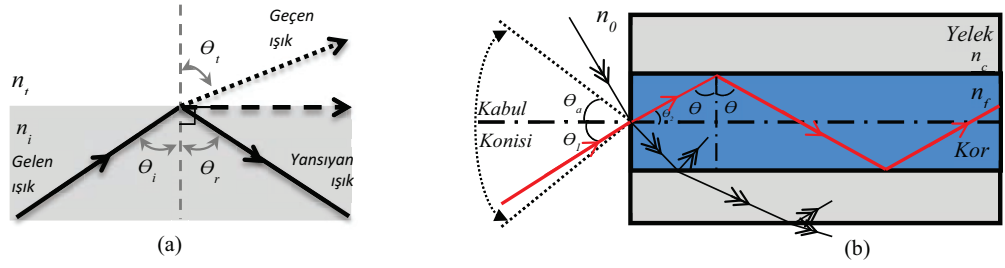


Şekil 2.1. Optik fiberin genel yapısı

Optik fiber Şekil 2.1'de gösterildiği gibi en temel olarak 3 farklı katmandan oluşmaktadır. n_f kırılma indisli merkezdeki katman kor "core" (8-600 μm) olarak isimlendirilir. Koru çevreleyen ikinci katman yelek "cladding"tir (125-800 μm). Kora göre daha düşük kırılma indisli (n_c) bu katman ışığın tam yansıma prensibi ile optik fiber içerisinde geçmesini sağlar. Başka bir deyişle ışığın ikinci ortama geçmesini engeller. Bu yeleği örten üçüncü katman ceket "jacket"tir (Gowar 1993). Burada kırılma indisi olarak bahsedilen terim bir materyaldeki ışığın hızının bir ölçüsüdür. Işık hızı vakum (kırılma indisi 1'dir) ortamında 300000 km/s hızla hareket etmektedir. Tipik bir telekomünikasyon optik fiberinin kırılma indisi 1500 nm dalgaboyunda 1,444'tür ve kırılma indisi arttıkça ışık optik fiber içerisinde daha yavaş hareket eder (Chakrabarti 1998).

2.1.1. Kabul açısı, nümerik açıklık ve bağıl kırılma indisi farkı

Işığın optik fiber içerisinde ilerlemesi tam iç yansıma ilkesine dayanır. Şekil 2.2.a'da n_i kırılma indisine sahip yoğun bir ortamdan, n_t kırılma indisine sahip daha az yoğun bir ortama gönderilen ışığın geçmesi sırasında kırılma açısı (θ_t), geliş açısından (θ_i) daima büyük olur. θ_i açısının belirli bir kritik değerinde (θ_c) kırılan ışık iki ortam arasındaki sınır yüzeyine teğet olarak ilerler. Bu durumda kırılma açısı 90° ve $\sin\theta_t = 1$ olur ve



Şekil 2.2. a) Bir ışık ışınının çok yoğun ortamdan az yoğun ortama geçerken izlediği yolların gösterimi; b) Optik fiberde ışık iletimi

$$\sin\theta_c = \frac{n_t}{n_i} \quad (2.1)$$

dir. Bu kritik açının altındaki geliş açısı değerlerinde ışık ikinci ortama geçer, üzerindeki değerlerde ise ışık ikinci ortama geçemez ve geldiği ortama geri yansır. Bu olay tam iç yansıma olarak adlandırılır. Bu tam iç yansıma olayı, optik fiberlerdeki iletimin temel özelliğidir ve ışığın optik fiber içerisinde ilerlemesine neden olur. Işık tam iç yansıma yapmasına rağmen, ikinci ortama genliği azalan ilerlemeyen elektrik ve manyetik alan titreşimleri geçer (Hecht 2010).

Şekil 2.2 b'de n_0 kırılma indisine sahip bir ortamdaki optik fiberin koruna θ_1 geliş açısı ile gelen bir ışık ışınının tam yansımaya uğrayarak ilerleyebilmesi için şekilde de gösterilen kabul konisi ($2\theta_a$) olarak isimlendirilen bölgeden optik fibere giriş yapılmalıdır. Böylelikle ışık θ_2 kırılma açısı ile kor içerisine girer ve θ açısıyla tam yansımaya uğrayarak ilerler. Kabul açısından (θ_a) daha büyük açılarda gelen ışık ışınının bir miktarı yelek ortamına geçer bir miktarı da geri yansır.

Optik fiberler için önemli bir diğer parametre de kabul açısına bağlı olarak fiberin ışık toplama kabiliyetinin bir ölçüsü olan nümerik açıklıktır (NA) (Hecht 2010). NA , Denklem 2.2 ile verilmektedir.

$$NA = n_0 \sin\theta_a = (n_f^2 - n_c^2)^{1/2} \quad (2.2)$$

Genel olarak $n_0 = 1$ (hava) için $NA = \sin\theta_a$ olur (maksimum 1'dir). Daha genel bir ifadeyle, NA , optik fiberden giren yada çıkan ışığın optik fiberin eksenine yaptığı açının sinüsüdür. NA değeri yüksek olan bir optik fiberin, ışık iletimi de yüksektir (Agrawal 2012).

Bir optik fiberin bağıl kırılma indisi farkı (Δ), kor ve yeğin kırılma indisleri arasındaki farkın bir ölçüsü olarak tanımlanmaktadır. Normal bir optik fiber için Δ , % 0,5-4 arasındadır ve Δ 'nın büyük değerleri ışığın dağılmasına (dispersiyon) neden olur. Bu da ışık kayıplarının artması ile sonuçlanır. Optik fiberin bağıl kırılma indisi farkı,

$$\Delta = \frac{n_c - n_f}{n_c} \quad (2.3)$$

ile verilir ve yüzde (%) ile temsil edilir. Optik fiberde, kırılma indisi farkı küçük olduğundan iki yüzey arasındaki kritik açı değeri de küçülecektir. Bu açının üstündeki açılarda ışık daha kolay bir şekilde ve daha geniş bir açı bölgesinde tam yansıma yapabilecektir (Chakrabarti 1998).

2.1.2. Normalize frekans (V)

Normalize frekans (V sayısı), ışığın optik fiber içerisinde ilerleyebilecek kip sayısını göstermektedir ve kiplerin kor ve yelekteki güç oranlarını belirler. Düşük bir V sayısı, mikro bükülme kayıplarına ve optik fiberin ceketinin soğurma kayıplarına karşı fiberi duyarlı hale getirir. Bununla birlikte, yüksek bir V sayısı, kor veya kor-yelek arayüzeyinde saçılma kayıplarını arttırabilir (Snyder ve Love 1983). Normalize frekans şu şekilde tanımlanır;

$$V = \frac{2\pi a}{\lambda} \sqrt{n_c^2 - n_f^2} = \frac{2\pi a}{\lambda} NA \quad (2.4)$$

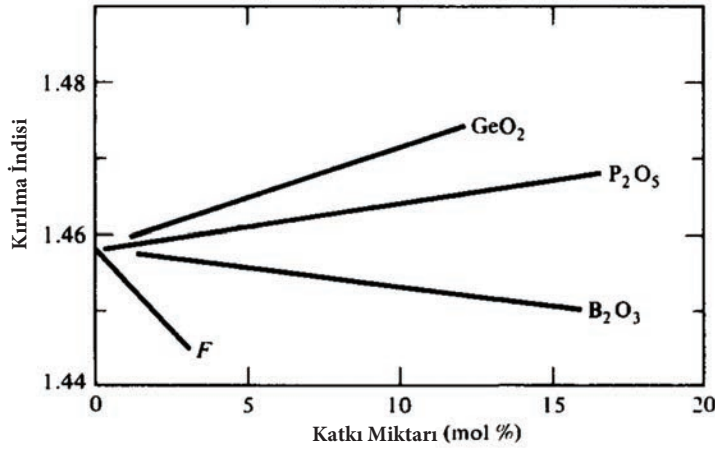
Burada; λ vakum ortamındaki dalgaboyu ve a optik fiberin korunun yarıçapıdır. Çok kipli optik fiberler yüksek V değerlerine sahip olabilirler. Tek kipli optik fiberler için $0 \leq V \leq 2,405$ aralığında düşük değerlerde olmalıdır. .

2.2. Optik Fiber Türleri

Optik fiberleri; yapımında kullanılan malzeme türüne göre cam optik fiberler ve plastik optik fiberler; kip sayısına göre tek kipli ve çok kipli; indis profiline göre basamak indisli ve dereceli indisli optik fiberler şeklinde gruplara ayırmak mümkündür.

2.2.1. Cam optik fiberler

Cam, kristal yapısı olmayan (amorf) katı bir malzemedir. Genel olarak cam, silikatlardan ve yüksek sıcaklıkta kaynaşmış bir alkaliden oluşan kırılğan ve ışığı geçirebilen bir maddedir. Metal oksitlerin, halojenürlerin, sülfürlerin veya selenitlerin, çeşitli elementler ile karışımından elde edilebilirler. Piyasada ticari olarak satılan camların çoğu, eritme ve söndürme ile hazırlanmaktadır. Alternatif olarak, cam bir buhar veya sıvı çözeltiden çökeltme yolu ile elde edilebilir. Çeşitli şekillerde ve boyutlarda temin edilebilen ticari camların çoğunluğu silika (SiO_2)



Şekil 2.3. Silika camının kırılma indisinin katkı yüzdesi ile değişimi (Keiser 1991)

temelli malzemelerdendir (Chakrabarti 1998). Genel olarak bilinen üç tür cam çeşidi vardır: Bunlardan ilki doğal malzemeden üretilen kuartz veya silika olarak isimlendirilen ve içerisinde düşük OH⁻ içeren amorf yapıda ultraviyole geçirgenliği düşük olan camdır. İkincisi ise silikanın eritilerek sentetik olarak üretilmesi ile elde edilen eritilmiş (fused) silikadır. Bu eritilmiş silika üretim sürecinde içerisinde kalan safsızlıklar nedeniyle kızılötesi geçirgenlikleri düşüktür. Üçüncü tür ise eritilmiş silikanın saflaştırılarak üretilen temiz eritilmiş silika (clear fused silica)'dır.

Cam optik fiber, saf silika (SiO₂) ile düşük erime noktalı sodyum borosilikat, sodyum kalsiyum silikatlar ve kurşun silikatlar gibi bileşikler katkılanarak geniş bir ayırım yapılabilir. Optik fiber imalatında kullanılacak malzemenin sağlaması gereken şart, kırılma indisinin değiştirilebilmesidir. Saf SiO₂ 850 nm dalgaboyunda 1,458'lik kırılma indisine sahiptir. Flor veya diğer metal oksitler gibi çok az miktarda katkı maddesinin eklenmesiyle, saf silikanın kırılma indisi eklenen katkı madde miktarı ile değiştirilebilir. GeO₂, P₂O₅ molekülleri gibi katkı maddeleri kırılma indisini yükseltirken, B₂O₃ molekülü ve Flor elementi eklenmesi ile de kırılma indisi azaltılabilir (America 2001; Chakrabarti 1998; Keiser 1991) (Şekil 2.3). Tipik bir optik fiber; saf SiO₂ yeleğe karşılık GeO₂ gibi katkılı SiO₂ kordan oluşabilmektedir. Silika hem kısa hem de uzun mesafe optik fiber iletişim sistemleri için yaygın olarak kullanılır. Hem görünür hem de yakın kızılötesi bölgelerde yüksek şeffaflığa sahip malzemelerdir. Cam optik fiberler, düşük kayıpları sebebiyle uzak mesafe haberleşmesinde ve haberleşme dışı diğer uygulamalarda da tercih sebebidir (Chakrabarti 1998).

2.2.2. Plastik optik fiberler

Optik fiberin iletim prensipleri ile çalışabilen plastikten yapılan optik fiberler de başarılı bir şekilde ticari uygulamalarda kullanılmaktadır. Hammadde olarak plastik (tipik olarak bir polistiren-polystyrene veya polimetil metakrilat- polymethyl

methacrylate) kullanılan bu optik fiberlerde kullanım amacına göre SiO₂ korlu ve plastik yekekli veya tamamen plastikten yapılabilmektedirler. SiO₂ korlu ve plastik yekekli olan optik fiberlerde, koru sıkı bir şekilde saran yekek elde etmek için, SiO₂ kor, yüksek sıcaklıktaki polimer banyosundan çekme yöntemi ile üretilir. Işık miktarının çok az bir kısmının yekekta taşındığı basamak indisli optik fiberlerde bu yöntemle üretilmektedirler. Bunlar, maliyeti düşük, orta mesafeli ilettime uygun olan optik fiber sistemleridir (John 2009). İkincisi ise yani tamamen plastikten üretilen optik fiberler hem kor hem yekek bölgesi plastik malzemeden yapılmaktadırlar. Bu tip optik fiberlerde kayıp daha çok olduğundan sadece görünür bölgede pratik kullanıma sahiptirler. Kısa mesafelerde ve düşük bant genişlikli haberleşme sistemlerinde tercih edilmektedirler.

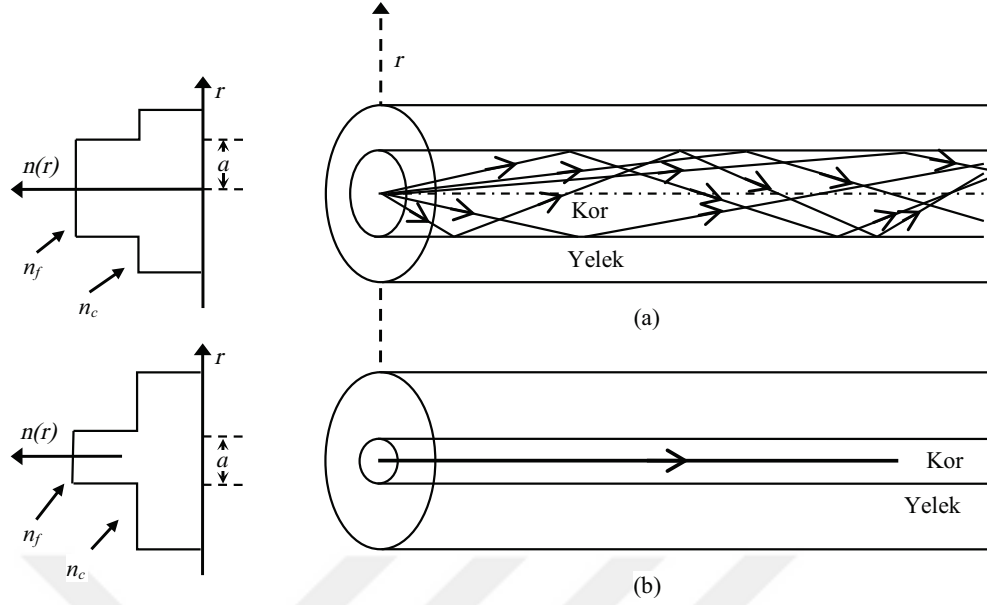
Plastik optik fiberlerin kullanılmasının üç ana avantajı vardır. İlk olarak, cam optik fiberlerden çok daha sağlamdırlar. Cam optik fiberlere göre çok daha fazla darbe, basınç ve strese dayanabilirler. Bu nedenle, otomobillerde darbe basınç gibi zorlu ortamlara maruz kalabilecekleri için tercih edilmektedirler. İkincisi, çok daha esneklerdir, işlenmeleri cam optik fiberlere göre daha kolaydır ve bu nedenle plastik optik fiberler daha kolay boyutlandırılabilirler. Üçüncü avantajı ise genellikle cam optik fiberlere göre birim maliyetleri daha düşüktür. Öte yandan, plastik optik fiberler bazı önemli dezavantajlara da sahiptirler. Cam fiberlerden daha yüksek bir kayıp oranına sahiptirler ve genellikle çok kısa mesafelerde (maksimum 100 m'de) kullanılmaktadırlar. Plastik optik fiberlerin en uygun çalışma dalgaboyu 650 nm'dir (kırmızı LED (Işık yayan diyot-"Light Emitted Diode")'ler ile kullanılır). Bu dalgaboyunda kilometre başına yaklaşık 300 dB'lik bir zayıflama değerine sahiptirler. Ayrıca, sınırlı bir çalışma bant genişlikleri vardır. Bu nedenle telekomünikasyon amaçlı nadiren kullanılmaktadırlar (Bailey ve Wright 2003).

2.2.3. Basamak indisli optik fiberler

Basamak indisli optik fiberler; kor kırılma indisi sabit ve yekek kırılma indisi korunkinden küçük olan optik fiberlerdir. Bu fiberlerin kırılma indisi profili;

$$n(r) = \begin{cases} n_f, & r < a(kor) \\ n_c, & r \geq a(yekek) \end{cases} \quad (2.5)$$

ile verilir (Derickson 1998; Gowar 1993; Keiser 1991). Burada 'a' kor ve yekeği belirleyen parametredir, 'r' kor yarıçapını göstermektedir. Basamak indisli optik fiberlerde, çok kipli (kor çapı 50-600 μ m, yekek çapı 125-800 μ m) ve tek kipli (kor çapı 8-11 μ m, yekek çapı 125 μ m) olmak üzere ikiye ayrılırlar. Tek kipli fiberlerde ışık ışını tek bir yol üzerinde hareket ederken (Şekil 2.4.b) çok kipli fiberde tam iç yansıma yapan meridyonel ışık ışını (fiber içerisinde belirli düzlemler üzerinde ilerleyen ışın) ve fiber boyunca ilerledikçe açılmal "helisler" çizen vida ışınları (skew



Şekil 2.4. Basamak indisli optik fiberde kırılma indisi profili ve ışın iletimi a) Çok kipli; b) Tek kipli

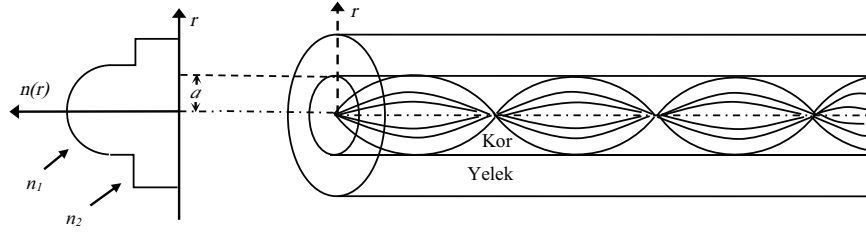
rays) olarak adlandırılan ışınlar şeklinde ilerlerler (Şekil 2.4.a).

Tek kipli basamak indisli optik fiber, sadece bir tek kip taşıdığından, düşük değerli bir kipler arası dispersiyona (taşınan ışık atmalarının genişlemesi) sahiptir. Bu nedenle yüksek bant genişlikli uygulamalarda kullanılabilirler. Düşük bant genişlikli uygulamalar için çok kipli basamak indisli optik fiberler uygun bir iletim ortamı sağlamaktadırlar.

2.2.4. Dereceli indisli optik fiberler

Dereceli indisli optik fiberler, kor içinde değişken bir kırılma indisine sahip olan optik fiberlerdir. Kor kırılma indisi, merkezde en yüksek değerdedir ve korun dış kenarına doğru azalmaktadır. Bu tür optik fiberlerde ışınlar, Şekil 2.5'de gösterildiği gibi optik fiber koru içerisinde eğrilmiş yollar izlerler ($n_1 = n_f, n_2 = n_c$). Korun kesiti boyunca kırılma indisi profilinden dolayı yüksek-alçak kırılma indisli arayüzeyler ortaya çıkmaktadır. Bu da ışınların çok sayıda kırılma gerçekleştirmesine sebep olmaktadır (Wilson ve Hawkes 2000). Kırılma indisi profili sebebiyle bu optik fiberler, basamak indisli çok kipli optik fiberlere göre daha az kipler arası dispersiyona sahiptir. Bu özelliğiyle, uzun mesafeli yüksek bant genişlikli haberleşmeye olanak sağlarlar.

Bu optik fiber türlerinde NA (Denklem 2.2) kırılma indislerine bağlı olarak tek kipli ve dereceli indisli (Franzen vd. 1989; Saman ve Nahlah 2012) fiberler için hesaplanabilir fakat çok kipli basamak indisli fiberler için bu formülden hesaplamak oldukça zordur.



Şekil 2.5. Çok kipli dereceli indisli optik fiberlerde kırılma indis profili ve ışın iletimi

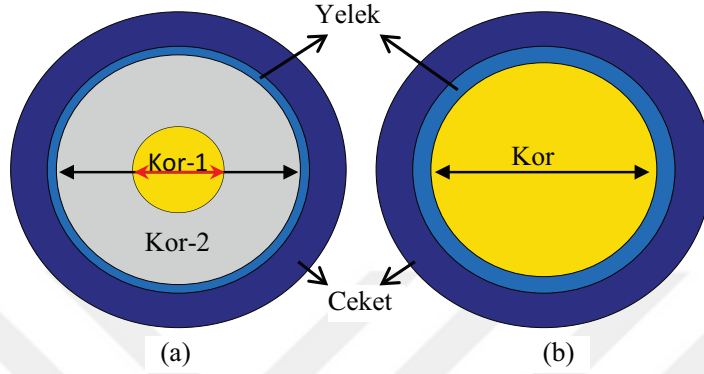
2.3. Sintilasyon, Sintilasyon Detektörleri ve Sintilasyon Fiberleri

Sintilatör, iyonlaştırıcı radyasyon ile uyarıldığında parıldama özelliği gösteren bir malzemedir. Işıldama özelliğine sahip bu tür malzemelerin atomları, bir parçacık ile çarpıştığı zaman onun enerjisini soğurur ve soğurduğu bu enerjiyi parıldama (sintilasyon) olarak yayar. Bazı durumlarda yüksek enerji seviyesinden daha düşük enerji seviyesine geçişte parıldama gecikmeli olarak gerçekleşebilmektedir (White 1988). Bu da geçişin türüne ve gelen ışığın dalgaboyuna bağlıdır. Bu tür parıldamalar floresans veya fosforesans olarak da isimlendirilmektedirler.

İlk sintilatör 1903 yılında Sir William Crookes tarafından bir ZnS ekranda kullanılmıştır (Dyer 2004; Leo 1987). Bu ekran tarafından üretilen parıldamalar karanlık bir odada mikroskop yardımı ile görülebilmştir. Spintharoscope olarak isimlendirilen bu cihaz çok dikkat çekmese de 1944 yılında Curran ve Baker tarafından yeni geliştirilen fotoçoğaltıcı tüp yardımıyla çıplak gözle sintilasyonlar görülmüştür (Leo 1987). Bu modern sintilasyon dedektörlerinin ortaya çıkmasını sağlamıştır.

Bir sintilatör, bir fotoçoğaltıcı tüp, fotodiyot veya silikon fotoçoğaltıcı gibi bir elektronik ışık sensörüne bağlandığında bir sintilasyon detektörü elde edilir. Bu sistemde fotoçoğaltıcı tüp sintilatör tarafından yayılan ışığı soğurarak bunu fotoelektrik etki yoluyla fotoelektronlar şeklinde yeniden yayar. Fotoçoğaltıcı tüpe gelen bu fotoelektronlar bir sinyal olarak kaydedilerek gelen parçacık hakkında gerekli bilgi elde edilir (Toccafondo 2015). Günümüzde radyasyon algılayıcı olarak kullanılan bu sintilasyon dedektörleri katı (Antresan kristalleri, sodyum iyodür (NaI) vb.), sıvı (p-terfenil ($C_{18}H_{14}$), butil PBD ($C_{24}H_{22}N_2O$) vb.) ve gaz (seryumla aktive edilmiş lityum veya bor silikatları) tipi malzemelerden oluşmaktadırlar. Gelişen teknoloji ve kullanılan sintilasyon dedektörlerinin çeşitli dezavantajlarından dolayı sintilasyon özelliği gösteren optik fiberler üretilmeye başlanmıştır. Bu sintilasyon fiberleri, optik fiberlere benzer bir yapıda kor, yelek ve ceketten oluşmaktadır. Bunların korları, radyasyon ile etkileşime girerek sintilasyon ışığını oluşturmaktadırlar (Mapelli 2011).

Sintilasyon fiberleri tek kor (Şekil 2.1.b) veya ikili kor (Şekil 2.6.a) vb. yapılarında tasarlanmaktadır. Bu fiberlerin koruna (veya korlarına) çeşitli oranlarda nadir toprak elementleri (Tb, Ce, Er, Yb vb.) katkılandırılmaktadır (Kiryarov vd. 2014). Katkılanacak olan elementlerin kararlı, çözünebilir, radyasyon toleransı yüksek ve verimli olması gerekmektedir.



Şekil 2.6. Sintilasyon fiberlerinin yapısı

Sintilasyon fiberleri; hızlı sinyal iletimi (hız kapasitesi), iyi optik özellikler (uzun mesafelerde sinyal iletimi), iyi mekanik özellikler (esneklik) ve düşük kütle vb. özelliklere sahiptirler (Simon 1992). Bu özelliklerinden dolayı, sintilasyon fiberleri yüksek enerji fiziği yada parçacık fiziğinde iz sürücü (tracking), kalorimetre (calorimetry), tetikleme (triggering) vb. ölçüm sistemlerinde kullanılmaktadırlar (Knoll 2010). Aynı zamanda sintilasyon fiberleri radyoaktif maddelerden çıkan yüksek enerjili radyasyonun (X-ışını, gama ışını (γ), beta (β) ve alfa (α)) tespiti için de kullanılabilir (Park ve Kim 2004; Tao ve Jayaprakash 2009).

2.4. Optik Fiber Kayıpları

Optik fiberlerde iletim kayıpları, fiberin tüm özelliklerini etkileyen en önemli etkenlerden biridir. Optik fiberdeki kayıplar, ışık gücünde bir azalmaya neden olur ve böylece sistemin bant genişliğini, bilgi iletim hızını, verimliliğini ve sistemin genel kapasitesini önemli ölçüde azaltabilirler. Optik fiber kayıpları genel olarak saçılma, soğurma ve eğilme (bükülme) kayıpları olarak tanımlanmaktadır.

Zayıflama, ışık optik fiber içerisinde yol alırken meydana gelen güç kaybı olarak tanımlanır ve dB/km olarak ölçülür. Bu kayıp, plastik fiberler için 300 dB/km, tek kipli cam fiberler için 0,21 dB/km civarındadır. Genel koşullar altında, bir optik fiberin içinde yayılan ışığın ortalama optik gücündeki (P) değişimler Beer-Lambert yasasına tabidir (Swinehart 1962):

$$\frac{dP}{dz} = -\alpha P \quad (2.6)$$

Burada α zayıflama katsayısıdır. $P_{\text{giriş}}$, L uzunluğundaki bir optik fibere gönderilen ışığın giriş gücü ise, $P_{\text{çıkış}}$ çıkış gücü;

$$P_{\text{çıkış}} = P_{\text{giriş}} \exp(-\alpha L) \quad (2.7)$$

şeklinde ifade edilir. Buradan optik fiber kaybı (optik sinyal zayıflaması) α ;

$$\alpha(\lambda) = \frac{10}{L} \log \frac{P_{\text{giriş}}}{P_{\text{çıkış}}} \quad (2.8)$$

olarak elde edilir.

2.4.1. Saçılma kayıpları

Saçılma ile oluşan kayıplar, mikroskopik yoğunluk farkları, yabancı atom öbekleri ve eklenen oksitlerin (SiO_2 , GeO_2 ve P_2O_5) bölgesel olarak yarattığı yapısal değişimlerden kaynaklanır (Keiser 1991). Bu yapısal değişimlerin homojen olmamasından dolayı kırılma indisinde meydana gelen değişimler optik fiberin performansında büyük rol oynarlar. Kırılma indisindeki değişimler Rayleigh türü saçılmalara yol açmaktadırlar. Rayleigh saçılması sebebiyle soğurma sabiti, α_R ;

$$\alpha_R = \frac{8\pi^3}{3\lambda^4} n^8 p^2 \beta_T k_B T_F \quad (2.9)$$

şeklinde tanımlanabilir. Burada, k_B , Boltzman sabiti, β_T , sabit sıcaklıkta maddenin sıkıştırılabilirliği, T_F , yoğunluk farkı yaratan bölgelerin oluşturduğu optik sıcaklık (optik fiberin donma sıcaklığı), p , fotoelastik katsayısıdır (John 2009; Keiser 1991).

Rayleigh saçılması, ışığın dalgaboyunun artmasıyla hızlı bir şekilde azalmaktadır. Bu saçılma, 1000 nm'den daha küçük dalgaboyları için en baskın kayıp mekanizması olarak bilinmektedir. Silika optik fiber için 1000 nm üzerindeki dalgaboyları için kırmızı ötesi soğurma baskın hale gelmektedir.

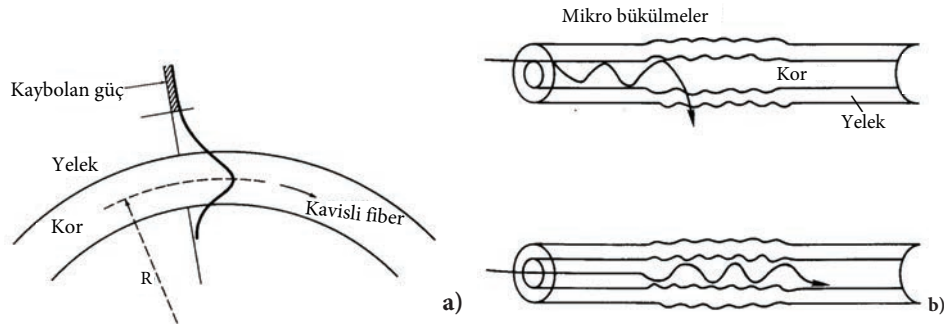
2.4.2. Soğurma kayıpları

Optik fiberlerde soğurma kayıpları üç farklı mekanizmanın varlığından kaynaklanırlar:

- a) Atomik hatalar: Optik fiberin üretilmesinden önce oluşturan ham maddenin hazırlanması sırasında sıcaklık 1400 °C civarındadır. Bu ham madde eritilerek optik fiber haline getirilir. Bu işlemler sırasında optik fiber korunun yapısında bulunan moleküllerin farklı konumlara yerleşmesinden ve bazı bölgelerde kümelenmeler oluşturarak burada yoğunluk farkı yaratmasından dolayı kaynaklanır.
- b) Yabancı atomlar: Geçiş metal iyonları genellikle optik fiber kuru içerisinde bulunan yabancı atomların varlığıdır. Bu geçiş metalleri demir, krom, kobalt ve bakır vb. dir. Bunlar kor içerisinde atomik yapılarına bağlı olarak çeşitli soğurmalar meydana getirirler. Ayrıca optik fiberin yapısında bulunan OH⁻ iyonları 850, 1310 ve 1550 nm’de soğurma meydana getirirler ve spektrumlarda bu pikler açıkça görülebilmektedirler (Keiser 1991).
- c) Optik fiber yapısını oluşturan madde: Optik fiberin, kullanım amacına bağlı olarak spektrumunun belirli bir bölgesi için üretilmesi sonucunda o dalgaboyu bölgesinde optik soğurmanın daha az olması ve diğer bölgelerde soğurmanın bu bölgeye göre daha fazla olmasından kaynaklanır.

2.4.3. Eğilme (bükülme) kayıpları

Optik fiberler esneklik limitlerinin üstünde kıvrılır veya bükülürse ışık tam yansıma olayını kısmen gerçekleştirebilir veya gerçekleştiremez duruma gelir. Bu durumda ışık optik fiberin kor bölgesini terk eder. Optik fiberler iki tip bükülmeye maruz kalabilir (Şekil 2.7): birincisi fiber çapına göre daha büyük yarıçapa sahip makroskobik bükülmelerdir. Örneğin, bir optik fiber kablo kullanıldığı bölgeye bağlı olarak belirli bir açı verilmesi sonucu meydana gelebilmektedir. İkincisi mikroskobik bükülme ise, optik fiberlerin başka kablolarla eklendiğinde ortaya çıkabilen, fiber ekseninin rastgele bükülmesi ile oluşabilmektedir (John 2009; Keiser 1991).



Şekil 2.7. a) Makro bükülme; b) mikro bükülme ile optik fiberde oluşan kayıpların örnekleri (John 2009)

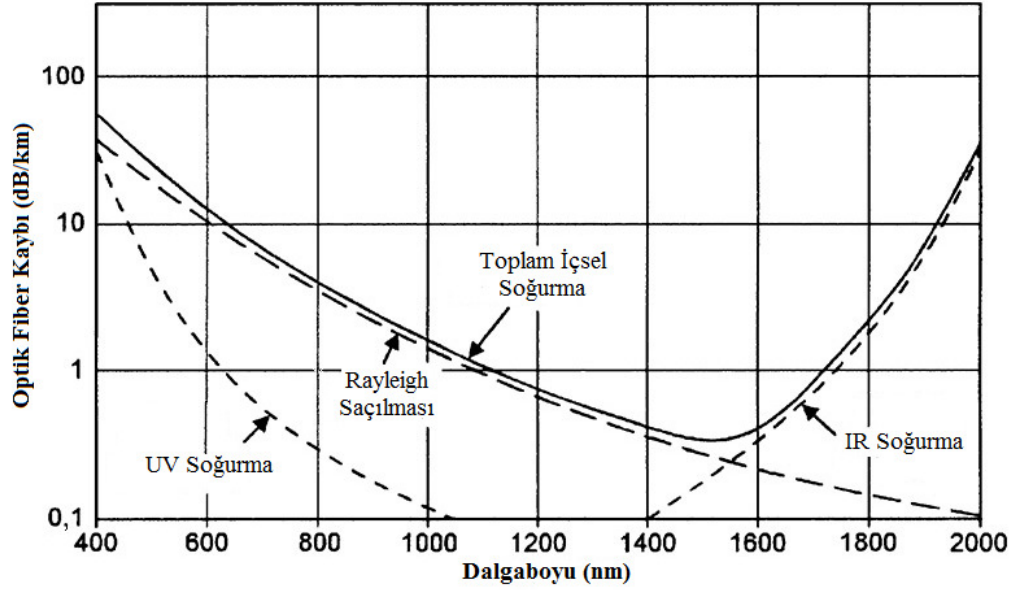
2.4.4. Optik fiber kayıp grafiği

Silika fiberlerde, çalışma dalgaboyu aralığı 300 ile 2000 nm arasında değişmektedir. Şekil 2.8, silika optik fiberlerin çalışma dalgaboyları aralığındaki ışıkta meydana gelen zayıflama seviyelerini göstermektedir. Bu tür optik fiberlerde ultraviyole (UV<400nm) ve kızılötesi (Infrared-IR>2000 nm) bölgeler içsel soğurmanın yüksek olduğu kuyruk olarak nitelendirilen bölgelerdir (John 2009).

UV bölgedeki içsel soğurma, elektronik soğurma bantlarından kaynaklanmaktadır. Temel olarak, bir ışık parçacığı (foton) bağlı bir elektronla etkileştiğinde, elektronu rezonans bölgesinde soğurma yoluyla daha yüksek bir enerji seviyesine uyarılmaktadır. UV soğurma bandınının kuyruğu Şekil 2.8'de okla gösterilmiştir. IR bölgedeki içsel soğurmaların ana nedeni ise atomik bağların karakteristik titreşim frekanslarından kaynaklanır. Silika fiberde soğurma, silikon (Si) - oksijen (O) bağlarının titreşmesinden kaynaklanmaktadır. Titreşen bağ ile optik sinyalin elektromanyetik alanı arasındaki etkileşim, içsel soğurmaya neden olmaktadır. Işık enerjisi elektromanyetik alandan bağa aktarılmaktadır. IR soğurma bandınının kuyruğu Şekil 2.8'de belirtilmiştir.

UV ve IR bölgelerinin kuyrukları arasında kalan düşük soğurma bölgesinde Rayleigh saçılması gerçekleşir ve bu bir içsel kayıp mekanizmasıdır. Bu, ışığın dalgaboyu ile karşılaştırıldığında küçük bir ölçekte meydana gelen kendisinin rastgele doğasından kaynaklanan homojensizliklerdir. Bu küçük ölçekteki homojensizlikler kendilerini kırılma indisindeki dalgalanmalar, yoğunluk ve malzemenin kompozisyonundaki çeşitlenmeler olarak göstermektedir. Malzemenin kompozisyonundaki çeşitlenmeler üretim aşamasında gerçekleştirilen soğutma işlemi sırasında silika malzemesinin hızlı bir şekilde donmasından kaynaklanmaktadır. Bu da yapının bazı homojensizlikler oluşturmaya neden olabilmektedir. Böyle bir durumun önüne geçebilmek için daha gelişmiş üretim yöntemlerinin kullanılması gerekmektedir. Kırılma indisindeki dalgalanmalar temel bir kusur olup bunun önüne geçilememektedir. Bu dalgalanmalardan oluşan kayıplar tüm yönlerde gerçekleşmektedir ve $1/\lambda^4$ ile orantılıdır.

Bunun yanında günümüzde kullanılmakta olan optik fiberlerde en önemli kayıp mekanizmalarından birisi de optik fiber yapısı içinde OH^- iyonlarının bulunmasıdır. Bu kayıplar belirli dalgaboylarında 850, 1310 ve 1550 nm soğurma bantları şeklinde görülmektedir. Sonuç olarak optik fiber kayıpları, daha kısa dalgaboyları için önemli ölçüde yüksektir ve görünür bölgede 5 dB/km'yi geçebilecek kayıplara neden olarak uzun mesafeli iletim için bir engel teşkil etmektedirler (Agrawal 2012; Keiser 1991).

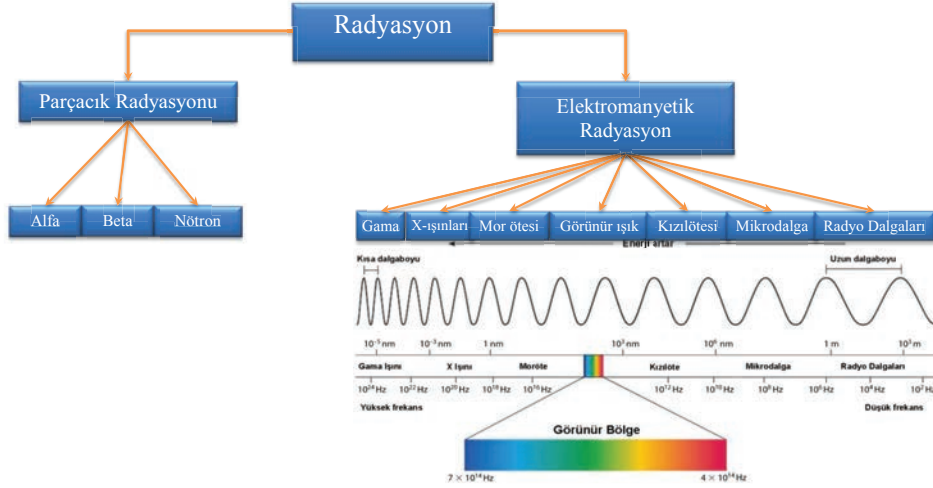


Şekil 2.8. Silika optik fiberinin bazı temel kayıp mekanizmalarının dalgaboyu bağımlılığına göre kayıp spektrumu (Kapron vd. 1970)

2.5. Radyasyon ve Türleri

Radyasyon, doğal veya yapay radyoaktif bir atom çekirdeğinin kararsız durumundan daha kararlı bir duruma geçerken elektromanyetik dalga veya parçacık şeklinde taşınan enerji olarak tanımlanmaktadır. Başka bir deyişle radyasyonu ortamda yol alan enerji olarak isimlendirmek mümkündür. Radyasyon temel olarak iki şekilde sınıflandırılabilir (Şekil 2.9); "parçacık" ve "elektromanyetik" radyasyon. Belli bir kütle ve enerjiye sahip parçacıklar, parçacık radyasyonu olarak tanımlanır. Belli bir enerjiye sahip ve belirli bir frekansla ilerleyen elektromanyetik dalgalara ise elektromanyetik radyasyon ismi verilir.

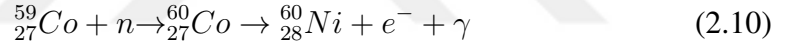
Radyasyon, madde üzerinde oluşturduğu etkilere göre iyonlaştırıcı olan ve iyonlaştırıcı olmayan radyasyon olarak ayrıca sınıflandırılabilir. İyonlaştırıcı radyasyon, bir atomdan bir elektron koparabilecek kadar yüksek enerjiye sahip dolayısıyla bu yüksek enerjisi ile atomu iyonize edebilen radyasyon türüdür. Bunlar alfa, beta, gama ve X-ışınlarıdır. Burada, eğer iyonize edici radyasyon çekirdekte yayımlanıyorsa gama, yörüngeden yayımlanıyorsa X-ışını adını alır. İyonlaştırıcı olmayan radyasyon; kızıl ötesi ışık, ultraviyole ışık, görünür ışık, radyo ve mikro dalgaları içermektedir. Ultraviyole ışık, teknik olarak iyonlaştırıcı olmamasına rağmen bazı moleküllerde fotokimyasal tepkimelere sebep olmaktadır, bundan dolayıda iyonlaştırıcı özelliğe sahip ultraviyole bölgeleri mevcuttur (Harorlı A. 2006; Khan 2010).



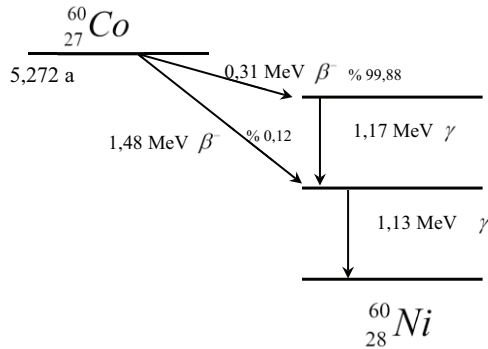
Şekil 2.9. Radyasyonun türleri

2.5.1. Co-60 radyasyon kaynağı

Co-60 radyoaktif kaynağı bir çok endüstriyel ve medikal uygulamada yaygın olarak kullanılmaktadır. Doğal kobalt ($^{59}_{27}\text{Co}$) doğada kararlı halde bulunan sert, kırılğan mavimsi renge sahip bir metaldir. $^{60}_{27}\text{Co}$, $^{59}_{27}\text{Co}$ 'nun nötron bombardımanına tutularak kararsız hale getirilen yapay radyoaktif bir metal izotopudur. $^{60}_{27}\text{Co}$ izotopu bozunum sonucu kararlı bir izotop olan $^{60}_{28}\text{Ni}$ 'ye dönüşmektedir ve bozunum süreci



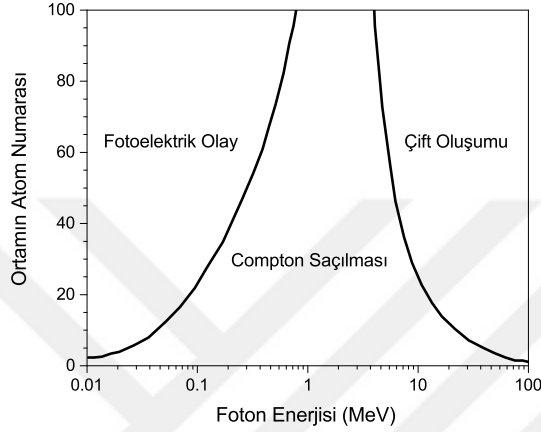
şeklinde dir. Şekil 2.10'da gösterildiği gibi $^{60}_{27}\text{Co}$ izotopunun $^{60}_{28}\text{Ni}$ 'a bozunması sırasında β^{-} parçacıkları ile 1,17 MeV ve 1,33 MeV enerjiye sahip iki gama ışını yayılır. Bu iki gama ışınının enerjisi ortalama 1,25 MeV olarak kabul edilmektedir. Kaynağın yarı ömrü 5,27 yıldır ve her ay aktivitesi % 1,1 azalmaktadır (Karaçam vd. 2003).



Şekil 2.10. Co-60 bozunum şeması (Khan 2010)

2.6. Radyasyonun Madde ile Etkileşimi

Elektromanyetik radyasyonlar, $h\nu$ enerjisine sahip (ν frekans ve h Planck sabiti), ışık hızıyla hareket eden, kütesiz, momentumları olan enerji paketleridir ve foton olarak adlandırılırlar. Fotonlar, içinden geçtikleri ortamın (maddenin) atomları ile karşılıklı etkileşimleri sonucunda ortamda enerji kaybederek soğurulabilir veya saçılabilirler.



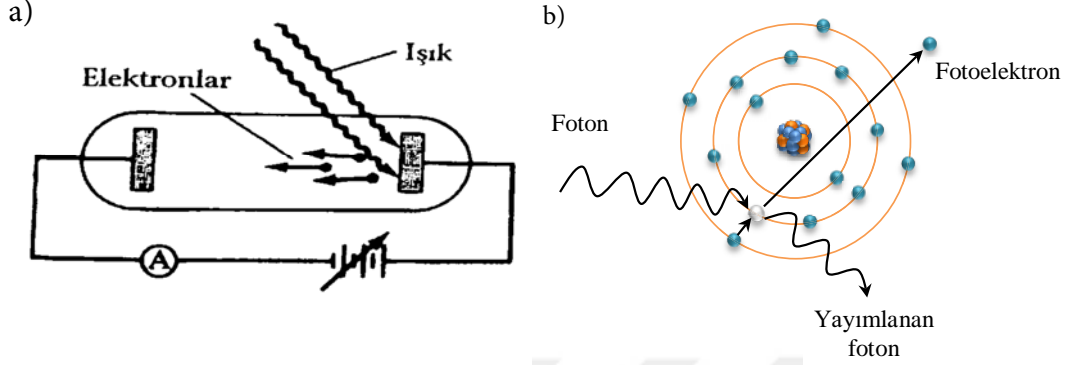
Şekil 2.11. Fotonların enerjilerine bağlı olarak farklı maddeler ile etkileşimi (Knoll 2010)

Elektromanyetik radyasyonun (X-ışınları ve gama ışınları) madde ile etkileşiminde rol oynayan en önemli üç mekanizma: fotoelektrik olay, Compton saçılımı ve çift oluşumdur. Bu olayların olma olasılığı fotonun etkileştiği atomun atom numarası ve gelen fotonun enerjisine bağlı olarak değişmektedir (Şekil 2.11). Fotoelektrik etki, 0,5 MeV'den daha düşük foton enerjileri için baskındır. 0,5 MeV ile 2 MeV aralığında olan foton enerjileri için baskın olan olay ise Compton saçılmasıdır. Çift üretim süreci, 2 MeV'den daha büyük foton enerjileri için baskın hale gelmektedir (Knoll 2010; Lilley 2018). Bu etkileşimler, fotonların iki önemli özelliklerini açıklamaktadır. Bunlardan birincisi fotonların madde içerisinde yüklü parçacıklara göre daha uzun mesafeler katedebilmesidir, ikincisi ise belli bir kalınlıktaki malzemeyi geçince fotonların enerjilerinde bir azalma meydana gelmemesi, sadece şiddetinde bir azalmanın olmasıdır.

2.6.1. Fotoelektrik olay

Fotoelektrik etki ilk kez 1887 yılında Heinrich Hertz tarafından keşfedilmiştir. Fotoelektrik etki, Şekil 2.12.a'de gösterilen vakumlu bir cam tüp içerisinde iki metal plakanın yerleştirildiği bir düzenek ile gözlemlenmiştir.

Metal plaka üzerine belirli bir frekansın üstünde gönderilen ışık, metal yüzeyinden elektronlar kopması sonucunda iki plaka arasında bir akım oluşmasına neden olmuştur. (Martin 2013).

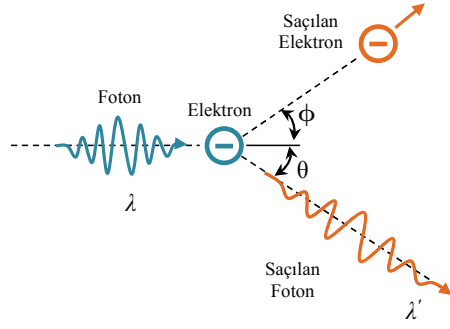


Şekil 2.12. a) Fotoelektrik olay için deneysel bir düzenek ve b) Fotoelektrik olay

Gama ve UV radyasyonları geçtiği ortamdaki atomların K veya L yörüngelerindeki bir elektrona bütün enerjisini aktarabilir. Aktarmış olduğu bu enerji ile yörüngeden bir elektron koparabilir ve fotoelektrik etki gözlenir. Yörüngeden kopan bu elektronlara fotoelektron denir (Lilley 2018). Fotoelektrik olay, 0,5 MeV'den daha az radyasyon enerjisinde meydana gelir. Fotoelektronun yörüngeden atılmasından sonra, bir elektron boşluğu oluşur ve oluşan bu boşluk dış yörüngedeki başka bir elektron tarafından doldurulur (Şekil 2.12.b). Bu sırada foton yayımlanır. Bu olay sırasında, gelen fotonun enerjisinin bir kısmı, elektronu bağlı olduğu atomdan koparabilmek için harcanır, geri kalan kısmı ise koparılan elektrona kinetik enerji olarak aktarılır ve $h\nu = E_{\text{Bağlanma}} + E_{\text{Kinetik}}$ bağıntısı ile ifade edilir.

2.6.2. Compton saçılması

Compton saçılması, E enerjisine sahip bir fotonun atomun dış yörüngesinde zayıf bağlı elektronlarından biri ile esnek çarpışması sırasında gözlemlenir. Şekil 2.13'de gösterildiği gibi gelen foton, kendisine kıyasla çok zayıf bağlı bu nedenle serbest kabul edilebilecek bir elektron ile çarpışarak enerjisinin bir kısmını kaybeder ve geliş doğrultusu ile θ açısı yaparak sapar. Bu sırada gelen fotonla etkileşen elektron yörüngesinden koparılarak belli bir ϕ açısıyla saçılır. Compton, gelen ve saçılan fotonları parçacıkmiş gibi düşünerek, herbirinin dalgaboyundaki değişimi hesaplamak için momentum ve enerjinin korunumu yasalarını uygulamıştır. $h\nu$ enerjili ve $h\nu/c$ momentumlu gelen bir foton, durgun kütle enerjisi m_0c^2 olan bir elektron ile etkileşir.



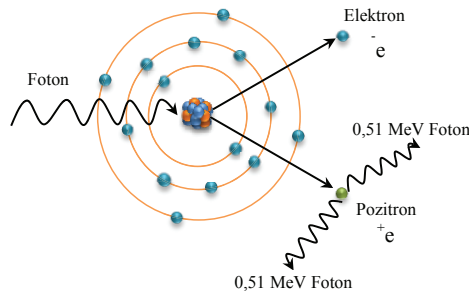
Şekil 2.13. Compton saçılması (Lilley 2018)

$$\delta\lambda = \lambda' - \lambda = \frac{h}{m_0c}(1 - \cos\phi) \quad (2.11)$$

denklemleri ile hesaplanır ve buna göre $\lambda' > \lambda$ 'dır. 0,5-2,0 MeV arasında olan fotonların düşük atom numaralı ortamlar tarafından soğurulmasında bu olay fotoelektrik ve çift oluşum olaylarına göre daha baskın şekilde gerçekleşir (Krane ve Şarer 2001).

2.6.3. Çift oluşum

Çift oluşumu, enerjisi 1,02 MeV'den büyük bir fotonun atomun çekirdeğine çok yakın bir mesafeden geçtiği zaman gelen fotonun sahip olduğu enerjiden dolayı çekirdek civarında bir elektron ile bir pozitron çifti oluşur. Bu olayda elektromanyetik bir dalgadan madde elde edilmiş olur (Lilley 2018). Oluşan elektron, atomla serbest elektronlar gibi etkileşirken, pozitron ise yeterince yavaşladığında bir yörünge elektronu ile birleşir ve zıt yönlü iki foton salarak çift yokolmasına yol açar. 2 MeV den daha büyük enerjili fotonlar ve ağır elementler için çift oluşumu olayı daha baskındır (Şekil 2.11) (Knoll 2010).



Şekil 2.14. Çift oluşum (Martin 2013)

2.7. Radyasyonun Optik Fiber Üzerine Etkisi

Optik fiberler radyasyona maruz kaldığında belirli dalgalarda bulunan ışık için geçirgenlikleri azalmakta veya soğurmaları artmaktadır. Bu dalgalarda bulunan geçirgenlikteki azalma veya soğurmalarındaki artmanın büyüklüğü optik fiberin kor/yelek bileşimine ve kırılma indislerine, fibere katılan element konsantrasyonuna, fiber yapısına, fiber karakteristiklerine, üretim koşullarına, test fiberin uzunluğuna ve optik fiberin burulma (kırılma) özelliklerine bağlı olarak değişmektedir. Ayrıca ortamdaki radyasyonun; enerjisine, doz hızına, toplam doz miktarına, ortamın sıcaklığına, kullanılan ışık kaynağının dalgalı boyuna ve gücüne de bağlıdır (Friebele vd. 1988; Paul vd. 2009; Xing vd. 2012).

Optik fiberlerde çıkış sinyalinin kayıpsız elde edilmesi kullanılan uygulamalar için büyük bir öneme sahiptir. Bununla birlikte radyasyonlu ortamların, optik fiberler üzerindeki etkileri nedeniyle çıkış ışık şiddetinde değişime neden olurlar. Burada radyasyonun, optik fiberlerin üretimindeki kusurlarına ek olarak yeni kusurlar meydana getirmesinden dolayı çıkış ışık şiddetinde kayıplar oluşur. Bu değişimler optik fiber yapısındaki yapısal kusurlardan ve katılan elementlerin kusurlarından kaynaklanmaktadır. Bu kusurlar genel olarak RIA ve renk merkezleri (color centers) (Friebele 1979; Friebele vd. 1984; Fu vd. 2014; Kreidl ve Hensler 1955) olarak isimlendirilmektedirler.

2.7.1. Radyasyona bağlı zayıflamalar (RIA)

Radyasyonlu bir ortamda kullanılan optik fiberlerde radyasyondan kaynaklı oluşan kusurlar nedeniyle çıkış sinyallerinde bir zayıflama gözlemlenir. Bu radyasyona bağlı zayıflamalar (RIA) olarak bilinir (Friebele vd. 1984; Girard vd. 2013). RIA kullanılan ışığın dalgalı boyuna ve zamana bağlı bir etkidir. Bir optik fiberdeki zayıflama genellikle km başına desibel (dB) cinsinden tanımlanır. Zayıflama şu şekilde ifade edilir:

$$RIA(\lambda) = -\frac{10}{L} \left(\frac{T(\lambda)}{T_0(\lambda)} \right) \quad (2.12)$$

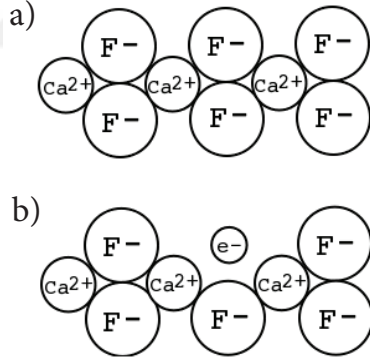
Bu denklemde L optik fiber uzunluğu, $T(\lambda)$ ve $T_0(\lambda)$ radyasyondan önce ve sonraki ışığın şiddetini göstermektedir (Wall vd. 1975).

2.7.2. Renk merkezleri

Optik fiberlerin, radyasyona maruz kalmaları sonucunda iletim özelliklerinde değişimler meydana gelmektedir. Optik fiberde meydana gelen bu değişimden

radyasyon kaynaklı oluşan renk merkezleri sorumludur. Bu renk merkezleri kuartz optik fiberler için yapısında üretim vb. durumlardan kaynaklanan safsızlık iyonları ve/veya kristal yapısındaki eksik iyonların radyasyona (doğal veya yapay) maruz kaldığında çiftlenmemiş elektronların uyarılması sonucunda oluşmaktadır. Katkılı optik fiberlerde ise katkılanan metal iyonlarının radyasyon ile uyarılmaları sonucunda kuartz optik fiberlerdeki renk merkezlerine ek olarak farklı renk merkezleri de oluşabilmektedir. Bu oluşum optik fiberin yapısındaki mevcut atomların yerine farklı atomların yerleşmesi veya oradan koparılması veya katkılanan elementin yörüngelerinden sökülen bir elektrondan da kaynaklanabilmektedir. Bu durum katkı elementine veya sayısına bağlı olarak değişiklikler gösterebilir. Bu renk merkezleri eğer uyarılan konumda bir elektron varsa "elektron renk merkezi", bir boşluk (hole) var ise "boşluk renk merkezi" diye isimlendirilmektedirler (Nassau 1983).

Elektron renk merkezleri mekanizması kalsiyum florür (CaF_2) örneği ile kolaylıkla açıklanabilirler. CaF_2 yapısı dış etkilerden dolayı yapıdaki Ca'un genişlemesi veya radyasyon gibi bir etkinin altında kalması sonucu meydana gelir. Kristal yapısındaki bir flor (F) iyonu yapıdan ayrılarak bir eksiklik oluşmasına neden olur. Bu durum F merkezi (Farbe merkezi) olarak isimlendirilmektedir (Şekil 2.15). Sonuç olarak şeffaf bir görünüme sahip olan CaF_2 bu etkilerden sonra mor renkte görülmektedir (Kittel 2004).

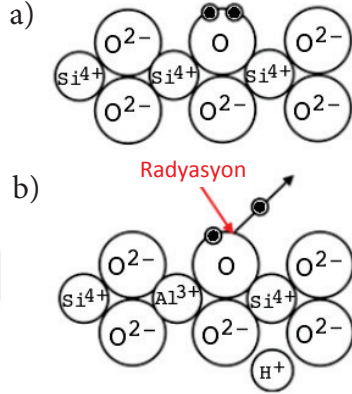


Şekil 2.15. Kalsiyum florürün şematik yapısı. a) normal; b) bir florin iyonunun elektron ile değiştirildiği bir "F-merkezi"

Boşluk renk merkezlerine de verilebilecek en iyi örnek kuartz (SiO_2) yapısıdır. SiO_2 yapısında, her silisyum (Si) atomu dört oksijen (O) atomuna bağlanır. Her 'O' atomu iki Si atomu arasında Şekil 2.16.a'da görüldüğü gibi bir köprü oluşturmaktadır (Bach ve Neuroth 1995; Elliott 1986).

Şekil 2.16.b'de Alüminyum (Al) elementi katkılı SiO_2 yapısı gösterilmektedir. Burada +4 değerlikli silisyum iyonu, +3 değerlikli alüminyum iyonu ile yer değiştirebilir. Bu durumda Al elementi 3 oksijen atomu ile bağ

yapar ve bir oksijen atomu bağ yapamaz. Elektro-nötrlüğün sağlanması için bir hidrojen atomu veya sodyum iyonu gibi +1 değerlikli atom bağ yapamayan oksijen ile bağ yapmak zorunda kalır. Bu durum oksijen atomundaki elektron bağlanma kuvvetlerinin zayıflamasına neden olur. X-ışını, gama ışını gibi radyasyonlar oksijen atomunun zayıf bağlı elektronunu rahatlıkla koparabilirler. Böylece bir boşluk oluşur. Bu durum boşluk renk merkezi olarak tanımlanmaktadır (Nassau 1983).



Şekil 2.16. Kuartz şematik yapısı. a) normal; b) radyasyona maruz kaldıktan sonra boşluk merkezi oluşumu

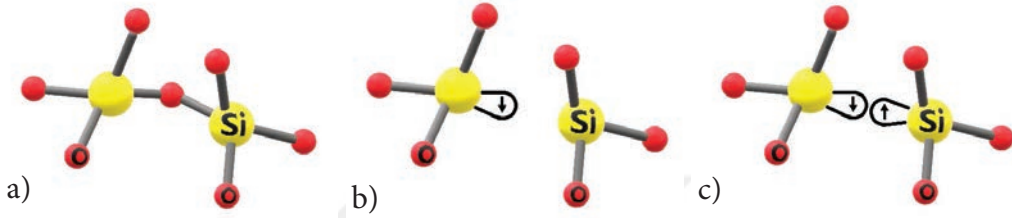
Renk merkezleri, elektronik yapılarına ve davranışlarına bağlı olarak belirli dalgaboylarındaki ışığı soğururlar. Soğurulan ışığın dalgaboyu ile birlikte yaratılan kusurların konsantrasyonu radyasyon ortamına ve optik fiberin içsel ve dışsal özelliklerine bağlıdır (Singleton 2014). Kusurlar optik fiberin yapısındaki elementlerden kaynaklanıyorsa içsel, yapı içerisindeki farklı elementlerin oluşturduğu safsızlıklardan (H, Ge, P vb.) kaynaklanıyorsa dışsal kusur olarak nitelendirilirler (Griscom 1991; Skuja 1998; Skuja vd. 2001).

2.7.2.1. İçsel kusurlar

Optik fiberin temel yapısındaki kusurlar içsel kusurlar olarak isimlendirilmektedir. Bunlar genel şartlarda optik fiberin SiO₂ yapısından kaynaklanırlar. Şekil 2.17.a'da kusur içermeyen bir SiO₂ yapısı gösterilmiştir. Bu yapıdan yola çıkılarak içsel kusurlar iki kategoriye ayrılabilirler; oksijen yetersizliğine ve oksijen fazlalığına bağlı kusurlar.

Şekil 2.17.b'de görüldüğü gibi Si atomu etrafındaki 4 oksijen atomu ile bağ yapar ve radyasyon etkisi ile oksijen atomlarından bir tanesi bağ yaptığı konumdan uzaklaştırıldığında bu bölgede çiftlenmemiş bir elektron boşta kalacaktır. Bu duruma *E' merkezi kusuru* denir. Ayrıca buradan kopan oksijenden dolayı diğer üç

bağlı oksijen atomunun bağ açıları kararlı durumlar için farklı açılara yönelebilirler (Griscom 1991). Oksijen yetersiz kusur olarak bilinen bu kusur ilk olarak 1956 yılında Weeks tarafından nötronla ışınlanmış silika cam çalışmasında gözlenmiştir (Weeks 1956) ve ışınlanmış optik fiberlerde de var olduğu Hanafusa ve Hibino tarafından gösterilmiştir (Hibino ve Hanafusa 1983; Hibino vd. 1985). Bu kusur merkezi spektrumda 5,8 eV civarında bir soğurma bandı piki olarak görülmektedir. E' merkezi kusuru optik fiberin ana yapısının silikadan oluşmasından dolayı çalışmalarda en çok karşılaşılan kusurların başında gelmektedir.



Şekil 2.17. a) SiO₂ yapısı; b) E' merkezi ve c) doğal oksijen boşluğu merkezler (ODC) modelleri

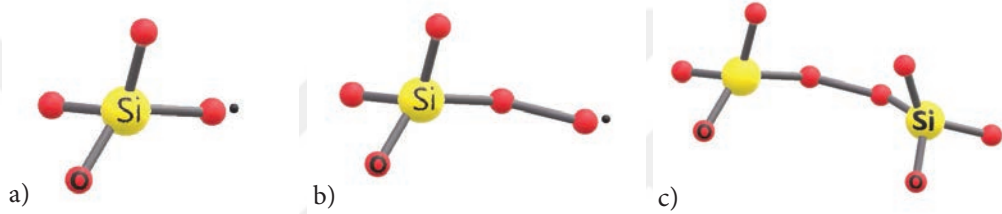
Doğal oksijen boşluğu (neutral oxygen vacancy-ODC) renk merkezleri O'Reilly ve Imai tarafından silika camlarda gözlemlenmiştir (Imai vd. 1988; O'Reilly ve Robertson 1983). Oksijen yetersiz bu renk merkezi ikiye ayrılır. Bunlardan ilki oksijen yetersiz kusur ODC-(I)'dir. Şekil 2.17.c'de ≡Si-Si≡ şeklinde doğal olarak oksijenin var olmadığı iki Si atomunun birbiri ile bağlanması sonucu meydana gelmektedir. Bu kusur 7,6 eV civarında kuvvetli bir soğurma bandının spektrumunda yükselmesine neden olur. İkincisi ise iki katlı koordine Si (twofold coordinated Si-ODC(II)) olarak isimlendirilir. İki Si atomu arasında bir 'O' atomunun olmaması sonucunda bu Si atomlarının eşlenmemiş elektronlarının boşta kalmasından kaynaklanan kusurdur. Bu kusurda spektrumda zayıf bir soğurma bandı olarak 5,03 eV'ta yükselir.

Oksijenin fazlalığından kaynaklanan kusurlardan ilki Şekil 2.18.a'da gösterilen *köprüsüz oksijen boşluğu merkezi* kusurudur (NBOHC- Non-bridging oxygen hole center) (Griscom 1985). Bu kusur silika yapısı içerisinde iyonize radyasyonun ≡Si-OH⁻ yapısını bozarak 'H' atomunu iyon haline geçirmesi sonucu ≡Si-O• şeklinde ifade edilen bir boşluk kusurudur. 2 eV'ta bir soğurma bandı oluşmasına neden olmaktadır. NBOHC, kuartzdaki 'O' temelindeki en basit bozulmayı temsil eder. Bu renk merkezi kırık bir bağın 'O' kısmı olarak tanımlanabilir (Griscom 1985; Vaccaro 2009). Skuja silika üzerine yapmış olduğu çalışmasında, 275 nm, 620 nm ve 650 nm dalgaboylarında NBOHC kusurunu gözlemlenmiştir (Skuja 2000).

Bir diğer oksijen fazlalığı kusuru *peroksi radikali (POR)* kusurudur (Griscom 1985). POR, iki 'O' atomunda delocalize edilmiş eşlenik olmayan bir

elektron içeren bir oksijen molekülüne bağlı bir Si atomundan oluşur (Morana 2013). Şekil 2.18.b'de oluşum mekanizmasından bağımsız olan bu kusur Si atomuna bağlı olan bir 'O' atomuna başka bir 'O' atomunun bağlanmasından kaynaklanırlar $\equiv\text{Si}-\text{O}-\text{O}^\bullet$. Böyle bir durum için radyasyon etkisi ile oluşan mekanizma ise $\equiv\text{Si}-\text{O}-\text{O}-\text{Si} \rightarrow \equiv\text{Si}-\text{O}-\text{O}^\bullet + \text{Si} + e^-$ şeklindedir. 1,97 (Griscom 2000), 4,8 (Hosono ve Weeks 1990), 5,4 (Bobyshv ve Radtsig 1989) ve 7,6 eV'ta (Friebele 1979; Stapelbroek vd. 1979) soğurma bandı oluşturmaktadır.

Şekil 2.18.c'de *Peroksi köprüsü* renk merkezi gösterilmektedir. $\equiv\text{Si}-\text{O}-\text{O}-\text{Si}\equiv$ şeklinde bir silikon boşluğudur. (Griscom 1985). Optik fiberlerde bu merkezler üretim sırasındaki çekme işleminde oluşabilirler. Sıcaklık, çekme hızı gibi üretim koşulları optik fiberlerdeki bu kusur oluşumunu etkileyebilmektedir (Hibino vd. 1985).



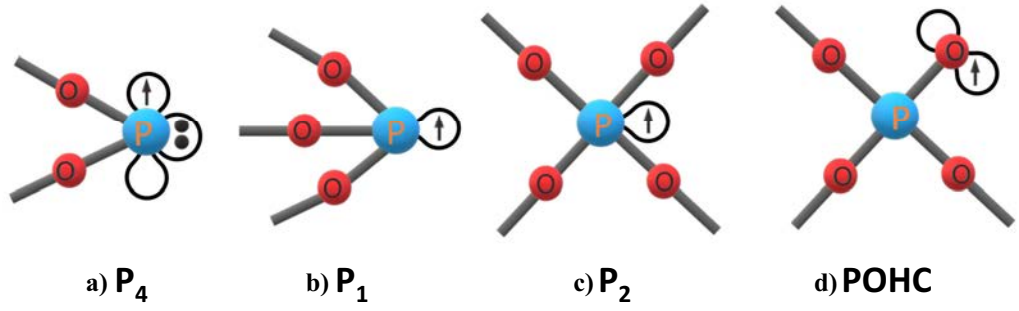
Şekil 2.18. a) NBOHC merkezi; b) peroksi radikal (POR) ve c) peroksi köprü modelleri

2.7.2.2. Dışsal kusurlar

Dışsal kusurlar, optik fiberin yapısına katkılanan elementlerin oluşturduğu safsızlıklardan kaynaklanan kusurlardır. Silika fiberlerinde bulunan safsızlıklar arasında H, P, Al ve Ce en yaygın olanlarıdır. Dışsal kusurlar, üretim sırasında katkılanan elementin SiO_2 yapısına yerleşmesi ve optik fiberdeki bu elementlerin radyasyon ile uyarılması sonucunda oluşurlar.

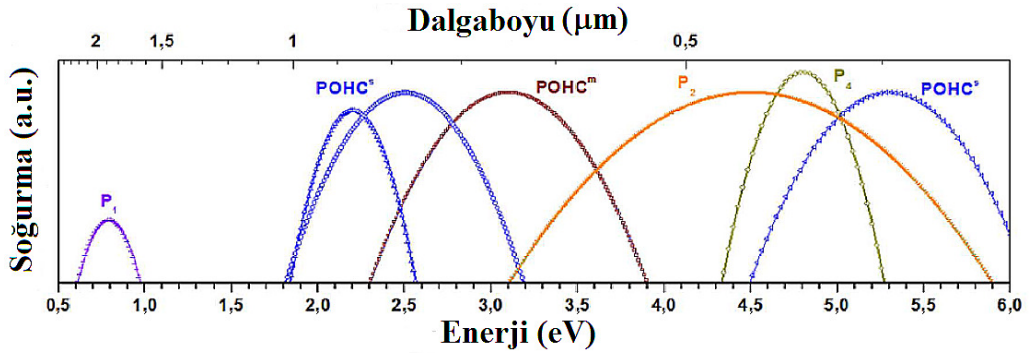
Optik fiberlerde 'H' elementi genellikle düşük veya yüksek miktarlarda hidroksil iyonları (OH^-) şeklinde varolmaktadırlar. Bu kusurlardan dolayı kayıplar 850, 1310 ve 1550 nm dalgaboylarında soğurma bantları şeklinde görülmektedir.

Fosfor, optik fiberlerin kor ve yelek yapısının (Ehrt vd. 2000; Keiser 1991) kırılma indisi profilini geliştirmeye olanak tanıyan, P_2O_5 formunda silika fiberlere katkılanarak yaygın şekilde kullanılan bir elementtir. Optik fibere katkılanan 'P', radyasyona maruz kaldığı zaman kusur oluşumuna neden olmaktadır. Çeşitli literatür çalışmaları, iyonize radyasyonun oluşturduğu paramanyetik 'P' ile ilgili kusurlar olduğunu göstermiş ve bunların karakterizasyonları üzerine odaklanmışlardır (Girard vd. 2004; Griscom vd. 1983). İdeal P_2O_5 yapısı, her bir 'P' için bir köprülü bağ yapmayan ve üç köprülü bağ yapan oksijen ile tanımlanır.



Şekil 2.19. P-katkılı silika optik fiberlerde radyasyonun neden olduğu ana fosfor ilişkili paramanyetik kusur merkezleri (Griscom vd. 1983).

Bu yapıdan herhangi bir sapma bir kusur olarak ortaya çıkmaktadır (Griscom vd. 1983). ‘P’ katkılı SiO_2 camında ‘P’ ile ilişkili P_1 , P_2 , P_4 ve Fosfor Oksijen Boşluğu Merkezi (POHC) olarak adlandırılan dört tane paramanyetik kusur merkezi tanımlanmıştır (Griscom vd. 1983; Weeks ve Bray 1968). Griscom ve arkadaşları tarafından önerilen ‘P’ elementi ile ilgili kusurlar Şekil 2.19’de gösterilmiştir (Griscom vd. 1983). P_4 , P_1 ve P_2 renk merkezlerinde, ‘P’ atomu merkezde olup sırasıyla 2, 3 ve 4 tane oksijen atomuna ek olarak bir tane eşleşmemiş elektrona bağlanmıştır. Bu kusur merkezlerinin yapıları sırasıyla $[(O^-)_2P^\bullet]^0$, $[(O^-)_3P^\bullet]^+$ ve $[(O^-)_2P^\bullet(O^-)_2]^0$ olarak gösterilmektedir. POHC’nin paramanyetik sinyali P_2O_5 içeren cam yapılarının her bölgesinde bulunabilirler. Bu kusurun en basit yapısı, ‘P’ atomu ile köprülü bağ yapan üç tane ‘O’ atomu ve eşleşmemiş elektrona sahip bir dördüncü köprülü olmayan ‘O’ ile tanımlanmaktadır $[(O^-)_3P-O^\bullet]^+$. Bu kusurlar, Şekil 2.20’de gösterildiği gibi, spektrumun görünür ve IR bölgelerinde soğurma bantlarının oluşmasına neden olmaktadır. Bu kusur merkezlerinin çoğu oda sıcaklığında kararlı bir durumdadır ve bu da ‘P’ katkılı silika fiberlerin sürekli radyasyon altında radyasyona karşı yüksek hassasiyete sahip olmalarının en temel nedenidir (Griscom vd. 1983).



Şekil 2.20. Farklı P ile ilgili kusur yapıları ile ilişkili soğurma bantları (Girard vd. 2013)

Al katkılı silika fiberlerde Al atomları dört oksijen ile bağı Si atomlarının yerine yerleşebilmektedir. Al'un dış kabuğunda üç elektronlu yapıya sahiptir. Al, dış yörüngesinde dört tane elektrona sahip Si atomunun yerine geçtiği için bir oksijen atomu ile dördüncü bağı tamamlayamaz. Oksijenin bu yüküne bağlanması gereken bir katyon (M^+) alkali toprak veya hidrojen elementi bu boşluğu doldurur. Meydana gelen grup (AlO_4^-/M^+) olarak adlandırılır ve net toplam yük bu şekilde sıfır olmaktadır (Guttilla 2017; Leon vd. 2016). Bu durum zayıf bağı bir alkali metalin veya hidrojenin yapıya bağlanmasına neden olmaktadır. Radyasyona maruz bırakıldığında zayıf bağı alkali metal veya hidrojen elementi gruptan uzaklaşır. Al atomuna bağı bir oksijen atomunda bir boşluk meydana gelir (AlO_4/o). *Al Oksijen boşluğu merkezi (Al-OHC)* olarak bilinen bu renk merkezi Al katkılı silika fiberlerde sıklıkla görülmektedir (Hideo ve Hiroshi 1994; Leon vd. 2016). 2,15, 2,3, 2,5 ve 2,98 eV'daki soğurma bantları Al-OHC ile ilişkilendirilmiştir (Hideo ve Hiroshi 1994; Lagomacini vd. 2014; Shao vd. 2018).

Ce katkılı optik fiberlerde üretim esnasında katılan Ce elementi fiberin yapısında Ce^{3+} ve Ce^{4+} iyonları şeklinde bulunur. Ce^{3+} ve Ce^{4+} iyonlarının konsantrasyonları üretim aşamasında eritme ve soğutma gibi işlemlerden kaynaklı olarak farklılık gösterebilmektedirler. Radyasyona maruz kaldıklarında bu optik fiberlerde kuartz optik fiberlerdekine benzer elektron veya boşluk renk merkezleri oluşmaktadır (Baccaro vd. 2015; Kreidl ve Hensler 1955). Bu aşamada;



şeklinde elektron (e^-) yakalayarak veya boşluk (e^+) yakalayarak birbirlerine dönüşebilirler ve bu dönüşüm sırasında renk merkezleri oluşur (Stroud 1962, 1965). Xinjie, yapmış olduğu 2014 yılındaki çalışmasında Ce katkılı optik fiberin gama ışınımına maruz kaldığında oluşan durumu şu şekilde belirtmiştir (Xinjie vd. 2014):

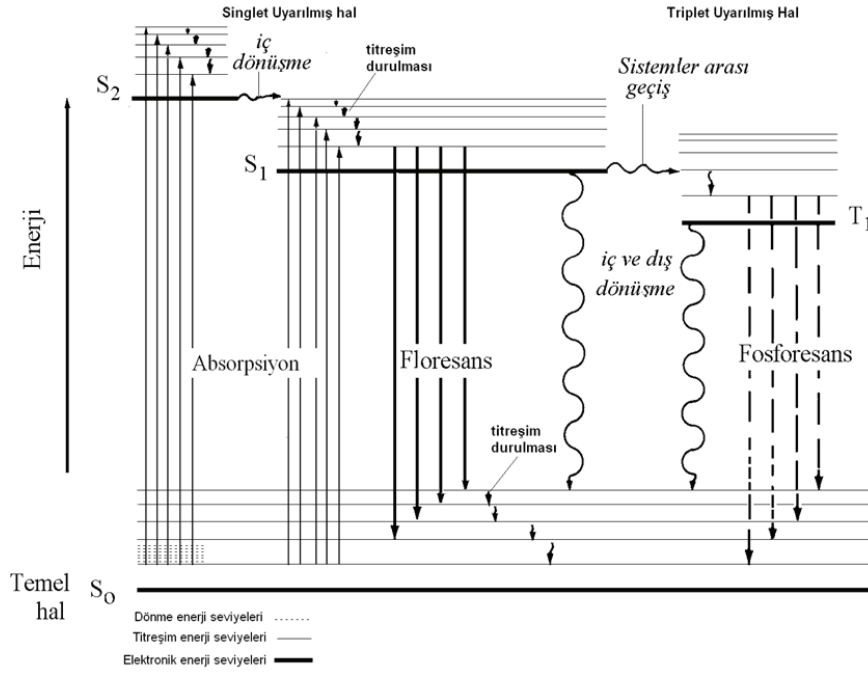
1. Serbest elektronlar ve boşluklar gama ışınımı sırasında üretilir.
2. Ce^{3+} iyonları, Ce^{4+} merkezleri oluşturmak için boşluk yakalarlar.
3. Ce^{4+} iyonları, Ce^{3+} merkezleri oluşturmak için elektron yakalarlar.

Birçok kusur tipi, optik soğurma ve lüminesans bantları oluştururlar. Bu kusurlar görünür bölgede optik soğurma ile kızılötesi bölgede Raman ve fotolüminesans (Photoluminescence-PL) spektroskopileriyle tespit edilebilmektedirler. Paramanyetik kusurlar ise elektron spin rezonans spektroskopisi (ESR) ile belirlenebilmektedir. Bundan dolayı bu kusurlar tek bir teknik ile ayırt edilebilmesi oldukça zordur (Origlio 2009).

2.8. Fotoluminesans

Fotoluminesans (PL), bir maddenin foton soğurup uyarılan sonrasında ışık yayması olayıdır. Atom veya molekülün elektronlarının spinlerinin orbitallerde çiftlendiği duruma temel singlet hal denir. Atom veya molekül uyarıldığında çiftlenmiş elektronlardan biri daha yüksek bir enerji seviyesindeki orbitale yerleşir. Uyarılan elektronun spininin ayrılmış olduğu orbitaldeki elektron spini ile anti-simetrik dalga fonksiyonlu ve anti-paralel yönelimde olması durumuna uyarılmış singlet hal, simetrik dalga fonksiyonlu olması durumlarına ise triplet hal ismi verilir. Fotoluminesans olayı üç aşamada gerçekleşebilir: i) uyarıcı ışığın soğurulması ile elektron-boşluk çiftleri oluşur, ii) elektron-boşluk çiftlerinin rekombinasyonu (yeniden birleşimi) gerçekleşir ve iii) rekombinasyon sonucunda ışıma gerçekleşir (Bebb ve Williams 1972; Shinde vd. 2012). Fotoluminesans yayımlanması, uyarılmanın ardından yayımlanma ömrü olarak bilinen bir τ_c karakteristik zamanda meydana gelir.

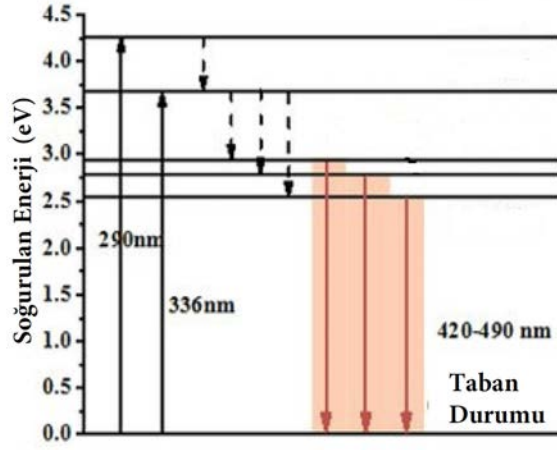
Fotoluminesans çoğu zaman floresans ve fosforesans ışıma olarak iki alt sınıfa ayrılır. Şekil 2.21'de Jablonski diyagramı ile floresans, fosforesans ve soğurma geçişleri şematik olarak gösterilmiştir. Elektronik enerji düzeyleri başlıca singlet haldeki molekülün temel hal (S_0) ve uyarılmış singlet (S_1, S_2, \dots) ve uyarılmış triplet (T_1) enerji düzeyleri oklarla belirtilmiştir. Her bir enerji düzeyine ilişkin farklı bir titreşim enerji düzeyi vardır. Floresans ışıma uyarılmış singlet halden S_1 temel haldeki singlet hale S_0 geçiş sırasında gerçekleşir. Floresans ışımının τ_c yayımlanma ömrü $10^{-10} - 10^{-6}$ s aralığındadır ve çok hızlı bir süreçtir. Floresans ışımının özelliği, madde içindeki yabancı iyonların kısa dalgaboylu ışınların enerjisini soğurarak, bunların yerine daha uzun dalgaboylu (gözle görülebilen) ışığın üretilmesini sağlar. Fosforesans ışıma, uyarılmış triplet halden T_1 temel haldeki singlet hale geçiş sırasında yayımlanan ışımadır. τ_c yayımlanma ömrü $10^{-6} - 10^{-2}$ s sürer ve floresans ışımaya göre daha yavaştır. Aynı zamanda floresans ışıma özelliği gösteren maddeler ışık ile uyarılmanın sonlandırılmasına rağmen kısa bir süre daha ışık yaymaya devam etmektedirler (Rendell vd. 1987). Bu geçiş süreçlerinde temel enerji düzeyinden triplet enerji düzeyine doğrudan geçişler gözlenmez ve bunlara yasaklanmış geçişler denir. Aynı zamanda singlet ve triplet uyarılmış enerji düzeyinden temel haldeki enerji düzeyine ışımasız geçişler gerçekleşebilmektedir (Öztürk 2008).



Şekil 2.21. Jablonski diyagramı ile Floresans, Fosforesans ve soğurma geçişleri

Ce^{+3} iyonları $5d$ orbital kabuğundan dolayı dış çevreden kolaylıkla etkilenebilirler. Bu yüzden Ce^{+3} iyonları fosfat, silikat ve kristal materyaller gibi çeşitli malzemeler için bir lüminesans merkezi olarak yaygın şekilde kullanılmaktadırlar (Sun vd. 2017). Bunlar, Şekil 2.22'de gösterilen izinli $5d-4f$ geçişlerinden dolayı fosfor gibi parlama, sintilatör, ışık yayan diyot (LED) ve iyonize radyasyon detektörleri için oldukça uygundur (Koao vd. 2011; Vedda vd. 2004).

Ce katkılı optik fiberlerde Ce^{+3} iyonlarının silika ile etkileşimi olmadığı düşünüldüğünde 360 nm 'de kuvvetli bir yayılım piki bulunmaktadır. Silika yapısı ile etkileştiği düşünüldüğünde ise yayılım piki kırmızı bölgeye kayar (red shift) ve yayılım piki 430 nm 'de görülmektedir. Bu dalgaboyundaki kayma Ce^{+3} iyonunun $5d$ yörüngesindeki elektronların, silikanın iletkenlik bandını kullanarak $4f$ yörüngesine geçmesinden kaynaklanır. Bu davranış çeşitli çalışmalarda da gözlemlenmiştir (Raukas vd. 1996; Sun vd. 2017).



Şekil 2.22. Ce³⁺ iyonunun soğurma enerji seviyelerinin diyagramı (Sun vd. 2017)

3. MATERYAL VE METOT

3.1. Kullanılan Optik Fiberlerin Özellikleri

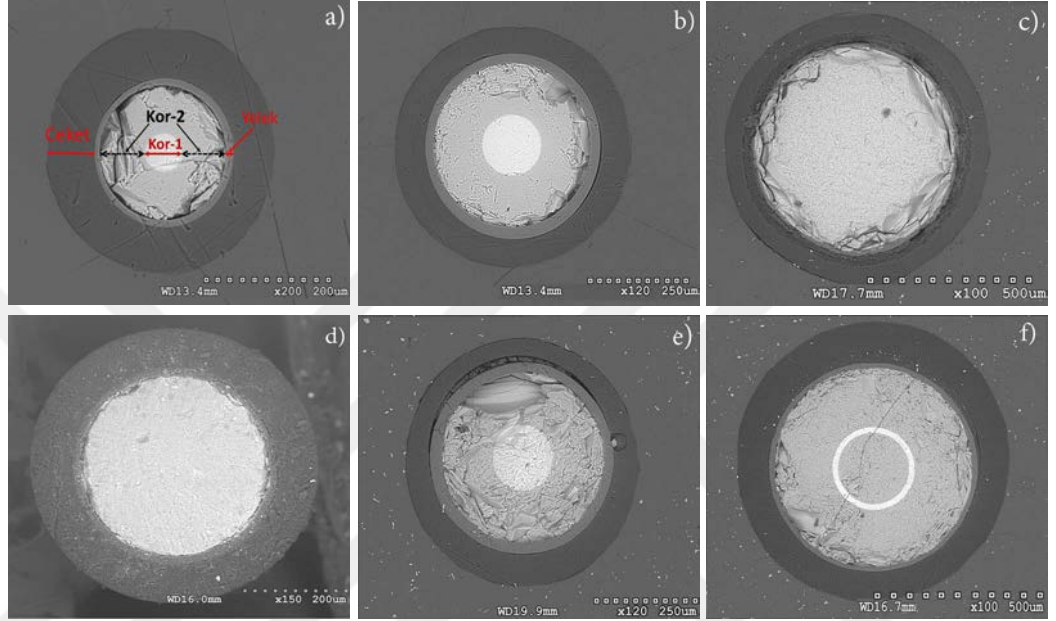
Bu tez çalışmasında kullanılan optik fiberler Amerika Birleşik Devletleri'nde bulunan Polymicro Technologies firması tarafından Texas Tech Üniversitesi ve bu çalışma için özel olarak üretilmiştir. On farklı optik fiber ile çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Bunlara Çizelge 3.1'de görüldüğü gibi kodlarla isim verilmiştir. Bu optik fiberlerin dört tanesi kuartz optik fiber (T3 (Clear fused-silica), T4 (Cern-01A), T5 (Cern-02A) ve T7 (KOG-02A)) ve diğer altı tanesi tek veya iki kora sahip olan Ce katkılanmış sintilasyon fiberleridir (T1 (Phase-I), T2 (Phase-II), T9 (Clear), T10 (Phase-III), T14 ve T15 (Phase-IV)).

Çizelge 3.1. Kuartz optik fiberlerin ve Ce katkılanmış sintilasyon optik fiberlerin kor, ceket ve yelek çapları

Kodu	Fiber adı	Kor-1 [μm]	Kor-2 [μm]	Yelek [μm]	Ceket [μm]
T1	Phase-I	60 \pm 7	200 \pm 6	230 $^{+5}_{-10}$	350 \pm 15
T2	Phase-II	150 \pm 20	400 \pm 10	430 \pm 10	550 \pm 30
T3	Clear fused-silica	600 \pm 10	-	630 $^{+5}_{-10}$	800 \pm 30
T4	Cern-01A	600 \pm 10	-	630 $^{+5}_{-10}$	800 \pm 30
T5	Cern-02A	600 \pm 10	-	630 $^{+5}_{-10}$	800 \pm 30
T7	KOG-02A	600 \pm 10	-	630 $^{+5}_{-10}$	800 \pm 30
T9	Clear	215	365	393	571
T10	Phase-III	370 \pm 8	-	400 \pm 8	550 \pm 15
T14		150 \pm 5	400 \pm 5	450 \pm 5	500 \pm 15
T15	Phase-IV	200 \pm 8 (kor)/ 15 \pm 8 (Ce halkası)	600 \pm 6	630 \pm 10	800 \pm 30

Tek kora sahip olan T3, T4, T5 ve T7 kuartz optik fiberlerin kor (600 μm), ceket (630 μm) ve yelek (800 μm) çapları aynı olup kimyasal bileşimleri farklıdır (Çizelge 3.1). Bu çalışmada kullanılan çapı en küçük ve ilk büyük ölçekli (> 1 km) üretimi gerçekleştirilen T1 optik fiberinin kor-1'i 5780 ppm Ce katkılanmış olup 60 μm çapa sahiptir. Ce katkılanmış korun çevresinde 200 μm çapında kalın bir koaksiyel cam tabakası sarıdır. % 0,1 molar Ce konsantrasyonuna sahip ön hazırlık malzemesi ile standart endüstri tekniği kullanılarak ticari amaçlı üretilmiştir. T1 ile kimyasal olarak aynı özelliklere sahip T2 optik fiberi 4920 ppm Ce katkılanmış 150 μm kor-1 çapına sahip ve endüstriyel süreçler kullanılarak büyük ölçekte (\sim 2 km) üretilmiştir. İkili kor yapısına sahip T9 ve T14 optik fiberlerinin sırasıyla; kor-1 çapları 215-150 μm , kor-2 çapları 365-400 μm ve yelek çapları 393-450 μm 'dir. Sırasıyla kor-1 Ce katkı miktarları 760 ve 5230 ppm'dir. Ce katkılanmış fiberler arasında tek korlu yapıya sahip T10 optik fiberinin kor ve yelek çapları; 370 ve 400 μm olup, koru 427 ppm Ce içermektedir. T15 diye

isimlendirilen optik fiber ise merkezinde $200 \mu\text{m}$ cam yapısına sahiptir. Bu kor etrafında $215 \mu\text{m}$ çapında Ce katkılandırılmış (2070 ppm) halka biçiminde bir yapıyla sarılmıştır. Cam ve Ce halkası etrafında $600 \mu\text{m}$ çapında ikinci bir cam katmanı bulunmaktadır. Optik fiberlerin kor, yelek ve ceket çapları Çizelge 3.1’de listelenmiştir. Bütün optik fiberler (T9 hariç) flor içeren sert kaplı akrilat yelek ve UV ile sertleştirilmiş akrilat ceket yapısına sahiptir.



Şekil 3.1. a) T1; b) T2; c) T3; d) T10; e) T14 ve f) T15 optik fiberlerin enine ara kesitlerinin SEM görüntüleri

Optik fiberlerin kor, yelek ve ceket çaplarını kesit ara yüzeyleri Texas Tech Üniversitesi’nde Deneysel Fizik Bölümü’nde bulunan taramalı elektron mikroskobu (Scanning electron microscopy-SEM) ile görüntülenmiştir. Bu ölçümler için yaklaşık 1 cm uzunluğunda her bir fiberden altı parça olacak şekilde örnek alınarak epoksi yardımı ile dikey olacak şekilde yapıştırılarak konumlandırılmıştır. Hazırlanan fiberlerin yüzeylerinin pürüzsüzlüğünü sağlamak ve net bir görüntü elde edebilmek için ince bir SiC zımpara ile zımparalama işlemi yapılmıştır. Yapılan ölçümler Şekil 3.1.a-f’de gösterilmiştir. Şekil 3.1.a, b ve e’de T1, T2 ve T14 optik fiberlerinin merkezinde açık gri renkte Ce katkılanmış kor-1, gri renkte kor-2’, koyu gri renkte yelek ve siyah renkte ceket kısmı açık bir şekilde görülmektedir (T9 optik fiberi de benzer yapıya sahiptir). Tek kora sahip olan T3 ve T10 optik fiberleri Şekil 3.1.c ve d’de gösterilmiştir. Bunların kor (gri renkte), yelek (koyu gri renkte) ve ceket (siyah renkte) yapıları şekilde görülmektedir. T4, T5 ve T7 olarak isimlendirilen optik fiberleri T3 kuartz optik fiber ile benzer bir yapıya sahip olduğu için ayrıca gösterilmemiştir. Şekil 3.1.f’de T15 olarak isimlendirilen optik fiberin Ce halka yapısı açık gri renkte net bir şekilde görülmektedir.

3.2. Optik Fiberlerin Element Analizleri

Optik fiberlerin element analizleri iki farklı yöntem ile gerçekleştirilmiştir. İlk olarak lazer ablasyonlu - indüktif olarak eşleşmiş plazma - kütle spektrometresi (LA-ICP-MS, Agilent 7500cs) kullanılmıştır. Bu sistem Nd:YAG lazeri içerir ve bu lazer ile fiber çapının uzunluğu boyunca ölçüm gerçekleştirilir. Burada, lazer spotun çapı $40 \mu\text{m}$ ve tarama hızı $5 \mu\text{m/s}$. Lazerin bir cm^2 'ye uyguladığı atım (pulse) başına enerji $\sim 7,5 \text{ J}$ 'dür.

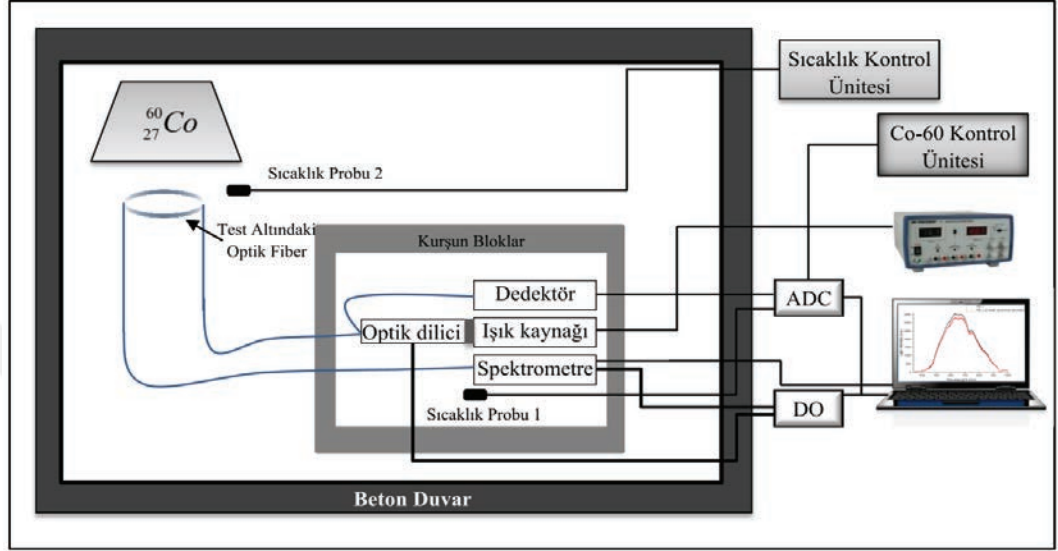
İkinci olarak, optik fiberlerin kor, yelek ve ceket katmanlarındaki elementlerin tayini ve doğrulanması için bir enerji dağılımlı spektrometre ("Energy dispersive spectrometry"-EDS) cihazı ile ölçümler gerçekleştirilmiştir. Optik fiberlerden 1 cm uzunluğa sahip parçalar kesilerek epoksi yardımı ile hazırlanan örneklerin üst yüzeyleri 1, 0,5 ve 0,3 μm 'lik zımparalar ile pürüzsüzleştirilmiştir. EDS ölçümleri alınmadan önce osminyum plazması ile kaplanarak ölçüm yüzeyinde iletkenlik sağlanmıştır.

3.3. Optik Fiberlerin Co-60 Radyasyon Kaynağı ile Işınlanmasında Kullanılan Deney Düzenegi

Optik fiberler düşük ($\leq 400 \text{ Gy}$) ve yüksek ($400 \text{ Gy} < \text{ ve } \leq 5 \text{ kGy}$) toplam dozlarda Co-60 radyasyonuna maruz bırakılmışlardır. Optik fiberlerin ışınlanması için kurulan deney düzeneginin şematik yapısı Şekil 3.2'de gösterilmiştir. Bu sistem ile radyasyona maruz bırakılma ve ölçümlerin gerçekleştirilmesi eş zamanlı olarak yapılabilmektedir. Bu sistemde optik fiberler 2,35-3,35 m aralığındaki uzunluklarda, 4,5-20 cm aralığında değişen farklı çaplarda sarılarak Co-60 radyasyon kaynağı altına yerleştirilmişlerdir.

Kullanılan Co-60 kaynağı açılıp-kapanabilen bir bölme içerisinde bulunmaktadır. Kaynak altına yerleştirilen optik fiberin bir ucuna spektrometre ve diğer ışık kaynağı ile bağlantıların sağlanması için 6 m uzunluğunda kuartz optik fiberler bağlanmıştır. Bağlanan bu kuartz fiberlerin bir ucuna, önünde optik dilici (chopper) bulunan ışık kaynağı (Tungsten Halojen lamba) diğer ucuna ise Ocean Optic-USB2000 spektrometresi yerleştirilmiştir. Kullanılan spektrometre, ışık kaynağı, vb. cihazların radyasyondan etkilenmemesi için kurşun bloklarla oluşturulan kapalı bir bölmede kullanılmıştır. Işık kaynağı ile optik dilici arasındaki boşluğun üzerine dedektör (Si-fotodiyot) konularak ölçüm sırasında ışık kaynağının şiddetinin değişip değişmediği kontrol edilmiştir. Bu dedektörden alınan veriler, analog-dijital dönüştürücü (ADC-"Analog Digital Converter"-National instruments USB 6009) yardımıyla bilgisayar ortamına aktarılmıştır. Spektrometre ve optik dilici, dijital çıkış ünitesi (DO) ile doğrudan kontrol edilerek, Ocean optik programı ile spektrumlar kaydedilmiştir. Bu kapalı bölmede ölçüm sırasında sıcaklığın kontrol edilmesi için sıcaklık probu 1 (LM35 entegre devresi) konulmuştur. Bu

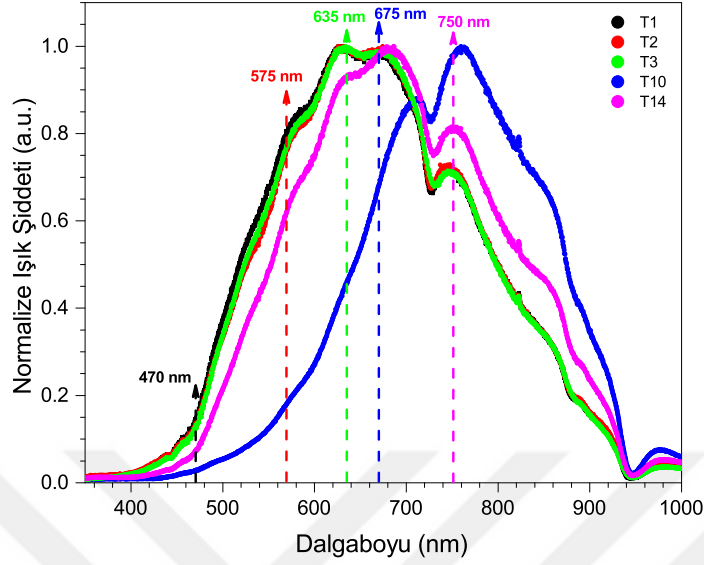
probun ve Co-60 kaynağının açılış-kapanış zamanının belirlenmesi için kontrol ünitesinin üzerine konulan bir dedektör ADC'ye bağlanmıştır. ADC veri alış-verişi tarafımızca yazılan Labview kodu ile gerçekleştirilmiştir. Bu sistemlere ek olarak sıcaklık probu 2 (ısı çift) kaynağın yakınına yerleştirilerek odanın sıcaklığının değişimi ayrıca gözlemlenmiştir.



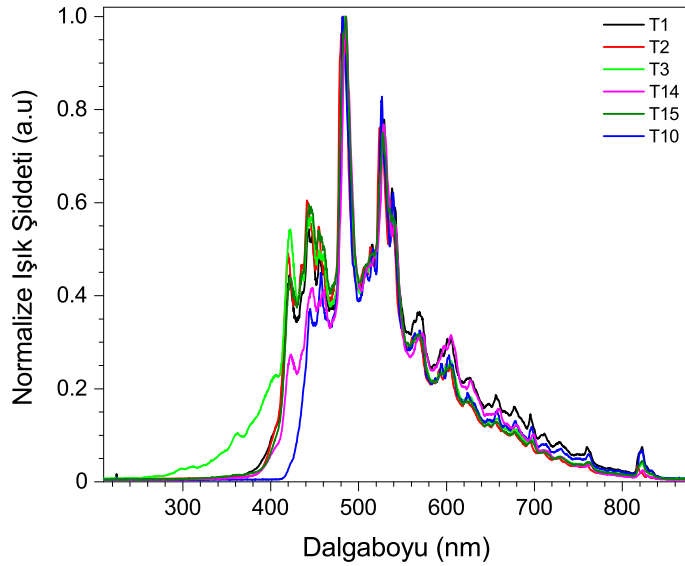
Şekil 3.2. Deney düzeneğinin şematik gösterimi

Optik fiberlerden spektrometre yardımıyla 350-1000 nm dalgaboyu aralığında spektrumlar elde edilmiştir. Şekil 3.3'de gösterilen spektrumlardan özellikle ışık şiddetinin maksimum olduğu dalgaboyları (470 nm, 570 nm, 635 nm, 675 nm ve 750 nm) seçilmiştir. Bu spektrumlardan RIA değerleri Denklem 4.5 ile hesaplanmıştır.

Bu ölçümlerin dışında T1, T2, T3, T10, T14 ve T15 optik fiberlerinden 2,5-3,35 m uzunluğa sahip parçalar 20 cm çapında sarılıp hazırlanarak Amerika Birleşik Devletleri Maryland Üniversitesinde bulunan Co-60 Panoramic Irradiator ile yüksek toplam dozlarda ışınlamalar gerçekleştirilmiştir. Sırasıyla uygulanan doz hızları 0,05, 0,5, 1 ve 10 kGy/h ve toplam dozlar 0,5, 5, 10 ve 100 kGy'dir. Optik fiberlere radyasyon uygulanmadan önce ve radyasyon uygulandıktan sonra spektrumlar kaydedilmiştir. Bu ölçümlerde Ksenon (Xenon) atımlı ışık kaynağı (Ocean optics- PX-2) ve Ocean Optik (USB2000) spektrometresi kullanılmıştır. Şekil 3.4'de optik fiberlerin ksenon ışık kaynağı ile alınan spektrumları gösterilmiştir. Bu ölçümlerde atmalı ksenon ışık kaynağının kullanılmasının nedeni, UV bölgesinin spektrumları tungsten halojen lambadan daha belirgin olmasıdır. Elde edilen spektrumlardan RIA değerleri benzer şekilde hesaplanmıştır.



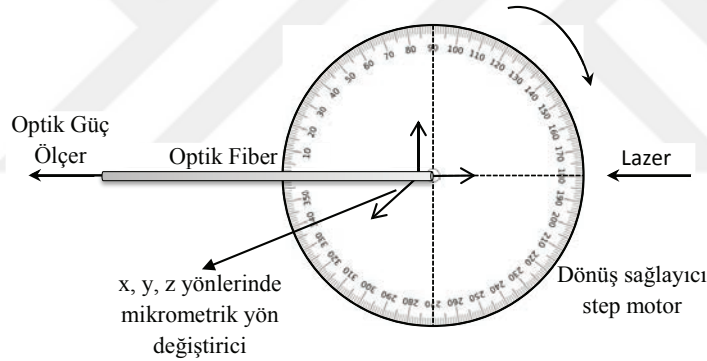
Şekil 3.3. Tungsten Halojen lamba kullanılarak T1, T2, T3, T10 ve T14 optik fiberlerden elde edilen çıkış spektrumları ve seçilen dalgaboyları



Şekil 3.4. T1, T2, T3, T10, T14 ve T15 optik fiberlerden ksenon ışık kaynağı kullanılarak elde edilen spektrumlar

3.4. Nümerik Açıklık (NA) Ölçümü için Kurulan Deney Düzenegi

Şekil 3.5’de kurulan sistem ile Kuartz ve Ce katkılandırılmış optik fiberlerin nümerik açıklıklarındaki radyasyon kaynaklı değişimler incelenmiştir. Bu sistemde fiberlerin radyasyonla ışınlanmadan önce ve radyasyonla ışınlandıktan sonra ölçümler gerçekleştirilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi sistem bir step motor yardımıyla dönebilen bir dairesel plaka üzerine monte edilen x , y ve z eksenlerini mikrometrik olarak hareket ettirebilecek şekilde ayarlanmıştır. Optik fiberin ucu, xyz kordinat sisteminin merkezine gelecek şekilde monte edilerek optik fibere üç yönde de mikrometrik değişimler gerçekleştirilmesi sağlanmıştır. Optik fiberin ucu ile aynı ekseninde HeNe lazer (Thorlabs HNL100L-632,8 nm) konumlandırılmıştır. Işık şiddeti optik fiberin uzak ucuna bağlanan bir optik güç ölçer tarafından açıya bağlı olarak ($0-180^\circ$) 2° ’lik aralıklarda ölçülmüştür. NA değerlerini hesaplamak için elde edilen sonuçlar normalize edilmiştir. Bulunan eğrilerin sol ve sağ kollarındaki maksimumun $1/(2e^2) \approx 0,068$ değerleri ile maksimum nokta arasındaki mesafelerin ortalaması alınarak ışınlanmadan önceki ve sonraki durumlar için NA değerleri hesaplanmıştır.

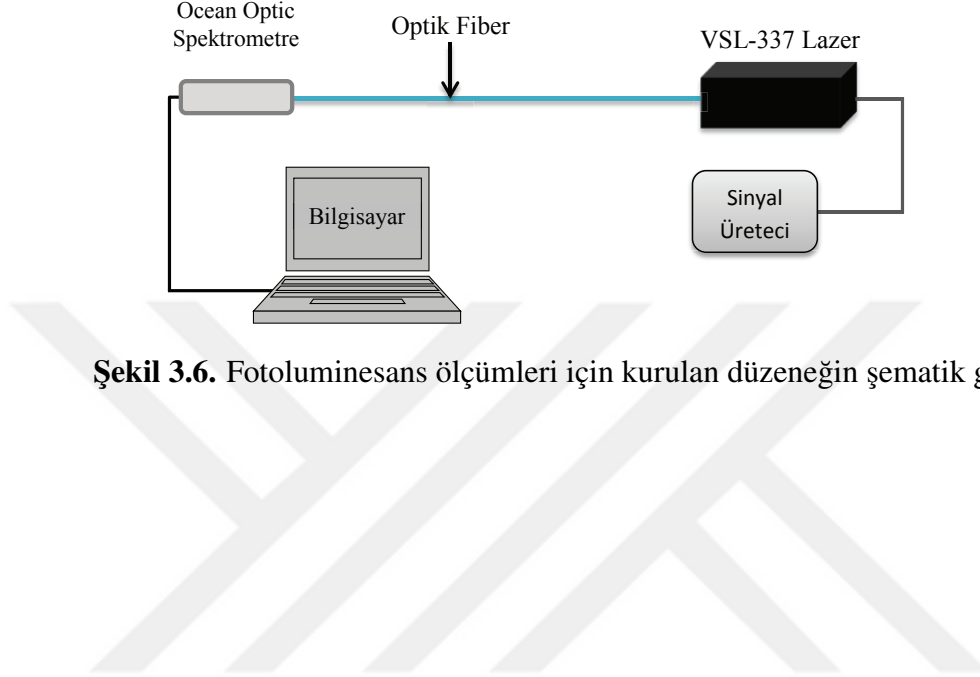


Şekil 3.5. NA ölçümü için kurulan deney düzeneginin şeması

3.5. Fotoluminesans için Kurulan Deney Düzenegi

Fotoluminesans ölçümlerinin gerçekleştirilmesi için Şekil 3.6’deki sistem kurulmuştur. Bu sistem de ışık kaynağı olarak LSI (Laser Science Inc.-VSL 337) azot lazer ve Ocean Optic (Flame model) spektrometre kullanılarak ölçümler gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.6’da görüldüğü gibi sinyal üreticine bağlı 337 nm dalgaboyuna sahip lazer ışık kaynağı optik fiberin bir ucuna bağlandıktan sonra diğer ucuna bağlanan spektrometre yardımıyla ışınlama öncesi ve sonrası ayrı ayrı spektrumlar bilgisayar yardımıyla kaydedilmiştir. Burada sinyal üretici atım süresini ayarlamak için kullanılmıştır. Elde edilen spektrumlardan Denklem 4.5

kullanılarak RIA değerleri hesaplanmıştır. Bu ölçümler için Co-60 radyasyonuna maruz bırakılan T3 kuartz optik fiberi ve Ce katkılı sintilasyon fiberleri (T1, T2, T10, T14 ve T15) kullanılmıştır. Bu optik fiberlerden 4 adet eşit uzunlukta örnek hazırlanmıştır. Örneklerin uzunlukları 2,35-3,35 m aralığında değişmektedir.



Şekil 3.6. Fotoluminesans ölçümleri için kurulan düzeneğin şematik gösterimi

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1. Optik Fiberlerin Kütle Spektrometresi Sonuçları

Kuartz ve Ce katkılanmış optik fiberlerin kor, yelek ve ceketle bulunan element miktarlarının tayini için Lazer ablasyonlu - indüktif olarak eşleşmiş plazma - kütle spektrometresi (LA-ICP-MS, Agilent 7500cs) cihazı kullanılmıştır. Lazer ile optik fiber çapının uzunluğu boyunca o bölgedeki atomlar iyonlaştırılarak enerji seviyelerine bağlı olarak element tayini gerçekleştirilmiştir. Bütün optik fiberler % 99,99 silika içermektedir ve bundan dolayı silikaya ait sonuçlar çizelgede gösterilmemiştir. Tüm optik fiberler için % 0,01'lik kısma ait elde edilen element miktarları Çizelge 4.1'de verilmiştir.

Kullanılan optik fiberler yüksek miktarlarda OH^- iyonu içermektedir. T3, T4, T5 ve T7 kuartz optik fiberlerinin korunda 700 ppm ve T14 Ce katkılanmış optik fiberin silikadan yapılan kor-2 yapısında ~400 ppm miktarında OH^- iyonu bulunmaktadır. T15 Ce katkılı halkalı yapıya sahip optik fiberin kor-1'inde ~700 ppm, kor-1'i çevreleyen Ce katkılı halkasında 130-220 ppm ve kor-2 yapısında ~400 ppm'lik OH^- iyonu bulunmaktadır.

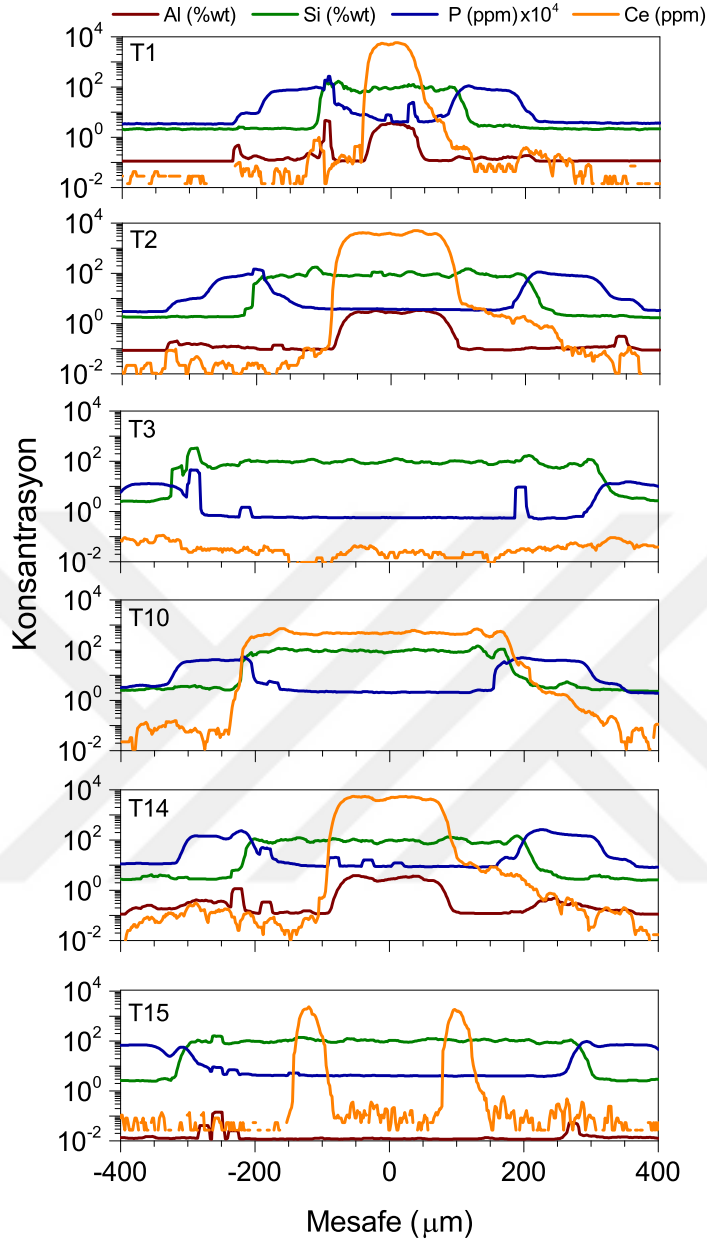
Kuartz optik fiberlerin (T3, T4, T5 ve T7) kor kısımlarında silikanın yanında düşük oranlarda B, Mg (T3 fiberi hariç), Sc, P ve Fe (T3 fiberi hariç) elementleri bulunmaktadır. Düşük oranlardaki bu elementlerden en dikkat çekici olanı T3 optik fiberinde diğer fiberlere göre daha yüksek miktarda P elementi içermesidir. Bunun yanında T4, T5 ve T7 optik fiberlerinde ortalama 60 ppm'lik Fe katkısı vardır. Bu fiberlerin yelek kısmında da P oranları diğer elementlere göre oldukça yüksektir. T4 optik fiberinin yelek kısmında 582 ppm'lik Al içeriğinde bulunmaktadır. Bu optik fiberlerin ceketlerinde bu elementlerden bol miktarda bulunmakla birlikte T5 ve T7 optik fiberlerinin ceket kısmında Al elementi yoktur.

Ce katkılanmış T1, T2, T9, T10, T14 ve T15 optik fiberlerinin korunda yüksek miktarda Ce ile birlikte Mg, Sc, Ti, Ga, La, Fe ve Gd elementleri düşük konsantrasyonlarda gözlemlenmiştir. T1, T2 ve T14 korlarında yüksek miktarda Al konsantrasyonları oldukça belirgindir ve bu üç optik fiberin yelek ve ceket kısımları yüksek miktarda P elementi içermektedir. T9 optik fiberinin yelek ve ceket kısımlarında B, Al ve P elementleri bulunmaktadır. T10 ve T15 optik fiberlerinin kor kısımlarında Al ve P elementlerinin olmadığı görülmüştür.

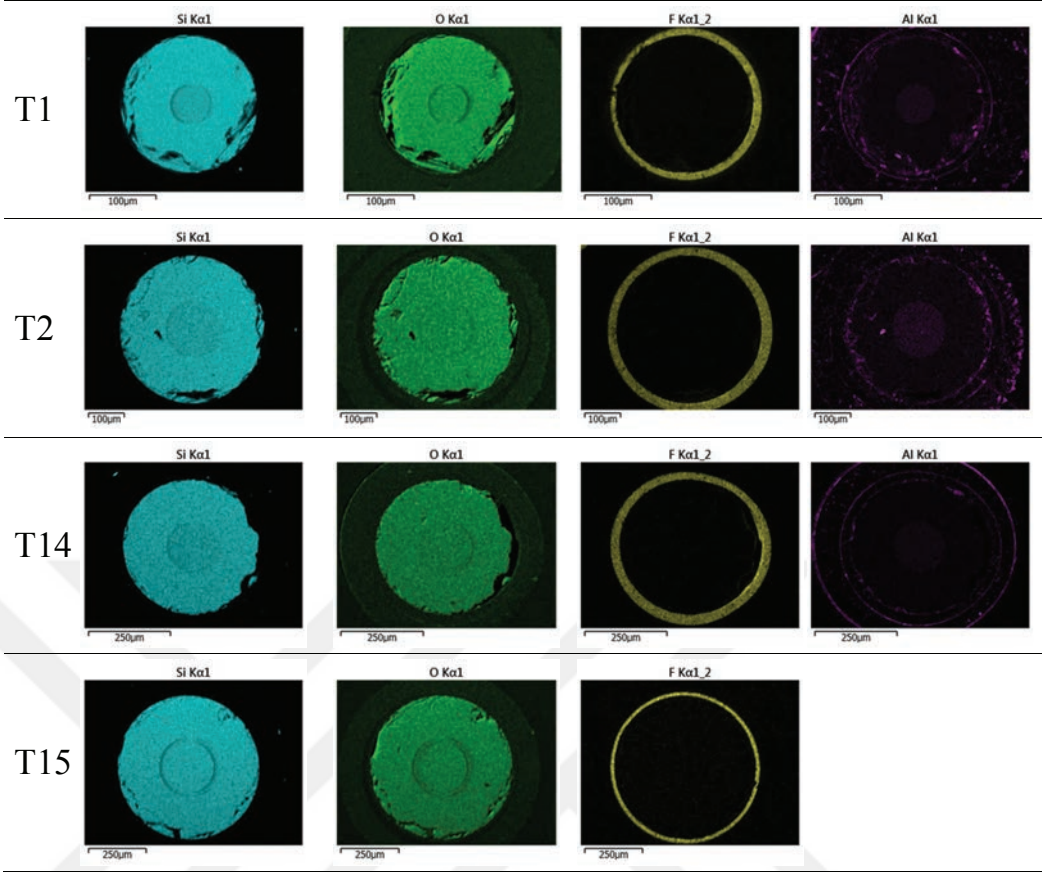
Optik fiberlerin çapları boyunca yapılan ölçümlerde Si, Al, P ve Ce elementleri için elde edilen grafikler Şekil 4.1'de gösterilmiştir. Yüksek miktarda katkılanmış Ce elementi T1, T2, T10 ve T14 fiberlerinin koru içinde ve ayrıca T15 fiberinin halka bölümünde bulunduğu grafiklerde net bir şekilde görülmektedir. T1, T2 ve T14 optik fiberlerinin korundaki yüksek miktardaki Al elementinin konumları şekilde görülmektedir.

Çizelge 4.1. Optik fiberlerin farklı bölgelerinden kütle spektrometresi ile elde edilmiş element konsantrasyonlarıdır. Birimler ppm ("Parts per million"-milyon başına parça) cinsinden verilmiştir. Ölçüm, algılama eşik seviyesinin altındaysa sayısal veri yoktur

Fiber	B	Mg	Al	P	Sc	Ti	Ga	La	Ce	Fe	Gd
T1 Kor-1	-	2	13760	183	5	-	176	1	5780	-	9
T1 Kor-2	6	-	11	70	6	-	-	-	10	-	-
T1 Yelek	98	74	1006	21640	4	-	2	-	-	-	-
T1 Ceket	4760	6810	35930	1590490	-	-	-	-	-	-	-
T2 Kor-1	4	-	12700	154	5	-	160	1	4920	-	7
T2 Kor-2	3	6	30	97	6	-	-	-	4	-	7
T2 Yelek	15	-	420	11430	3	1	28	-	-	-	-
T2 Ceket	4650	-	27095	1235370	-	38	4145	-	-	-	-
T3 Kor	7	-	-	94	6	-	-	-	-	-	-
T3 Yelek	8	93	-	1180	3	-	-	-	-	-	-
T3 Ceket	120	530	-	121755	-	-	-	-	-	-	-
T4 Kor	1	3	-	17	2	-	-	-	-	69	-
T4 Yelek	1	4	582	44	2	0,3	-	-	-	57	-
T4 Ceket	69	260	-	319220	10	7	2	-	-	2700	-
T5 Kor	1	1	-	17	2	-	-	-	-	56	-
T5 Yelek	1	4	-	200	2	0,02	-	-	-	49	-
T5 Ceket	141	910	1323	530190	-	14	7	-	-	27820	-
T7 Kor	1	15	-	17	2	-	-	-	-	65	-
T7 Yelek	4	66	-	97	2	0,7	-	-	-	54	-
T7 Ceket	440	2620	2117	340610	-	31	-	-	-	5192	-
T9 Kor-1	6	-	-	33	2	-	-	-	760	-	0,46
T9 Kor-2	7	7	-	171	2	-	0,1	-	2	-	-
T9 Yelek	19	71	47	4525	2	1	0,2	-	-	-	-
T9 Ceket	1457	-	582	197733	-	-	6	-	-	-	-
T10 Kor	7	-	-	17	3	-	7	0,02	427	-	0,3
T10 Yelek	7	-	-	15	3	25	6	0,02	367	-	0,3
T10 Ceket	116	555	1856	518023	-	18	20	2,3	-	-	-
T14 Kor-1	6	-	14394	16	3	-	82	1	5230	-	4
T14 Kor-2	7	-	-	20	3	-	-	-	0,8	-	-
T14 Yelek	28	95	1164	23084	4	3	55	-	0,8	-	-
T14 Ceket	1166	447	2035	2641060	-	67	10761	-	-	-	-
T15 Kor-1	5	-	-	-	3	-	-	0,02	-	-	-
T15 Ce halkası	5	-	-	-	3	4	11	0,05	2070	-	0,84
T15 Kor-2	6	-	-	-	3	-	-	0,04	-	-	-
T15 Yelek	3	-	-	5940	2	-	-	-	-	-	2
T15 Ceket	2360	2540	-	956270	-	-	-	-	-	-	-



Şekil 4.1. T1, T2, T3, T10, T14 ve T15 optik fiberlerin farklı kısımlarındaki Si, Al, P ve Ce konsantrasyonları optik fiberler boyunca belirli bölgelerde olduğu için lazer ablasyon yöntemi ile açıkça görülmektedir. Ce'nin varlığı ve yeri, sürekli turuncu çizgilerle gösterilmiştir. Ayrıca Al'in varlığı T1, T2 ve T14 optik fiberlerinde de görülmektedir. T3, T10, ve T15 optik fiberlerinde ölçülebilir miktarda Al bulunmamaktadır. P konsantrasyonu akrilat yelek ve çekette bulunmaktadır. Sinyal asimetrisinden çıkarılabileceği gibi, lazer tarama yönü soldan sağa doğrudur ve sağ taraftaki kuyruk, lazer spotunun optik fiberler boyunca sabit hızda hareket etmesinden ötürü, ablasyonlanmış materyalin sürekli olarak spektrometreye aktığını göstermektedir. Dikey eksen, Al ve Si için molar ağırlıkların yüzdesini, P ve Ce için ise ppm'i göstermektedir



Şekil 4.2. T1, T2, T14 ve T15 optik fiberlerinin kesit alanlarından alınan EDS görüntüleri. Si, O, F ve Al elementlerinin yoğunlukları bölgesel olarak sırasıyla mavi, yeşil, sarı ve mor renkte sunulmuştur

T1, T2, T14 ve T15 Ce katkıli optik fiberlerinde gerçekleştirilen EDS ölçümleri Şekil 4.2’de gösterilmiştir. Optik fiberlerin kor, yelek ve ceket yapılarında Si, O, F ve Al elementlerinin bölgesel olarak yoğunlukları sırasıyla mavi, yeşil, sarı ve mor renklerde şekilde belirtilmiştir. Optik fiberlerdeki Ce katkısı EDS cihazının algılama eşik değeri olan 6000 ppm değerinde altında olmasından dolayı belirlenememiştir. Bu fiberlerin kor-1 ve kor-2 kısımlarında yüksek yoğunluklarda Si ve O elementleri ile yelek kısımlarında F elementi bulunmaktadır. T1, T2 ve T14 optik fiberlerinin kor-1, yelek ve ceket kısımlarında Al elementi gözlenirken, T15 optik fiberinde Al elementi bulunamamıştır.

Element analizleri gerçekleştirilen optik fiberlerin Co-60 radyasyon kaynağı ile eş zamanlı (online) yapılan ölçümlerle ışık şiddetindeki değişimler belirlenmiştir. Daha sonraki aşamada bu optik fiberlerin RIA zayıflamaları ve iyileşme süreçlerinin teorik bir model ile yaklaşımı tanımlanarak bu fiberlerin RIA ve iyileşme süreçleri ile birlikte tartışılmıştır. Eş zamanlı yapılan ölçümlerin, eş zamanlı olmayan ölçümlerle karşılaştırılması için tüm optik fiberlerden yeni

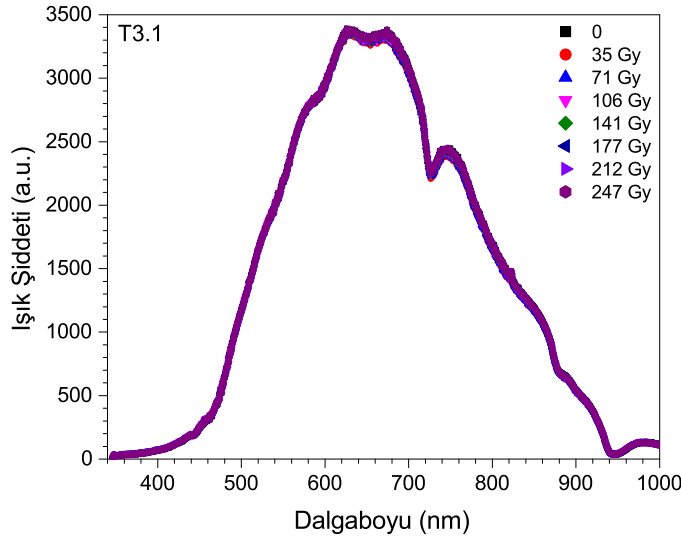
örnekler hazırlanmıştır. Hazırlanan bu optik fiberler yüksek doz hızlarında ve toplam dozlarda Co-60 gama radyasyona maruz bırakılmışlardır. Bunların radyasyon uygulanmadan önce ve radyasyon uygulandıktan sonra meydana gelen değişimler incelenmiştir. Bunlara ait sonuçlar her bir optik fiber için sırasıyla aşağıda sunulmuştur.

4.2. Co-60 Radyasyon Kaynağının Kuartz Optik Fiberlere Etkisi

Çizelge 3.1’de ‘T’ kodları ile isimlendirilen optik fiberlerden hazırlanan farklı uzunluklardaki parçalara çeşitli doz hızı ve toplam dozlarda radyasyon uygulanmıştır. Farklı doz hızı ve toplam doz miktarlarında radyasyona maruz kalan parçaların karışmaması adına optik fiber kodunun sonuna ayrıca bir sayı eklenmiştir.

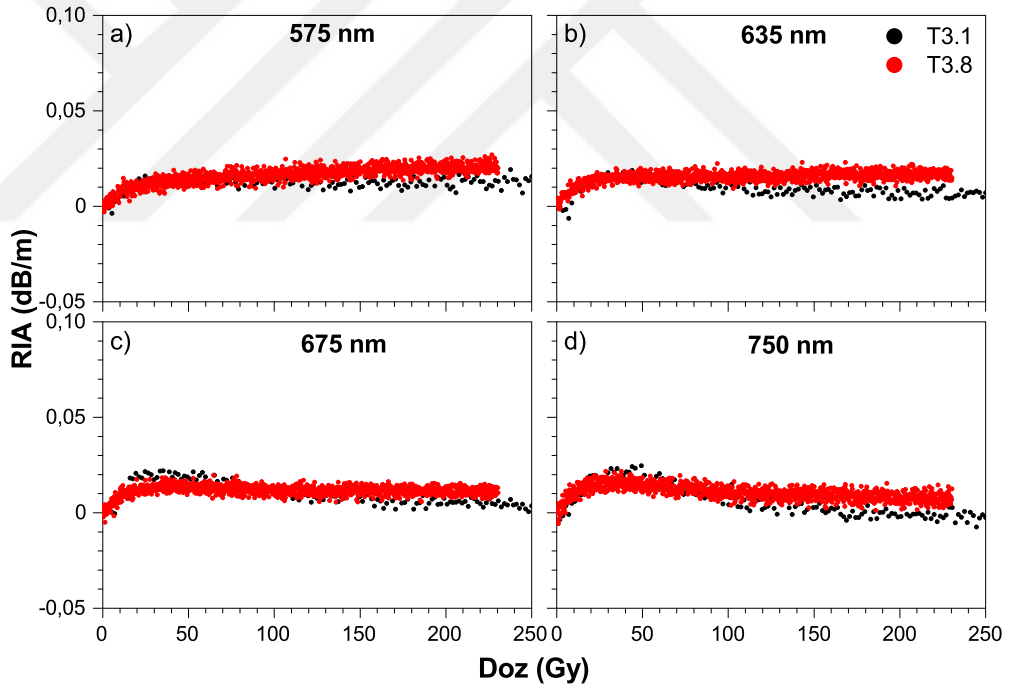
4.2.1. T3 (Clear fused-silica) kuartz optik fiber

T3 kuartz optik fiberden 3,35 m uzunluğunda parçalar alınarak Co-60 gama radyasyonuna maruz bırakılmıştır. Burada radyasyon doz hızı 106 Gy/sa olarak belirlenmiştir. Hazırlanan 3,35 m’lik parçalar sırasıyla 1484 (T3.1) ve 247 (T3.8) Gy toplam doz olacak şekilde radyasyona maruz bırakılmışlardır. Şekil 4.3’de T3.1 kuartz optik fiberinin spektrometreden elde edilen dalgaboyuna karşı çıkış ışık şiddetindeki değişim verilmiştir. Grafikte 20’şer dakikalık adımlarla toplam 2 saat 40 dakikada gerçekleşen değişim gösterilmiştir.



Şekil 4.3. T3.1 optik fiberlerinin 2 saat 40 dakikalık ışınlama sürecinde 20 dakikalık aralıklarla alınan spektrumları

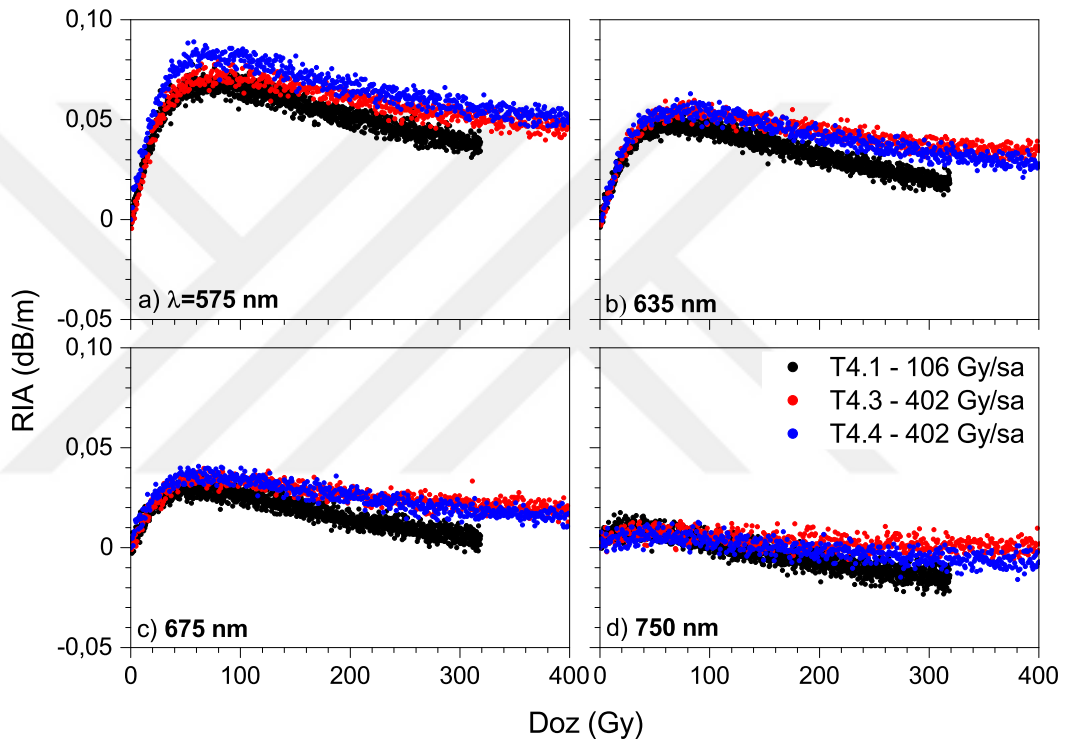
Eşzamanlı ölçümlerden elde edilen spektrumlarda 575, 635, 675 ve 750 nm dalgaboyları için RIA değişimleri hesaplanmıştır ve Şekil 4.4.a-d'de verilmiştir. Grafikte kırmızı noktalarla gösterilen 247 Gy, siyah noktalarla gösterilen 1484 Gy toplam doz miktarında alınan ölçümlerdir. 106 Gy/sa doz hızında gerçekleştirilen bu ölçümlerde uygulanan toplam doz arttıkça zayıflama da artmaktadır. 25 Gy toplam doz değerinden sonra zayıflama hemen hemen sabit kalmaktadır. Dört dalgaboyu içinde hesaplanan RIA değişimi yaklaşık olarak 0,02 dB/m'dir. Bu kadar az bir değişim kuartz optik fiberlerin radyasyona karşı oldukça dayanıklı olduğunu göstermektedir. Bu dayanıklılığın sebebi kuartz optik fiberlerin korunda bulunan yüksek miktardaki OH^- iyonundan kaynaklanmaktadır (Gavrilov vd. 1994; Kaya vd. 1984). 0,02 dB/m'lik zayıflama ışınlama esnasında radyasyondan kaynaklı oluşan kusurlar (NBOHC ve E' renk merkezleri)'dir. 630 ve 670 nm dalgaboylarında oluşan soğurmalar NBOHC renk merkezinin (Bhattacharya vd. 2011; Gavrilov vd. 1997; Kaya vd. 1984) ve 450 nm dalgaboyundaki soğurmalar E' renk merkezlerinin (Gavrilov vd. 1997; Griscom 1984) oluşmasından kaynaklanmaktadır.



Şekil 4.4. 106 Gy/sa doz hızında T3 optik fiberin a) 575 nm; b) 635 nm; c) 675 nm ve d) 750 nm dalgaboylarındaki doz miktarına karşı RIA değişimleri. Burada kırmızı noktalarla gösterilen 247 Gy, siyah noktalarla gösterilen 1484 Gy toplam doz miktarında alınan ölçümleri göstermektedir

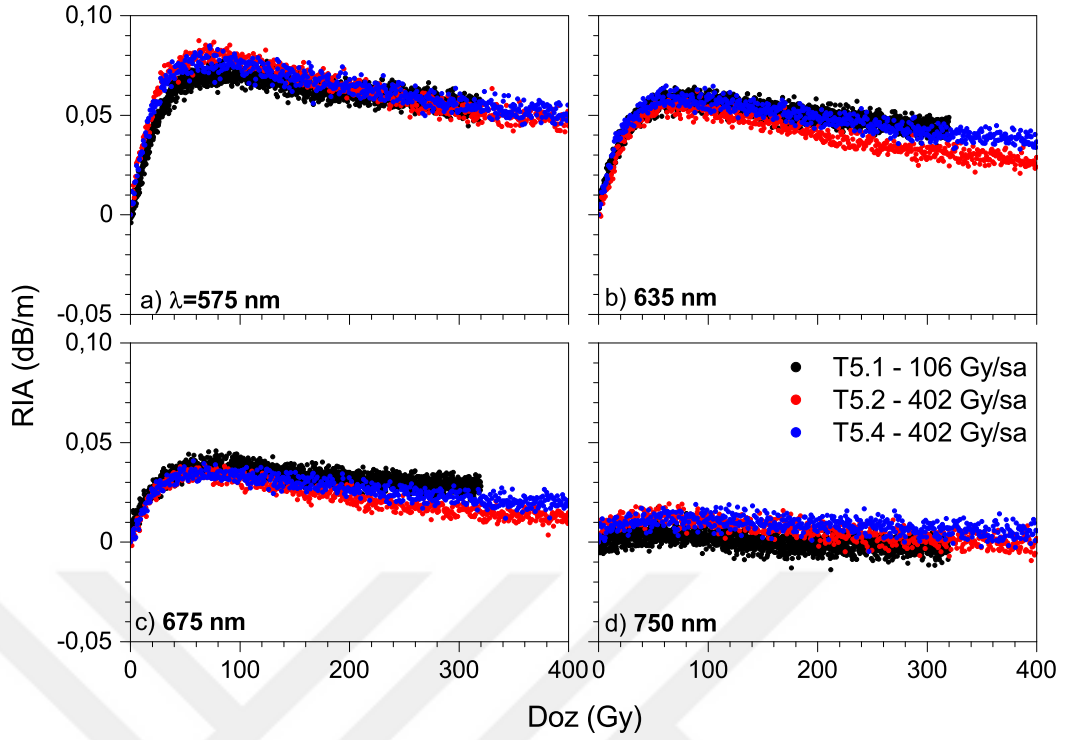
4.2.2. T4 (Cern-01A) ve T5 (Cern-02A) kuartz optik fiber

T4 kuartz optik fiberinden hazırlanan 2,50 m'lik parçalar 106 Gy/sa doz hızında 318 Gy (T4.1), 402 Gy/sa doz hızında 1942 Gy (T4.3) ve 402 Gy/sa doz hızında 1206 Gy (T4.4) toplam doz olacak şekilde Co-60 radyasyonuna maruz bırakılmışlardır. Eş zamanlı ölçümlerden elde edilen spektrumlarında 575, 635, 675 ve 750 nm dalgaboylarındaki RIA değişimleri Şekil 4.5.a-d'de gösterilmiştir. Grafikte siyah noktalarla gösterilen 318 Gy, kırmızı noktalarla gösterilen 1942 Gy ve mavi noktalarla gösterilen 1206 Gy toplam doz miktarında alınan ölçümleri göstermektedir.

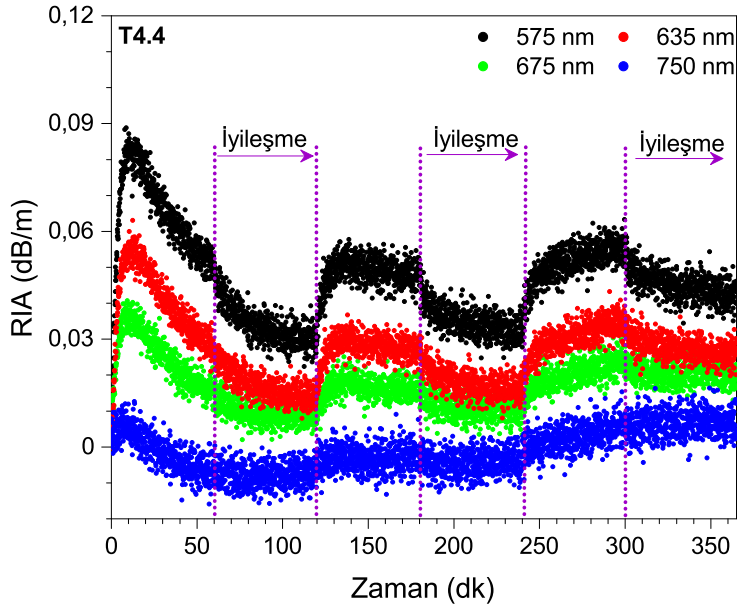


Şekil 4.5. 106 Gy/sa ve 402 Gy/sa doz hızında T4 optik fiberin a) 575 nm; b) 635 nm; c) 675 nm ve d) 750 nm dalgaboylarındaki doz miktarına karşı RIA değişimleri. Burada siyah, kırmızı ve mavi noktalarla gösterilen ölçümler sırasıyla 318 Gy, 1942 Gy ve 1206 Gy toplam doz miktarlarıdır

Şekil 4.5.a'da gösterilen 575 nm dalgaboyunda, uygulanan doz miktarındaki artışına bağlı olarak, 75 Gy toplam doz değerine kadar RIA hızlı bir şekilde artmaktadır. 75 Gy'den sonra RIA değeri lineer olarak azalmaktadır. Burada toplam zayıflama 0,05 dB/m'dir. 635 ve 675 nm dalgaboylarında (Şekil 4.5.b ve c) 50 Gy'e kadar hızlı bir şekilde artış meydana gelmiştir ve bu doz değerinin üstündeki değerlerde zayıflama lineer olarak azalmıştır. 635 ve 675 nm'deki zayıflama miktarları sırasıyla 0,04 ve 0,02 dB/m'dir. 750 nm dalgaboyunda ise artan doza bağlı olarak 0,005 dB/m'lik zayıflama gözlenmiştir.



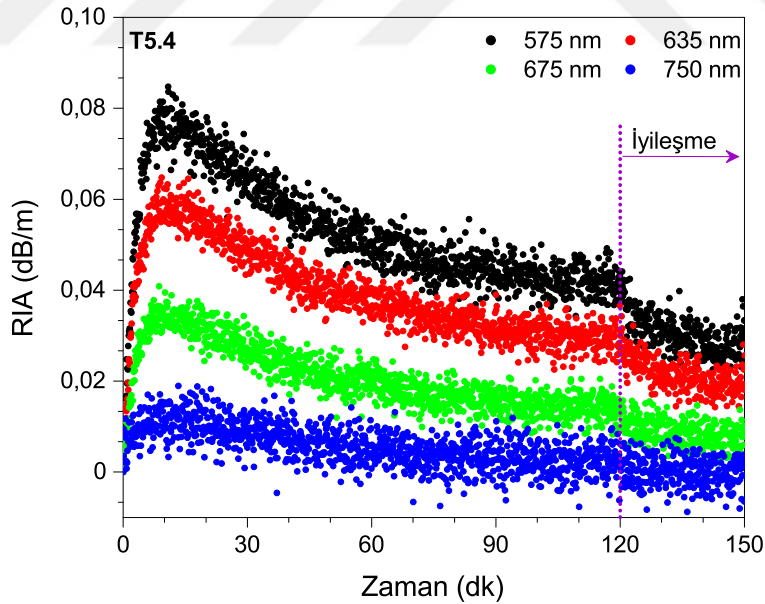
Şekil 4.6. 106 Gy/sa ve 402 Gy/sa doz hızında T5 optik fiberin a) 575 nm; b) 635 nm; c) 675 nm ve d) 750 nm dalgaboylarındaki doz miktarına karşı RIA değişimleri. Burada siyah kırmızı ve mavi noktalarla gösterilen ölçümler sırasıyla 318, 1206 ve 804 Gy toplam doz miktarlarıdır



Şekil 4.7. T4.4 kuartz optik fiberinde üç hasar (60 dk) seti ve üç iyileşme (60 dk) setinin zamana bağlı olarak değişimi

Aynı şekilde T5 kuartz optik fiberi 106 Gy/sa doz hızında 318 Gy (T5.1), 402 Gy/sa doz hızında 1206 Gy (T5.2) ve 402 Gy/sa doz hızında 804 Gy (T5.4) toplam doz olacak şekilde radyasyona maruz bırakılmışlardır. T5 fiberinde de T4 optik fiberinde seçilen dalgaboyları için RIA değişimleri hesaplanmıştır ve Şekil 4.6.a-d'de gösterilmiştir. 106 ve 402 Gy/sa doz hızında alınan bu ölçümlerde, 575 nm dalgaboyunda (Şekil 4.6.a) uygulanan doz miktarının artışına bağlı olarak 75 Gy'ye kadar RIA hızlı bir şekilde artmıştır. 75 Gy değerinden sonra RIA değeri lineer olarak azalmıştır ve toplam zayıflama 0,05 dB/m olarak bulunmuştur. Şekil 4.6.b ve c'de 635 ve 675 nm dalgaboyları için hesaplanan RIA değişimleri gösterilmiştir. Burada 50 Gy'ye kadar hızlı bir şekilde artan RIA, 50 Gy'den sonra lineer olarak azalmaktadır. RIA zayıflama miktarları sırasıyla 0,04 ve 0,02 dB/m'dir. 750 nm dalgaboyunda ise uygulanan radyasyon doz miktarı artmasına bağlı olarak 0,005 dB/m'lik zayıflama gözlenmiştir ve bu zayıflama T4 fiberinde olduğu gibi oldukça azdır.

T4 ve T5 optik fiberlerinin aynı doz hızında ve aynı toplam dozun uygulanmasında bezer sonuçlar gösterdiği belirlenmiştir. T4 ve T5 fiberleri T3 kuartz optik fiberi gibi radyasyona karşı oldukça dayanıklı oldukları görülmüştür ve bu da optik fiberlerin korunda bulunan yüksek OH⁻ miktarından (700 ppm) kaynaklanmaktadır (Friebele vd. 1983).



Şekil 4.8. T5.4 kuartz optik fiberinde 603 Gy toplam doza maruz bırakıldıktan sonra 30 dk iyileşme sürecinin zamana bağlı olarak değişimi

T4.4 kuartz optik fiberin genel performansının radyasyona bağlı olarak değişimi 60 dk'lık aralıklarla radyasyona maruz bırakıp 60 dk'lık bekleme süreçleri uygulanmıştır. Şekil 4.7'da görüldüğü gibi bu işlem üç kez tekrarlanmıştır. Böylelikle T4.4 optik fiberinin hasar ve iyileşme süreçlerinin tekrarlanabilirliği gözlemlenmiştir. İlk 60 dk'da radyasyon etkisi ile 0.06 dB/m'lik bir zayıflamaya ulaşan RIA değeri daha sonraki 60 dk'lık süreçte bir miktar iyileşme göstermiştir. Bu iyileşme sürecinde elde edilen miktar radyasyona maruz kaldığında elde edilen kayıba kıyasla oldukça düşüktür. İkinci 60 dk'lık radyasyona maruz bırakıldığında, optik fiberin daha önceki 60 dk süreçteki biriken radyasyon dozundaki durumu hafızasında tutarak ve önceki ışınlama periyodu esnasında gözlemlenen RIA zayıflama seviyesine hızlı bir şekilde ulaştığı görülmüştür. Benzer bir davranış Brichard vd.'nin kuartz ve F katkılanmış optik fiberlerde yapmış oldukları çalışmalarında da gözlemlenmiştir (Brichard vd. 2002).

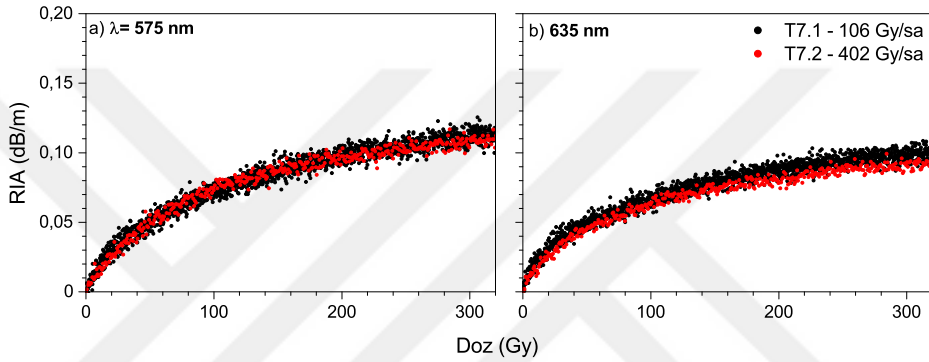
Aynı şekilde T5.4 optik fiberi için de benzer bir performans testi yapılmıştır. Bu testte 2 saat radyasyona maruz bırakılan optik fiberler 30 dk'lık süreçlerde iyileşmesi beklenmiştir (Şekil 4.8). Bu T5.4 fiberinde de T4.4 fiberindeki hasar-iyileşme mekanizmasına benzer bir davranış gözlenmiştir ve bu iki fiberde de dalgaboyu arttıkça zayıflama miktarının daha az olduğu görülmüştür (Youngwoong vd. 2013).

4.2.3. T7 (KOg-02A) kuartz optik fiber

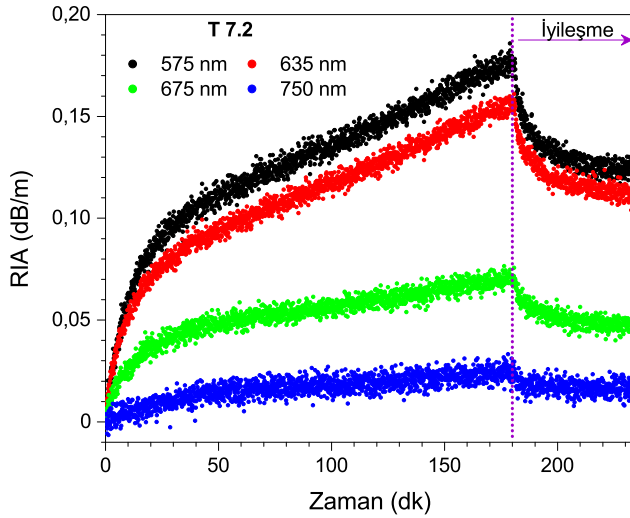
Şekil 4.9.a ve b'de T7 kuartz optik fiberinin 575 ve 635 nm dalgaboylarındaki artan toplam doza bağlı RIA değişimleri verilmiştir. Burada siyah noktalarla gösterilen 318 Gy (106 Gy/sa doz hızında, T7.1) ve kırmızı noktalarla gösterilen 1206 Gy (402 Gy/sa doz hızında, T7.2) toplam doz miktarında alınan ölçümleri göstermektedir. Bu dalgaboylarında, uygulanan radyasyon dozunun artmasıyla RIA değerinde bir artış görülmüştür ve RIA zayıflaması yaklaşık 0,1 dB/m'dir. 106 ve 402 Gy/sa radyasyon doz hızlarında yapılan ölçümler benzer bir davranış göstermiş ve aynı RIA değerine ulaşmaktadır. Bu da T7 optik fiberinin radyasyona karşı göstermiş olduğu direncin radyasyon doz hızından bağımsız olduğunu göstermektedir. Griscom'un 1994 yılında gerçekleştirmiş olduğu çalışmasında (Griscom vd. 1994) doz hızına bağımlılığı nadir toprak elementi katkılı sentilasyon fiberlerinde gözlemlenmiştir ve bu bağımlılığın direk olarak optik fiberdeki nadir toprak elementlerinden kaynaklandığı göstermiştir. T7 fiberinin yapısında herhangi bir nadir toprak elementi katkısı bulunmamaktadır ve bulunan bu sonuç Griscom'un çalışması ile tutarlılık göstermektedir.

402 Gy/sa doz hızında 1206 Gy toplam doza maruz bırakılan T7.2 kuartz optik fiberinde performans testi gerçekleştirilmiştir. 180 dk'lık bir radyasyon uygulanmasından sonra 55 dk'lık bir iyileşme süreci sonucunda elde edilen farklı dalgaboyundaki RIA değişimleri Şekil 4.10'da gösterilmiştir. Radyasyon uygulandıktan sonra 575 ve 635 nm dalgaboyları için RIA zayıflamaları sırasıyla

yaklaşık 0,18 ve 0,15 dB/m değerine ulaşmaktadır. 55 dk'lık iyileşme sürecinden sonra hesaplanan RIA değerleri bu iki dalgaboyu için yaklaşık 0,11 dB/m'dir. 675 ve 750 nm dalgaboylarındaki RIA değerleri radyasyon uygulandıktan sonra sırasıyla 0,06 ve 0,015 dB/m'dir. 55 dk'lık iyileşme sürecinden sonra 0,04 ve 0,01 dB/m değerlerine gerilemişlerdir. Sonuçlardan da görüleceği gibi bu optik fiber kısa dalgaboylarında uzun dalgaboylarına göre daha fazla radyasyondan etkilenmektedir. Uzun dalgaboylarındaki iyileşme süreçleri kısa dalgaboylarındaki süreçlere göre oldukça yavaş gerçekleşmektedir (Youngwoong vd. 2013). T7 kuartz optik fiberinin genel performansına bakıldığı zaman radyasyondan kaynaklı kusurların oluştuğu görülmüştür ve seçilen dalgaboyları için iyileşme sürecinde başlangıç değerine ulaşamadığı gözlemlenmiştir.



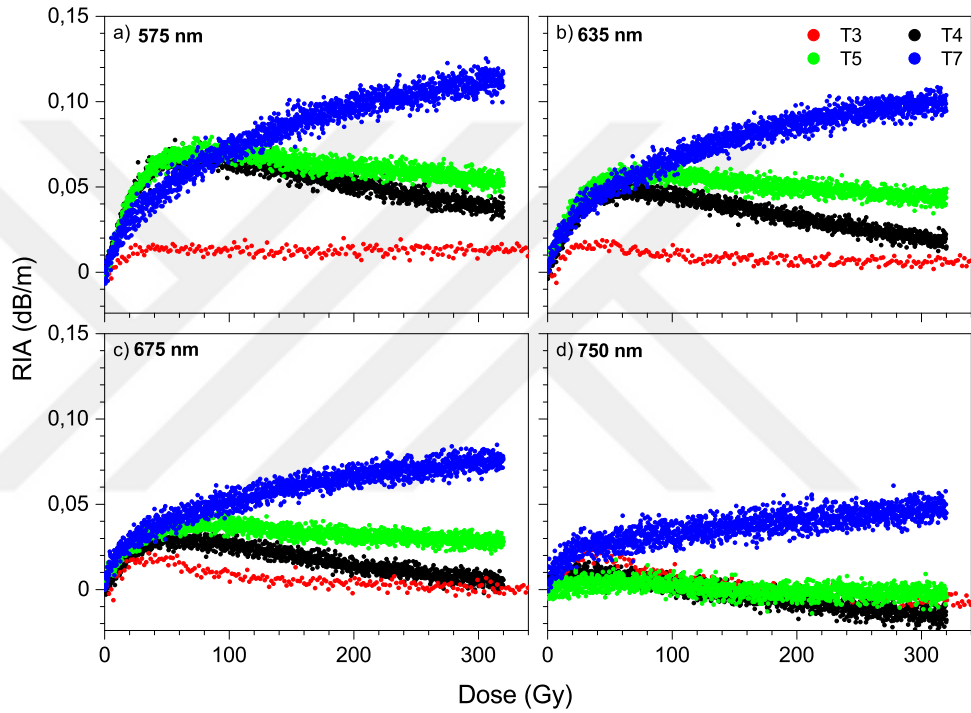
Şekil 4.9. 106 ve 402 Gy/sa doz hızında T7 optik fiberin a) 575 ve b) 635 nm dalgaboylarındaki doz miktarına karşı RIA değişimleri. Burada siyah noktalarla gösterilen 318 Gy ve kırmızı noktalarla gösterilen 1206 Gy toplam doz miktarında alınan ölçümleri göstermektedir



Şekil 4.10. T7.2 kuartz optik fiberin 1206 Gy toplam doza maruz bırakıldıktan sonra 55 dk iyileşmenin zamana bağlı olarak değişimi (doz hızı 402 Gy/sa)

4.2.4. T3, T4, T5 ve T7 kuartz optik fiberlerin karşılaştırılması

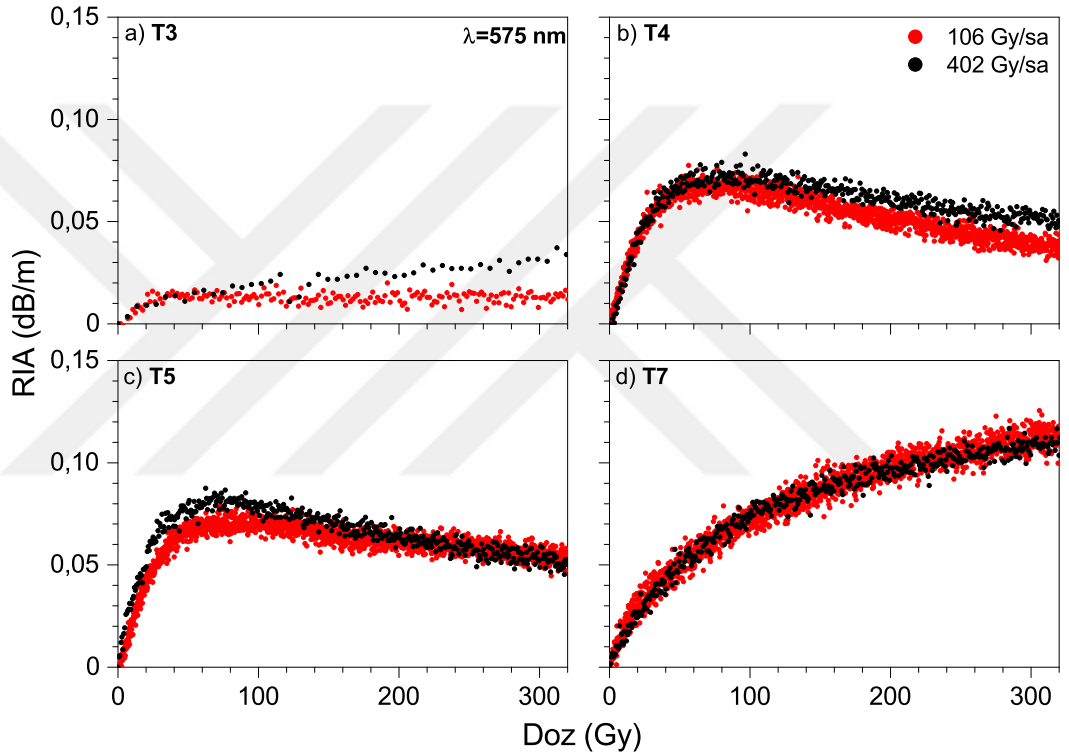
Bu bölüme kadar T3, T4, T5 ve T7 kuartz optik fiberlerinin genel performansları ayrı ayrı olarak radyasyon doz hızı ve toplam doz miktarlarına göre incelenmiştir. Bu optik fiberlerin karşılaştırılmaları, kuartz optik fiberlerin yapısındaki farklı element katkılarının radyasyon ile etkileşimlerinin belirlenmesi açısından büyük bir öneme sahiptir. Şekil 4.11'da radyasyona maruz bırakılan T3, T4, T5 ve T7 kuartz optik fiberlerin RIA değişimleri tek bir grafik üzerinde gösterilmiştir.



Şekil 4.11. 106 Gy/sa doz hızında kuartz optik fiberlerin farklı dalgalı boyundaki RIA değişimleri. a) 575 nm; b) 635 nm; c) 675 nm ve d) 750 nm

Sonuçlar, T4, T5 ve T7'nin radyasyona karşı direncinin dalgalı boyu arttıkça arttığını, buna karşılık T3'ün radyasyona karşı direncinin tüm dalgalı boylarında aynı kaldığını göstermektedir. T4 ve T5 kuartz optik fiberlerin kısa dalgalı boylarında radyasyona karşı dirençlerinin daha az olmasının nedeni optik fiberlerin yapısındaki Fe elementinden kaynaklanmaktadır (Youngwoong vd. 2013). Radyasyon direnci için önemli faktörlerden birisi de optik fiberin yapısında bulunan yüksek OH⁻ içeriğidir (Aikawa vd. 2008; Sigel vd. 1979). Çizelge 4.1'de görüldüğü gibi, T7 optik fiberi yüksek miktarda Mg elementi içerir ve T3 optik fiberi ile karşılaştırıldığında bu elementten dolayı T7 optik fiberinin radyasyona karşı direncinin azalmış olduğu açıkça görülmektedir.

Şekil 4.12.a-d, farklı doz hızlarındaki gama ışını radyasyonu altında kuartz optik fiberlerinin 575 nm dalgaboyundaki RIA değişimlerini göstermektedir. Bu grafikte kırmızı ve siyah noktalar sırasıyla 106 ve 402 Gy/sa doz hızlarını göstermektedir. Tüm kuartz optik fiberler farklı doz hızlarında aynı davranışı göstermektedir ve RIA'daki değişimin doz hızından bağımsız olduğu bulunmuştur. Yukarıda da anlatıldığı gibi, T3 kuartz optik fiberin radyasyona karşı direnci diğer kuartz optik fiberlerden daha yüksektir. Fe ve Mg elementlerinin katkılanması ile optik fiberlerin radyasyon direncinin azaldığı görülmektedir. Aynı zamanda P ve B elementlerinin optik fiberin korundaki miktarlarının azaltılması optik fiberin radyasyona karşı direncinin artmasına neden olmuştur.



Şekil 4.12. Farklı doz hızlarındaki gama ışını radyasyonu altında kuvars optik fiberlerin 575 nm dalgaboyundaki RIA değişimleri. Kırmızı ve siyah noktalar sırasıyla 106 ve 402 Gy/sa doz hızlarını göstermektedir

4.3. Co-60 Radyasyon Kaynağının Ce Katkılanmış Sintilasyon Fiberlerine Etkisi

Kuartz optik fiberlerde gerçekleştirilen eşzamanlı ölçümler Ce katkılı optik fiberlerde de Şekil 3.2'de gösterilen düzenek yardımı ile gerçekleştirilmiştir.

4.3.1. T1 (Phase-I) ve T2 (Phase-II) Ce katkılanmış sintilasyon fiberleri

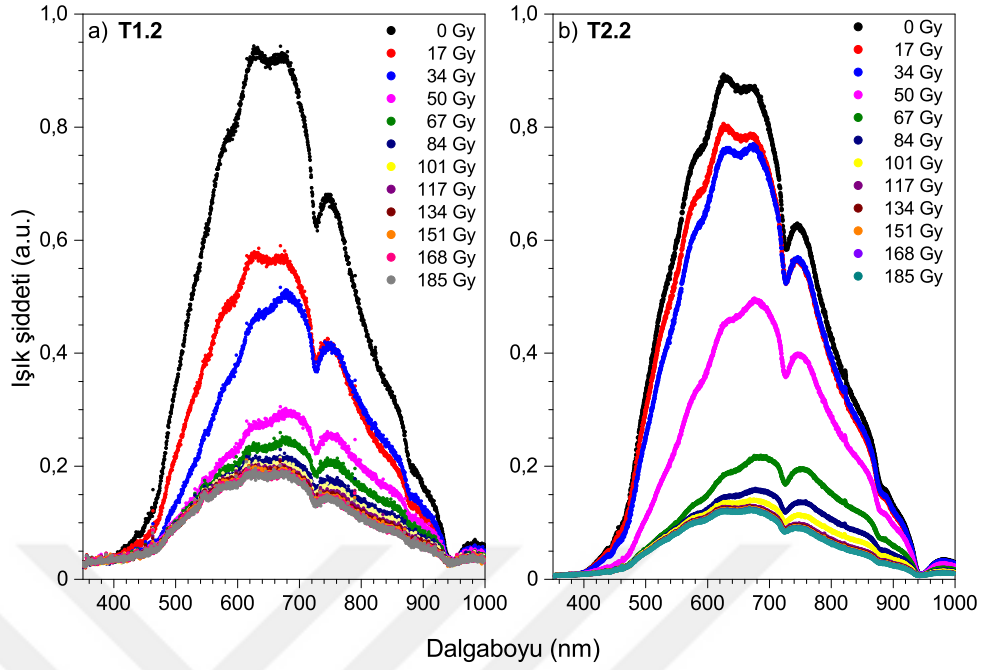
T1 ve T2 optik fiberleri ikili kor yapısına sahiptir. Kimyasal bileşimleri aynı olan bu iki fiberin kor, yelek ve ceket çapları birbirinden farklıdır (sırasıyla kor-1 için 60-150 μm , kor-2 için 200-330 μm ve yelek yarıçapları 230-400 μm). Radyasyona maruz bırakılacak olan T1 ve T2 fiberleri 2,35 m'lik uzunluklarda hazırlanmıştır. Radyasyon doz hızı bu iki optik fiber için 1007 Gy/sa olarak seçilmiştir. T1 optik fiberinden T1.2, T1.3 ve T1.4 olarak isimlendirilen parçalar sırasıyla 2350, 168 ve 5370 Gy toplam doz radyasyona maruz bırakılmışlardır. Aynı şekilde T2'den hazırlanan T2.2 parçasına 1007 Gy toplam doz uygulanmıştır.

T1.2 ve T2.2 optik fiberleri için spektrometreden elde edilen dalgaboyuna karşı çıkış ışık şiddetindeki değişimler Şekil 4.13.a ve b'de gösterilmiştir. Burada 1'er dakikalık adımlarla toplam 11 dakikalık ölçüm gerçekleştirilmiştir. Co-60 radyasyon kaynağı için her bir dakikada 17 Gy değerinde radyasyon dozu uygulandığı hesaplanmıştır.

Şekil 4.13.a'da verilen spektrumda T1.2 optik fiberinde başlangıçta ışık şiddeti oldukça yüksek bir seviyededir. 17 Gy'lik bir doz miktarından sonra ışık şiddetinde yaklaşık %40'lık ani bir düşüş gerçekleşmiştir.

34 Gy doz miktarı uygulandığında ışık şiddetindeki değişim 750 nm dalgaboyunun altındaki dalgaboylarında gerçekleşmektedir. 50 Gy doz miktarı uygulandığı zaman tüm dalgaboylarında ışık şiddetindeki %50 oranında bir azalmaya neden olmaktadır. Şekil 4.13.b'de gösterilen T2.2 optik fiberindeki değişimde 17 Gy doz miktarında T1.2'ye göre ışık şiddetinde oldukça az bir değişim meydana gelmektedir. 50 Gy doz miktarında ise ışık şiddetinin ilk değerinin yarısına indiği görülmüştür. 67 Gy doz değerinden sonra T2.2 fiberi de T1.2'de gözlemlenen minimum değişimler gerçekleşmektedir. T1.2'deki ışık şiddetindeki hızlı azalma 17 Gy değerinden sonra, T2.2'de ise 34 Gy değerinden sonra gerçekleşmektedir.

T1 ve T2 optik fiberlerinin 470, 575, 635, 675 ve 750 nm dalgaboylarındaki artan doza bağlı RIA değişimleri Şekil 4.14.a-e'de verilmiştir. Şekil 4.14.a'da 470 nm dalgaboyunda T1.2, T1.3 ve T1.4 optik fiberlerinde 20 Gy doza kadar RIA değerlerinde hızlı bir artış görülmektedir ve bu doz miktarından daha yüksek değerlerde zayıflama hemen hemen aynı değerinde sabit kalmaktadır. Bu zayıflama yaklaşık 1,5 dB/m'dir. Aynı dalgaboyunda T2.2 optik fiberinde 50 Gy doz miktarına kadar RIA'nın hızlı bir şekilde arttığı görülmektedir ve bu fiberdeki zayıflama yaklaşık olarak 3 dB/m civarındadır. Şekil 4.14.b'de gösterilen 575 nm dalgaboyunda T1.2, T1.3 ve T1.4 optik fiberleri 40 Gy'den sonra 2,5 dB/m'lik bir zayıflama gösterirken T2.2 fiberi 50 Gy'den sonra 3,5 dB/m'lik bir zayıflama göstermektedir. Diğer üç dalgaboyu 635, 675 ve 750 nm'de bu 4 fiber içinde 100 Gy dozdan sonra yaklaşık olarak 3,5 dB/m'lik bir zayıflama meydana gelmektedir.



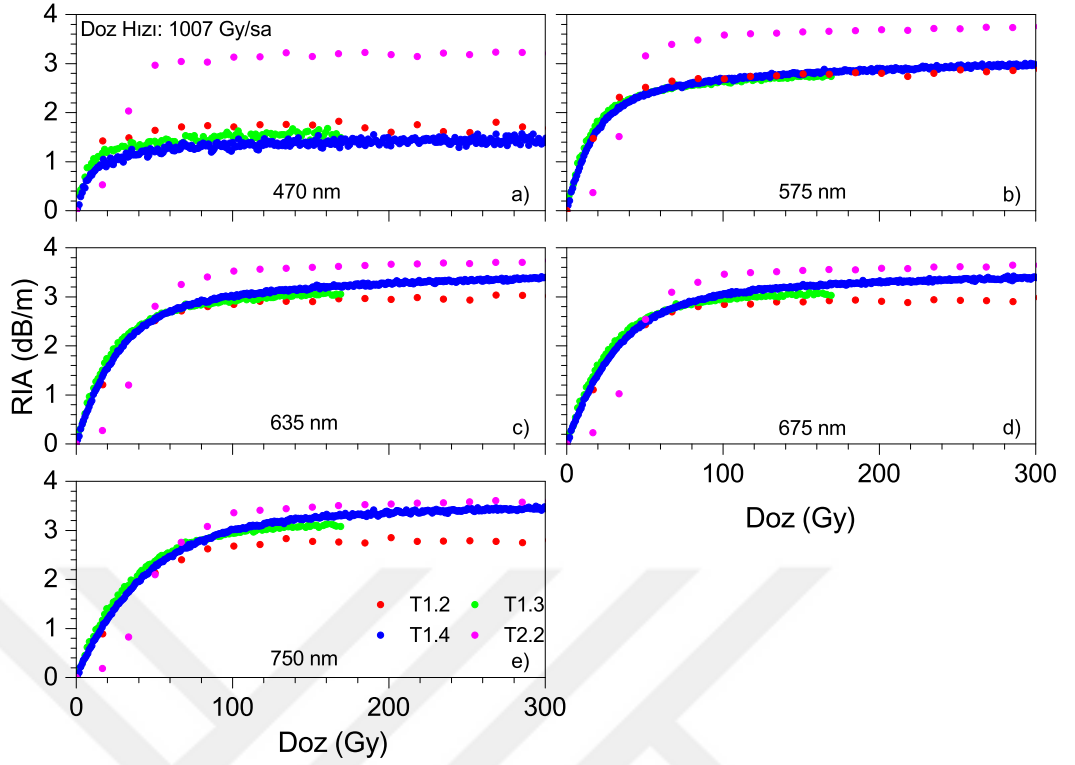
Şekil 4.13. Ce katkılı a) T1.2 ve b) T2.2 optik fiberlerinin ilk 11 dakikalık ışınlama sürecinde bir dakikalık aralıklarla alınan spektrumları. Bu spektrumlarda her bir dakika yaklaşık olarak 17 Gy değerine denk gelmektedir

Sonuçlardan da görüleceği gibi 635 nm dalgaboyunun altındaki dalgaboylarında T2.2 optik fiberi radyasyona karşı daha fazla kayba uğramaktadır. Bu durum T2.2 optik fiberinin radyasyon direncinin daha düşük olduğunu göstermektedir. Bunun yanında Şekil 4.13'deki spektrumda da görüldüğü gibi 470 nm dalgaboyundaki çıkış ışık şiddeti diğer dalgaboylarına göre oldukça düşüktür ve bu dalgaboyunda gözlemlenen değişim belirleyici bir unsur olmamaktadır.

Kor ve yelek yarıçapları farklı olan fakat Ce katkısı neredeyse aynı olan bu iki optik fiberin RIA'larındaki ani yükseliş değerleri yarıçapın artışına bağlı olarak sırasıyla 20 ve 50 Gy doz değerlerinde gerçekleşmektedir. T1.2, T1.3 ve T1.4 için yapılan karşılaştırmada uygulanan doz miktarları farklı olmasına rağmen seçilen tüm dalgaboylarında benzer bir davranış göstermiştir ve sadece bunların RIA değerleri farklıdır.

T2.2 optik fiberinin RIA değişimleri tüm dalgaboylarında T1 optik fiberlerinden fazladır. Bu da T2 optik fiberinin daha büyük yarıçapa sahip olmasından ileri gelmektedir. Bu sonuçlar büyük yarıçapa sahip olan optik fiberin artan yanal yüzeyine bağlı olarak radyasyon direncinin azaldığı düşünülmektedir.

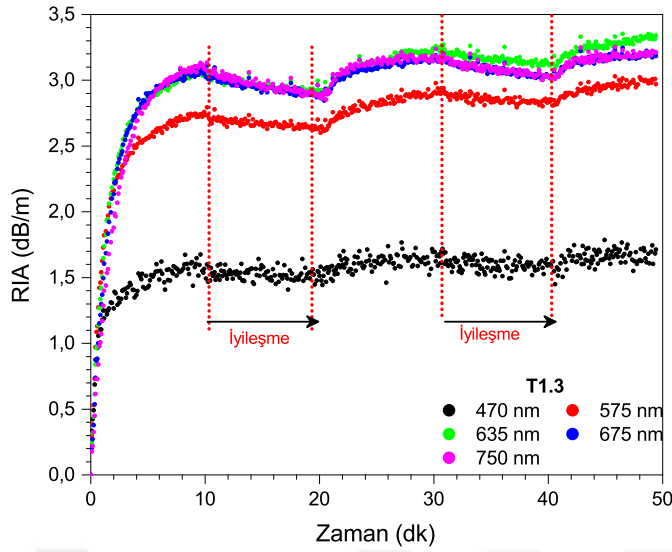
T1 ve T2 optik fiberlerinde ışınlama sonrası iyileşme (recovery) süreçleri de incelenmiştir. Bu fiberlerde, 300 Gy toplam radyasyon dozundan sonra herhangi bir iyileşme olmadığı görülmüş ve optik fiberlerin zayıflaması sabit



Şekil 4.14. T1.2 (kırmızı nokta), T1.3 (yeşil nokta), T1.4 (mavi nokta) ve T2.2 (mor nokta) fiberlerinin a) 470nm; b) 575 nm; c) 635 nm; d) 675 nm ve e) 750 nm dalgaboylarının doza bağlı RIA değişimleri

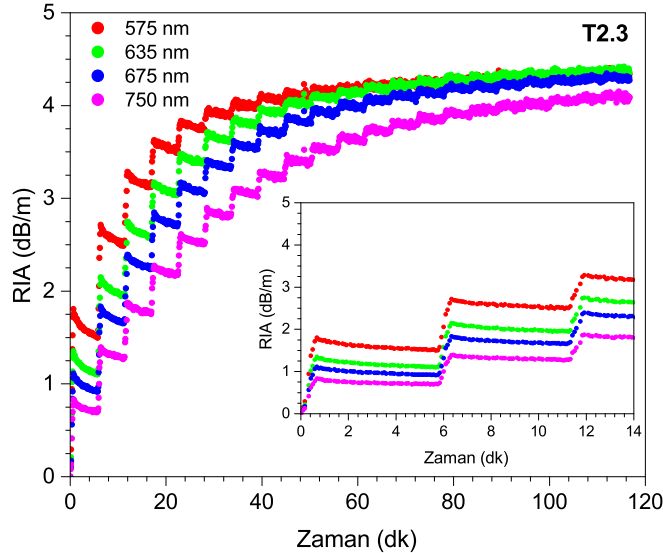
olarak devam etmektedir. Bu iki fiberin yapılarında radyasyon etkisi ile oluşan bozulmalar kalıcı olarak korunmaktadır. Bu bozulma T1 ve T2 optik fiberlerinin korundaki alüminyum varlığından kaynaklanmaktadır (Griscom 2011; Halliburton vd. 1981; Nunes ve Lameiras 2005). Burada Al^{3+} iyonları, üretim aşamasında Si^{4+} iyonlarının yerine konumlanmasından dolayı oksijen ile 4 bağ yapan Si atomunun sadece 3 bağ yapabilecek olan Al atomu ile bir oksijen atomunun bağlanamaması ve bunun sonucunda oksijenin bir elektronun boşta kalması olayı meydana gelir. Oksijenin bu yüküne bağlanması gereken bir katyon (M^+) alkali toprak veya hidrojen elementi bu boşluğu doldurur. Bu da optik fiber yapısındaki meydana gelen (AlO_4^-/M^+) grubu olarak adlandırılır (Guttilla 2017; Leon vd. 2016). Radyasyona maruz bırakıldığında zayıf bağlı alkali metal veya hidrojen gruptan uzaklaşır ve Al atomuna bağlı bir oksijen atomunda bir boşluk oluşur (AlO_4/\circ). Bu da yapıda boşluk renk merkezlerinin oluşmasına neden olur.

T1.3 optik fiberinin hasar ve iyileşme süreçlerinin tekrarlanabilirliğini gözlemlemek için Şekil 4.15’de gösterilen 1007 Gy/sa doz hızında ölçümler gerçekleştirilmiştir. İlk olarak 10 dk (168 Gy) radyasyona maruz bırakılan optik fiber daha sonra 10 dakikalık iyileşme sürecine bırakılmıştır. Bu süreç üç kez tekrarlanmıştır. İlk 10 dk’da 3,2 dB/m’lik bir zayıflama meydana gelmiştir. Sonraki 10 dk’lık süreçte bir miktar iyileşme gözlemlenmiştir. Kuartz optik fiberlerde



Şekil 4.15. T1.3 sintilasyon fiberinde 1007 Gy/sa doz hızında üç hasar (10 dk-168 Gy) seti ve iki iyileşme (10 dk) setinin zamana bağlı olarak değişimi

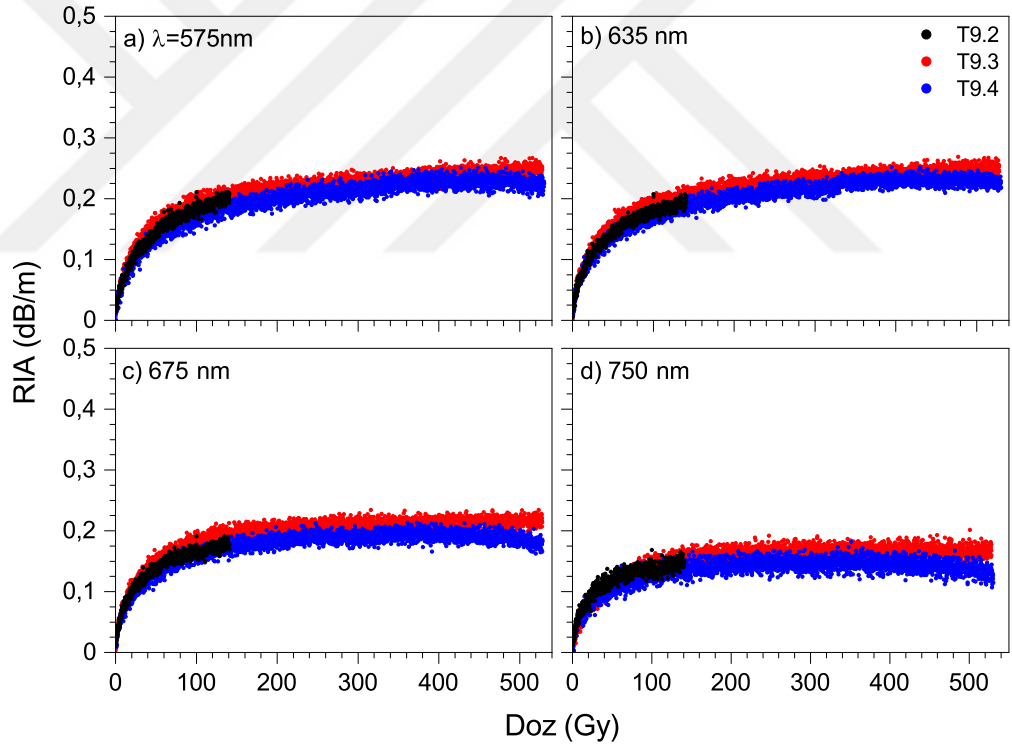
gözlemlenen hafıza benzeri özelliğin bu fiberde de olduğu görülmüştür. Benzer şekilde T2.3 fiberinde de 1007 Gy/sa doz hızında 30 s (8,4 Gy) ışınlama 5 dk iyileşme şeklinde 20 kez tekrarlanan ölçüm Şekil 4.16'de gösterilmiştir. Bu fiber toplam 10 dk (168 Gy) radyasyona maruz bırakılmıştır. Daha geniş kor yapısına sahip T2 optik fiberinde de iyileşme gözlemlenmemiştir ve hafıza özelliği bu fiberde de görülmüştür. Bununla birlikte T2 optik fiberinde dalgaboyu arttıkça RIA kayıp miktarı daha az olduğu belirlenmiştir.



Şekil 4.16. T2.3 optik fiberi 1007 Gy/sa doz hızında 30 s (8,4 Gy) ışınlama 5 dk iyileşme setinin zamana bağlı olarak değişimi (20 kez tekrarlanmıştır)

4.3.2. T9 (Clear) Ce katkılanmış sintilasyon fiberleri

İkili kor yapısına sahip ve kor-1 kısmı Ce katkılanmış T9 optik fiberinden 120 (T9.2), 105 (T9.3) ve 101 (T9.4) cm uzunluklarında üç farklı örnek hazırlanmıştır. Hazırlanan bu örnekler 106 Gy/sa doz hızında radyasyona maruz bırakılmıştır. T9.2 fiberi 141 Gy, T9.3 ve T9.4 optik fiberleri 530 Gy toplam radyasyon dozu uygulanmıştır. Eşzamanlı ölçümlerden elde edilen spektrumlarından seçilen 575, 635, 675 ve 750 nm dalgaboylarındaki RIA değişimleri Şekil 4.17.a-d'de gösterilmiştir. T9 optik fiberi tüm dalgaboylarında benzer davranış sergilemiştir. RIA değeri 100 Gy'e kadar hızlı bir şekilde artarken, 100 Gy'den sonra sabit olarak devam etmektedir. T9 optik fiberinde yaklaşık 0,2 dB/m kayıp görülmüştür ve dalgaboyu artıkça kayıp azalmıştır. T9 optik fiberi Ce katkılanmış optik fiberler içinde radyasyona karşı direnci en yüksek olanlardan biridir. Fakat T9 optik fiberi oldukça kırılğan bir yapıya sahiptir. Bu nedenle dedektör uygulamalarında kullanımı oldukça zordur.



Şekil 4.17. 106 Gy/sa doz hızında T9.2 (siyah nokta), T9.3 (kırmızı nokta) ve T9.4 (mavi nokta) opti fiberlerinin a) 575 nm; b) 635 nm; c) 675 nm ve d) 750 nm dalgaboylarının doza bağlı RIA değişimleri

4.3.3. T10 (Phase-III) ve T14 Ce katkılanmış sintilasyon fiberleri

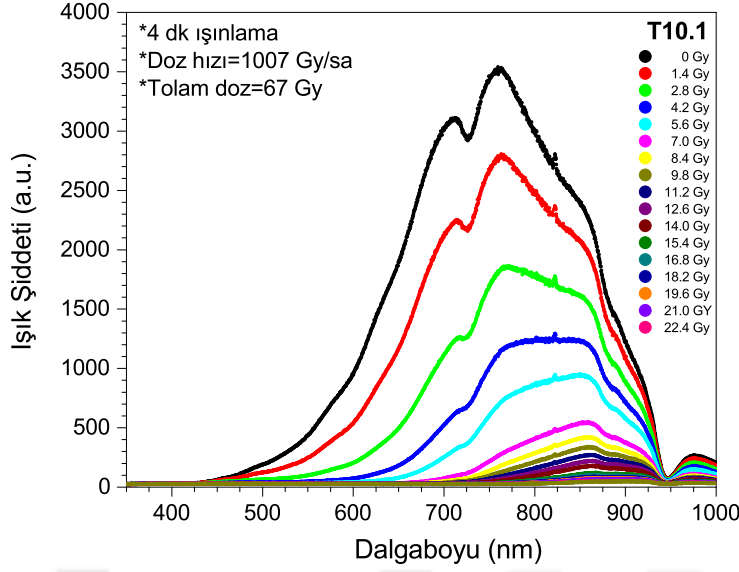
T10 optik fiberi tek kora sahiptir ve kor bölgesinin tamamı Ce ile katkılanmıştır. T14 optik fiberi ise bir önceki altbölümde anlatılan T2 optik fiberine benzer bir yapıya sahiptir ve katkılanan elementlerin konsantrasyonları T2 optik fiberinden farklılıklar gösterir. Bu iki optik fiber tek ve çift korun radyasyon doz hızına bağlı olarak değişimlerinin gözlemlenmesi için bir arada anlatılmıştır. Bu iki fiberin merkezdeki korları sırasıyla 427 ve 5230 ppm oranında Ce elementi katkılanmıştır. T10 ve T14 optik fiberlerinden sırasıyla 2,35 ve 2,50 m uzunluğunda parçalar hazırlanarak, farklı çaplarda dairesel olarak sarılmıştır ve Co-60 gama radyasyonuna maruz bırakılmışlardır. Bu fiberlere uygulanan radyasyon doz hızları ve toplam doz miktarları Çizelge 4.2’de verilmiştir.

Çizelge 4.2. T10 ve T14 Ce katkılanmış fiberlerin ışınlama doz hızları ve toplam doz miktarları

Fiber kodu	Sarım çapı (cm)	Doz hızı (Gy/sa)	Toplam doz
T10.1	4.5	1007	67
T10.2	20	106	45
T10.5	20	25	75
T10.4	20	5	25
T14.1	9	402	402
T14.2	20	106	455
T14.3	20	5	50

T10.1 optik fiberi 5’er saniyelik adımlarla toplam 4 dakikalık bir süreçteki radyasyona bağlı değişim Şekil 4.18’de gösterilmiştir. T10.1 optik fiberinde başlangıçta görüldüğü gibi ışık şiddeti spektrumu oldukça yüksek bir seviyededir. 675 ve 775 nm dalgaboyunda iki yüksek pik noktasına sahiptir. Radyasyon uygulanmaya başladığı zaman bu iki pikte 4,2 Gy doz miktarına kadar eşit miktarda azalma gerçekleşmektedir. 4,2 Gy doz miktarında 775 nm’deki pik kaybolmaya başlamıştır. 8,4 Gy doz miktarından sonra ışık şiddetindeki değişim miktarı giderek azalmaktadır. Bu optik fiber 4 dakikalık bir radyasyona maruz kaldığında ışık şiddetinde 70 kat azalma meydana gelmektedir.

T10 optik fiberinden hazırlanan 2,35 m’lik parçalara 5, 25, 106 ve 1007 Gy/sa doz hızlarında, sırasıyla 24 Gy (T10.4), 75 Gy (T10.5), 45 Gy (T10.2) ve 67 Gy (T10.1) toplam doz radyasyon uygulanmıştır. Eşzamanlı ölçümlerden elde edilen spektrumlarda seçilen 575, 635, 675 ve 750 nm dalgaboyları için Şekil 4.19.a-d’de gösterilen RIA değişimleri gerçekleşmiştir. Grafikte siyah noktalarla gösterilen 1007 Gy/sa, kırmızı noktalarla gösterilen 106 Gy/sa, mavi noktalarla gösterilen 25 Gy/sa ve mor noktalarla gösterilen 5 Gy/sa doz hızlarında alınan ölçümleri göstermektedir.

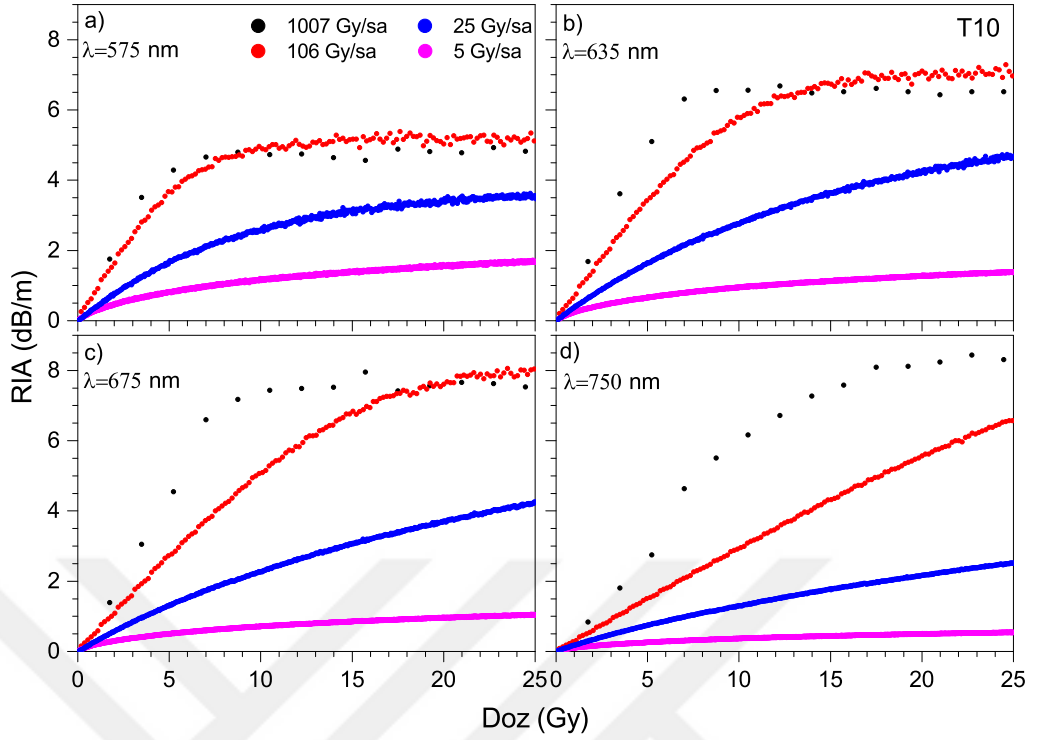


Şekil 4.18. T10.1 optik fiberinin 4 dakikalık ışınlama sürecinde 5 saniye aralıklarla alınan spektrumları

T10 optik fiberinin zayıflaması dozun bir fonksiyonu olarak tüm dalgalarda artmaktadır. Şekil 4.19.a'da görüldüğü gibi 575 nm dalgalarda 1007 Gy/sa doz hızında 8 Gy doz değerine kadar 5 dB/m'lik bir zayıflama gerçekleşmiştir. Bu doz değerinden sonra zayıflama sabit kalmıştır. Bu davranış tüm dalgalarda görülmektedir ve RIA kaybı artan dalgalarda göre 8 dB/m değerine kadar yükselmektedir. T10 optik fiberinde, 106 Gy/sa doz hızındaki ölçümlerde 575, 635 ve 675 nm dalgalarda için belirli bir RIA değerinden sonra (dalgalarda bağlı olarak bu değer 8'den 20 Gy'e kaymaktadır) zayıflama doz oranına göre hemen hemen sabit kalmaktadır. 750 nm dalgalarda ise RIA kaybı 25 Gy doz miktarına kadar lineer olarak artmaktadır. 25 ve 5 Gy/sa doz hızlarında RIA 635, 675 ve 750 nm dalgalarda için linner bir artış göstermektedir.

T10 optik fiberinin korunda P ve ceket kısmında Al, Mg ve P gibi metal elementleri bulunmaktadır. Bu elementleri içeren optik fiberlerin çok yüksek RIA değerlerine sahip olduğu çeşitli çalışmalarda rapor edilmiştir (Bueker vd. 1990; Girard vd. 2011). Bu elementlerin yanında T10 optik fiberinin korunun tamamı Ce elementi içermektedir ve diğer optik fiberler gibi kuartz kısma sahip değildir. Bu iki durum bu optik fiberin radyasyona karşı direncinin daha az olmasına sebep olmaktadır. Sonuç olarak, radyasyon doz hassasiyetinin 750 nm'den daha kısa dalgalarda daha büyük olduğunu ve bu fiberin, radyasyona karşı direncinin çok düşük olduğunu görülmüştür. Işık şiddetinde radyasyona karşı yüksek duyarlılığının olması bu optik fiberin bir dozimetre olarak kullanıma uygun olabileceğini göstermektedir (Batal vd. 2004; Huston vd. 2001; Paul vd. 2007; Youngwoong vd. 2014).

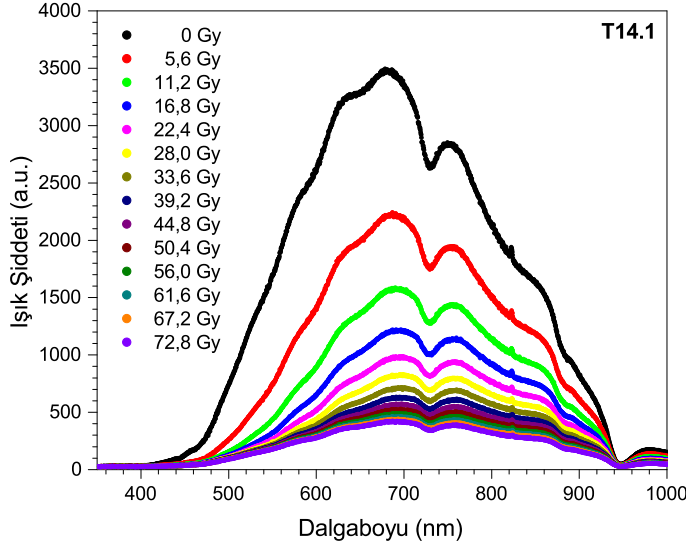
T14 optik fiberinden 2,5 m uzunluğundaki örnekler 5, 106 ve 402 Gy/sa doz hızlarında radyasyona maruz bırakılmışlardır ve bu parçalara sırasıyla 402 Gy



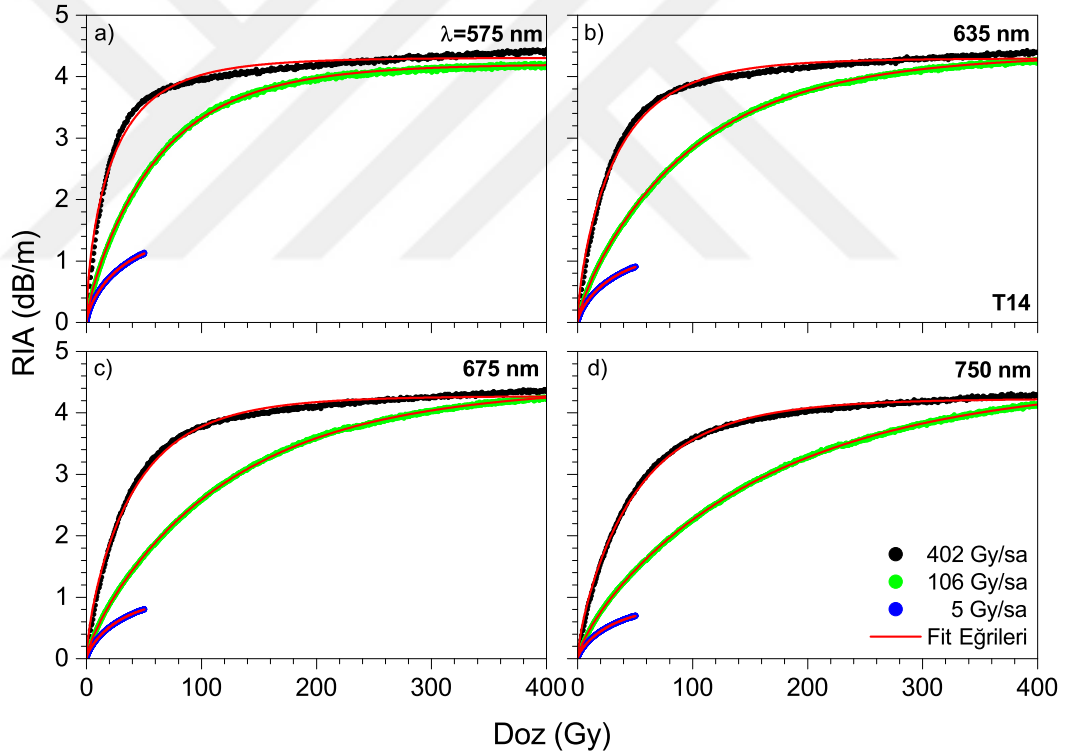
Şekil 4.19. T10 Ce katkılanmış optik fiberin a) 575 nm; b) 635 nm; c) 675 nm ve d) 750 nm dalgalı boylarındaki doz miktarına karşı RIA değışimleri. Burada kırmızı, siyah, mavi ve yeşil noktalar sırasıyla 1007, 106, 25 ve 5 Gy/sa doz hızlarında alınan ölçümlerdir

(T14.1), 455 Gy (T14.2) ve 50 Gy (T14.3) toplam doz radyasyon uygulanmıştır (4.2). T14.1 optik fiberinde 402 Gy/sa doz hızında 11 dakikalık ışınlama sürecinde 50 saniye aralıklarla alınan spektrumlarıdaki değışimler Şekil 4.20’de verilmiştir. Spektrumda görüldüğü gibi 690 ve 760 nm dalgalı boylarında iki yüksek pik bulunmuştur. Radyasyon uygulanmaya başladıktan 50 saniye sonra ışık şiddetinde hızlı bir düşüş gerçekleşmektedir. Işık şiddetindeki bu hızlı düşüş 28 Gy toplam doza kadar devam etmektedir ve sonrasında 50,4 Gy doz miktarına kadar ışık şiddetindeki azalma yavaşlamaktadır. 72,8 Gy toplam doz uygulandıktan sonra başlangıç durumuna göre %92 oranında ışık şiddetinde kayıp gözlemlenmiştir.

T14 optik fiberlerinden farklı doz hızlarında (5, 106 ve 402 Gy/sa) ve farklı dalgalı boylarında elde edilen RIA değışimleri Şekil 4.21’de gösterilmektedir. Doz hızına bağılı olarak seçilen dalgalı boylarında benzer davranışlar gözlemlenmiş olup, 402 ve 106 Gy/sa doz hızlarında RIA yaklaşık 4 dB/m değerine ulaşmaktadır. 5 Gy/sa doz hızında ise 575 nm’de 60 Gy doz miktarına karşılık 1,2 dB/m’lik bir RIA değeri bulunmuştur. 635 nm dalgalı boyunda RIA 1 dB/m değerine ulaştıktan sonra 675 ve 750 nm dalgalı boylarında 1 dB/m değerinin altına düşmektedir.



Şekil 4.20. T14.1 optik fiberinin 11 dakikalık ışınlama sürecinde 50 saniye aralıklarla alınan spektrumları



Şekil 4.21. Dört farklı doz oranında gama ışını radyasyonu altında dört farklı dalgaboyunda zayıflama gösterilmektedir: a) 575 nm; b) 635 nm; c) 675 nm ve d) 750 nm. Sırasıyla siyah, yeşil ve mavi katı noktalar 402, 106 ve 5Gy/sa'lik doz hızlarını göstermektedir. Kırmızı düz çizgiler fit eğrileridir

4.4. Optik Fiberlerin İyileşme Sürecinin Teorik Hesaplanması

Radyasyon etkisi ile optik fiberlerin ışık şiddetindeki zayıflama ve buna bağlı olarak iyileşme süreçlerinin kinetiği bir çok araştırmacı tarafından modellenerek öngörülme çalışılmıştır (Borgermans ve Brichard 2002; Griscom 2001; Griscom vd. 1994; Liu ve Johnston 1994; Mashkov vd. 1996). Bu çalışmalarda, katkılı ve katkısız, tek modlu ve çok modlu fiberlerin zayıflama ve iyileşme süreçleri incelenmiştir (Griscom 2001; Kim vd. 2016). Bu modellerin ilki, üst yasası (power law, Denklem 4.1) denklemdir. Bu denklem çeşitli toplam dozlarda radyasyon uygulanmış optik fiberlerin zayıflamasının belirlenmesi için kullanılmıştır (Friebele vd. 1991, 1993). Kullanılan bu denklem doz hızından bağımsızdır ve bu nedenle herhangi bir spesifik doz hızında zayıflama ve/veya ışınlama sonrası iyileşme süreçlerini öngörememektedir (Griscom vd. 1993).

Liu ve Johnston üst üste binme ilkesine dayanan doz hızına bağlı hem zayıflama hem de ışınlama sonrası iyileşme süreçlerini öngören bir model geliştirmişlerdir (Liu ve Johnston 1994). Mashkov ve ark., 1996 yılında Kohlrausch yasasını (Kohlrausch 1847) ve üst yasasını birlikte içeren bir model türetmişlerdir. Modellerinde, amorf yalıtkanlarda radyasyon nedeniyle oluşan renk merkezi üretimini tanımlamışlardır (Mashkov vd. 1996). Griscom'un 2001 yılında doz hızına ve toplam doza bağlı olarak renk merkezlerinin termal bozunumunu tanımlayabilen radyasyona bağlı birinci ve ikinci dereceden fraktal kinetik modelini geliştirmiştir. Griscom'un bu modeli, aynı toplam doza sahip dört farklı doz hızında radyasyona maruz bırakılmış Ge-katkılı silika korlu optik fiberlere uygulamıştır. Elde edilen teorik sonuçların deneysel sonuçlar ile uyumlu olduğunu gösterilmiştir (Griscom 2001).

RIA, tipik olarak radyasyon dozuna bağlı üst yasasına (power law) uymaktadır (Devine ve Arndt 1989; Friebele vd. 1993). Üst yasası şu şekilde tanımlanır:

$$q(D) = CD^f \quad (4.1)$$

$q(D)$ dozun (D) bir fonksiyonu olarak ölçülen niceliktir. Bu denklemde C ve $f (< 1)$ sabitlerdir. Klasik hız denklemi şöyledir:

$$\frac{dN(t)}{dt} = K\dot{D}N^* - RN \quad (4.2)$$

Burada bir maksimuma ulaşan renk merkezlerinin sayısı $N_{sat} = (K\dot{D}/R)N^*$ dır. K üretim hız sabiti, R klasik hız sabiti, \dot{D} doz hızı ve N^* renk merkezlerinin yoğunluğudur. Bu denklemin çözümü

$$N(t) = N_{sat}[1 - \exp(-Rt)] \quad (4.3)$$

şeklindedir. Burada boyutsuz değişken olan $kt \rightarrow (kt)^\beta$ olarak dönüşüm yapılırsa, yeni denklem,

$$\frac{dN[(kt)^\beta]}{d(kt)^\beta} = \left(\frac{K\dot{D}}{R}\right)^\beta N^* - N \quad (4.4)$$

halini alacaktır ve $0 < \beta < 1$, $k = R$ olduğunda çözüm;

$$N[(Rt)^\beta] = N_{sat}\{1 - \exp[-(Rt)^\beta]\} \quad (4.5)$$

şeklinde olur ve $N_{sat} = (K\dot{D}/R)N^*$ dir. Bu Denklem 4.5 birinci dereceden büyüme kinetiği (First-order growth kinetics) denklemdir. Eğer $f = \beta$ ve $C = K^\beta N^*$ ise Denklem 4.5, Denklem 4.3 ile tanımlanan üst yasasına indirgenebilir.

İkinci dereceden büyüme kinetikleri (Second-order growth kinetics) için klasik hız eşitliği ise şu şekilde yazılabilir;

$$\frac{dN(t)}{dt} = K\dot{D}N^* - \frac{RN^2}{N^*} \quad (4.6)$$

burada $N_{sat} = (K\dot{D}/R)^{1/2}N^*$ ve $k = (K\dot{D}/R)^{1/2}$ dir. ve Denklem 4.6'nın çözümü

$$N(t) = N_{sat}\tanh(kt) \quad (4.7)$$

dir. Benzer şekilde boyutsuz değişken olan $kt \rightarrow (kt)^\beta$ olarak dönüşüm yapılırsa, yeni denklem

$$\frac{dN[(kt)^\beta]}{d(kt)^\beta} = \left(\frac{K\dot{D}}{R}\right)^{\beta/2} N^* - \left(\frac{R}{K\dot{D}}\right)^{\beta/2} \frac{N^2}{N^*} \quad (4.8)$$

halini alır ve bu denklemin çözümünden;

$$N[(kt)^\beta] = N_{sat}\tanh[(kt)^\beta] \quad (4.9)$$

ikinci dereceden büyüme kinetiği çözümü elde edilir. Elde edilen bu denklemler ile radyasyondan önce optik fiberin yapısında bulunabilecek kusur merkezleri ve radyasyon uygulandıktan sonra oluşabilecek kusur merkezlerinin toplam sayısının

tüm olasılıkları belirlenebilir. Radyasyon uygulama sonrası hesaplanan RIA değerleri Denklem 4.9 yardımı ile fit edilir ve N_{sat} , R ve β katsayıları elde edilir.

Radyasyon uygulanmadığı zaman renk merkezi üretimi de duracağından ikinci dereceden bozunumlar (second-order decay kinetics) için klasik hız denkleminde (Denklem 4.6) $K = 0$ için çözüm yapılırsa;

$$N(t) = N(0) \left(1 + \frac{N(0)}{N^*} Rt \right)^{-1} \quad (4.10)$$

bulunur. Burada $N(0)$ ışınlamanın durdurulduğu andaki mevcut renk merkezlerinin sayısıdır. Boyutsuz değişken $Rt \rightarrow (Rt)^\beta$ 'nin değiştirilmesi ile yeni hız denklemini;

$$\frac{dN[(Rt)^\beta]}{d((Rt)^\beta)} = -\frac{N^2}{N^*} \quad (4.11)$$

şeklini alır ve denklemin çözümünden;

$$N[(Rt)^\beta] = N(0) \left(1 + \frac{N(0)}{N^*} (Rt)^\beta \right)^{-1} \quad (4.12)$$

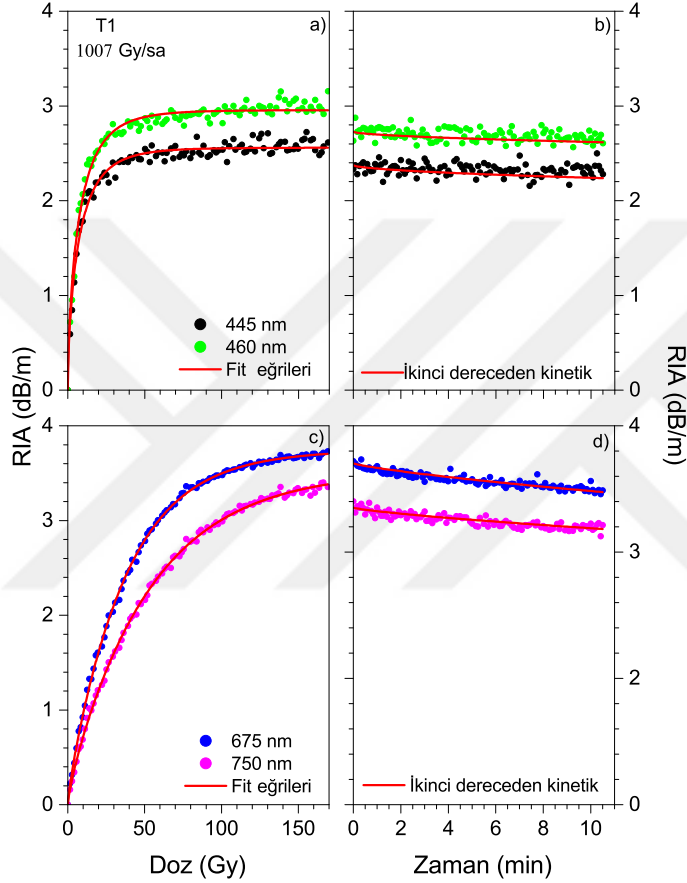
elde edilir. Optik fiberlerin iyileşme süreçleri Denklem 4.12 ile öngörülebilir. Optik fiberlerin doza bağlı zayıflama verileri Denklem 4.9 ile fit edilmektedir. Fit eğrilerinden elde edilen katsayılar Denklem 4.12'de yerine yazılarak optik fiberlerin ışınlama sonrası iyileşme aşamasında zamana bağlı olarak RIA değişimleri hesaplanabilmektedir.

Eş zamanlı olarak radyasyona maruz bırakılan T1, T2, T3, T10 ve T14 optik fiberlerin yukarıda tanımlanan denklemler kullanılarak zayıflama ve iyileşme süreçleri için teorik sonuçlar elde edilmiştir. Deneysel ve teorik sonuçlar sonraki altbölümlerde sırasıyla anlatılmaktadır.

4.4.1. T1 optik fiberinin iyileşme süreci

T1 optik fiberin farklı dalgalı boylarında (445 nm, 460 nm, 675 nm ve 750 nm) ve 1007 Gy/sa'lik doz hızında RIA değişimi Şekil 4.22'de gösterilmektedir. Şekil 4.22.a ve c'de T1 optik fiberinin 445 nm ve 460 nm'de RIA değerleri 30 Gy radyasyon dozuna kadar hızla yükselmekte ve daha sonrasında belirli bir değerde sabit kalmaktadır. RIA değişimi uzun dalgalı boylarında (675 ve 750 nm) kısa dalgalı boylarına göre daha yüksek doz oranlarında gerçekleşmektedir. Bu dört dalgalı boyundaki veriler Denklem 4.9 ile fit edilmiştir ve Şekil 4.22. a ve c'deki kırmızı düz çizgiler ile gösterilmektedir. Fit eğrisinden elde edilen parametrelerin değerleri Çizelge 4.3'de verilmiştir. Deneysel veriler fit eğrileri

uyumludur. Griscom'un çalışmasında (Griscom 2001) β değeri yaklaşık 2/3 olacağı belirtilmiştir ve T1 optik fiberi için 1007 Gy/sa'lık yüksek doz hızında elde edilen β değeri $\sim 2/3$ olarak bulunmuştur. Sonuçlarda dalgaboyu arttıkça β değeri artmasına karşın renk merkezi oluşumu hız sabiti olan k değeri azalmaktadır. Griscom'un çalışmasında bu k değerinin sadece doz hızına bağlılığından bahsetmektedir. Fakat bizim bulgularımıza göre T1 optik fiberinde bu değer dalgaboyuna bağlı olarak değiştiği bulunmuştur.



Şekil 4.22. T1 optik fiberinin radyasyon dozuna karşılık a) 445 ve 460 nm; c) 675 ve 750 nm dalgaboylarındaki RIA değişimleri ve b ile d) bu dalgaboylarındaki 1007 Gy/sa doz hızında iyileşme süreçleri gösterilmektedir. Kırmızı çizgilerle gösterilen Denklem 4.9 ile elde edilen fit eğrileri ile hesaplanan teorik iyileşme süreçleridir

T1 optik fiberi yapısında yüksek miktarda Al ve P elementleri içermektedir (Çizelge 4.1). Literatürde Al ve P katkılı silika fiberler radyasyon ile etkileştiği belirtilmektedir ve bu etkileşimlerde fosfordan kaynaklı P_1 ve POHC olarak isimlendirilen renk merkezlerinin meydana geldiği görülmüştür. Ayrıca yapı içerisindeki Al'dan kaynaklı Al-OHC renk merkezleri de oluşmaktadır (Girard vd. 2008; Lu vd. 1999). Bu nedenle, Al ve P elementi içeren fiberlerin radyasyona karşı dayanıklılığının düşük olduğu ve radyasyonun bu fiberlerde daha etkin bir

şekilde renk merkezi oluşumuna neden olduğu gözlenmiştir (Giacomazzi vd. 2018; Griscom vd. 1983; Henschel vd. 1998; Mies ve Soto 1985).

Çizelge 4.3. T1, T2, T3, T10 ve T14 fiber optikler için ikinci mertebeden büyüme kinetiği denkleminde elde edilen fit parametreleri

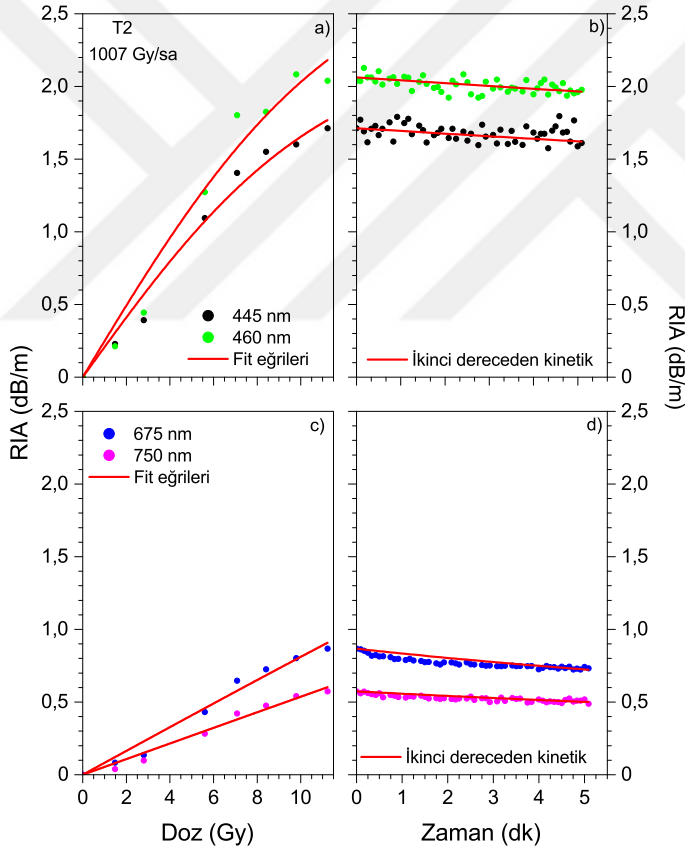
Fiber adı	Dalgaboyu (nm)	N_{sat}	k	β
T1 (1007 Gy/sa)	445	2,56±0,01	79,53±3,94	0,58±0,03
	460	2,96±0,01	77,32±2,17	0,58±0,02
	675	3,75±0,01	19,16±1,33	0,80±0,01
	750	3,54±0,01	13,44±0,37	0,78±0,01
T2 (1007 Gy/sa)	445	2,31±0,53	90,28±35,50	1,00±0,35
	460	2,96±1,21	83,34±29,82	1,00±0,28
	675	4,50±2,28	18,35±34,28	1,00±0,30
	750	6,70±5,71	8,07±48,81	1,00±0,31
T3 (106 Gy/sa)	445	0,05±0,02	0,61±0,09	0,46±0,04
	460	0,10±0,02	0,03±0,02	0,29±0,04
	470	0,04±0,01	0,24±0,01	0,31±0,02
	575	0,02±0,01	5,10±0,01	0,61±0,02
T10 (25 Gy/sa)	445	0,72±0,03	1,81±0,21	0,93±0,08
	460	1,13±0,01	1,93±0,05	0,88±0,01
	675	4,17±0,01	0,65±0,02	0,84±0,01
	750	2,19±0,01	0,59±0,01	0,83±0,01
T14 (402 Gy/sa)	445	1,97±0,01	26,55±1,15	0,47±0,02
	460	2,63±0,01	23,17±0,46	0,45±0,01
	675	4,27±0,01	6,53±0,26	0,67±0,01
	750	4,22±0,01	5,36±0,07	0,70±0,01
T14 (106 Gy/sa)	445	1,83±0,01	4,74±0,07	0,72±0,01
	460	2,45±0,01	4,19±0,01	0,71±0,01
	675	4,44±0,01	0,61±0,01	0,74±0,01
	750	4,57±0,01	0,45±0,01	0,73±0,01
T14 (5 Gy/sa)	445	1,41±0,01	0,17±0,01	0,63±0,01
	460	1,65±0,01	0,16±0,01	0,69±0,01
	675	1,03±0,01	0,11±0,01	0,70±0,01
	750	0,90±0,01	0,10±0,01	0,69±0,01

Şekil 4.22.b ve d, T1 optik fiberinin Co-60 radyasyonu ile ışınlamadan sonraki 11 dakikalık iyileşme sürecini göstermektedir. Deneysel verilerin Denklem 4.12'den hesaplanan teorik değerler ile uyumlu olduğu görülmektedir. Dört dalgaboyundaki iyileşme oranları hemen hemen aynıdır ve iyileşme yüzdesi %8'dir. Benzer bir sonuç Mies ve Soto'nun (Mies ve Soto 1985) çalışmasında da görülmüştür. Bu kadar az bir iyileşme T1 optik fiberindeki P elementinin ışınlama sonrası iyileşme sürecini engellemesinden kaynaklanmaktadır. Bu davranış, radyasyon etkisi ile meydana gelen P₁ ve POHC renk merkezlerinin kalıcı bir hasar

oluşturduğu ve bu nedenle iyileşme sürecinde bu hasarların iyileşemediği şeklinde yorumlanmaktadır (Griscom vd. 1983).

4.4.2. T2 optik fiberinin iyileşme süreci

T2 optik fiberinin, dört farklı dalgaboyundaki RIA değişimleri Şekil 4.23.a ve c'de gösterilmiştir. T2 optik fiberinin RIA değeri 10 Gy doz miktarına kadar lineer olarak artmaktadır. T2 fiberinde, RIA kaybı kısa dalgalarda yaklaşık 2 dB/m ve uzun dalgalarda 0,7 dB/m'dir. T1 ve T2 optik fiberlerinin kimyasal içerikleri aynıdır fakat kor, yelek ve ceket çapları birbirinden farklıdır. Bu durumda, radyasyon karşı tepki sürecinin fiberin geometrik yapısına bağlı olarak değiştiği sonuçlardan net bir şekilde görülmektedir. Bu dört dalgaboyundaki doza bağlı RIA değişimleri Denklem 4.9 ile fit edilmiştir ve şekilde kırmızı çizgilerle gösterilmiştir. Bu fitten N_{sat} , k ve β parametreleri elde edilmiştir (Çizelge 4.3).

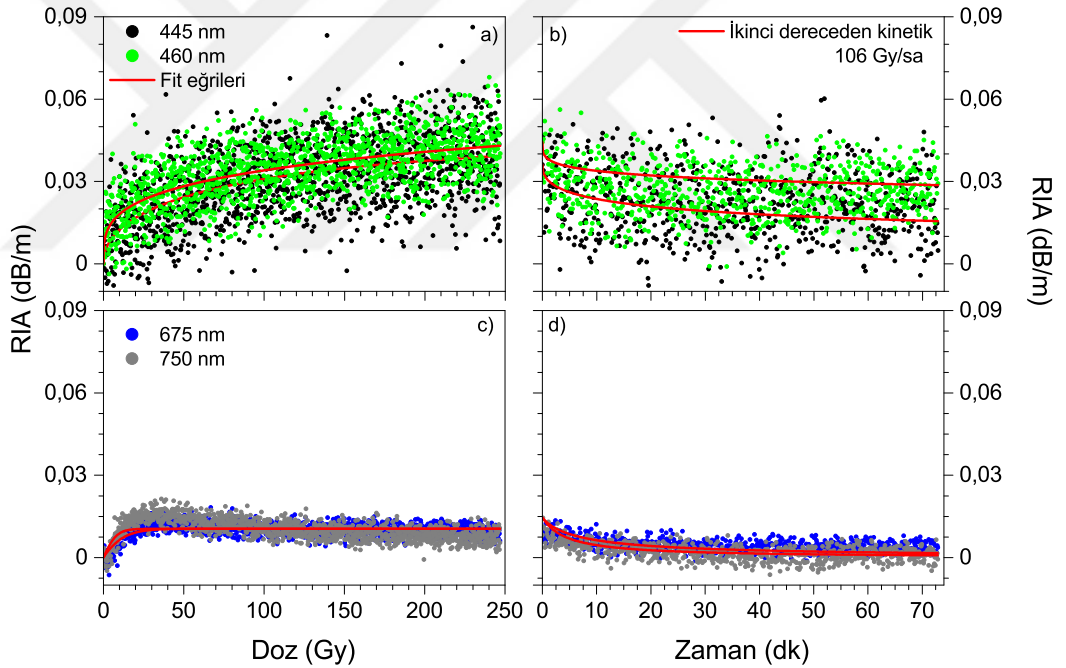


Şekil 4.23. a, c) Gama ışını radyasyonu altında dört farklı dalgaboyunda 1007 Gy/sa doz hızında RIA değişimi ve kırmızı düz çizgiler fit eğrileridir; b, d) Kırmızı düz çizgiler, 10,5 Gy ışınımından sonra T2 fiberi için Denklem 4.9 ile hesaplanan iyileşme değerleridir. Siyah, yeşil, mavi ve pembe noktalar sırasıyla 445 nm, 460 nm, 675 nm ve 750 nm dalgalaboylarını göstermektedir

Şekil 4.23.b ve d radyasyondan sonra T2 fiberinin 5 dakikalık iyileşme periyodunu göstermektedir. Elde edilen N_{sat} , k ve β parametreleri Denklem 4.12'de yerine yazılarak bu optik fiberin iyileşme sürecinde teorik olarak öngörülmüştür (Şekil 4.23.b ve d'de kırmızı çizgiler).

4.4.3. T3 kuartz optik fiberinin iyileşme süreci

Gama ışını radyasyonu altında 106 Gy/sa doz hızında T3 optik fiberinin dört farklı dalgaboyundaki RIA değişimleri Şekil 4.24'de gösterilmektedir. Siyah, yeşil, mavi ve gri noktalar sırasıyla 445, 460, 470 ve 575 nm dalgaboylarını gösterir. T3 kuartz optik fiberine 250 Gy toplam doz uygulanmış ve fit eğrilerden elde edilen parametreler Tablo 4.3'da verilmiştir. T3 optik fiberindeki radyasyon doz miktarı arttıkça, RIA değeri 25 Gy'e kadar hızla artar. RIA, 25 Gy doz değerinden sonra yavaşlar ve sabit bir değerde devam eder. T3 optik fiberinin 445 nm dalgaboyundaki RIA değeri 0,04 dB/m ve 575 nm'de 0,02 dB/m'dir.



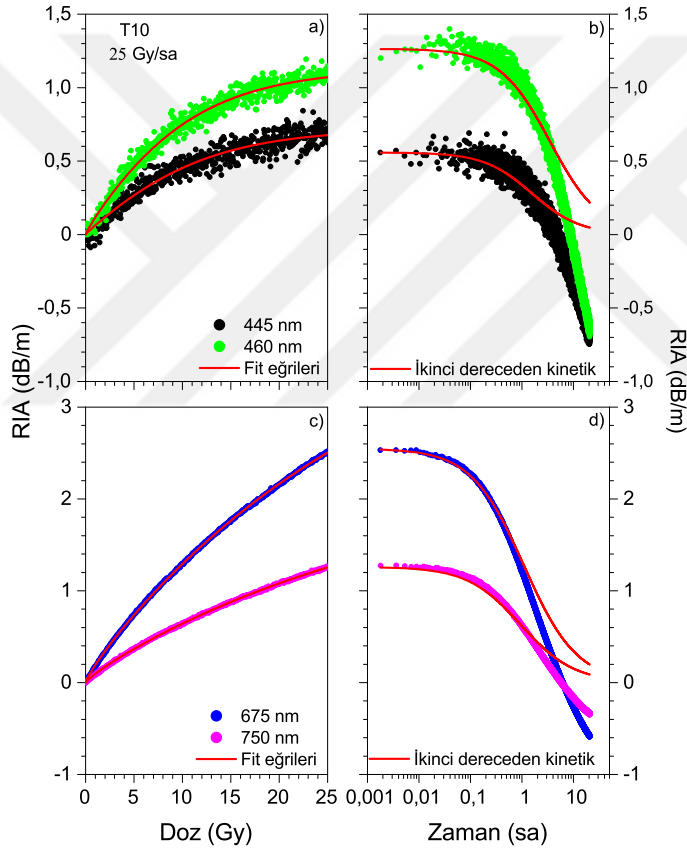
Şekil 4.24. T3 fiberi için 106 Gy/sa doz hızında radyasyon altında dört farklı dalgaboyundaki RIA değişimi gösterilmiştir. a, c) 250 Gy toplam dozda RIA değişimi; b, d) Işınlamadan sonra 73 dakikalık iyileşme sürecidir. Siyah, yeşil, mavi ve gri noktalar sırasıyla 445, 460, 470 ve 575 nm dalgaboylarını gösterir

Işınlamadan sonra T3 optik fiberinin 73 dakikalık iyileşme süreci Şekil 4.24.b ve d'de gösterilmiştir. T3 fiberinin iyileşmesi ilk 10 dakikada hızlı bir şekilde gerçekleşmiştir ancak daha sonra yavaşlayarak devam etmektedir. Bu optik

fiberdeki RIA zayıflama miktarı T1 ve T2 optik fiberi ile karşılaştırıldığında oldukça düşük bir seviyededir. Bu durum T3 optik fiberinin yapısındaki Al elementinin olmaması ve aynı zamanda P elementinin çok düşük miktarlarda olmasından kaynaklıdır.

4.4.4. T10 optik fiberinin iyileşme süreci

Şekil 4.25’de dört farklı dalgaboyunda (445, 460, 675 ve 750 nm) gama ışını altında 25 Gy/sa doz hızında T10 optik fiberinin RIA değişimleri gösterilmiştir. RIA değerleri Denklem 4.9 ile fit edilmiştir (kırmızı düz çizgiler) ve fit eğrilerinden elde edilen parametreler Çizelge 4.3’te verilmiştir.



Şekil 4.25. T10 Ce katkılılandırılmış fiberin 25 Gy/sa doz hızında a) 445 ve 460 nm dalgaboylarındaki; c) 675 ve 750 nm dalgaboylarındaki RIA değişimleri ve kırmızı çizgiler fit eğrileri. b) ve d) sırasıyla bu dalgaboylarındaki 20 saatlik iyileşme süreci ve kırmızı çizgiler ile ikinci dereceden kinetik denkleminde hesaplanan eğrileridir

675 nm dalgaboyunda 25 Gy radyasyona maruz bırakıldığında maksimum zayıflama (2,5 dB/m) gözlemlenmiştir. T10 fiberinde yeni renk merkezleri oluşturulma hız sabiti olan k 'nın değeri yaklaşık 1 civarındadır. Grisco'sun çalışmasında düşük doz hızlarına maruz kalan fiberlerde $\beta > 2/3$ olduğu belirtilmiştir (Grisco 2001). Benzer şekilde düşük doz hızına maruz kalan T10 fiberinin seçilen dört dalgaboyunda da β değeri $2/3$ 'den büyüktür.

Radyasyona maruz kaldıktan sonra T10 fiberinin 20 saatlik iyileşme sürecini Şekil 4.25.b ve d'de gösterilmiştir. Bu iyileşme sürecinde 6 saatlik iyileşmede, RIA değeri başlangıç değeri ile aynı değere ulaşarak radyasyon ile oluşturulan renk merkezlerinin tamamen düzeldiği görülmektedir. 6 saat sonra RIA başlangıç değerinden daha yüksek bir değere ulaşmaktadır. Fit eğrileri ile teorik iyileşme süreci belirlenen bu fiberde ilk durumdan daha yüksek bir iyileşme göstermesinden dolayı fit eğrileri 1 saatlik iyileşme sürecine kadar deneysel sonuçlar ile tutarlıdır. Daha sonraki aşamada belirgin bir uyumsuzluk görülmektedir. Bu optik fiberde dikkat çekici bir durum iyileşme sürecinde optik fiberin RIA değeri ilk durumundan da öteye geçerek daha fazla iyileşme meydana geldiğini göstermesidir. Burada radyasyon etkisi ile optik fiberde oluşan renk merkezlerinin yanında radyasyon uygulanmadan öncede optik fiber yapısında renk merkezlerinin olduğu sonucuna varılabilir.

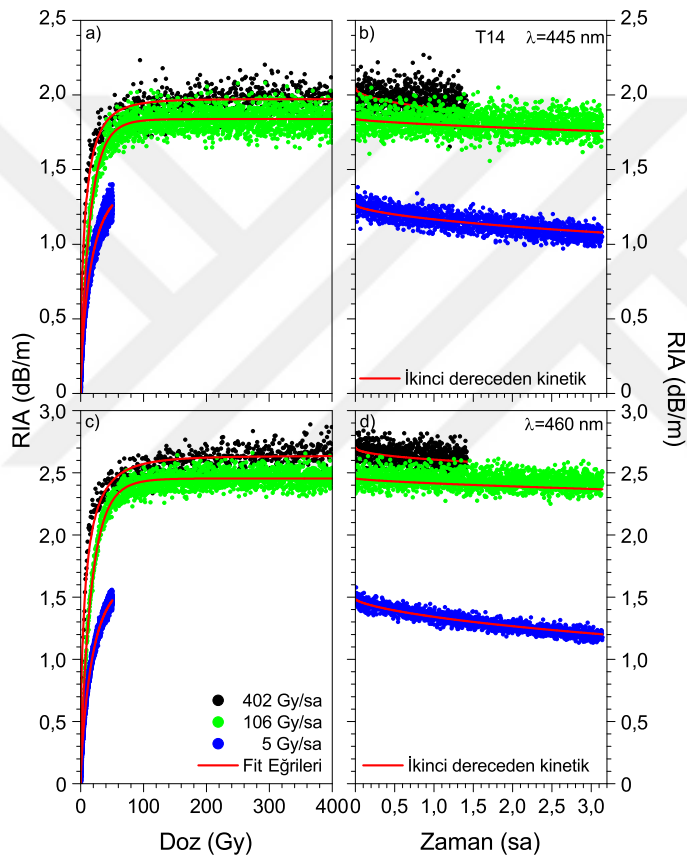
4.4.5. T14 optik fiberinin iyileşme süreci

T14 optik fiberinden 2,5 m uzunluğunda hazırlan örnekler 5, 106 ve 402 Gy/sa doz hızlarında radyasyona maruz bırakılmışlardır ve sırasıyla 402 Gy (T14.1), 455 Gy (T14.2) ve 50 Gy (T14.3) toplam dozlar uygulanmıştır (4.2). 445 ve 460 nm dalgaboylarında RIA ve iyileşme süreci Şekil 4.26.a-d'de gösterilmektedir. Radyasyon dozuna bağlı olarak RIA zayıflama değerlerinin arttığı görülmüştür. 106 ve 402 Gy/sa yüksek doz hızlarında 25 Gy doz miktarına kadar hızlı bir şekilde artan RIA 445 nm'de 1,9 dB/m değerine 460 nm'de ise 2,5 dB/m kadar ulaşmıştır. 5 Gy/sa doz hızındaki ölçümlerde 50 Gy toplam doz uygulanarak alınan ölçümlerde RIA değişimi 1,3 ve 1,5 dB/m değerine 445 ve 460 nm dalgaboylarında ulaşmaktadır. Şekil 4.27.a-d'de, T14 optik fiberinin 675 ve 750 nm dalgaboylarındaki farklı doz hızlarında ışınlama sırasında ve sonrasında (80 dakika (T14.1) ve 3 saat (T14.2 ve T14.3) iyileşme süreci) ölçülen RIA değerlerinin karşılaştırması gösterilmektedir. T14 fiberinde zayıflama değerleri 402 ve 106 Gy/sa doz hızlarında yaklaşık olarak 4 dB/m değerine ulaşmıştır ve bu değere 400 Gy toplam doz miktarında ulaşabilmektedir.

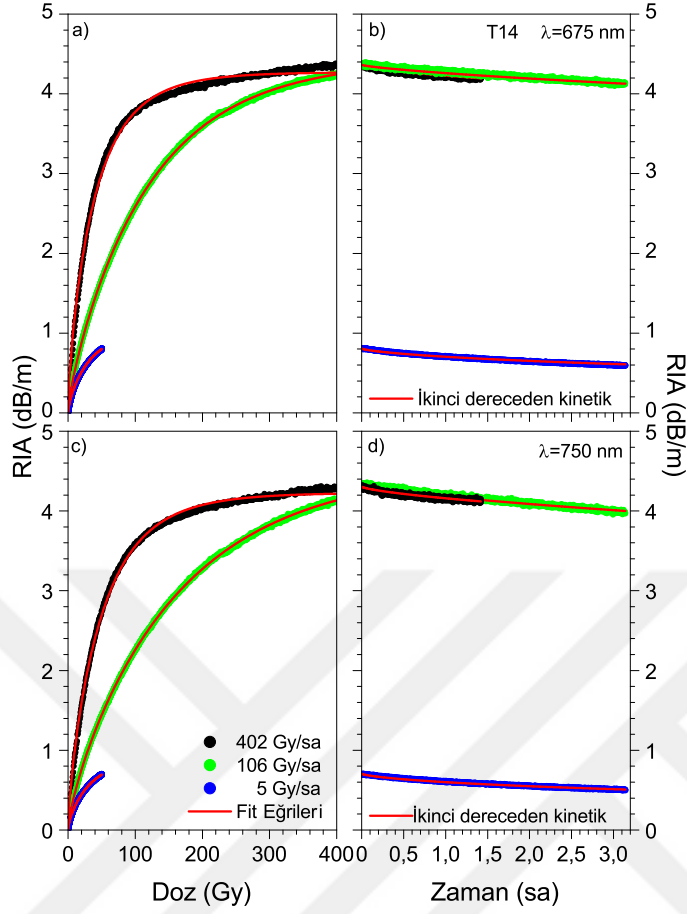
Bu RIA eğrileri Denklem 4.9 ile fit edilerek ve N_{sat} , β ve k parametreleri elde edilmiştir (Çizelge 4.3). Elde edilen bu parametreler doz hızına bağlı olarak artış göstermektedir. Aynı zamanda, kısa dalgaboylarında doz hızı arttıkça N_{sat} 26,55 gibi yüksek bir değerdedir. Uzun dalgaboylarında N_{sat} değeri 106 ve 402 Gy/sa doz hızlarında 5,36 değerine 5 Gy/sa doz hızında ise 0,10 değerine düşmüştür.

Aynı doz hızlarında, dalgaboyu arttıkça, k değeride azalmaktadır. 5 Gy/sa düşük doz hızında $\beta > 2/3$ ve 402 Gy/sa yüksek doz hızında $\beta \sim 2/3$ değerindedir.

T14 fiberi için farklı doz hızlarında bulduğumuz bu parametreler, diğer çalışmalardaki doz hızlarıyla elde edilen değerler ile tutarlıdır (Griscom 2001). T14 fiberinin iyileşme sürecinde 402 Gy/sa doz hızında 80 dakikadır. 106 ve 5 Gy/sa doz hızlarında 3 saat'lik bir iyileşme süreci için ölçüm alınmıştır. Işınlamadan sonra T14 fiberinin iyileşme yüzdesi %3 civarındadır. T14 fiberinin iyileşme süreci Denklem 4.12 yardımıyla teorik olarak hesaplanmıştır. Teorik hesaplamanın deneysel iyileşme süreci ile oldukça tutarlı olduğu görülmüştür.



Şekil 4.26. T14 optik fiberinin gama ışını radyasyonu altında a) 445 nm ve c) 670 nm dalgaboyunun RIA değişimleri. b) ve d) radyasyon uygulandıktan sonra 80 dakika ve 3'er saatlik iyileşme süreçleridir. Siyah, yeşil ve mavi katı noktalar sırasıyla 402, 106 ve 5 Gy/sa doz hızlarını göstermektedir

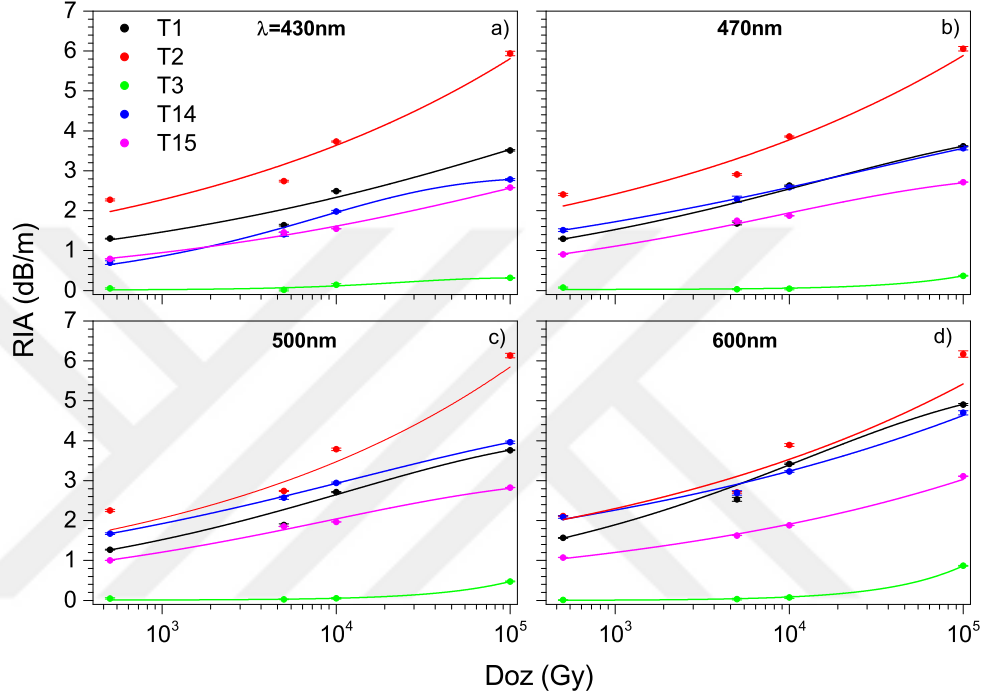


Şekil 4.27. T14 optik fiberinin gama ışını radyasyonu altında a) 675 nm ve c) 750 nm dalgaboyunun RIA değişimleri. b) ve d) radyasyon uygulandıktan sonra 80 dakika ve 3'er saatlik iyileşme süreçleridir. Siyah, yeşil ve mavi katı noktalar sırasıyla 402, 106 ve 5 Gy/sa doz hızlarını göstermektedir

4.5. Yüksek Dozlarda Radyasyon Öncesi ve Sonrası RIA Değişimleri

Bu bölüme kadar radyasyon uygulanması sırasında eşzamanlı yapılan ölçümler düşük radyasyon doz hızları ve toplam doz miktarlarında gerçekleştirilmiştir. Bu bölümde yüksek doz hızları (0,05, 0,5, 1 ve 10 kGy/sa) ve toplam doz miktarlarında (0,5, 5, 10 ve 100 kGy) Maryland Üniversitesinde bulunan Co-60 Panoramic Irradiator cihazı ile optik fiberler ışınlanmış ve RIA ölçümleri Texas Tech Üniversitesinde radyasyon uygulanmadan önce ve sonrasında alınan spektrumlar ile hesaplanmıştır. Bu ışınlama kısmında T1, T2, T3, T10 ve T14 fiberlerinden 2,50 ile 3,35 m arasında uzunlukları değişen yeni örnekler hazırlanmıştır. Düşük doz eşzamanlı ölçümlerin sonuçlarından elde edilen bilgiler doğrultusunda Texas Tech Üniversitesi adına bu tez çalışmasında da sunulmak üzere özel olarak Polymicro Technologies tarafından üretilen T15 (Phase-IV) ismi verilen yeni tür bir optik fiberde ilk kez yüksek dozda ışınlama yapılmıştır.

430, 470, 500 ve 600 nm dalgaboylarında optik fiberlerin RIA değerleri Şekil 4.28.a-d'de gösterilmiştir. Bu dalgaboylarının seçimi kullanılan ışık kaynağından dolayı farklılık göstermektedir. Düşük dozlarda yapılan ölçümlerde kullanılan tungsten-halojen ışık kaynağından farklı olarak ksenon ışık kaynağı kullanılmıştır ve alınan spektrumlarda kısa dalgaboylarında ksenon daha şiddetli pikler vermektedir.



Şekil 4.28. Sırasıyla 0,05, 0,5, 1 ve 10 kGy/sa'lık bir doz oranlarında 0,5, 5, 10 ve 100 kGy toplam dozlarda gama ışını radyasyonu altında optik fiberlerin farklı dalgaboylarında zayıflama değişimi: a) 430 nm; b) 470 nm; c) 500 nm; d) 600 nm. Siyah, kırmızı, yeşil, mavi ve mor noktalar sırasıyla T1, T2, T3, T14 ve T15 optik fiberlerini göstermektedir

T3 kuartz optik fiberinin RIA değişimi 100 kGy'de 0,2 dB/m'dir. Bu optik fiber yüksek miktarda OH⁻ iyonu içermesinden dolayı radyasyona karşı dayanıklı olduğu gerçekleştirilen eş zamanlı ölçümlerde olduğu gibi yüksek dozda radyasyon uygulanan ölçümlerde de görülmüştür (Aikawa vd. 2008; Friebele vd. 1983). Ce katkılı T1, T2 ve T14 optik fiberlerinde tüm dalgaboylarında toplam doz artışına bağlı olarak RIA zayıflama değerlerinde artış net bir şekilde görülmüştür. T2 optik fiberi en fazla radyasyondan etkilenen fiberdir ve 100 kGy toplam dozdan sonra zayıflama 6 dB/m'dir. Yapılan hesaplamalarda T2 optik fiberinin ışık iletiminin %97 oranında azaldığı bulunmuştur. T2 optik fiberi ile aynı yapıda olan ama kor, yelek ve ceket çapları daha küçük olan T1 optik fiberinde hesaplanan RIA

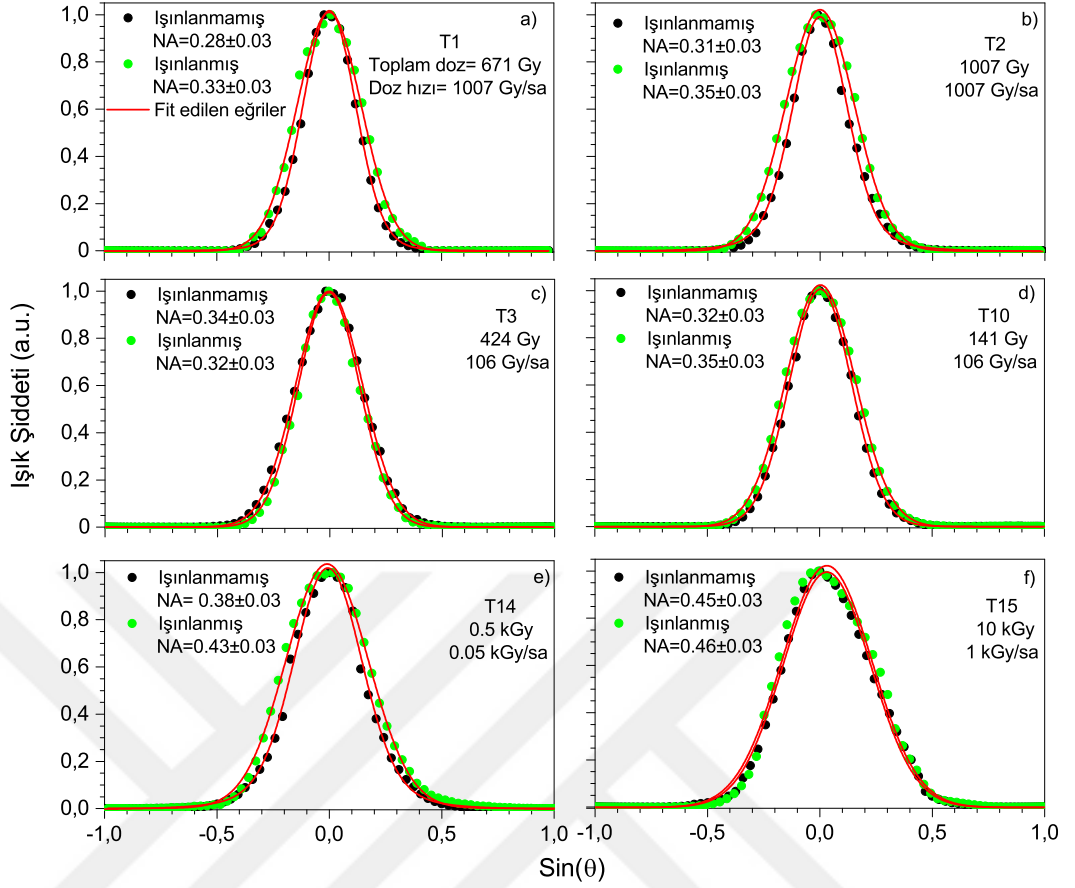
değerleri 430, 470 ve 500 nm dalgaboylarında 3 dB/m'dir. 600 nm dalgaboyunda ise RIA değeri 4 dB/m'ye kadar çıkmıştır. T2 ile benzer yapıya ve T1 optik fiberi ile katkılanan madde miktarları açısından benzerlik gösteren T14 optik fiberi T1 ile neredeyse aynı RIA zayıflamalarına sahiptir. T10 optik fiberi yüksek dozda radyasyon sonucunda ışık iletimi özelliğini tamamen kaybetmiştir. Bundan dolayı T10 optik fiberine ait bir ölçüm bulunmamaktadır.

Halka şeklinde Ce katkılandırılmış T15 optik fiberi grafiklerde görüleceği üzere T3 kuartz optik fiberi dışında yukarıda anlatılan tüm Ce katkılı fiberlerden daha yüksek bir radyasyon direncine sahiptir. Hesaplamalarda T15 optik fiberinin yüksek doz radyasyonda ışık iletimini %80 oranında kaybettiği bulunmuştur. Özel olarak üretilen bu optik fiberin radyasyona karşı olan dayanıklılığı yapılan katkı maddelerinin doğru seçimi ve doğru konsantrasyon değerleri ile optimum seviyeye getirilebilmiştir.

4.6. Optik Fiberlerin *NA* Ölçümleri

T1, T2, T3, T10, T14 ve T15 optik fiberlerinin ışınlanmadan öncesi (siyah daireler) ve sonrasında (yeşil daireler) elde edilen *NA* ölçümleri Şekil 4.29'de verilmiştir. *NA* değerlerini hesaplamak için elde edilen sonuçlar normalize edilerek Gauss fit edilmiştir. Elde edilen fit eğrilerinde maksimum noktanın sol ve sağ kollarından $1/2e^2 \approx 0,068$ değerleri ile maksimum nokta arasındaki bulunan bu iki farkın ortalaması alınarak ışınlanmadan önceki ve sonraki durumlar için *NA* değerleri hesaplanmıştır. Bu şekilde yapılan hesaplama ile ölçümden kaynaklanacak gürültü seviyesi ve optik fiberin eksen üzerindeki dönmeden kaynaklı sistematik hataların minimuma indirilmesi sağlanmıştır.

Ce katkılandırılmış T1, T2, T10 ve T14 optik fiberlerinde sırasıyla 671, 1007, 571 ve 500 Gy toplam doz radyasyon uygulandıktan sonra optik fiberlerin *NA* değerlerinde %20 oranında bir artış hesaplanmıştır. Böyle bir artış korunma kırıma indisindeki azalmanın yeşilin kırıma indisindeki azalmadan daha büyük olduğunu göstermektedir ($-dn_{kor}/dD > -dn_{yelek}/dD$). T15 Ce katkılı optik fiberinde 10 kGy toplam doz radyasyon uygulandıktan sonra hesaplanan *NA* değerinde ise hata sınırları içerisinde sabit kalmaktadır. T3 kuartz optik fiberinde ise 141 Gy toplam doz radyasyondan sonra bu fiberin *NA* değerinde %6'lık bir azalma gözlenmiştir ve bu azalma, Ce katkılandırılmış optik fiberlere göre zıt yönlü gerçekleşmiştir.



Şekil 4.29. Işınlanmadan öncesi (siyah daireler) ve sonrası (yeşil daireler) altı fiber için radyasyona bağlı olarak NA'daki değişimleri göstermektedir. Katı kırmızı çizgiler, gauss fit eğrilerine uymaktadır

4.7. Fotolüminesans Ölçümleri

Uzunlukları 2,35-3,35 m aralığında hazırlanan T1, T2, T3, T10, T14 ve T15 optik fiberlerinden öncelikli olarak ışınlanmamış örnekler 337 nm dalgaboyuna sahip atmalı N₂ lazer ışık kaynağı (fiberlere aynı eksen üzerinde gönderilmektedir) ile optik fiberinin bir ucundan uyarılmıştır. Optik fiberin diğer ucundan spektrometre yardımıyla spektrumlar elde edilmiştir. Yüksek doz hızları (0,05, 0,5, 1 ve 10 kGy/sa) ve toplam doz miktarlarında (0,5, 5, 10 ve 100 kGy) radyasyona maruz bırakılan optik fiberlerin benzer şekilde ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Tüm spektrumlar Şekil 4.30.a-f'de gösterilmiştir. Bu verilerde 337 nm civarındaki (doymuş) yüksek şiddetli pik kullanılan lazerden kaynaklanmaktadır. 400 nm'den daha büyük dalgaboylarında meydana gelen eğriler fotolüminesans yayılımını göstermektedir.

T3 optik fiberi dışında Ce katkılı optik fiberlerin (T1, T2, T10, T14 ve T15) ışınlanmadan önce alınan ölçümlerinde 420 ve 460 nm'de (koyu siyah çizgiler) geniş yayılım pikleri görülmektedir. Şekil 4.30.d ve f'deki T10 ve T15 optik

fiberlerinin yayılım spektrumlarında, diğer optik fiberlerden (T1, T2 ve T14) farklı olarak, yaklaşık 20 nm kadarlık daha uzun dalgaboylarına bir kayma (kırmızı ışığın dalgaboyuna doğru kayma) gözlenmiştir. Spektrumlardaki bu fark, T10 ve T15 optik fiberlerinin yapısında Al elementinin olmamasından kaynaklanmaktadır (Ishii vd. 1987; Sun vd. 2017).

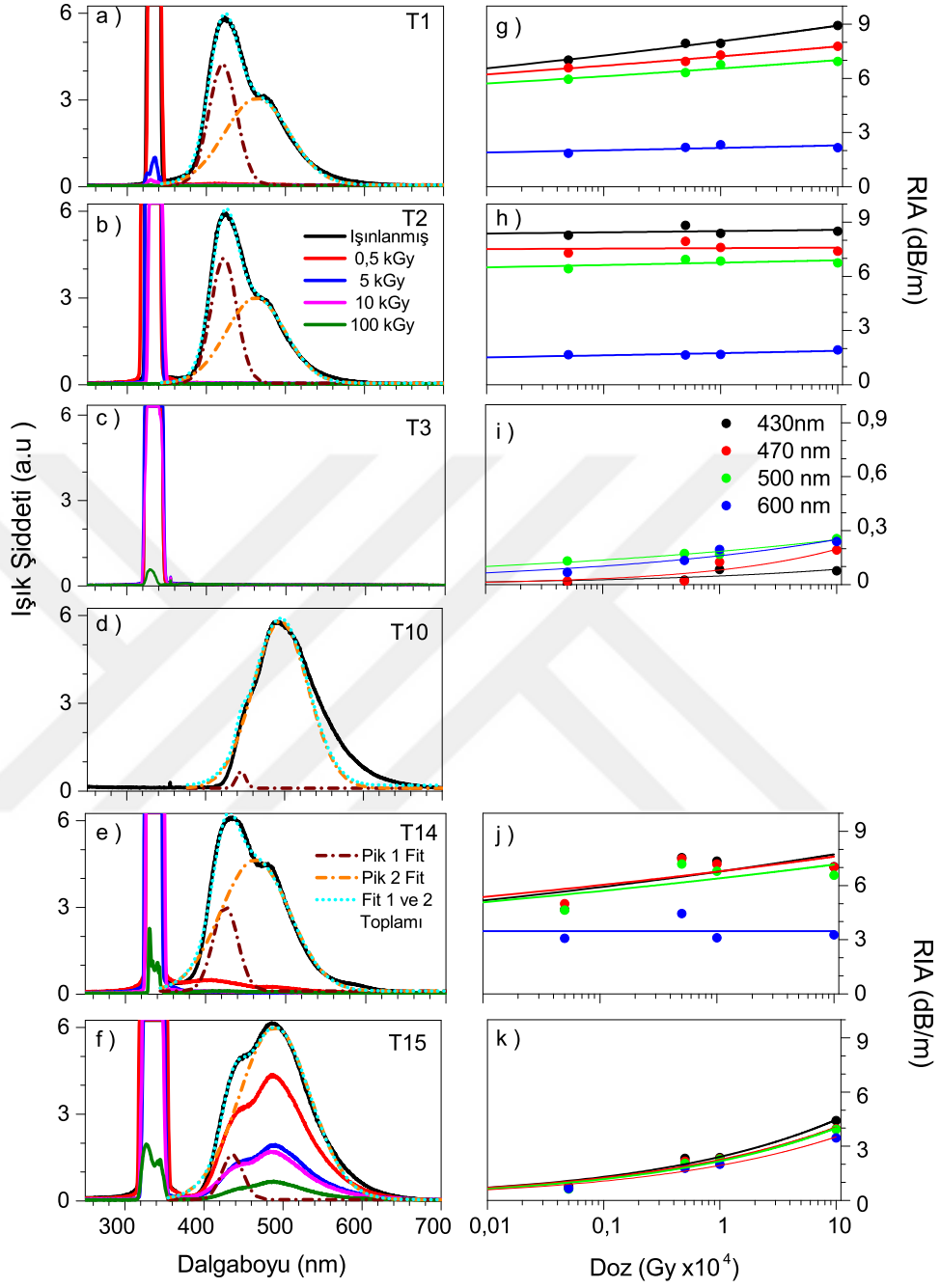
Tüm şekillerde de görüleceği gibi 420 nm'deki geniş bant Ce^{+3} iyonlarının $5d-4f$ yörüngeleri arasında bir geçiş gerçekleştiğini işaret etmektedir (Renata vd. 1999). Bu, spin-yörünge etkileşmesinden dolayı $4f'$ teki yörünge $f_{5/2}$ ve $f_{7/2}$ iki alt seviyeye yarılmaktadır. Bu iki alt seviye Gauss fonksiyonu ile fit edilerek 420 ve 460 nm'de iki pik şeklinde gösterilmiştir. Burada Ce^{+3} , $4f$ yörüngesindeki bir elektronunu kaybeder yada bir boşluğun tuzaklamasıyla Ce^{+4} haline dönüşmesidir ($Ce^{+3}+e^+ \rightarrow Ce^{+4}$) ve Ce^{+4} bir elektron tuzaklayarak tekrar Ce^{+3} durumuna döner ($Ce^{+4}+e^- \rightarrow Ce^{+3}$). Böylece yük transferi sırasında UV bölgede bir soğurma piki oluşur (DasMohapatra 1998; Ishii vd. 1987; Reisfeld vd. 1998).

T1, T2 ve T10 optik fiberlerinde (Şekil 4.30.a, b ve d) 0,5 kGy toplam radyasyon uygulandıktan sonra herhangi bir ışık şiddeti gözlenmemiştir. 0,5 kGy toplam dozdan sonra T14 optik fiberinde çok az bir ışık iletimin olduğu ve tamamen zarar görmediği anlaşılmıştır. Bunun nedeni ise T14 optik fiberinin kor-2 kısmındaki OH^- miktarının (~ 400 ppm) T1 ve T2 optik fiberlerinden daha fazla olmasından kaynaklanmaktadır.

T15 optik fiberinde artan toplam doza bağlı olarak kademeli bir şekilde yayılım ve ışık iletiminde kayıplar meydana gelmektedir (Şekil 4.30.f). Bununla birlikte, fotoluminesans ışığın yayılımı ve lazerden kaynaklı UV ışığı iletimi 100 kGy'den sonra bile açıkça görülebilmektedir. Bu ışık iletimi T15 optik fiberinin kor-1 (~ 700 ppm OH^-) ve $15 \mu m$ Ce katkılı halka ($130-220$ ppm OH^-) etrafındaki kor-2 (~ 400 ppm OH^-) katmanalarındaki yüksek miktarda OH^- iyonundan kaynaklanmaktadır. Yüksek doz radyasyon uygulandıktan sonra T15 optik fiberinin en iyi hale getirilen yapısı sayesinde yayılım eğrileri ve ışık iletimi görülebilmektedir.

T3 kuartz optik fiberi (~ 700 ppm OH^-) için benzer şekilde ölçümler gerçekleştirilmiştir. Bu optik fiberde fotoluminesans olayı görülmemiştir ve lazerden kaynaklı UV ışığı iyi bir şekilde iletilebilmektedir. 100 kGy toplam dozdan sonra oluşan zayıflama daha önceki çalışmalardaki verilerle uyumludur (430 nm'de 0.05 dB/m) (Akchurin vd. 2002).

337 nm dalgaboylu lazer ile uyarılan ışınlanmış Ce katkılı T1, T2, T10, T14, T15 ve T3 kuartz optik fiberlerinin dört dalgaboyunda (430 , 470 , 500 ve 600 nm) fotoluminesans ölçümlerinden hesaplanan RIA zayıflamaları Şekil 4.30.g-k gösterilmiştir.



Şekil 4.30. Gama radyasyonu ile ışınlanmamış ve ışınlanmış T1, T2, T3, T10, T14 ve T15 optik fiberleri, 337 nm dalgaboyuna sahip N₂ lazer ışığı (fiberlere aynı eksen üzerinde gönderilmiştir) ile uyarıldığında, fotoluminesans ve RIA kaybının farklı toplam radyasyon dozlarındaki düzeylerini göstermektedir

T1 optik fiberinin RIA'sı artan doza bağlı olarak çok hızlı bir şekilde artış göstermiştir. 100 kGy toplam dozdan sonra 430 nm dalgaboyundaki RIA değeri 9 dB/m'dir. 470 ve 500 nm dalgaboyları için RIA değeri 7.5 dB/m ve 600 nm dalgaboyundaki değeri 2.5 dB/m'dir. 600 nm'deki bu düşük değer spektrumlarda bu dalgaboyunda ışık şiddetinin oldukça düşük olmasından kaynaklanmaktadır. T2 ve T14 optik fiberleri benzer bir davranış sergilemektedir. T15 optik fiberi belirgin olarak diğer fiberlerden farklıdır ve 100 kGy'de RIA değeri ~4 dB/m'dir. T3 kuartz optik fiberinde 100 kGy toplam dozda en az zayıflama gözlenmiştir ve RIA değeri ~0.2 dB/m'dir. Ce-katkılı kor yapısında Al ve P elementlerinin varlığı radyasyon dayanıklılığı açısından negatif bir etki sağladığı görülmektedir.



5. SONUÇLAR

Bu tez çalışmasında, dört adet kuartz optik fiber (T3, T4, T5 ve T7) ve altı adet Ce katkılı sintilasyon fiberleri, tek korlu (T10) ve iki korlu (T1, T2, T9, T14 ve T15), Co-60 radyasyonuna maruz bırakılmışlardır. Çeşitli doz hızları ve toplam doz miktarlarında farklı ölçümler gerçekleştirilerek optik fiberlerin radyasyon sonucunda oluşan kayıp değerleri (RIA) karşılaştırılmıştır. Farklı kor yapılarına ve konsantrasyonlara sahip optik fiberlerin radyasyona karşı göstermiş oldukları tepkiler eş zamanlı ve eş zamanlı olmayan ölçümler gerçekleştirilerek detaylı bir şekilde sunulmuştur. Bunun yanında bu ölçümler teorik bir çerçevede incelenerek teorik iyileşme süreçlerinin deneysel sonuçlarla uyumluluğu gösterilmiştir. Aynı zamanda bu optik fiberlerin radyasyon uygulamadan önce ve radyasyon uygulandıktan sonraki durumları için nümerik açıklık (NA) ve fotoluminesans (PL) ölçümleri gerçekleştirilmiştir.

5.1. Optik Fiberlerin Element Analizi

Optik fiberlerin kor, yelek ve ceket kısımlarının kimyasal analizleri kütle spektrometresi ve enerji dağılımlı spektrometre yardımıyla yapılmıştır. Kuartz optik fiberlerin (T3, T4, T5 ve T7) kor kısımlarında silikanın yanında düşük oranlarda B, Mg (T3 fiberi hariç), Sc, P ve Fe (T3 fiberi hariç) elementleri bulunmaktadır. T4, T5 ve T7 fiberlerin yelek kısmında P elementi oranı diğer elementlere göre oldukça yüksektir. Ayrıca T4 optik fiberinin yelek kısmında 582 ppm'lik Al içeriği bulunmaktadır. T1, T2, T9, T10, T14 ve T15 optik fiberlerinin korunda sırasıyla 5780, 4920, 760, 427, 5230 ve 2070 ppm miktarında Ce elementi bulunmaktadır ve yüksek miktardaki Ce ile birlikte Mg, Sc, Ti, Ga, La, Fe ve Gd elementleri düşük konsantrasyonlarda gözlemlenmiştir. T1, T2 ve T14 korlarında yüksek miktarda Al elementi ve bu üç optik fiberin yelek ve ceket kısımları yüksek miktarda P elementi içermektedir. T10 ve T15 optik fiberlerinin kor kısımlarında Al ve P elementlerinin olmadığı görülmüştür. Bu elementlerin dışında T3, T4, T5 ve T7 kuartz optik fiberlerinin korunda 700 ppm ve T14 Ce katkılı optik fiberin silikadan yapılan kor-2 yapısında ~400 ppm miktarında OH⁻ iyonu bulunmaktadır. T15 Ce katkılı halkalı yapıya sahip optik fiberin kor-1'inde ~700 ppm, kor-1'i çevreleyen Ce katkılı halkasında 130-220 ppm ve kor-2 yapısında ~400 ppm'lik OH⁻ iyonu barındırmaktadır.

5.2. Düşük Dozlarda Optik Fiberlerin Eş zamanlı Ölçümleri

5.2.1. Kuartz optik fiberlerin eş zamanlı ölçümleri

Eş zamanlı yapılan ölçümlerde T3, T4, T5 ve T7 kuartz optik fiberleri 106 ve 402 Gy/sa doz hızlarında 180 ile 1942 Gy aralığında değişen toplam dozlarda radyasyon uygulanmıştır. T4, T5 ve T7'nin dalgaboyu arttıkça radyasyondan daha az etkilenmekte olduğu görülmüştür ve buna karşılık T3'ün radyasyona karşı direncinin seçilen dalgaboylarında (575, 635, 675 ve 750 nm) değişmediği gözlenmiştir. T4 ve T5 kuartz optik fiberin kısa dalgaboylarında radyasyona karşı direnci daha az olmasının temel nedenlerinden birisi optik fiberlerin yapısındaki Fe elementinden kaynaklanmaktadır (Youngwoong vd. 2013). T7 optik fiberinde ise içermiş olduğu Mg elementinden dolayı radyasyon direncinin düşük olduğu düşünülmektedir. Kuartz optik fiberler arasında radyasyon direnci en yüksek olan T3 optik fiberidir. Bununla birlikte diğer üç optik fiberin radyasyon direncindeki düşüş oldukça azdır. Bu durumun temel nedeni yapılarındaki yüksek OH⁻ içeriğinden kaynaklanmaktadır. Doz hızına bağlı olarak yapılan incelemede 106 ve 402 Gy/sa doz hızlarında gama ışını radyasyonu altında bu kuartz optik fiberlerin benzer davranışlar gösterdiği bulunmuştur. RIA'daki değişimleri gözönüne alındığında sonuçlar bu optik fiberlerin radyasyon dirençlerinin doz hızından bağımsız olduğunu göstermektedir. Kuartz optik fiberler üzerine yapılan çalışmalarda 630 ve 670 nm dalgaboyundaki kayıpların radyasyon sonucunda oluşan NBOHC renk merkezlerinden kaynaklanmaktadır.

Bu kuartz optik fiberlerin eş zamanlı ölçümlerinde radyasyon sonrası iyileşme süreçleri incelenmiştir ve bu ölçümlerde fiberlerin belirli bir oranda iyileştikleri görülmüştür. Fakat bu iyileşme optik fiberin ilk durumdaki hasarsız durumuna dönmesini sağlayamamıştır. Ayrıca T4 optik fiberi için yapılan radyasyon hasar ve iyileşme süreçlerinin tekrarlanabilirliğinin incelenmesinde optik fiberin bir önceki radyasyon dozundan kaynaklı oluşan RIA değerini hafızasında tutmaktadır. Radyasyon tekrar uygulandığında o seviyedeki RIA değerine hızlı bir şekilde ulaşır, kaldığı RIA seviyesinden zayıflamaya devam ettiği görülmüştür.

5.2.2. Ce katkılı optik fiberlerin eş zamanlı ölçümleri

Ce katkılanmış T1 ve T2 optik fiberlerinde uygulanan toplam doz miktarları farklı olsa da seçilen tüm dalgaboyları için fiberlerin zayıflama davranışları benzerdir. T2 optik fiberinin RIA değişimi tüm dalgaboylarında T1 optik fiberlerinden fazladır. Bu da T2 optik fiberinin daha büyük yarıçapa sahip olmasından ileri gelmektedir. T2 optik fiberinin daha büyük yarıçapa sahip olması artan yanal yüzeyine bağlı olarak radyasyon direncinin düştüğünün bir göstergesidir.

T1 ve T2 optik fiberleri için yapılan iyileşme süreci incelemelerinde iki fiberinde 300 Gy toplam dozdan sonra herhangi bir iyileşme olmadığı bulunmuştur. Daha yüksek toplam doz miktarı uygulandıktan sonra yapılan iyileşme süreci incelemesinde RIA değerinin sabit kaldığı görülmüştür. İki optik fiberden de hazırlanan yeni örnekler ile radyasyon hasar iyileşme süreçlerinin tekrarlanabilirliği için daha düşük toplam doz (168 Gy) uygulanarak belirli periyotlarda ölçümler alınmış ve kuartz optik fiberlere benzer bir hafızada tutma sürecinin olduğu görülmüştür. Bu optik fiberlerdeki inceleme sürecinde fiberlerin yüksek miktarlarda alüminyum ve fosfor içerdiğinden dolayı radyasyon etkisi ile bozulmaların meydana geldiği ve Al-OHC (600-1000 nm aralığında), P2 ve POHC (500-700 nm dalgaboyu aralığında) renk merkezleri oluşmaktadır. Oluşan renk merkezlerinin iyileşmediği ve aynı zamanda radyasyon uygulandığında mevcut renk merkezlerinin üzerine yenilerinin eklendiği bulunmuştur.

Ce katkılandırılmış T9 optik fiberi 106 Gy/sa doz hızında 141 ve 530 Gy toplam doz radyasyon uygulanmıştır. T9 optik fiberlerinde yaklaşık 0,2 dB/m kayıp görülmüştür ve seçilen dalgaboyları artıkça kayıp azalmıştır. Ce katkılandırılmış optik fiberler ile karşılaştırıldığında radyasyona karşı direnci oldukça yüksek olan bu optik fiberin kırılğan bir yapıya sahip olmasından dolayı kullanım alanları kısıtlıdır.

Ce katkılandırılmış optik fiberlerde RIA'nın radyasyon doz hızına bağlılığın araştırılması için T10 optik fiberleri 5, 25, 106 ve 1007 Gy/sa doz hızlarında ve T14 optik fiberleri 5, 106 ve 402 Gy/sa doz hızlarında radyasyona maruz bırakılarak eş zamanlı ölçümler gerçekleştirilmiştir. Tüm dalgaboylarında T10 ve T14 optik fiberlerinin zayıflaması uygulanan dozun bir fonksiyonu olarak artmaktadır ve aynı zamanda uygulanan doz hızı arttıkça RIA değerlerindeki arttığı görülmüştür. T10 fiberinin korunda P ve ceket kısmında Al, Mg ve P ve T14 optik fiberinin ise hem kor hem yelek kısımlarında Al ve P elementleri yüksek miktarda bulunmasından kaynaklı çok yüksek RIA değerlerine sahip olduğu görülmüştür. (Bueker vd. 1990; Girard vd. 2011). Aynı zamanda T10 optik fiberinin korunun tamamı Ce elementi içermesi ve diğer fiberler gibi kuartz kısma sahip olmaması radyasyona karşı direncinin daha az olmasına sebep olmuştur. T10 ve T14 optik fiberleri için yapılan incelemelerde, optik fiberler içerisinden geçirilen ışığın şiddetinde radyasyona karşı yüksek duyarlılık göstermesi bu optik fiberin bir dozimetre olarak kullanıma uygun olabileceğini göstermektedir. Aynı zamanda halen kullanılmakta olan dozimetrelerin boyutlarına göre daha küçük olması bu optik fiber için ayrı bir avantaj sağlamaktadır.

5.3. Optik Fiberlerin Hasar-İyileşme Kinetiği

Optik fiberlerin radyasyon etkisi ile gerçekleşen ışık şiddetindeki zayıflama ve radyasyonsuz ortamda iyileşme süreçlerinin kinetiği, doz hızına ve toplam

doza bağılı olarak ikinci dereceden kinetik hız denklemleri ile modellenmiştir. Bu modelleme T3 kuartz ve T1, T2, T10, T14 Ce katkılanmış optik fiberlerinde yapılmıştır. Bu optik fiberlerde, deneysel olarak elde edilen sonuçlar ile ikinci dereceden kinetik hız denklemlerinden hesaplanan değerlerle büyük bir uyumluluk içerisinde olduğu görülmüştür. Parçacık fiziği ve nükleer fizikteki tipik dedektör uygulamaları için, çok çeşitli doz hızlarında (örneğin LHC endcap kalorimetrelerde 1-10 Gy/sa) ve birkaç dakika ile birkaç ay arasında iyileşme süreçlerinde uzun vadeli performansları önemlidir. Bu bağlamda, olumsuz radyasyon koşullarında detektör kalibrasyonunu ve uzun süreli performansı izlemek için güvenilir bir modelleme olarak kullanılabilmesi görülmüştür.

5.4. Yüksek Dozlarda Optik Fiberlerin Eş zamanlı Olmayan Ölçümleri

Düşük dozlarda yapılan eş zamanlı ölçümlerde yüksek dozlarda görülmesi mümkün olmayan geçirgenlikteki değişimlerin incelenmesine ve yüksek dozlardaki çalışmalara yön verebilmesi adına yapılan bu incelemelerin yanında yüksek dozlarda eş zamanlı olmayan ölçümler gerçekleştirilerek radyasyon öncesi ve sonrası bu optik fiberlerin radyasyona karşı gösterdikleri tepkiler araştırılmıştır.

Eş zamanlı olmayan ölçümlerde T1, T2, T3, T10, T14 ve T15 optik fiberleri yüksek doz hızları (0,05, 0,5, 1 ve 10 kGy/sa) ve toplam doz miktarlarında (0,5, 5, 10 ve 100 kGy) Co-60 radyasyonuna maruz bırakılarak radyasyon öncesi ve sonrası ölçümler gerçekleştirilmiştir. T3 kuartz optik fiberinin düşük dozlarda olduğu gibi yüksek dozlarda uygulanan radyasyona karşı yüksek dirençli olduğu ve T1, T2 ve T14 Ce katkılanmış fiberlerin ise radyasyon direncinin düşük olduğu bulunmuştur. Bu sonuçlar eş zamanlı ölçüm sonuçları ile tutarlı olduğu görülmüştür.

Bu tez çalışmasında eş zamanlı ölçümlerden elde edilen bilgiler ve buna bağılı olarak optik fiberlerin element katkılarındaki değişimler gözönünde bulundurularak özel olarak bu çalışma için üretilen Ce katkılanmış halkalı yapıya sahip T15 optik fiberinin yüksek dozlarda radyasyona karşı dirençli olduğu gözlenmiştir. Ce katkılanmış diğer fiberler ile karşılaştırıldığında RIA değerinin daha az olduğu bulunmuştur. Diğer optik fiberlerde bulunan Al ve P elementi T15 optik fiberinin kor-1 ve kor-2 kısımlarında bulunmamaktadır. Aynı zamanda radyasyon direnci yüksek olan kuartz optik fiberlerde yüksek miktarda OH⁻ içeriğinin bulunmasının avantajı gözönüne alınarak bu optik fiberde yüksek miktarda OH⁻ içeriğinin eklenmesi ile radyasyona karşı direnci arttırmıştır. Optik fiberlerin radyasyon direncinin geliştirilmesinde malzemelerin saflığı ön önemli hususlardan birisidir. Burada Al ve P varlığının optik fiberleri radyasyona dirençsiz hale getirdiği açıkça görülmüştür. Ce katkılı fiberlerin en iyisi olan T15 optik fiberinin radyasyon direnci yüksek olan T3 kuartz optik fiber ile karşılaştırıldığında, <100 kGy toplam dozlarda radyasyona dirençli olarak kabul edilmektedir. 100

kGy'den yüksek toplam doz uygulamaları için bu optik fiberin radyasyon direncini arttırmak için geliştirilmesi planlanmaktadır.

5.5. Optik Fiberlerin NA Değişimi

Bu çalışmalara ek olarak, T3 kuartz ve T1, T2, T10, T14, T15 Ce katkılanmış optik fiberlerin radyasyon uygulanmadan önce ve radyasyon uygulandıktan sonra nümerik açıklık (NA) değerleri ölçümü gerçekleştirilmiştir. 500-1007 Gy aralığında toplam doz radyasyon uygulandıktan sonra Ce katkılanmış T1, T2, T10 ve T14 optik fiberlerinde NA değerlerinde %20 oranında artış ve T3 kuartz optik fiberinde %6 oranında azalma meydana gelmiştir. 10 kGy toplam doz radyasyona maruz kaldıktan sonra Ce katkılı halka yapısına sahip T15 optik fiberinin NA değerinde hata sınırları içerisinde sabit kalmaktadır.

5.6. Optik Fiberlerin Fotolüminesans Ölçümleri

Son olarak, radyasyon uygulanmadan önce ve yüksek dozlarda radyasyon uygulandıktan sonra T3 kuartz ve T1, T2, T10, T14, T15 Ce katkılanmış optik fiberlerinin fotolüminesans ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Bu optik fiberlerde UV ışığının yüksek şiddetli iletim piki 337 nm'de ve fotolüminesans yayılım eğrileri 400 nm dalgaboyundan daha büyük değerlerde belirgin olarak elde edilmiştir. T3 kuartz optik fiberinde beklendiği gibi fotolüminesans olayı görülmemiştir ve UV ışığını iyi bir şekilde iletebilmektedir.

Işınlanmamış Ce katkılı T1, T2, ve T14 optik fiberlerde 420 ve 460 nm'de geniş yayılım pikleri görülmüştür. T10 ve T15 optik fiberlerinin yapısında Al elementinin olmamasından kaynaklı olarak yayılım spektrumlarında ~20 nm'lik kırmızı ışığın dalgaboyuna doğru kayma gözlenmiştir. Ce katkılanmış optik fiberlerde 420 nm'deki geniş bant Ce⁺³ iyonlarının 5d-4f yörüngeleri arasında geçiş yaptığını işaret etmektedir. Bu 4f'teki yörünge $f_{5/2}$ ve $f_{7/2}$ spin-yörünge etkileşmesine göre iki alt seviyeye ayrılması sonucunda 420 ve 460 nm'de pikler oluşmaktadır.

0,5 kGy toplam doz radyasyon uygulandıktan sonra T1, T2 ve T10 optik fiberlerinde ışık iletimi tamamen kaybolduğu görülmüştür. T14 optik fiberinin ise tamamen zarar görmediği ve az oranda ışık iletimi gerçekleştirdiği görülmüştür. Bunun nedeni T14 optik fiberinin kor-2 kısmında OH⁻ miktarının yüksek olmasından kaynaklanmaktadır.

100 kGy toplam doz radyasyon uygulanan T15 optik fiberinde yayılım ve ışık iletiminin kayıplar olmasına rağmen gerçekleştiği görülmüştür. Bu da T15 optik fiberinin kuartz korlara sahip olması ve bu korların yüksek miktarda OH⁻ iyonunu bulundurmasından kaynaklanır. Işık yayımı, yani fotolüminesans, radyasyon nedeniyle bölgesel olarak zarar görse de, optik fiberlerin yüksek OH⁻

içeriğine sahip kısımları aracılığıyla ışığın iletimine yardımcı olur.

Aynı zamanda, T3 kuartz ve T1, T2, T10, T14, T15 Ce katkılandırılmış optik fiberlerinin fotoluminesans ölçümlerinden RIA zayıflamaları incelenmiştir. T1, T2 ve T14 optik fiberleri benzer bir davranış sergileyerek, artan radyasyon dozuna bağlı olarak RIA değerleride artmaktadır. 100 kGy toplam dozdan sonra, Ce katkılandırılmış optik fiberler arasında T15 optik fiberinin radyasyona karşı direncinin yüksek olduğu ve en az zayıflama değerine sahip olduğu görülmüştür. T3 optik fiberinin radyasyona karşı direncinin yüksek olduğu bu sonuçlar ile bir kez daha doğrulanmıştır. Al ve P içermeyen T15 optik fiberi T1, T2 ve T14 optik fiberleri ile karşılaştırıldığında fotoluminesans ve ışık iletimin korunması açısından daha iyi bir performans göstermektedir. Sonuç olarak, Ce katkılı kor yapısına sahip optik fiberlerde Al ve P elementlerinin varlığı radyasyon dayanıklılığı açısından negatif bir etki sağlamaktadır.

5.7. Son Değerlendirme

Bu çalışmada düşük ve yüksek radyasyon dozunun optik fiberlerdeki oluşturduğu zayıflamalar eş zamanlı ve eş zamanlı olmayan ölçümler ile gösterilmiştir. Kuartz ve Ce katkılı optik fiberlerden şu sonuçlar elde edilmiştir:

- Kuartz optik fiberler radyasyona en dayanıklı fiberlerdir. Bu dayanıklılıkları yapılarında yüksek miktarda OH^- içermelerinden kaynaklanmaktadır.
- Kuartz optik fiberlere Fe ve Mg elementlerinin katkısı radyasyon direncini düşürmektedir.
- Ölçümü gerçekleştirilen kuartz optik fiberlerin RIA değişimleri radyasyonun doz hızından bağımsızdır.
- Ce katkılı optik fiberlerde Ce katkılı kor kısımlarının çaplarının büyük olması radyasyondan daha çok etkilenmesine neden olmaktadır.
- Al ve P elementlerinin Ce katkılı optik fiberlere katkılanması radyasyona karşı direncin düşmesine neden olmaktadır.
- Kuartzdaki oluşan kor ve onu çevreleyen Ce halkası gibi bir yapının başka bir yüksek miktarda OH^- içeren kuartz kor ile kaplanması hem ışık iletiminin zayıflamasını azaltır hem de radyasyon direncinin artmasına neden olur. Aynı zamanda optik fiberlerin böyle bir yapıya (kuartz kor1-Ce halka-kuartz kor2) sahip olması ışık iletiminin daha verimli olmasına yardımcı olmaktadır.
- Hem kuartz hem de Ce katkılı optik fiberlerin hasar-iyileşme süreçlerinde (radyasyon-iyileşme-radyasyon olarak periyodik), optik fiberin bir önceki

radyasyon uygulandığında meydana gelen RIA değerini bir sonraki radyasyon uygulama sürecine kadar hafızada tuttuğu görülmüştür.

- Optik fiberlerin radyasyona bağlı zayıflamalarına ikinci derece büyüme kinetiği denklemleri ile yapılan fitlerden elde edilen N_{sat} , R ve β parametrelerin Denklem 4.12’inde kullanılmasıyla optik fiberlerin iyileşme süreçleri öngörülebilir.

Elde edilen sonuçlardan Ce katkılı bir optik fiberin şu özellikleri sağlaması gerektiği görülmüştür:

- Üretilecek optik fiber iki kora sahip olmalıdır ve iki korda yüksek miktarda OH^- içeriği barındıran kuartztan yapılmalıdır.
- Ce katkısı bir halka şeklinde iki kor bölgesi arasında uzanmalıdır.
- Optik fiber kırılma bir yapıya sahip olmamalıdır.
- Al ve P elementinin optik fiberin yapısında olmaması gerekmektedir.

6. KAYNAKLAR

- Agnello, S., Di Francesca, D., Alessi, A., Iovino, G., Cannas, M., Girard, S., Boukenter, A. and Ouerdane, Y., 2013. Interstitial O⁻² distribution in amorphous SiO₂ nanoparticles determined by Raman and photoluminescence spectroscopy. *Journal of Applied Physics*, 114(10): 1043051–6.
- Agrawal, G., 2012. *Fiber-Optic Communication Systems*. Wiley Series in Microwave and Optical Engineering. Wiley. 626 p.
- Aikawa, K., Izoë, K., Shamoto, N., Kudoh, M. and Tsumanuma, T., 2008. Radiation-resistant single-mode optical fibers. *Fujikura Giho*, 4: 10–14.
- Akchurin, N., Ashurov, M. K., Baidzhanov, M. I., Ibragimov, Z. D., Rustamov, I. R., Gasanov, E. M., Nuritdinov, I. and Yuldashev, B. S., 2008. Effect of prior structural defects in quartz fiber lightguides on defect formation by γ radiation. *Atomic Energy*, 104(1): 33–37.
- Akchurin, N., Ayan, A., Bencze, G., Dumanolu, I., Eskut, E., Fenyvesi, A., Ferrando, A., Gavrilov, V., Hajdu, C., Josa, M. et al., 2002. Effects of radiation and their consequences for the performance of the forward calorimeters in the CMS experiment. *Nucl Instrum Meth B*, 187(1): 66–78.
- America, O., 2001. *Fiber Optics Handbook: Fiber, Devices, and Systems for Optical Communications*. McGraw-Hill telecom. McGraw-hill. 416 p.
- Baccaro, S., Cemmi, A., Di Sarcina, I. and Menchini, F., 2015. Gamma rays effects on the optical properties of cerium-doped glasses. *International Journal of Applied Glass Science*, 6(3): 295–301.
- Bach, H. and Neuroth, N., 1995. *The Properties of Optical Glasses*. Springer, Verlag. 414 p.
- Bailey, D. and Wright, E., 2003. *Practical Fiber Optics*. Elsevier Science. 259 p.
- Batal, F. H. A. E., Nada, N., Desouky, S. M. and Khalil, M. M. I., 2004. Absorption and infrared spectra of gamma irradiated ternary silicate glasses containing cobalt. *Indian J. Pure Appl. Phys.*, 42(10): 711–721.
- Bebb, H. and Williams, E., 1972. Chapter 4 Photoluminescence I: Theory. *Semiconductors and Semimetals* vol. 8 Elsevier. pp. 181–320.
- Bhattacharya, A., Pal, A., Bhowmick, G. K., Saha, A., Dasgupta, K. and Sen, R., 2011. Radiation Resistant Optical Fiber for Visible Region. In 2011 Asia Communications and Photonics Conference and Exhibition (ACP). pp. 1–5.

- Bobyshev, A. and Radtsig, V., 1989. Optical absorption spectra of paramagnetic defects in glassy SiO₂. 14: 274–279.
- Borgermans, P. and Brichard, B., 2002. Kinetic models and spectral dependencies of the radiation-induced attenuation in pure silica fibers. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 49(3): 1439–1445.
- Börner, M., 1967a. Electro-optical transmission system utilizing lasers. number: 3845293, Patent.
- Börner, M., 1967b. Mehrstufiges Übertragungssystem für pulscodemodulation dargestellte Nachrichten für Telefunken Patentverwertungsgesellschaft m.b.H. number: 1254513, Patent.
- Brichard, B., Fernandez, A. F., Berghmans, F. and Decretton, M., 2002. Origin of the radiation-induced OH vibration band in polymer-coated optical fibers irradiated in a nuclear fission reactor. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 49(6): 2852–2856.
- Bueker, H., Haesing, F. W., Nicolai, S. and Wolters, B., 1990. Fiber Optic Radiation Dosimetry for Medical Applications. vol. 1201, pp. 419–429.
- Chakrabarti, P., 1998. Optical Fiber Communication. Mc Graw Hill. 461 p.
- DasMohapatra, G., 1998. A spectroscopic study of cerium in lithium-alumino-borate glass. *Materials Letters*, 35(1): 120–125.
- Deneka, C. W., Kar, G. and Mensah, T. O., 1988. Method for coating optical waveguide fiber. number: 4792347, Patent.
- Derickson, D., 1998. Fiber Optic Test and Measurement. Hewlett Packard Company, New Jersey. 642 p.
- Devine, R. A. B. and Arndt, J., 1989. Correlated defect creation and dose-dependent radiation sensitivity in amorphous SiO₂. *Phys. Rev. B*, 39(8): 5132–5138.
- Dumanoglu, I., Akchurin, N., Akgun, U., Ayan, S., Bruecken, P., Eskut, E., Fenyvesi, A., Kayis Topkasu, A., Koca, N., Makonyi, K. et al., 2002. Radiation-hardness studies of high OH⁻ content quartz fibres irradiated with 500 MeV electrons. *Nucl Instrum Meth A*, 490(3): 444–455.
- Dyer, S., 2004. Wiley Survey of Instrumentation and Measurement. Wiley-IEEE. Wiley. 1112 p.
- Ehrt, D., Ebeling, P. and Natura, U., 2000. UV Transmission and radiation-induced defects in phosphate and fluoride-phosphate glasses. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 263–264(1–2): 240–250.

- Elliott, S., 1986. *Physics of Amorphous Materials*. John Wiley & Sons, Incorporated. 481 p.
- Fox, B. P., Schneider, Z. V., Simmons-Potter, K., Thomes, J. W. J., Meister, D. C., Bambha, R. P., Kliner, D. A. V. and Söderlund, M. J., 2007. Gamma Radiation Effects in Yb-Doped Optical Fiber. vol. 6453, pp. 6453281–8.
- Franzen, D. L., Young, M., Cherin, A. H., Head, E. D., Hackert, M. J., Raine, K. W. and Baines, J. G. N., 1989. Numerical aperture of multimode fibers by several methods: resolving differences. *Journal of Lightwave Technology*, 7(6): 896–901.
- Friebele, E. J., 1979. Optical fiber waveguides in radiation environments. *Optical Engineering*, 18(6): 552–561.
- Friebele, E. J., Askins, C. G., Gingerich, M. E. and Long, K. J., 1984. Optical fiber waveguides in radiation environments, II. *Nucl Instrum Meth B*, 1(2–3): 355–369.
- Friebele, E. J., Askins, C. G., Shaw, C. M., Gingerich, M. E., Harrington, C. C., Griscom, D. L., Tsai, T.-E., Paek, U.-C. and Schmidt, W. H., 1991. Correlation of single-mode fiber radiation response and fabrication parameters. *Appl. Opt.*, 30(15): 1944–1957.
- Friebele, E. J., Gingerich, M. E. and Griscom, D. L., 1993. Survivability of Optical Fibers in Space. vol. 1791, pp. 1791–1803.
- Friebele, E., Gingerich, M., Long, K., Levin, P. and Pinnow, D., 1983. Radiation-resistant low OH content silica core fibers. *Journal of Lightwave Technology*, 1(3): 462–465.
- Friebele, E. J., Taylor, E. W., Beauregard, G. T. d., Wall, J. A. and Barnes, C. E., 1988. Interlaboratory comparison of radiation-induced attenuation in optical fibers. I. Steady-state exposures. *Journal of Lightwave Technology*, 6(2): 165–171.
- Fu, X., Song, L. and Li, J., 2014. Radiation induced color centers in silica glasses of different OH content. *Nucl Instrum Meth B*, 330: 7–10.
- Gavrilov, V., Golutvin, A., Gershtein, Y., Danilov, M., Zamyatin, A., Izraelyan, V., Isaev, V., Kolosov, V., Kuleshov, S., Litvintsev, D. et al., 1997. Absorption spectra of pure quartz fiber lightguides irradiated with γ -quanta from a ^{60}Co source. *Instruments and Experimental Techniques*, 40(4): 457–466.
- Gavrilov, V., Kuleshov, S., Litvintsev, D., Rusinov, V., Stolin, V., UI'yanov, A., Chumarovskii, Y., Izraelyan, V., Morshnev, S., Zamyatin, A. et al., 1994. Study of quartz fiber radiation hardness. *CMS TN*, 94: 3241–17.

- Giacomazzi, L., Martin-Samos, L., Alessi, A., Valant, M., Gunturu, K. C., Boukenter, A., Ouerdane, Y., Girard, S. and Richard, N., 2018. Optical absorption spectra of P defects in vitreous silica. *Opt. Mater. Express*, 8(2): 385–400.
- Girard, S., Keurinck, J., Boukenter, A., Meunier, J. P., Ouerdane, Y., Azaïs, B., Charre, P. and Vié, M., 2004. Gamma-rays and pulsed X-ray radiation responses of nitrogen-, germanium-doped and pure silica core optical fibers. *Nucl Instrum Meth B*, 215(1–2): 187–195.
- Girard, S., Kuhnenn, J., Gusarov, A., Brichard, B., Van Uffelen, M., Ouerdane, Y., Boukenter, A. and Marcandella, C., 2013. Radiation effects on silica-based optical fibers: Recent advances and future challenges. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 60(3): 2015–2036.
- Girard, S., Ouerdane, Y., Marcandella, C., Boukenter, A., Quenard, S. and Authier, N., 2011. Feasibility of radiation dosimetry with phosphorus-doped optical fibers in the ultraviolet and visible domain. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 357(8): 1871–1874.
- Girard, S., Ouerdane, Y., Origlio, G., Marcandella, C., Boukenter, A., Richard, N., Baggio, J., Paillet, P., Cannas, M., Bisutti, J. et al., 2008. Radiation effects on silica-based preforms and optical Fibers – I: Experimental study with canonical samples. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 55(6): 3473–3482.
- Gowar, J., 1993. *Optical Communication Systems*. Prentice Hall International, United stated of America. 577 p.
- Griscom, D. L., 1984. Characterization of three E' -center variants in X- and γ -irradiated high purity α -SiO₂. *Nucl Instrum Meth B*, 1(2): 481–488.
- Griscom, D. L., 1985. Defect structure of glasses: Some outstanding questions in regard to vitreous silica. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 73(1–3): 51–77.
- Griscom, D. L., 1991. Optical properties and structure of defects in silica glass. *Journ. Ceram. Soc. of Japan*, 99(10): 923–942.
- Griscom, D. L., 2000. *The Natures of Point Defects in Amorphous Silicon Dioxide*, Springer Netherlands, Dordrecht. pp. 117–159.
- Griscom, D. L., 2001. Fractal kinetics of radiation-induced point-defect formation and decay in amorphous insulators: Application to color centers in silica-based optical fibers. *Phys. Rev. B*, 64(17): 174–201.

- Griscom, D. L., 2011. Trapped-electron centers in pure and doped glassy silica: A review and synthesis. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 357(8–9): 1945–1962.
- Griscom, D. L., Friebele, E. J., Long, K. J. and Fleming, J. W., 1983. Fundamental defect centers in glass: Electron spin resonance and optical absorption studies of irradiated phosphorus doped silica glass and optical fibers. *Journal of Applied Physics*, 54(7): 3743–3762.
- Griscom, D. L., Gingerich, M. E. and Friebele, E. J., 1993. Radiation-induced defects in glasses: Origin of power-law dependence of concentration on dose. *Phys. Rev. Lett.*, 71(7): 1019–1022.
- Griscom, D. L., Gingerich, M. E. and Friebele, E. J., 1994. Model for the dose, dose-rate and temperature dependence of radiation-induced loss in optical fibers. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 41(3): 523–527.
- Guo, Q., Lin, S., Huang, Y., Pang, F., Chen, Z., Shang, Y. and Wang, T., 2013. Cerium Doped Silica Scintillating Fiber Sensor for γ Radiation Measurement. vol. 9044, pp. 904417–904423.
- Guttilla, A., 2017. Radiation induced attenuation in Aluminum doped fibers for dosimetry applications. Ph.D. thesis, Università degli studi di Palermo.
- Halliburton, L., Koumvakalis, N., Markes, M. and Martin, J., 1981. Radiation effects in crystalline SiO₂: The role of aluminum. *Journal of Applied Physics*, 52(5): 3565–3574.
- Harorlı A., D. S., Akgül H.M., 2006. Radyasyon Fiziği, Erzurum. 3. Cilt.
- Hecht, J., 2004. City of Light: The Story of Fiber Optics. Oxford University Press, New York. 340 p.
- Hecht, E., 2010. Optik. Akademi Yayıncılık, Ankara. 963 p.
- Henschel, H., Kohn, O., Schmidt, H. U., Kirchof, J. and Unger, S., 1998. Radiation-induced loss of rare earth doped silica fibres. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 45(3): 1552–1557.
- Hibino, Y. and Hanafusa, H., 1983. ESR study on E'-centers induced by optical fiber drawing process. *Japanese Journal of Applied Physics*, 22(12A): L766–L768.
- Hibino, Y., Hanafusa, H. and Sakaguchi, S., 1985. Formation of drawing-induced E' centers in silica optical fibers. *Japanese Journal of Applied Physics*, 24(9R): 1117–1121.

- Hideo, H. and Hiroshi, K., 1994. Radiation-induced coloring and paramagnetic centers in synthetic $\text{SiO}_2 : \text{Al}$ glasses. *Nucl Instrum Meth B*, 91(1): 395–399.
- Hosono, H. and Weeks, R., 1990. Bleaching of peroxy radical in SiO_2 glass with 5 eV light. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 116(2): 289–292.
- Huston, A., Justus, B., Falkenstein, P., Miller, R., Ning, H. and Altemus, R., 2001. Remote optical fiber dosimetry. *Nucl Instrum Meth B*, 184(1–2): 55–67.
- Imai, H., Arai, K., Imagawa, H., Hosono, H. and Abe, Y., 1988. Two types of oxygen-deficient centers in synthetic silica glass. *Physical Review B*, 38(17): 12772–12775.
- Ishii, Y., Arai, K., Namikawa, H., Tanaka, M., Negishi, A. and Handa, T., 1987. preparation of cerium-activated silica glasses: Phosphorus and aluminum codoping effects on absorption and fluorescence properties. *Journal of the American Ceramic Society*, 70(2): 72–77.
- Jang, K. W., Cho, D. H., Yoo, W. J., Seo, J. K., Heo, J. Y., Park, J. Y. and Lee, B., 2011. Fiber-optic radiation sensor for detection of tritium. *Nucl Instrum Meth A*, 652(1): 928–931.
- John, S. M., 2009. *Optical Fiber Communications: Principles and Practice*. Pearson Education. 1128 p.
- Kao, K. C. and Hockham, G. A., 1986. Dielectric-fibre surface waveguides for optical frequencies. *IEE Proceedings J - Optoelectronics*, 133(3): 191–198.
- Kapron, F. P., Keck, D. B. and Maurer, R. D., 1970. Radiation losses in glass optical waveguides. *Applied Physics Letters*, 17(10): 423–425.
- Karaçam, S., Demir, B., Günhan, B., Koca, A. and Öber, A., 2003. Eksternal radyoterapi cihazlarına ait dozimetrik parametrelerin ölçüm ve fabrika değerlerinin karşılaştırması. *Cerrahpaşa Tıp Dergisi*, 34: 28–35.
- Kaya, N., Manabu, T. and Kichinosuke, Y., 1984. Gamma-ray-induced absorption bands in pure-silica-core fibers. *Japanese Journal of Applied Physics*, 23(12R): 1608–1613.
- Keiser, G., 1991. *Optical Fiber Communications*. Mcgraw- Hill International, Singapore. 580 p.
- Kendir, E., 2012. Optik lif manyetik alan algılayıcısı tasarımı ve manyetik alan ölçümü. Yüksek lisans tezi, Akdeniz Üniversitesi, Antalya. 95 s.
- Khan, F. M., 2010. *Physics of Radiation Therapy, The 4th Edition*. Lippincott Williams & Wilkins, Baltimore, 588 pp.

- Kim, Y., Ju, S., Jeong, S., Lee, S. H. and Han, W., 2016. Gamma-ray radiation response at 1550 nm of fluorine-doped radiation hard single-mode optical fiber. *Opt. Express*, 24(4): 3910–3920.
- Kiryanov, A. V., Ghosh, S., Paul, M. C., Barmenkov, Y. O., Aboites, V. and Kozlova, N. S., 2014. Ce-doped and Ce/Au-codoped alumino-phospho-silicate fibers: Spectral attenuation trends at high-energy electron irradiation and posterior low-power optical bleaching. *Optical Materials Express*, 4(3): 434–448.
- Kittel, C., 2004. Introduction to Solid State Physics. Wiley. 704 p.
- Knoll, G. F., 2010. Radiation detection and measurement; 4th ed. Wiley, New York, NY. 816 p.
- Koao, L., Swart, H., Obed, R. and Dejene, F., 2011. Synthesis and characterization of Ce³⁺ doped silica (SiO₂) nanoparticles. *Journal of Luminescence*, 131(6): 1249–1254.
- Kohlrausch, R., 1847. Theorie des elektrischen rückstandes in der leidener elasche. *Annalen der Physik*, 167(2): 179–214.
- Krane, K. and Şarer, B., 2001. Nükleer fizik. Palme yayınları. 405 p.
- Kreidl, N. and Hensler, J., 1955. Formation of color centers in glasses exposed to gamma radiation. *Journal of the American Ceramic Society*, 38(12): 423–432.
- Lagomacini, J., Bravo, D., Martín, A., Lopez, F., Martin, P. and Ibarra, A., 2014. Growth kinetics of AlOH₂ defects in γ -irradiated silica glasses. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 403: 5–8.
- Leo, W. R., 1987. Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments: A How to Approach. 378 p.
- Leon, M., Lancry, M., Ollier, N., Babu, B., Bigot, L., El Hamzaoui, H., Savelii, I., Pastouret, A., Burov, E., Trompier, F. et al., 2016. Ge- and Al-related point defects generated by gamma irradiation in nanostructured erbium-doped optical fiber preforms. 51(22): 10245–10261.
- Lilley, J., 2018. Nükleer Fizik - İlkeler ve Uygulamalar. Nobel Akademik Yayıncılık. 416 p.
- Liu, D. and Johnston, A., 1994. Theory of radiation-induced absorption in optical fibers. *Opt. Lett.*, 19(8): 548–550.

- Lu, P., Bao, X., Kulkarni, N. and Brown, K., 1999. Gamma ray radiation induced visible light absorption in P-doped silica fibers at low dose levels. *Radiation Measurements*, 30(6): 725–733.
- Mapelli, A., 2011. Scintillation Particle Detectors Based on Plastic Optical Fibres and Microfluidics. Ph.D. thesis, Ecole Polytechnique, Lausanne.
- Martin, J., 2013. Physics for Radiation Protection. Wiley. 822 p.
- Mashkov, V., Austin, W., Zhang, L. and Leisure, R., 1996. Fundamental role of creation and activation in radiation-induced defect production in high-purity amorphous SiO₂. *Physical Review Letters*, 76: 2926–2929.
- Mies, E. and Soto, L., 1985. Characterization of the Radiation Sensitivity of Single-Mode Optical Fibers.
- Mims, F. M., 1980. Alexander Graham Bell and the photophone: The centennial of the invention of light-wave communications, 1880-1980. *Optics News*, 6(1): 8–16.
- Morana, A., 2013. Gamma-rays and neutrons effects on optical fibers and Bragg gratings for temperature sensors. Ph.D thesis, Universite Jean Monnet De Saint-etienne (France) ve Universita Degli Studi Di Palermo (Italia).
- Nassau, K., 1983. The Physics and Chemistry of Color. John Wiley & Sons, Inc., Canada. 481 p.
- Nunes, E. H. M. and Lameiras, F. S., 2005. The optical absorption of gamma irradiated and heat-treated natural quartz. *Materials Research*, 8(3): 305–308.
- O'Reilly, E. P. and Robertson, J., 1983. Theory of defects in vitreous silicon dioxide. *Physical Review B*, 27(6): 3780–3795.
- Origlio, G., 2009. Properties and radiation response of optical fibers: Role of dopants. Ph.D thesis, Jean Monnet Of Saint-Etienne and Degli Studi Of Palermo.
- Öztürk, G., 2008. Bazı yeni floresant İndikatörlerin sentezi ve spektroskopik uygulamaları. Doktora tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi.
- Park, J. W. and Kim, G. H., 2004. Detection of gamma rays using plastic scintillating fibers. *Journal of Nuclear Science and Technology*, 41(sup4): 373–376.
- Paul, M., Sen, R., Bhadra, S. and Dasgupta, K., 2009. Radiation response behaviour of Al codoped germano-silicate SM fiber at high radiation dose. *Optics Communications*, 282(5): 872–878.

- Paul, M., Sen, R., Bhadra, S., Pal, M., Giri, P., Dasgupta, K., Bandyopadhyay, T., Bohra, D. and Bhatnagar, P., 2007. Gamma ray radiation induced absorption in Ti doped single mode optical fibres at low dose levels. *Optical Materials*, 29(6): 738–745.
- Raukas, M., Basun, S. A., Schaik, W. v., Yen, W. M. and Happek, U., 1996. Luminescence efficiency of cerium doped insulators: The role of electron transfer processes. *Applied Physics Letters*, 69(22): 3300–3302.
- Reisfeld, R., Minti, H., Patra, A., Ganguli, D. and Gaft, M., 1998. Spectroscopic properties of cerium in glasses and their comparison with crystals. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 54(13): 2143–2150.
- Renata, R., Amitava, P., Gerard, P. and Michael, G., 1999. Spectroscopic properties of cerium in sol-gel glasses. *Optical Materials*, 13(1): 81–88.
- Rendell, D., Mowthorpe, D. and (Project), A., 1987. Fluorescence and phosphorescence spectroscopy. Analytical Chemistry by Open Learning. Published on behalf of ACOL, London by Wiley. 419 p.
- Saman, Q. M. and Nahlah, Q. M., 2012. Theoretical and experimental study of a numerical aperture for multimode PCS fiber optics using an imaging technique. *Chinese Physics Letters*, 29(11): 1142171–4.
- Selleri, S., 2017. Claude Chappe and the first telecommunication network (without electricity). *URSI Radio Science Bulletin*, 2017(360): 96–101.
- Shao, C., Ren, J., Wang, F., Ollier, N., Xie, F., Zhang, X., Zhang, L., Yu, C. and Hu, L., 2018. Origin of radiation-induced darkening in Yb³⁺/Al³⁺/P⁵⁺-doped silica glasses: Effect of the P/Al ratio. *The Journal of Physical Chemistry B*, 122(10): 2809–2820.
- Shinde, K., Dhoble, S., Swart, H. and Park, K., 2012. Phosphate Phosphors for Solid-State Lighting. Springer Series in Materials Science. Springer Berlin Heidelberg. 270 p.
- Sigel, G., Friebele, E., Gingerich, M. and Hayden, L., 1979. Radiation response of large core polymer clad silica optical fibers. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 26(6): 4796–4801.
- Simon, A., 1992. Scintillating fiber detectors in particle physics. *CERN-PPE-92-095*, 92: 0951–18.
- Singleton, J. B., 2014. Radiation effects on Ytterbium-doped optical fibers. Ph.D thesis, Air University.

- Skuja, L., 1998. Optically active oxygen-deficiency-related centers in amorphous silicon dioxide. *J. Non-Cryst. Solids*, 239: 16–48.
- Skuja, L., 2000. Optical Properties of Defects in Silica, Springer Netherlands, Dordrecht. pp. 73–116.
- Skuja, L., Hosono, H. and Hirano, M., 2001. Laser-induced color centers in silica. *Proc. of SPIE*, 4347: 155–168.
- Snyder, A. and Love, J., 1983. Optical Waveguide Theory. Science paperbacks. Springer US. 734 p.
- Stapelbroek, M., Griscom, D., Friebele, E. and Sigel, G., 1979. Oxygen-associated trapped-hole centers in high-purity fused silicas. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 32(1): 313–326. Electronic Properties and Structure of Amorphous Solids.
- Stroud, J. S., 1962. Color centers in a cerium-containing silicate glass. *The Journal of Chemical Physics*, 37(4): 836–841.
- Stroud, J. S., 1965. Color-center kinetics in cerium-containing glass. *The Journal of Chemical Physics*, 43(7): 2442–2450.
- Sun, X., Wen, J., Guo, Q., Pang, F., Chen, Z., Luo, Y., Peng, G. and Wang, T., 2017. Fluorescence properties and energy level structure of Ce-doped silica fiber materials. *Opt. Mater. Express*, 7(3): 751–759.
- Swinehart, D., 1962. The Beer-Lambert Law. *Journal of Chemical Education*, 39(7): 333–335.
- Tao, S. and Jayaprakash, A., 2009. Nanostructured scintillating optical fiber prepared via sol-gel technique for detecting gamma radiation. *Optics Letters*, 34(20): 3244–3246.
- Toccafondo, I., 2015. Distributed optical fiber radiation and temperature sensing at high energy accelerators and experiments. Ph.D thesis.
- Tyndall, J., 1870. Notes of a Course of Nine Lectures on Light. London: Longmans, Green and Co.
- Tyndall, J., 1886. Six Lectures on Light. New York: D. Appleton and Company.
- Vaccaro, L., 2009. Electronic and vibrational properties of the non bridging oxygen hole center in the bulk and at the surface of silica. Ph.D thesis, Ministero dell'Università e della Ricerca.

- Vedda, A., Chiodini, N., Di Martino, D., Fasoli, M., Keffer, S., Lauria, A., Martini, M., Moretti, F., Spinolo, G., Nikl, M. et al., 2004. Ce⁺³-doped fibers for remote radiation dosimetry. *Applied Physics Letters*, 85(26): 6356–6358.
- Wall, J., Bryant, J. and (U.S.), A. F. C. R. L., 1975. Radiation Effects on Fiber Optics. AFCRL-TR. Air Force Cambridge Research Laboratories, Air Force Systems Command, United States Air Force. 213 p.
- Weeks, R., 1956. Paramagnetic resonance of lattice defects in irradiated quartz. *Journal of Applied Physics*, 27(11): 1376–1381.
- Weeks, R. and Bray, P., 1968. Electron spin resonance spectra of gamma-ray-irradiated phosphate glasses and compounds: Oxygen vacancies. *The Journal of Chemical Physics*, 48(1): 5–13.
- White, T., 1988. Scintillating fibres. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 273(2): 820–825.
- Wilson, J. and Hawkes, J., 2000. Optoelektronik. Değişim Yayınları, Adapazarı. 554 p.
- Xing, R.-X., Sheng, Y.-B., Liu, Z.-J., Li, H.-G., Jiang, Z.-W., Peng, J.-G., Yang, L.-Y., Li, J.-Y. and Dai, N.-L., 2012. Investigation on radiation resistance of Er/Ce co-doped silicate glasses under 5 kGy gamma-ray irradiation. *Optical Materials Express*, 2(10): 1329–1335.
- Xinjie, F., Lixin, S. and Jiacheng, L., 2014. Radiation induced color centers in cerium-doped and cerium-free multicomponent silicate glasses. *Journal of Rare Earths*, 32(11): 1037–1042.
- Youngwoong, K., Seongmin, J., Seongmook, J., Jong-Yeol, K., Nam-Ho, L., Hyun-Kyu, J. and Won-Taek, H., 2013. Radiation-Induced Optical Attenuation of Co/FeCo-Doped Alumino-Silicate Optical Fiber for Radiation Dosimeter Application. vol. 8794, pp. 87941A1–4.
- Youngwoong, K., Seongmin, J., Seongmook, J., Jong-Yeol, K., Nam-Ho, L., Hyun-Kyu, J. and Won-Taek, H., 2014. Gamma-ray irradiation-induced optical attenuation in Co/FeCo-doped alumino-silicate optical fiber for dosimeter application. *J. Lightwave Technol.*, 32(22): 3791–3797.

ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad: Esra KENDİR
E-mail: fiz.esrakendir@gmail.com



ÖĞRENİM BİLGİLERİ

Doktora Öğrencisi 2013-	Akdeniz Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Bölümü, Antalya
Yüksek Lisans 2009-2012 Tez ismi	Akdeniz Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Bölümü, Antalya "Optik Lif Manyetik Alan Algılayıcısı Tasarımı ve Manyetik Alan Ölçümü"
Lisans 2004-2008	Selçuk Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi, Fizik Bölümü, Konya

İŞ DENEYİMLERİ

2012-2013	Menar Mental Eğitim Merkezi, Öğretmenlik
2018 (9 ay)	Texas Tech Üniversitesi (Tübitak 2214-A), Research Scholar

ESERLER

Uluslararası hakemli dergilerde yayımlanan makaleler

1. Akchurin, N., **Kendir, E.**, Yaltkaya, Ş., Damgov, J., De Guio, F., Kunori, S., 2019. *Radiation-hardness Studies with Cerium-doped Fused-silica Fibers*. Journal of Instrumentation (JINST). (Publishing).
2. Akchurin, N., Damgov, J., De Guio, F., Dissertori, G., **Kendir, E.**, Kunori, S., Mengke, T., Nessi-Tedaldi, F., Pigazzini, S., Yaltkaya, Ş., 2019. *Cerium-doped Fused-silica Fibers as Wavelength Shifters*, Journal of Instrumentation (JINST). (Publishing).

Ulusal hakemli dergilerde yayımlanan makaleler

1. Yaltkaya, Ş., **Kendir, E.**, 2012 *A different point of view: a continuous tracing of acid-base titration with fiber-optic sensor*, Turkish Journal of Physics, Vol:37, 208-211.

Uluslararası ve Ulusal konferanslardaki bildiri ve poster çalışmaları

1. **Kendir, E.**, Akchurin, N., Damgov, J., De Guio, F., Kunori, S., Yaltkaya, Ş., 2018. *Radiation-hardness Studies with Cerium-doped Fused-silica Fibers*. Texas Section of the American Physical Society (TSAPS). Houston-USA.
2. **Kendir, E.**, Akchurin, N., Damgov, J., De Guio, F., Kunori, S., Yaltkaya, Ş., 2018. *Radiation-hardness Studies with Cerium-doped Fused-silica Fibers*. Texas Tech University Departmental Poster Competition. Lubbock-USA. (3rd prize and certificate was won.)
3. **Kendir, E.**, Yaltkaya, Ş., and Akçurin, N., 2017. *Gamma Radiation Effects In Quartz Optical Fibers*. Turkish Physical Society 33rd International Physics Congress. Muğla. Türkiye.
4. N. Akchurin, C. Cowden, J. Damgov, C. Dragoiu, P. Pudero, J. Faulkner, S. Kunori, S. W Lee, Z. Wang, Z. Xu, **E. Kendir**, and Ş. Yaltkaya, 2017. *Cerium-doped Fused-Silica Fibers*. The Technology and Instrumentation in Particle Physics Conference. Beijing. China.
5. **Kendir, E.**, Yaltkaya, Ş., and Akçurin, N., 2017. *The Change Of Numerical Aperture In Optical Fiber: The Role Of Liquid Claddings Having Different Refractive Index*. Adım Fizik Günleri 6. Burhaniye. Balıkesir. Türkiye.
6. **Kendir, E.**, Yaltkaya, Ş., 2015. *Gamma Işını Altında Bazı Entegre Devrelerin Elektriksel Parametrelerinin İncelenmesi*. Lumidoz 9: The 9th International Conference On Luminescence And ESR Dosimetry. Antalya. Türkiye.
7. **Kendir, E.**, Yaltkaya, Ş., 2015. *Magnetic Field Measurement With Extrinsic Fabry-Perot Interferometer By Double-Beam Tecniuque*. Balkan Physics Conference. İstanbul. Türkiye.
8. **Kendir, E.**, Yaltkaya, Ş., 2015. *Analysis Of A Op-Amp 741 And A Timer 555 Ic Under Influence Of Gamma*. Ray. Balkan Physics Conference. İstanbul. Türkiye.
9. **Kendir, E.**, Yaltkaya, Ş., 2013. *Displacement Deasurement with an Optical Fiber Fabry-Perot Dual-Beam Interferometer*. Turkish Physical Society 30rd International Physics Congress. İstanbul. Türkiye.

10. **Kendir, E.**, Yaltkaya, Ş., 2011. *An Optical Fiber Twist Sensor*. Turkish Physical Society 28rd International Physics Congress. Muğla. Türkiye.
11. **Kendir, E.**, Yaltkaya, Ş., 2010 *Simultaneous Measurement of Conductivity & Refractive Index Distribution of Acid base Titration*. Turkish Physical Society 27rd International Physics Congress. İstanbul. Türkiye.
12. Yaltkaya, Ş., **Kendir, E.** and Bayır, S., 2009. *Measurement of Refractive Index Variation of Temperature and Wavelength with Fiber Optic Sensor*. 17rd International Conference on Advanced Laser Technologies. Antalya. Türkiye.

