

**ANKARA ÜNİVERSİTESİ
NÜKLEER BİLİMLER ENSTİTÜSÜ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**OPTİK VE ENDÜSTRİYEL MALZEMELERİN RADYASYON HASARI VE
İYİLEŞTİRME MEKANİZMALARI**

Kutlu Kağan ŞAHBAZ

**NÜKLEER ARAŞTIRMALAR VE TEKNOLOJİLERİ
ANABİLİM DALI**

**ANKARA
2022**

Her hakkı saklıdır

ETİK

Bu tezdeki tüm bilgilerin akademik kurallara ve etik davranış ilkelerine uygun olarak elde edildiğini ve sunulduğunu beyan ederim. Ayrıca, bu kurallar ve davranışların gerektirdiği şekilde, başka kaynaklardan aldığım tüm materyalleri ve sonuçları alıntı yaparak, bunlara kaynak gösterdiğimi beyan ederim.

01.07.2022

Kutlu Kağan ŞAHBAZ

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

OPTİK VE ENDÜSTRİYEL MALZEMELERİN RADYASYON HASARI VE İYİLEŞTİRME MEKANİZMALARI

Kutlu Kağan ŞAHBAZ

Ankara Üniversitesi
Nükleer Bilimler Enstitüsü
Nükleer Araştırmalar ve Teknolojileri Anabilim Dalı
Hızlandırıcı ve Dedektör Teknolojileri Yüksek Lisans Program

Danışman: Prof. Dr. Ömer YAVAŞ
İkinci danışman: Doç. Dr. Burak BİLKİ

Optik malzemelerdeki radyasyon hasarı, çoğunlukla optik geçirgenlik kaybı olarak kendini gösterir. Optik malzemeler, radyasyona maruz bırakıldıktan sonra örnek bir dereceye kadar radyasyon hasarının etkilerinden kurtulur. Örnek ışık ile uyarıldığı zaman iyileşme daha hızlıdır. Öte yandan, dalga boyu, ışık parlaklığı ve maruz kalma süresi gibi uyarıcı ışık parametrelerinin bir fonksiyonu olarak iyileşme dinamiklerinin sistematik olarak incelendiği deneyler ayrıntılı olarak yapılmamıştır. Özel geometrilerde çeşitli dalga boylarında darbeli ve sürekli ışık sağlayan bir LED kurtarma istasyonu kuruldu. Sodalı cam örneklerini 87,5 Gy/dk doz hızında toplam 3,5 kGy ve 7 kGy doz ile ışınlandı. Daha sonra örneklerin optik geçirgenliği 200 nm – 1500 nm aralığında uzun bir süre boyunca ölçülmüştür. Radyasyon hasarının iyileştirilmesi, uyarıcı ışığın dalga boyu azaldıkça hem zamanlama hem de miktar açısından iyileşir. Uyarılma için 395 nm dalga boyuna sahip UV LED kullanıldığında hem iyileşme oranında hem de kalıcı hasar oranında yaklaşık %50 iyileşme ölçülmüştür. Hasar eğrileri, UV aralığında küçük dalga-boylarının radyasyon hasarında yaşanacak iyileşmenin, daha hızlı ve daha etkili sonuçlanacağı yönündedir. Radyasyon hasarını LED uyarımlı iyileştirme tekniği, yüksek radyoaktivite bulunan ortamlarda çalışan radyasyon ve parçacık dedektörlerinin optik aktif ortamı için uygun bir uygulamadır. Bu tez çalışması TÜBİTAK Lider Araştırmacılar Programı 118C224 No'lu Development of Novel Radiation Detector Technologies and Data Analysis Algorithms projesi kapsamında yazılmıştır.

Haziran 2022, 83 sayfa

Anahtar Kelimeler: Radyasyon hasarı, Optik geçirgenlik kaybı, LED ile uyarılma, Radyasyon hasarının iyileştirilmesi

ABSTRACT

Master's Thesis

RADIATION DAMAGE AND RECOVERY MECHANISMS IN OPTICAL AND INDUSTRIAL MATERIALS

Kutlu Kağan ŞAHBAZ

Ankara University
Institute of Nuclear Sciences
Nuclear Research And Technologies Department
Accelerator and Detector Technologies Master's Degree Program

Supervisor: Prof. Dr. Ömer YAVAŞ
Co-supervisor: Assoc. Prof. Dr. Burak BİLKİ

The radiation damage in optical materials mostly manifests itself as the loss of optical transmission. The optical materials recover from radiation damage to some extent when the radiation exposure is stopped. The recovery is at a faster rate in the presence of stimulating light. On the other hand, the systematic study of the dynamics of the recovery as a function of the stimulating light parameters such as its wavelength, intensity and exposure duration and method has not been performed in detail. An LED recovery station was established which provides pulsed and continuous light at various wavelengths at custom geometries. Soda lime glass samples were irradiated at a rate of 87.5 Gy/min to a total dose of 3.5 kGy and 7 kGy. The optical transmittance of the samples were measured in 200 nm – 1500 nm range for an extended period of time. The recovery from radiation damage is improved, both in terms of timing and quantity, as the wavelength of the stimulating light decreases. Around 50 % improvement was measured both in recovery rate and the permanent damage when UV LED with a wavelength of 395 nm was used for stimulation. The trend is such that wavelengths deeper in the UV range would result in faster and more effective recovery from radiation damage. The LED stimulated recovery technique from radiation damage is a feasible implementation for the optical active media of radiation and particle detectors which operate in high radiation environments. This thesis was written within the scope of the TÜBİTAK Lead Researchers Program Development of Novel Radiation Detector Technologies and Data Analysis Algorithms project No. 118C224.

June 2022, 83 pages

Key Words: Radiation damage, Optical transmission loss, LED stimulation, Recovery from radiation damage

TEŐEKKÖR

Bu çalışmada her konuda bana yardım eden danıőmanım Prof. Dr. Ömer YAVAŞ'a, proje hocam ve ikinci danıőmanım Doç. Dr. Burak BİLKI'ye tez süresince desteklerini benden hiçbir Şekilde esirgemeyen Dilara POLAT, ağlar KAYA ve Melike KAYA'ya ve ayrıca tüm çalışma arkadaşlarıma, en önemlisi de hayallerimi gerçekleőtirme yolunda hem manevi hem de maddi destek olan annem Emine COŐKUN ve babam İsmail Cem ŞAHBAZ'a emekleri ve sabırları için sonsuz teőekkürler. Bu tez alıőması TÜBİTAK Lider Araştırmacılar Programı 118C224 No'lu Development of Novel Radiation Detector Technologies and Data Analysis Algorithms projesi kapsamında yazılmıştır.

Kutlu Kağan ŞAHBAZ

2022

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER	iv
SİMGELER DİZİNİ VE KISALTMALAR.....	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xiv
1. GİRİŞ	1
2. KURAMSAL TEMELLER.....	4
2.1 Radyasyon Nedir	4
2.1.1 İyonlaştırıcı olmayan radyasyon.....	5
2.1.1.1 Mikrodalga.....	5
2.1.1.2 Kızılötesi.....	5
2.1.1.3 Görünür ışık	6
2.1.2 İyonlaştırıcı radyasyon	7
2.1.2.1 Morötesi radyasyon.....	7
2.1.2.2 Alfa radyasyonu.....	8
2.1.2.3 Beta radyasyonu	9
2.1.2.4 Gama ve x-ışını radyasyonu	10
2.1.2.5 Kozmik radyasyon	13
2.1.2.6 Nötron radyasyonu.....	14
2.2 Radyasyon Madde Etkileşimleri.....	16
2.3 Radyasyon Hasarı	17
2.3.1 Radyasyon hasarının kimyasal sonuçları	17
2.3.2 Radyasyon hasarının nükleer sonuçları.....	18
2.2.3 Radyasyon hasarının termal sonuçları	19
2.4 Radyasyon Hasarının İyileşmesi.....	20
2.5 İyileşme Sürecini Etkileyen Etmenler	23
3. MATERYAL VE YÖNTEM	26
3.1 Deney Düzenegi ve Tasarımı	27
3.2 Parçaların Üretimi	30
3.3 LED Parlaklıklarının Kalibre Edilmesi	34
3.4 Sinyal Jeneratörünün Tasarımı ve Üretimi	35

3.5 Radyasyon Hasarı Görmüş Örneklerin Hazırlanması	37
3.6 Yöntem	40
4. ARAŞTIRMA BULGULARI	41
4.1 LED Parlaklığı Kalibrasyonu	41
4.2 LED İstasyonu Sıcaklığa Bağlı Performans Deneyi.....	49
4.3 Veri İşlenme Metodları	54
4.4 Analiz Yöntemleri ve Sonuçları	61
4.5 Tartışma	67
4.6 Sistematik Hatalar	70
5. SONUÇ.....	72
5.1 Öneri.....	76
KAYNAKLAR.....	77
EKLER.....	83
EK-1 Kullanılan kodlar ve veriler	83
EK-2 Tez Konusu ile İlgili Yapılan Yayınlar	83

SİMGELER DİZİNİ VE KISALTMALAR

A	“Amper” Elektrik akımını ifade eden SI birimi
AKB	“Atomik Kütle Birimi” Karbon-12 İzotopunun 12’de 1 Ağırlığı
Al	“Alüminyum” Çekirdeğinde 13 Proton Bulunan Element
Am	“Amerisyum” Çekirdeğinde 95 Proton Bulunan Element
As	“Arsenik” Çekirdeğinde 33 Proton Bulunan Element
Au	“Altın” Çekirdeğinde 82 Proton Bulunan Element
Be	“Berilyum” Çekirdeğinde 4 Proton Bulunan Element
C	“Karbon” Çekirdeğinde 6 Proton Bulunan Element
CAT6	Uzun Mesafeli Dijital Veri İletiminde Kullanılan Bileşik Kablo
Co	“Kobalt” Çekirdeğinde 27 Proton Bulunan Element
Cu	“Bakır” Çekirdeğinde 29 Proton Bulunan Element
d	“Aşağı-quark” $-\frac{1}{3}$ Elektrik Yüküne Sahip Kuark
e	“Elektron” Nötr Atom Orbitalerinde Toplam Proton Sayısına Eşit Sayıda Bulunan -1 Elektrik Yüküne Sahip Kararlı Lepton
ES	“Elastomer Sintilatör” Esnek Polimer Yapısına Sahip Sintilatör
eV	“Elektron Volt” 1 Volt Potansiyel Alanda Hızlandırılan Elektronun Kinetik Enerjisi
FR4	Epoksi, Fiberglas ve Bakırdan Oluşan ve Devre Kartı Yapımında Kullanılan Kompozit Malzeme
Ga	“Galyum” Çekirdeğinde 31 Proton Bulunan Element
Gy	“Gray” Soğurulan Doz Birimi
H	“Hidrojen” Çekirdeğinde Tek Proton Bulunan Element
He	“Helyum” Çekirdeğinde 2 Proton Bulunan Element
Hz	“Hertz” Bir Saniye İçerisinde Tekrarlanan Periyodik Hareket veya Salınım
ICRP	Uluslararası Radyolojik Korunma Komisyonu
IR	“Infrared” Kızılötesi Elektromanyetik Dalga Kısaltması
LED	“Light Emitting Diode” Üzerinden Akım Geçerken Işık Yayan Diyot
LINAC	Doğrusal Parçacık Hızlandırıcı Anlamına Gelen Kısaltma
MFET	“MOSFET” Üzerinden Geçen Akımı Giriş Sinyali ile Ayarlayabilen Elektronik Eleman
n	“Nötron” 2 Aşağı ve 1 Yukarı Kuarktan Oluşan Nötr Nükleon
Ni	“Nikel” Çekirdeğinde 28 Proton Bulunan Element

P	“Fosfor” Çekirdeğinde 15 Proton Bulunan Element
p	“Proton” 2 Yukarı ve 1 Aşağı Kuarktan Oluşan +1 Elektrik Yüküne Sahip Nükleon
PCB	Basılmış Devre Kartı
PEN	“Polietilen Naftalin” Sintilatör Yapımında Kullanılan Polimer Malzeme
PET	“Polietilen Tereftalat” Sintilatör Yapımında Kullanılan Polimer Malzeme
PLA	“Polilaktik Asit” 3B Yazıcılarda Kullanılan Malzeme
Pu	“Plütonyum” Çekirdeğinde 94 Proton Bulunan Element
RGB	Kırmızı Yeşil ve Mavi Renkleri İfade Eden Kısaltma
SEL	Serbest Elektron Lazerini İfade Eden Kısaltma
SMD	Yüzeyle Lehimlenerek Yerleştirilen Elektronik Eleman
SOIC	Küçük Anahatlı Entegre Devre
TARLA	Türk hızlandırıcı ve ışınım laboratuvarı
TGK	Toplam Geçirgenlik Kaybı veya Hasar
Th	“Toryum” Çekirdeğinde 90 Proton Bulunan Element
u	“Yukarı-kuark” $+\frac{2}{3}$ Elektrik Yüküne Sahip Kuark
U	“Uranyum” Çekirdeğinde 92 Proton Bulunan Element
UV	“Ultraviolet” Morötesi Elektromanyetik Dalga Kısaltması
V	“Volt” Elektrik potansiyeli ifade eden SI birimi
VIS	“Visible Light” İnsan Gözünün Algılayabildiği Elektromanyetik Dalga Aralığı Kısaltması
W	“Tungsten” Çekirdeğinde 74 Proton Bulunan Element
α	“Alfa Parçacığı” 2 Proton ve 2 Nötrondan Oluşan Hadron
β	“Beta Parçacığı” Yüksek Enerjili Elektron
γ	“Gama Işını” Dalga-boyu 10^{11} Metre’den Küçük Elektromanyetik Radyasyon veya Fotonun Simgesi
λ	“Dalga-boyu” Periyodik Sahnım Yapan Bir Dalganın Kendini Tekrarlama Uzunluğu
μ	“Müon” Elektrondan Yaklaşık 207 Kat Ağır Negatif Yüklü Lepton
ν_e	“Elektron Nötrinosu” Lepton Sınıfına Dahil Yüksüz Parçacık
π	“Pion” 1 Kuark ve 1 Anti-kuarktan Oluşan Bozonik Hadron
Ω	“Ohm” İletkenlerin elektrik akımına uyguladığı direnci ifade eden SI birim

ŞEKİLLER DİZİNİ

- Şekil 2.1 Atomun çekirdeğinden fırlatılan α parçacığını gösteren diyagram, protonlar mavi ve nötronlar kırmızı ile gösterilmiştir (Wikipedia Diagram of Alpha Decay 2022) 9
- Şekil 2.2 Atomun çekirdeğinden fırlatılan (anti-nötrino gösterilmemiş) veya nötronun bozunması ile ortaya çıkan β^- parçacığını gösteren diyagram, protonlar mavi, nötronlar kırmızı, elektron siyah ve anti-nötrino beyaz ile gösterilmiştir (Wikipedia Diagram of Beta Decay 2022) 10
- Şekil 2.3 Dışarıdan gönderilen enerji yüklü radyasyon sonucu karakteristik x-ışını oluşumunu gösteren diyagram, elektron yeşil, çekirdek kırmızı küreler ve elektromanyetik radyasyon siyah kıvrımlı ok ile gösterilmiştir (solda), x-ışını parlaklığı ile sahip olduğu enerjisi ilişkilendirilen grafik (sağda) (K harfi koparılan elektronun K kabuğundan olduğunu, α harfi boşluğu dolduran elektronun bir üst kabuktan yani L kabuğundan geldiğini ve β harfi boşluğu dolduran elektronun iki üst kabuktan yani M kabuğundan geldiğini ifade eder) (Uo, M. vd. 2015)..... 11
- Şekil 2.4 Yüksek enerjili elektronun, pozitif yüklü çekirdeğin elektrik alanından etkilenip ivmeli hareket gerçekleştirmesi ile üretilen bremsstrahlung, çekirdek kırmızı küre, elektron mavi küre, elektronun izlediği patika siyah çizgili çizgi ve radyasyon yeşil kıvrımlı ok ile gösterilmiştir (Wikipedia Diagram of Bremsstrahlung Production 2022) 12
- Şekil 2.5 ^{60}Co izotopunun kararlı hale gelmek için, % 99,88 olasılık ile, 0,31 MeV veya, % 0,12 olasılık ile, 1,48 MeV kinetik enerji yüklü β^- parçacığı atarak atom numarasını bir arttırır. Her iki durumda da tam olarak kararlı duruma geçemeyen uyarılmış $^{60}\text{Ni}^*$, %99.88 olasılıkla 1,1732 MeV ve % 100 olasılık ile 1,3325 MeV enerji sahibi gama fotonu üretir. (Wikipedia Decay Scheme of Cobalt-60 2022)..... 13
- Şekil 2.6 Atmosfer dışından gelen birincil kozmik parçacık atmosferin üst katmanlarında bulunan atomlar ile yaptığı çarpışma ve çarpışma sonucu oluşan ikincil parçacık yağmuru (Wikipedia Diagram of Cosmic Particle Interactions 2022)..... 14
- Şekil 2.7 Nötronun β bozunması gösteren feynman diyagramı, u ; $+\frac{2}{3}$ yüklü yukarı kuark, d $-\frac{1}{3}$ yüklü aşağı kuark, W^- ; -1 yüklü W bozonu (Wikipedia Feynman Diagram for Beta Decay of The Neutron. 2022)..... 15
- Şekil 2.8 Işınlanma sonrası polimerler arası oluşan çapraz bağ mekanizması (Mohammed ve Walker 1986)..... 18
- Şekil 2.9 Yüksek enerjili bremsstrahlung fotonları ile tetiklenen ^{235}U fisyonu (Norman, vd. 2005) 19
- Şekil 2.10 Tek bir altın atomuna aktarılan 10 keV kinetik enerji ile ortaya çıkan çığ efekti simülasyonu sonucu belirli zaman aralıkları içerisinde verilmiş, atomların kinetik enerjileri renkleri ile gösterilmiş ve renk skalası sağ üstte bulunan lejantta gösterilmiştir (Nordlund, vd. 2018)..... 20

Şekil 2.11	1 Mrad (solda) ve 10 Mrad (sağda) doza maruz bırakılmış PEN örneklerin zamana bağlı hasar (parlaklık kaybı yüzdesi) grafikleri ve veriye uygulanan fit (Wetzel, vd. 2016).....	22
Şekil 2.12	1 Mrad (solda) ve 10 Mrad (sağda) doza maruz bırakılmış PET örneklerin zamana bağlı hasar (parlaklık kaybı yüzdesi) grafikleri ve veriye uygulanan fit (Wetzel, vd. 2016).....	23
Şekil 2.13	ES karanlık kutu (mavi) ve RGB LED (kırmızı) örneklerinin ışınlanma sonrası aldığı hasarın zamana bağlı grafiği (Wetzel, vd. 2017)	24
Şekil 2.14	EJN karanlık kutu (mavi) ve RGB LED (kırmızı) örneklerinin ışınlanma sonrası aldığı hasarın zamana bağlı grafiği (Wetzel, vd. 2017)	24
Şekil 2.15	EJ2P karanlık kutu (mavi) ve RGB LED (kırmızı) örneklerinin ışınlanma sonrası aldığı hasarın zamana bağlı grafiği (Wetzel, vd. 2017)	25
Şekil 3.1	Radyasyon hasarının şeffaf malzemeler üzerindeki hasarın incelenmesi için hazırlanan örnek	26
Şekil 3.2	Temiz örnek ile ışınlanmış örneklerin aynı grafikte gösterimi (solda) Temiz örnek ve ışınlanmış örnek arasında oranlama ile hesaplanmış bağlı geçirgenlik kaybı (sağda)	27
Şekil 3.3	TARLA tesisi şematik görüntüsü, SEL Deney Odaları ve Medikal Doğrusal Hızlandırıcı baskılanmıştır (Aksoy ve Karşı 2015)	28
Şekil 3.4	Shimadzu UV-3600 Plus UV-VIS-NIR spektrometre 200 nm (morötesi) ile 2600 nm (yakın kızılötesi) ışık tayfları arasında kaynağa ve bu aralığa duyarlı foton dedektörlerine sahip bir ölçüm aletidir. Ölçüm alanındaki parçaları modifiye edilerek, örneğin geçirgenlik (transmittance) veya yansıma (reflectance) spektrum ölçümleri yapılabilir. (Shimadzu Analytical Instrumentation 2021)	28
Şekil 3.5	Hazırlanan örneklerin uğradığı ışık geçirimi kaybının iyileştirilmesi için kullanılan ortamlar. A ve B grubu örnekler yüksek kontrollü bir ortamda olmamakla birlikte malzemenin doğal yöntemler ile iyileşmelerini temsil etmektedir, C grubu örnekler ise ışık geçirmeyen ve sıcaklık kontrolü olan bir ortamda bulunur ancak belirli dalga-boyuna sahip LED'ler ile etkileşimine izin verilir. Bu LED'ler 2 grup halinde LED istasyonu-1 ve LED istasyonu-2 şeklinde adlandırılmış yapılara yerleştirilecektir	29
Şekil 3.6	Programlanabilir işlemci, 2 amper akım kapasiteli N-kanal mosfet ve 5 V DC (doğru akım) kaynağından oluşan ev yapımı kare dalga üretici (Arduino Uno Teknoloji 2022)	29
Şekil 3.7	Yapısal malzemelerin üretildiği el yapımı 3 boyutlu baskı makinesinin tüm görüntüsü (solda) ve deney için kullanılacak malzemeler (kılavuz maskesi) basılırken çekilen görüntüsü (sağda).....	30
Şekil 3.8	İyileşme istasyonunu oluşturan LED'lerin kalibrasyonunda kullanılacak Ocean Insight marka spektrometre fiber-optik ucu (solda) ve fiber-optik ucu incelenen LED üzerinde sabit tutan kalibrasyon kılavuzu (sağda)	31
Şekil 3.9	İyileşme ölçümleri yapılan örneklere deney boyunca bağlı kalacak ve deney sırasında kullanılacak Shimadzu marka spektrometreye uygun şekilde	

	tasarlanmış kılavuz maskesi (solda) ve LED'lerin yerleştirileceği kolimatörleri içeren ve aynı zamanda LED ile uyarım süresince örneği tutacak olan LED kafesi (sağda)	31
Şekil 3.10	LPKF ProtoMat S103 model baskı makinesi (solda) ve aynı makina kullanılarak deneme amacıyla devre basılırken çekilmiş fotoğrafı (sağda) (LPKF PCB Prototype Technology 2022).....	32
Şekil 3.11	Kolimatörleri ve LED kartlarını içeren LED kafesi. Dizilimler görselde şematize edildiği gibi olup, kolimatörler örnek cam yüzeyine degecek şekilde tasarlanmıştır	33
Şekil 3.12	LED kafesinin tamamlanmış halinin çalışır durumdaki çekilmiş fotoğrafı. LED'lerin tamamı çalışır durumda olmasına karşın henüz kalibre edilmemiştir, bu nedenle her LED'in parlaklığı farklıdır. Bu durum fotoğrafta yeşil LED'in çok soluk çıkmasının açıklamasıdır.....	33
Şekil 3.13	Ocean Insight marka minyatür spektrometre (solda) ve LED kafesi, kalibrasyon kılavuzuna takılı olan fiber-optik kablo (sağda) (Ocean Insight Spectroscopy 2022)	34
Şekil 3.14	LED parlaklıklarının yakınlaştırılarak kalibre edilmesi amacıyla kurulmuş deney düzeneği diyagramı.....	35
Şekil 3.15	LED istasyonu (solda) ve Arduino marka elektronik işlemci (sağda) ile yapılmış basit şematik (Arduino Uno Teknoloji 2022).....	36
Şekil 3.16	Arduino marka işlemciden aldığı sinyal ile devreyi açıp kapatarak çalışan kare dalga üreticinin ve iki LED istasyonunun birlikte gösterilmiş şematiği	37
Şekil 3.17	TARLA bünyesinde bulunan medikal doğrusal hızlandırıcı ve gama kaynağının basit modeli	38
Şekil 3.18	Pozitif yüklü çekirdeklerin elektrik alanından etkilenecek yönelimlerini değiştiren enerji yüklü elektronlar, enerjilerinin bir kısmını kaybederler, bu kayıp enerji Bremsstrahlung radyasyonu olarak açığa çıkar.....	38
Şekil 3.19	Medikal doğrusal hızlandırıcının sonunda modifiye edilmiş Bremsstrahlung kaynağı (solda) ve kırmızı ok ile gösterilen örneğin konulduğu boşluk (sağda)	39
Şekil 3.20	Yerleştirilen örneğin kaynağın ve hayali hedefin arasında kalan konumu....	39
Şekil 4.1	Denyede geçirgenlik kaybına uğramış örneklerin uyarılması amacıyla kullanılacak LED'lerin spektrum ve integralleri (saniyede algılanan toplam γ sayısı).....	42
Şekil 4.2	İstasyonlarda kullanılacak kırmızı LED'ler için uygun akım sınırlayıcı belirlenirken karşılaşılan tayf kayması, gösterildiği üzere sınırlayıcının direnci düştükçe akım geçmesine izin verdiği değer artmakta ve kritik sınırın üzerine geçmektedir	44
Şekil 4.3	Alınan ölçümler ve doğrusal fit fonksiyonları, her fonksiyonun geçtiği dolayısıyla interpolasyon yöntemi ile hesaplanabileceği ve Şekil 4.1.2'de gösterilen problemten uzak durularak 7900 γ /ms değeri parlaklık hedefi olarak seçilmiştir	44

Şekil 4.4	İstasyon 1 (solda) ve İstasyon 2 (sağda), LED kafesine gerekli akımı sağlama amacıyla, “Eagle” isimli programda tasarlanmıştır. Tasarım baskı makinasından hazırlandıktan sonra üzerinde yazılı direnç değerlerine sahip elemanlar ile birleştirilecektir.....	45
Şekil 4.5	Birleştirilmiş akım sınırlayıcılar ve LED kafeslerinin oluşturduğu, LED istasyonları kalibrasyon testleri yapılırken gösterilmiştir	46
Şekil 4.6	Yeryüzü Kalibrasyon testi süresince alınan ölçümlerden alınan verinin ortalamasıyla oluşturulmuş LED rengine ve LED istasyonuna bağlı olarak ayrılmış spektrumlar.....	47
Şekil 4.7	Kalibrasyon verisi ile hesaplanmış nümerik integral ortalamaları ve hataları	47
Şekil 4.8	Arduino marka işlemci (sol-üst), işlemci tarafından çalıştırılan dalga üretici (orta-üst), istasyon 1 için üretilmiş akım sınırlayıcı (sağ-üst) ve tüm sistemlerin çalışır durumda tamamlanmış hali (alt)	48
Şekil 4.9	Tamamlanmış örnek iyileştirme sistemi; a. kare dalga üretici, b. akım sınırlayıcı, c. LED kafesi, d. kalibrasyon kılavuzu, e. minyatür spektrometre, f. fiber-optik kablo.....	49
Şekil 4.10	Termostatın 25 °C ayarlandığı TARLA C-103 (muayene odası) no’lu odada kapalı kutu içerisine yerleştirilen deney düzeneği; a. akım sınırlayıcı, b. BME280 sensör ve LED kabloları, c. LED kafesi, d. BME280 sensör	50
Şekil 4.11	İki gün boyunca alınmış ölçümlere göre, TARLA C-103 no’lu odanın sıcaklık ve bağıl nem değerleri.....	50
Şekil 4.12	İki gün boyunca alınmış ölçümlere göre, TARLA C-103 no’lu odada bulunan morötesi LED’in tepe nokta bağıl parlaklık oranı (solda) ve aynı LED’in hesaplanan toplam parlaklığı yani integrali (sağda).....	51
Şekil 4.13	İki gün boyunca alınmış ölçümlere göre, TARLA C-103 no’lu odada bulunan morötesi LED’in spektrum tepe noktasının dalga-boyunda yaşanan ufak değişimin 3B görüntüsü (solda) ve üstten görüntüsü (sağda)	51
Şekil 4.14	Çeker ocakta tekrarlanan deneyin çeşitli bileşenleri; a. LED istasyonunun ve BME280 dedektörün bulunduğu karanlık kutu, b. LED istasyonunun çalışmasını sağlayan kare dalga üretici, c. karanlık kutu içerisindeki veriyi okuyan ve kaydeden işlemci	52
Şekil 4.15	İki gün boyunca alınmış ölçümlere göre, TARLA SEL deney odalarının sıcaklık ve bağıl nem değerleri.....	52
Şekil 4.16	İki gün boyunca alınmış ölçümlere göre, TARLA SEL deney odalarında bulunan morötesi LED’in tepe nokta bağıl parlaklık oranı (solda) ve aynı LED’in hesaplanan toplam parlaklığı yani integrali (sağda)	53
Şekil 4.17	İki gün boyunca alınmış ölçümlere göre, TARLA SEL deney odalarında bulunan morötesi LED’in spektrum tepe noktasının dalga-boyunda yaşanan ufak değişimin 3B görüntüsü (solda) ve üstten görüntüsü (sağda)	53
Şekil 4.18	200-1500 nm arasında alınan tüm verinin örnek gruplarına göre sıralanmış grafikleri	54

Şekil 4.19	Alınan verilerde 830 nm ve 720 nm dalga boyuna denk gelen veriler kırılmanın yaşandığı konumun öncesi ile sonrası arasında oranlama yapılarak oluşturulan grafikler	55
Şekil 4.20	Kızılötesi tayf içerisinde bölgesel çukur oluşturan 1100 nm - 1300 nm aralığı ortalamaları ışınlanma sonrasında geçen sıraya göre dizilmiştir	56
Şekil 4.21	Bölgesel çukur oluşturan 1100 nm - 1300 nm arası ortalaması alınan mavi örnek değerlerinin, diğer örneklerin ortalamaları arasında yapılan oranın histogramları, histogramlara uygun oluşturulan fit eğrileri ve fit eğrilerinin μ değerleri.....	57
Şekil 4.22	Kızılötesi bölgesi, yerel çukur noktalarının düzeltme yapıldıktan sonraki grafikleri ışınlanma sonrasında geçen sıraya göre dizilmiştir	57
Şekil 4.23	Mavi örneklerde yapılan kızılötesi bölge düzeltmesi sonrası oluşturulan yeni spektrum grafikleri	58
Şekil 4.24	Işınlanmış örnekler ile temiz örneklerin mutlak geçirgenlik oranları arasında yapılan oranlama ile hesaplanmış görelî geçirgenlik oranları.....	59
Şekil 4.25	Işınlanmış örnekler ile temiz örneklerin mutlak geçirgenlik oranları arasında yapılan oranlama ile hesaplanmış görelî geçirgenlik haritaları.....	59
Şekil 4.26	Görelî geçirgenlik oranlarının 340 nm ile 1000 nm arasında alınan integralleri ile hesaplanan toplam geçirgenlik kaybı.....	60
Şekil 4.27	Toplam geçirgenlik kaybı, trapezoid nümerik integralden kaynaklanan hata çizgileri ve bu geçirgenlik kaybına uygulanan fit eğrileri.....	61
Şekil 4.28	İyileştirme aşamasında kullanılan farklı LED renklerinin ürettiği spektrumlar, bu spektrumlara uygulanan fit eğrileri ve fit eğrilerinden hesaplanan etkin dalga boyları	63
Şekil 4.29	Fit eğri denklemini oluşturan iyileşme değerleri ile iyileştirme amaçlı kullanılan LED'lerin baskın dalga boyu karşılaştırılması, burada beyaz LED tek bir tepe üretmediği için grafikte yer verilmemiştir	63
Şekil 4.30	Çeşitli sıcaklıklara sahip malzemenin yüzeyinden yayılan ışığın spektrumu (solda), 300 K yani yaklaşık oda sıcaklığında olan bir malzemenin yüzeyinden yayılan ışığın spektrumu (sağda)	64
Şekil 4.31	İlk gün ile 4. gün arası ölçülen spektral iyileşme oranları	65
Şekil 4.32	4. gün ile 40. gün arası ölçülen spektral iyileşme oranları	65
Şekil 4.33	40. gün ile 120. gün arası ölçülen spektral iyileşme oranları.....	66
Şekil 4.34	7 kGy örneklerin kalıcı hasarları ile 3.5 kGy örneklerin toplam geçirgenlik kayıpları arasındaki oran ve bu oranlara ilk 4 günü dahil etmeden uygulanmış doğrusal fit eğrileri	67
Şekil 4.35	7 kGy LED grubu örneklerin TGK eğrileri ve katsayılar uygulandıktan sonraki 3,5 kGy LED grubu örnekleri için TGK eğrileri ve uygulanan fitler	68
Şekil 4.36	3,5 kGy LED grubu örneklerin verilerine hesaplanan katsayılar uygulandıktan sonraki TGK ve uygulanan fit eğrileri	69

- Şekil 4.37 Düzeltilen Fit eğri denklemini oluşturan iyileşme değerleri ile iyileştirme amaçlı kullanılan LED'lerin baskın dalga boyu karşılaştırılması, burada beyaz LED tek bir tepe üretmediği için grafikte yer verilmemiştir 70
- Şekil 5.1 İyileşme ölçümleri sonrasında örneklerin fotoğrafları. Burada örnekler dikey olarak ışınlandıkları doz miktarına göre, yatay olarak buldukları iyileşme ortamına göre gruplanmıştır, A grubu karanlık kutu, B grubu çevresel ortam, C grubu LED istasyonudur ve LED rengi sıralaması; 1 beyaz LED, 2 morötesi LED, 3 mavi LED, 4 yeşil LED ve 5 kırmızı LED şeklindedir 73



ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 3.1 Işınlanmış örneklerin kalınlıkları ve belirsizlikleri.....	40
Çizelge 4.1 Deneyde kullanılan LED çeşitleri ve önerilen çalışma aralıkları. (Kırmızı 1206 Formasyonlu SMD LED 2021, Morötesi 5050 Formasyonlu SMD 400-405 nm 2021, Yeşil 1206 Formasyonlu SMD LED 2021, Beyaz 1206 Formasyonlu SMD LED 2021, Mavi 1206 Formasyonlu SMD LED 2021)	42
Çizelge 4.2 İstasyon 1’de kullanılacak LED gruplarının parlaklık optimizasyonu için yapılan deney ve deney için kullanılan eşdeğer akım sınırlayıcı dirençler .	43
Çizelge 4.3 İstasyon 2’de kullanılacak LED gruplarının parlaklık optimizasyonu için yapılan deney ve deney için kullanılan eşdeğer akım sınırlayıcı dirençler .	43
Çizelge 4.4 Yapılan deneye göre hesaplanan fit sabitleri, fit fonksiyonu ve gerekli olan direnç değerleri.....	45
Çizelge 4.5 Toplam geçirgenlik kaybına uygulanan fit eğrilerini oluşturan sabitler	62
Çizelge 4.6 7 kGy örneklerin kalıcı hasarları ile 3,5 kGy örneklerin toplam geçirgenlik kayıpları (TGK) arasındaki oranlara ilk 4 günü dahil etmeden uygulanmış doğrusal fit eğrileri	67
Çizelge 4.7 Düzeltilmiş toplam geçirgenlik kaybına uygulanan fit eğrilerini oluşturan sabitler	69

1. GİRİŞ

Radyasyon kelimesi kökeni ingilizcede merkezden dışarıya eşit yönlerde yayılmak veya saçılmak anlamına gelen *radiation* kelimesinden gelmektedir. Radyasyonun anlamı ise enerjinin bir kaynaktan etrafa parçacık veya dalgacık formunda yayılmasını ifade eder. Günümüzde radyasyon denilince akla gelen ilk isimlerden birisi olan x-ışınları 1895 yılında Wilhelm Conrad Röntgen tarafından üretilmiş ve keşfedilmiştir. Kurduğu deney düzeneğinde, vakum tüpünde bulunan yüksek voltaj bağlanmış iki paralel levha arasında hazırlanan elektronlar tüpün dışarısında bulunan fosfor kaplı ekranın parlamasına neden olmaktadır. Tüpün üzerini siyah bir kağıt ile kapattığında bile fosfor ekranın parlamaya devam ettiğini gözlemledi. Elektronlar gözle görülmeyen bir ışın yayıyordu ve bu ışınlar görünür ışığın geçemediği bazı opak cisimler içerisinden geçebiliyordu. Benzer deneyler ile kendi elinde bulunan kemikleri fotoğraflamış ve günümüz radyografi tekniklerinin ortaya çıkmasını sağlamıştır (Novelize 1997, Dictionary.com “radiation” 2022).

Keşfedilen ilk radyoaktif materyal 1896 yılında Antonie-Henri Becquerel tarafından tesadüfen keşfedilmiştir. Başka bir deney için kullanmayı planladığı fotoğraf kağıtlarını ışıktan etkilenmemeleri için opak bir zarf içerisine koymuş ve raslantı eseri, fotoğraf görüntüleme teknikleri için kullanılan, uranyum mineralini üzerine yerleştirmiştir. Ertesi gün kağıtlardan birisini test amaçlı incelemiş ve üzerinde duran mineral ile aynı şekilde bir kararma görmüştür, bu gözlemden yaptığı çıkarıma göre uranyum minerali ışığın geçemediği zarfın içerisinden geçip fotoğraf kağıdı ile etkileşen bazı ışınlar yaymaktadır. Bu ışınları kendi kendisine yaydığı için bu materyalin davranışına radyoaktivite ismini vermiştir (Donald Blaufox 1996).

Radyasyon katı malzemeler üzerinde yıkıcı etkiler uygulayarak malzemelerin özelliklerinde değişikliklere sebep olabilir. Nükleer reaktörlerde bulunan yakıt çubukları çeşitli katmanlardan oluşan kompozit materyallerdir, merkezlerinde bulunan peletler nükleer fisyon geçirerek ısı ve radyasyon üretir. Isı yakıt üzerinden alınmaz ise birikir ve pelet sıcaklığını arttırarak yakıtın erimeye ve kontrolden çıkmasına neden olabilir. Bunun için ısı sürekli dolaşımında tutulan soğutma sıvısı veya gazı ile yakıttan uzaklaştırılır ancak bu işlemin sürekli devam ettirilebilmesi için peletlerin şekil, boyut

ve ısı iletkenliği gibi özelliklerinin belirli aralıklarda sabit kalması gerekmektedir. Nükleer fisyon sırasında açığa çıkan radyasyonun peletlerin özelliklerini değiştireceği bilinmektedir ancak özelliklerin felaketslere yol açmasını engellemek için radyasyon hasarı incelenmeli ve üzerinde deneyler yapılarak standartlara oturtulmalıdır. Bu amaçla radyasyonun katı malzemeler üzerindeki kritik etkilerini inceleyen radyasyon materyal bilimi ortaya çıkmıştır (Allen ve Was 2007, Was ve Andresen 2007).

Radyasyon malzeme ile etkileşime girerek maddenin nükleer veya kimyasal yapısını değiştirebilir, yüksek radyasyon dozlarına maruz kalan malzemelerde renk, dayanıklılık, iletkenlik veya şeffaflık gibi dışarıdan fark edilebilen değişimler meydana gelebilir. Örneğin sintilasyon dedektörlerde, radyasyonun enerjisini soğurarak, büyüklüğü ile orantılı sayıda foton üreten materyaller (sintilatörler) aktif ortam olarak kullanılır. Sintilatörün ürettiği fotonlar bir dedektör ile sayıldığında radyasyonun enerjisi ölçülebilir ancak bu malzemeler çok yoğun radyasyon koşulları altında çalıştıklarında zaman içerisinde şeffaflıklarını kaybedebilirler. Bu gibi değişimler malzemenin eski işlevini yerine getirmesini engellerken bazen bu değişimler kendiliğinden, bazen de dışarıdan bir uyarının yardımıyla bir noktaya kadar dzeltilerilir.

Tezde çalışılan madde optik malzeme üretiminde kullanılan şeffaf sodalı camdır ve yüksek radyasyon dozuna maruz kaldığında ışık geçirgenliği özelliğini aşamalı olarak kaybeder. Sodalı cam amorf moleküler yapıya sahiptir, bundan dolayı radyasyonun verdiği hasar bir ölçüde kendi kendine iyileşme gösterir. Polimer yapılı sintilatör malzemelerde yapılan çalışmalar, radyasyon hasarının neden olduğu opaklığın RGB LED (kırmızı, yeşil ve mavi ışık yayan diyot) kullanılarak uyarılan örneklerin karanlık kutuda bekletilen örneklerle göre daha hızlı iyileştiğini ve iyileşme durduktan sonraki kalıcı hasarın RGB LED ile uyarılan örneklerde daha az olduğu keşfedilmiştir (Wetzel vd. 2017).

Bu tez kapsamında; sodalı cam rnekleri TARLA (Turkish Accelerator and Radiation Laboratory, Gölbaşı, Ankara) bünyesinde bulunan LINAC (medikal doğrusal hızlandırıcı) kullanılarak üretilen gama demeti ile ışınlanarak sahip olduğu ışık geçirgenliğini kaybetmesi sağlanmıştır. Ardından örneklerden bir grup karanlık kutuda, bir grup gün ışığı alan bir odada, son grup ise farklı dalga-boyunda ışık yayan

LED'lerin ışığı ile uyarılmış ve ışınlanma ile oluşturulan hasarın durumu periyodik olarak ölçülmüştür. Bu şekilde farklı koşullar altında bekletilen örneklerin iyileşme hızı ve son durumda sahip oldukları kalıcı hasar incelenmiştir.

Yapılan incelemeler sonucu radyasyonun yıkıcı etkileri nedeniyle işlevini yerine getiremeyen malzemelere LED ışığı ile uyarma gibi basit iyileştirme teknikleri uygulanarak, malzemelerin sahip olması gereken nitelikler geri kazandırılabilir. Veya belirli periyotlar ile çalışması beklenen dedektör veya diğer ölçüm aletleri, pasif olduğu süre içerisinde aynı iyileştirme teknikleri uygulanarak, bu aletlerin kullanım ömürleri uzatılabilir.



2. KURAMSAL TEMELLER

2.1 Radyasyon Nedir

Fizikte radyasyon enerjinin dalga veya parçacık biçiminde yayılması veya bir hedefe aktarılmasına verilen isimdir. Başlıca 4 tip radyasyon vardır, bunlar; elektromanyetik radyasyon, parçacık radyasyonu, akustik radyasyon ve kütleçekimsel radyasyon. Elektromanyetik radyasyon tez konusunda yapılan çalışmalarla ilgilidir ve basitçe elektromanyetik alana oluşan dalgalanmalardır, gama ışınından radyo dalgalarına kadar uzanan geniş bir enerji spektrumu vardır. Parçacık radyasyonu yüksek enerjili atomaltı parçacıklar veya iyonlardan oluşur, alfa (α), beta (β) veya m μ on (μ) radyasyonu parçacık radyasyonuna doğal örneklerdir. Akustik radyasyon maddesel ortamda titreşim yoluyla yayılan enerjiye verilen isimdir, sismik dalgalar ve ses dalgaları gibi bir çok çeşidi vardır. Kütleçekimsel radyasyon, yüksek kütleyle sahip objelerin ivmeli hareketler ile uzay-zaman eğrisinde oluşturduğu dalgalarıdır. Diğer radyasyon tiplerine göre en son gözlemlenmiş radyasyon türüdür (Ahmed 2007, Wofram Research 2022).

Elektromanyetik radyasyonun önceleri dalga özelliği gösterdiği bilinse de yapılan fotoelektrik deneyleri belirli frekansın altındaki ışığın parlaklığından bağımsız olarak hedeften elektron koparamadığı gözlemlenmiştir. Ancak hedefe bağlı eşik frekansının üzerindeki ışık hedeften elektron koparmakta başarılı olmuşken, koparılan elektron sayısının ışık kaynağının parlaklığı ile orantılı olduğu gözlemlenmiştir. Bu deney sonucuna göre ışık, enerjisi yalnızca frekansa bağlı, foton adında parçacıklardan oluşmaktadır, ışığın parlaklığı ise bu fotonların sayısı ile ilgilidir. Bu şekilde ışığın dalga-parçacık ikilemi gösterdiği anlaşılmıştır ve elektromanyetik radyasyonun bazı durumlarda parçacık radyasyonu gibi davranabildiği ortaya çıkmıştır (Serway 1990).

Tez çalışmasında yalnızca elektromanyetik dalgalara odaklanılmıştır ancak radyasyon hasarı parçacık radyasyonu ile de gerçekleşebilir, bu nedenle kuramsal temeller kısmında bu iki tip radyasyon türü iyonlaştırıcı ve iyonlaştırıcı olmayan radyasyon olarak iki başlıkta işlenecektir.

2.1.1 İyonlaştırıcı olmayan radyasyon

İyonize olmayan radyasyon, kütleçekimsel radyasyon, sismik radyasyon ve dalga-boyu 320 nm'den büyük elektromanyetik radyasyonu içerir. Basitçe radyasyonu oluşturan parçacıkların kinetik enerjisi atomlarda elektron kopararak iyonlar oluşturmaya yetmeyen ve özellikle organik moleküllerdeki kimyasal bağlara zarar vermeyen radyasyon tiplerine verilen addır. Kimi kaynaklara göre bu eşik 10 eV (elektronvolt) iken bazı kaynaklarda suyun iyonizasyon enerjisi olan 33 eV'dur (Kwan-Hoong 2003).

2.1.1.1 Mikrodalga

Boşluktaki dalgaboyu 1 m ile 1 mm arasında değişen elektromanyetik dalgalara denir, karşılık gelen frekansı 300 MHz ile 300 GHz arasında değişir. Mikrodalga fırın, radar, bluetooth ve kablosuz ağ bağlantısı gibi bir çok farklı alanda kullanılır. Koherens dalga üretimi ile yüksek genliklere ulaşıldığında iletken malzemeleri ısıtmak gibi etkileri olur, benzer şekilde 25 - 38 mm arası mikrodalga su moleküllerini kendi etraflarında döndürerek ısıtır. Enerjisi 50 µeV civarı olduğu için organik moleküllere zarar veremez ve bu nedenle yiyecek ısıtmakta kullanılır (Hitchcock 2004, Datta ve Rakesh 2013).

2.1.1.2 Kızılötesi

Dalga boyu 1 mm'den başlayıp 700 nm'ye kadar ulaşan elektromanyetik dalga spektrumuna verilen isimdir, Türkçe ismi gözle görülebilir en uzun elektromanyetik dalga grubu, yani kırmızı ışığın ötesinde olduğu için kızılötesidir. İngilizcede kullanılan "infrared" (IR) ismi ise Latince aşağı anlamına gelen "infra" ve İngilizce kırmızı anlamına gelen "red" kelimelerin birleşiminden oluşur (Türkçe Bilgi "Kızılötesi" 2022).

Bir kısmı terahertz radyasyonuna dahil olan kızılötesi ışın, gözle görülmez bir ışık türüdür. Önceleri "görünmez ısı ışını" diye de bilinirdi ve 1800 yılında astronom William Herschel tarafından yapılan bir deneyde, bugün kullandığımız, "infrared" olarak adlandırılmıştır. Herschel güneş ışığını üçgen prizma kullanarak tayflarına ayırmış ve hangi rengin daha çok ısı taşıdığını öğrenmek için spektrum üzerinde çeşitli noktalara termometre yerleştirmiştir. Görünür ışığın sonunda yer alan kırmızının biraz

ötesine oda sıcaklığını kontrol amaçlı fazladan bir termometre yerleştirmiş, fakat bu kontrol termometresinin diğerlerinden daha yüksek sıcaklık göstermesi üzerine görünmez ısı ışığının spektral konumunu keşfetmiş ve bu ışığa “kırmızının altı” anlamına gelen “infrared” ismi vermiştir (Rogalski 2019).

Oda sıcaklığında bulunan neredeyse her cisim tarafından yayılan kızılötesi radyasyon, rotasyonel veya titreşim momentumlarını aktaran atom ve moleküller tarafından yayılan ve emilen bir enerji türüdür. Moleküllerin titreşim modları ile etkileşerek, onları uyarak dipol momentlerini değiştirebilir, bu nedenle moleküllerin enerji seviyeleri üzerine yapılan çalışmalar için kullanışlı bir elektromanyetik frekans aralığı sağlar (Infrared Spectroscopy 2022).

2.1.1.3 Görünür ışık

Görünür ışık (VIS) sağlıklı insan gözü tarafından algılanabilir en geniş elektromanyetik dalga aralığıdır, dalga boyu 400 nm (mavi) den 700 nm'ye (kırmızı) kadar ulaşır. Modern atmosferden ve sudan en verimli şekilde ilerleyebilen ışık tayfi grubudur, bu nedenle fotoototroflar (ışıktan besin üreten canlılar) tarafından besin üretme amaçlı kullanılırken hayvanların çoğu tarafından çevrelerini algılamak amaçlı kullanılır. Bazı tek hücreli fotoototrof canlılar ışıktan daha fazla yararlanabilmek için bu ışığı algılayacak ve tepki verecek yöntemler kazanmışlardır, böylece hareketlerini ışığa göre düzenleyebilirler (Pal ve Pal 2001, Williams 2015).

İnsanlar için de çevrelerini algılamada önemli araç olan ışık, tarih boyunca doğa bilimciler tarafından merak konusu olmuş ve yapılan deneyler ile fiziğin ve modern fiziğin doğuşuna sebep olmuştur. Görülebilir ışığın ana doğal kaynağı merkezi yıldızımız Güneştir, aslında x-ışınlarından radyo dalgalarına kadar geniş spektrumda ışık yayıyor ise de Güneşin yaydığı bu geniş spektrumun çok geniş kısmı modern atmosferimiz tarafından soğurulur ve etkisini kaybeder (Uzan ve Leclercq 2008).

2.1.2 İyonlaştırıcı radyasyon

İyonize radyasyon, nükleer radyasyonu da içeren atom altı parçacıklardan veya yüksek enerjili elektromanyetik dalgalardan oluşur. Temel olarak kararlı bir atomun veya molekülün orbitallerinde bulunan elektronları kopararak iyon çiftleri oluşturmak için yeterli enerji sahibi her tür radyasyon tipi iyonlaştırıcı radyasyon olarak adlandırılır. Elektromanyetik spektrumun yüksek enerjili kısmını oluşturan gama ve x ışınlarına ek olarak morötesi radyasyonun kısa dalga-boyuna sahip bölümü iyonlaştırıcı radyasyon olarak sınıflandırılır. İyonize olmayan ve iyonlaştırıcı radyasyon arasındaki sınır morötesi radyasyon bandı içine denk gelir ancak bu sınır çok net tanımlanamaz, bunun nedeni farklı atom ve moleküller için farklı enerjiler ile iyonlaştırıcı olabilirler. Bu sınır uluslararası radyolojik korunma komisyonu (ICRP) canlı insan dokusuna zarar vererek kanser ve yanık gibi etkilere neden olabilecek asgari enerji seviyesi olarak belirlenmiştir ve bu seviye 10 eV ile başlar (ICRP Yayını 2007).

2.1.2.1 Morötesi radyasyon

Morötesi radyasyon (UV) 10 ile 400 nm arasında geniş bir banda sahiptir, bu bandın sahip olduğu enerji 3,1 eV ile başlar ve 124 eV'a kadar devam eder. Dolayısıyla morötesi radyasyonun tüm bandına iyonlaştırıcı denilemez. Enerjisi ve madde ile etkileşme çeşitlerine göre daha küçük bantlara ayrılır. En düşük enerjili olan UV-A bandı (400 - 310 nm) ozon katmanı tarafından emilmez ve yeryüzüne kadar ulaşır. UV-B (315 - 280 nm) kararlı atom ve molekülleri iyonlaştıramaz ancak proteinlerin sahip olduğu zayıf ester bağları kırarak işlevsiz hale getirebilir. Ozon tabakası tarafından büyük oranda emilir ancak yine de yeryüzüne ulaşabilir, bu nedenle UV-B bandını emebilecek pigmentler geliştirmemiş canlılar için öldürücü olabilir. UV-C (280 - 200 nm) atmosfer tarafından tamamen emilir bu nedenle yeryüzüne ulaşamaz, doğada rastlanılmadığı için canlılar arasında direnç gelişimi görülmez, bu nedenle özellikle tek hücreliler için oldukça öldürücüdür. İnsanlar dahil olmak üzere birçok kara hayvanı derilerindeki UV-A ve UV-B emen pigmentler ile kendilerini korurlar, buna rağmen UV-C deri kanseri gibi ölümcül hastalıklara yol açabilir. Eğer UV-C radyasyonu atmosfer tarafından engellenmiyorsa Güneşin yaydığı radyasyon yüzünden karasal

ortam üzerinde yaşam gelişmezdi (Haigh 2007, Reference Solar Spectral Irradiance: Air Mass 1.5 2011, Rastogi vd. 2017).

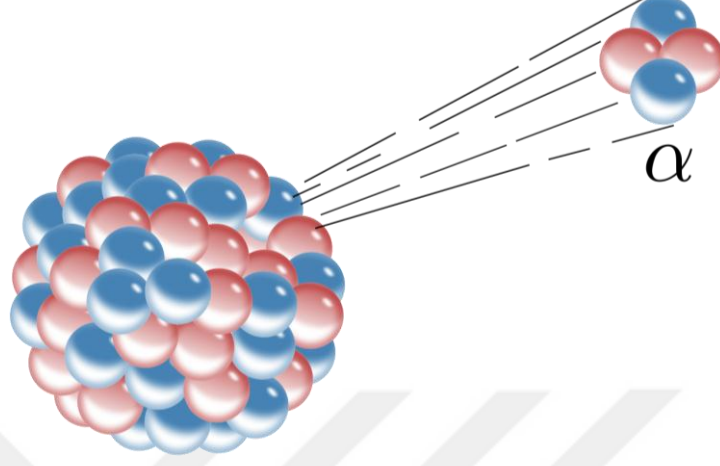
Uzak morötesi 200 nm ile 122 nm arasında banda verilen isimdir, canlılar için her ne kadar tehlikeli olsa da iyonlaştırıcı radyasyon sınırı ile UV-C arasında kalan alanda yer alır. Enerji seviyesi Silikon (Si) elementinin ilk valans elektronunu serbest bırakmak için gereken enerji, yani iyonizasyon enerjisi 8,15 eV'dur ve bu enerji seviyesi 152 nm dalga-boyuna denk gelmektedir. Bu nedenle uzak morötesi radyasyon yarı-iletken üretiminde kullanılır (König vd. 2018).

Ekstrem morötesi bandı 121 nm ile 10 nm arasında yer alır ve iyonlaştırıcı radyasyon sınırı olan 10 eV sınırını aşan enerjiye sahiptir. Enerji seviyesi elektron bağlanma enerjileri baz alındığında fazla yüksektir, bu nedenle ancak birden fazla elektron kaybetmiş iyonlarda elektron soğurulması ile üretilebilir. Bu durum ekstrem morötesi radyasyonun katı veya sıvı maddelerce üretilemeyeceğini ancak yüksek enerjili plazma kaynağı ile üretilebilmesine neden olur. Güneş yüksek sıcaklıklı plazmadan oluştuğu için, ekstrem morötesi bandı üreten doğal bir kaynaktır (Strauss ve Funk 1991, Haigh 2007).

2.1.2.2 Alfa radyasyonu

Alfa (α) radyasyonu çoğunlukla ağır ve kararsız çekirdeklerin daha kararlı seviyeye gelmesi sırasında salınan ve doğal izotop bozunmalarında açığa çıkan iki proton ve iki nötron içeren parçacıktır, bu durumda evrende en yaygın bulunan ikinci element olan helyum-4 (He) çekirdeğidir. Doğal alfa bozunmaları genellikle 5 MeV gibi bir enerjiye sahiptir, durgun kütle enerjisi 3,7274 GeV olan bu ağır parçacığın ortalama hızı ışık hızının %5,17'si kadardır. Bu kadar yavaş olması nedeniyle maddesel ortamda fazla girişken değildir, yalnızca bir sayfa kağıt tarafından bile engellenebilir, ancak yine de iyonlaştırıcı radyasyon grubunda yer alırlar. Etkileştiği ortamda enerjisini kaybettiği zaman ortamdaki aldığı 2 elektron ile nötr duruma geçer ve helyum atomuna dönüşür (Krane 1988).

Şekil 2.1’deki diyagramda α bozunması sırasında atomun çekirdeğinden fırlatılan alfa parçacığı gösterilmiştir.

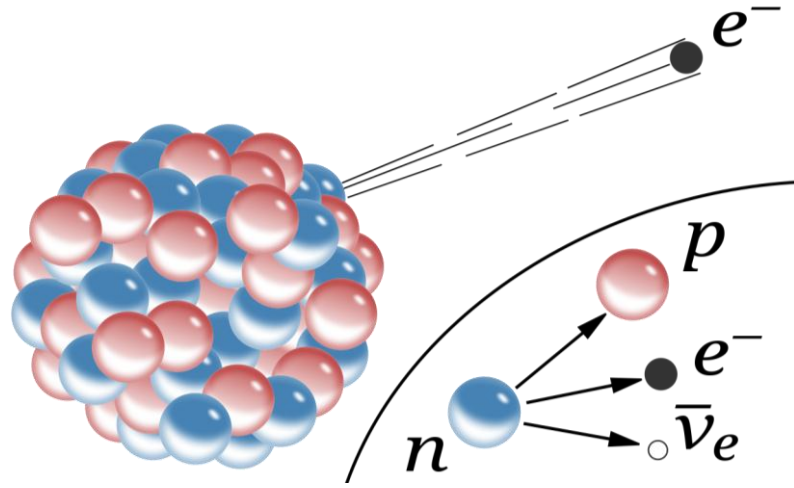


Şekil 2.1 Atomun çekirdeğinden fırlatılan α parçacığını gösteren diyagram, protonlar mavi ve nötronlar kırmızı ile gösterilmiştir (Wikipedia Diagram of Alpha Decay 2022)

2.1.2.3 Beta radyasyonu

Beta (β) radyasyonu ışık hızının ortalama %85’i kadar hıza sahip enerji yüklü elektronlardan (β^-) veya pozitronlardan (β^+) (elektron anti maddesi) oluşur. Doğada daha sık görülen β^- tek bir nötronun veya nötronca zengin kararsız çekirdeklerin daha kararlı hale geçerken yaptıkları bozunma sonucu ortaya çıkar, ancak bozunma sırasında bir adet antinötrino ile elektron aynı anda oluştuğu için iki parçacık enerjiyi kendi aralarında paylaşır (Lawrence Berkeley National Laboratory 2000).

Şekil 2.2’deki diyagramda β bozunması sırasında atomun çekirdeğinden fırlatılan veya nötronun bozunması ile üretilen β^- parçacığı gösterilmiştir



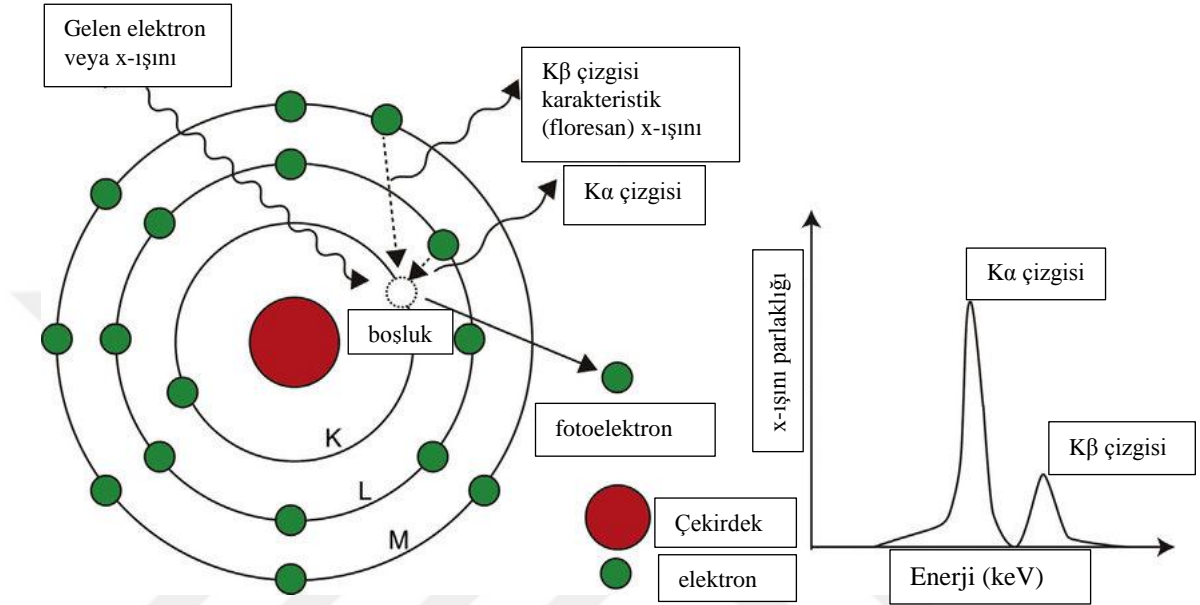
Şekil 2.2 Atomun çekirdeğinden fırlatılan (anti-nötrino gösterilmemiş) veya nötronun bozunması ile ortaya çıkan β^- parçacığını gösteren diyagram, protonlar mavi, nötronlar kırmızı, elektron siyah ve anti-nötrino beyaz ile gösterilmiştir (Wikipedia Diagram of Beta Decay 2022)

2.1.2.4 Gama ve x-ışını radyasyonu

Gama ve x-ışın radyasyonu morötesi radyasyondan daha küçük dalga-boyuna sahip elektromanyetik radyasyon aralıklarıdır, temelde bu iki radyasyon türünü ayıran şey enerji olsa da kendilerini oluşturan kaynaklar da değişiklik gösterir. Göreceli enerjisi daha küçük olan x-ışınları 10 nm ile 10 pm arasında dalga-boyuna sahip elektromanyetik dalga türüdür. X harfi yeni keşfedildiğinde bilinmeyen yeni tip radyasyon ifadesi için kullanılmıştır ve x-ışını olarak adlandırılmıştır. Günümüzde bu elektromanyetik ışınımı keşfeden Wilhelm Conrad Röntgen'e ithafen "Röntgen ışını" diye de adlandırılır. (Novelline 1997, Nasa Share The Science "X-ray" 2022)

X-ışınları yüksek enerjili parçacık veya elektromanyetik radyasyonun ağır atomlar ile etkileşmesi sonucu üretilir, özellikle yumuşak dokudan kolayca geçebilme özelliğinden yararlanılarak tıbbi görüntüleme gibi alanlarda kullanılır. Bazı durumlarda bombardıman etmek için kullanılan radyasyon, karşılaştığı atomun çekirdeğe yakın orbitallerde bulunan elektronlar ile etkileşerek bu elektronu koparabilir, ardından daha uzakta bulunan elektronlardan birisi yakın orbitalde kalan boşluğu kapatarak aradaki kinetik enerji farkını elektromanyetik dalga halinde dışarıya yayar. Buna karakteristik x-ışını adı verilir, her atom için farklı bir değere sahip olan karakteristik x-ışını elemental

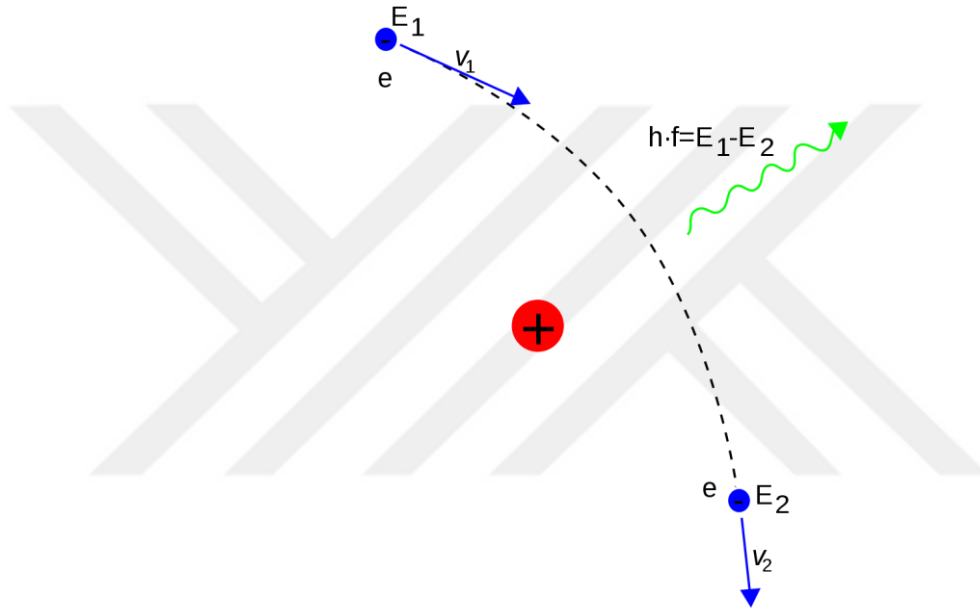
analiz yapmak için kullanılabilir. Karakteristik x-ışını oluşumu Şekil 2.3'teki diyagramda gösterilmiştir. Bazı kararsız izotoplar bozunma sırasında çekirdeğinden yayılan radyasyonun, alt orbitallerde bulunan elektronlar ile etkileşmesi sonucu karakteristik x-ışınlarını doğal olarak üretebilirler (Uo vd. 2015).



Şekil 2.3 Dışarıdan gönderilen enerji yüklü radyasyon sonucu karakteristik x-ışını oluşumunu gösteren diyagram, elektron yeşil, çekirdek kırmızı küreler ve elektromanyetik radyasyon siyah kıvrımlı ok ile gösterilmiştir (solda), x-ışını parlaklığı ile sahip olduğu enerjisi ilişkilendirilen grafik (sağda) (K harfi koparılan elektronun K kabuğundan olduğunu, α harfi boşluğu dolduran elektronun bir üst kabuktan yani L kabuğundan geldiğini ve β harfi boşluğu dolduran elektronun iki üst kabuktan yani M kabuğundan geldiğini ifade eder) (Uo vd. 2015)

Gama radyasyonu dalga-boyu 10 pm ve daha kısa olan enerjisi en yüksek elektromanyetik dalgalara verilen isimdir. X-ışınına benzer şekilde enerji yüklü fotonlardan oluşur ancak orbitallerde bulunan elektron etkileşmesi sonucu üretilemez çünkü kararlı bir atomun sahip olduğu orbitaller arası enerji farkı gama fotonlarının sahip olabileceği asgari enerji seviyesini karşılamaz. Genellikle kararsız çekirdeklerin fazla enerjiden kurtulma amaçlı yaptığı bozunmalar sırasında ortaya çıkar yani, x-ışınlarından farklı olarak, kaynağı orbital elektronlar değil çekirdektir. Yine de x-ışınlarına benzer şekilde enerji yüklü parçacıkların ağır atomlar ile etkileşmesi sonucu yapay olarak üretilebilir ama bu durumda parçacık başına düşen enerjinin x-ışını

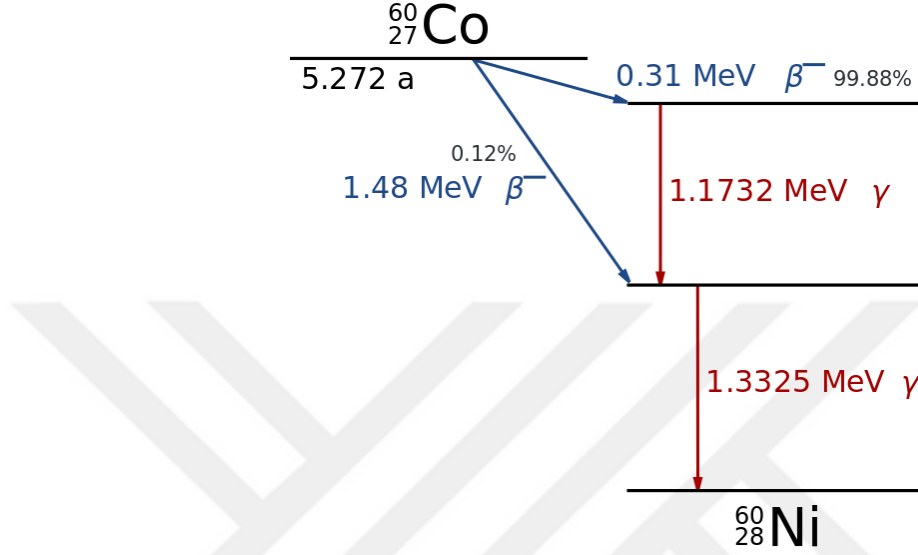
üretiminde gereken enerjiden daha fazla olması gerekmektedir. Yapay gama ışını üretmek için parçacık hızlandırıcı ile ışık hızına yakın hızlara sahip elektronlar üretilir ve elektronlar tungsten gibi ağır metal hedefler ile çarpıştırılır. Şekil 2.4’de enerji yüklü elektronların patikaları, çekirdeğin oluşturduğu elektrik alanından etkilenerek değiştiği gösterilmiştir. Elektron bu ivmeli hareketi sonucu enerji kaybeder ve bu enerji bremsstrahlung ışınması diye adlandırılan gama fotonları tarafından sistem dışına taşınır (Krane 1988, Ishii 2006).



Şekil 2.4 Yüksek enerjili elektronun, pozitif yüklü çekirdeğin elektrik alanından etkilenip ivmeli hareket gerçekleştirilmesi ile üretilen bremsstrahlung, çekirdek kırmızı küre, elektron mavi küre, elektronun izlediği patika siyah çizgili çizgi ve radyasyon yeşil kıvrımlı ok ile gösterilmiştir (Wikipedia Diagram of Bremsstrahlung Production 2022)

Gama ışınları bozunan kararsız çekirdekler tarafından doğal olarak üretilebilir, böyle durumlarda çekirdek kararlı daha hale ulaşmak için α veya β ışınması yaparak nükleon sayısını kararlı daha hale getirir, ancak çekirdek sahip olduğu fazla enerjinin tamamından kurtulamayabilir. Bu durumda oluşan izotopa uyarılmış izotop denir, izotop nükleer dengeye sahip olsa da nükleonların konumları veya dizilimleri nedeniyle fazladan enerjiye sahip olur ve bu enerjiden gama fotonu formunda kurtulur. Şekil 2.5’de kobalt 60 (^{60}Co) izotopunun kararlı hale gelmek için, % 99,88 olasılık ile, 0,31 veya, % 0,12 olasılık ile, 1,48 MeV kinetik enerji yüklü β^- parçacığı atarak atom

numarasını bir arttırır. Her iki durumda da tam olarak kararlı duruma geçemeyen uyarılmış nikel 60 ($^{60}\text{Ni}^*$), %99,88 olasılıkla 1,1732 ve her zaman 1,3325 MeV enerji sahibi gama fotonu üretir (Turner 2007).

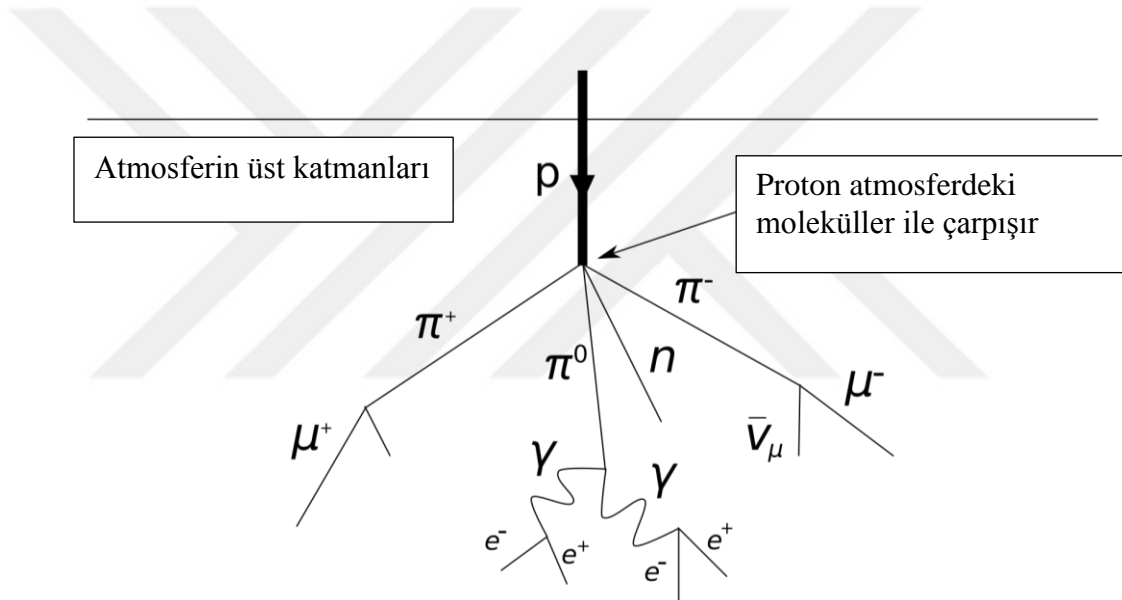


Şekil 2.5 ^{60}Co izotopunun kararlı hale gelmek için, % 99,88 olasılık ile, 0,31 MeV veya, % 0,12 olasılık ile, 1,48 MeV kinetik enerji yüklü β^- parçacığı atarak atom numarasını bir arttırır. Her iki durumda da tam olarak kararlı duruma geçemeyen uyarılmış $^{60}\text{Ni}^*$, %99,88 olasılıkla 1,1732 MeV ve % 100 olasılık ile 1,3325 MeV enerji sahibi gama fotonu üretir. (Wikipedia Decay Scheme of Cobalt-60 2022)

2.1.2.5 Kozmik radyasyon

Kozmik ışınlar çoğunlukla hidrojen çekirdeği olmak üzere tamamen iyonlaşmış ve ışık hızına yakın hızlar ile hareket eden atomik çekirdeklerdir. Bu radyasyonun başlıca üç kaynağı bulunmaktadır, Güneşimiz, kendi galaksimiz ve diğer galaksiler. Dünyanın atmosferine ulaşan enerji yüklü parçacıkları atmosferde bulunan atomlar ile çarpışarak ikincil parçacık yağmurları oluşturular, ikincil parçacıkların bazıları yeryüzüne kadar ulaşmayı başarsa bile büyük çoğunluğu magnetosfer ve heliosfer (Güneş sistemi dışından gelen parçacıklar için) tarafından saptırılır (Sharma 2008).

Dünya atmosferinin dışından gelmekte olan, birincil kozmik parçacıkların %99 kadarı elektronların kabukları soyulmuş çıplak atom çekirdekleridir, kalan %1'i ise yalnız elektronlardır (β parçacığı). Çıplak atom çekirdeklerinin yaklaşık %90'ı yalnız proton (hidrojen çekirdeği), %9'u α parçacığı (helyum-4 çekirdeği) ve kalan %1 daha ağır elementlerin çekirdeklerinden oluşur. Bu parçacıkların neredeyse tamamı yıldız rüzgarları veya süpernova patlamaları ile yıldızların içeriğini oluşturan parçacıkların uzaya dağılması ile oluşmaktadır ve enerjileri 10 GeV'den 10^{11} GeV'e kadar dağılım gösterebilir. Şekil 2.6'da Atmosfer dışından gelen birincil kozmik parçacık ile atmosferin üst katmanlarında bulunan atomların çarpışması sonucu oluşabilecek etkileşimler ile üretilen ikincil parçacık yağmuru gösterilmiştir (Dembinski 2018).

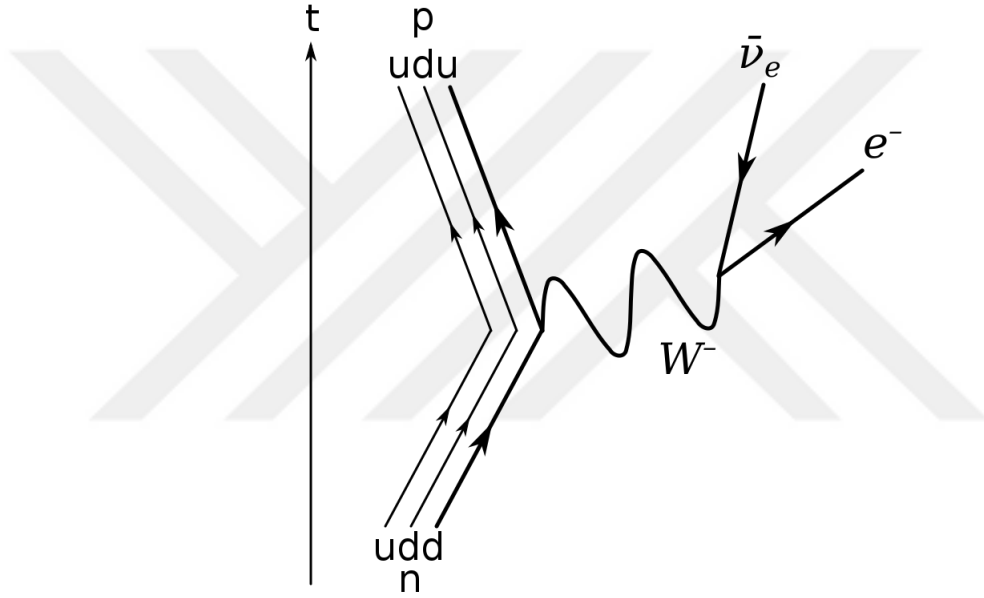


Şekil 2.6 Atmosfer dışından gelen birincil kozmik parçacık atmosferin üst katmanlarında bulunan atomlar ile yaptığı çarpışma ve çarpışma sonucu oluşan ikincil parçacık yağmuru (Wikipedia Diagram of Cosmic Particle Interactions 2022)

2.1.2.6 Nötron radyasyonu

Nötron (n) çekirdeğin yapısına katılan yüksüz bir hadron (kompozit atom altı parçacık) türüdür. Yalnız başına kararsız olan nötron 887 saniyelik yarı ömür ile birer proton (p),

elektron (e^-) ve elektron antinötrinosuna ($\bar{\nu}_e$) parçalanır. Yüksüz olduğu için doğrudan elektronlar ile etkileşerek atomları iyonlaştırması olasılığı çok düşüktür, ancak atomların çekirdekleri ile etkileşerek yeni izotoplar oluşturması olasılığı çok yüksektir. Yeni izotop uyarılmış haldedir ve sahip olduğu fazla enerjiyi γ , β ve/veya α bozunumu ile atar. Bu oluşan ikincil radyasyon iyonlaştırıcı etkiler gösterdiğinden doğrudan olmayan iyonlaştırıcı radyasyon olarak adlandırılır. Şekil 2.7'de yalnız bir nötronun feynman diyagramı ile β bozunması gösterilmiştir (Choi vd. 2008, Yue vd. 2013).



Şekil 2.7 Nötronun β bozunması gösteren feynman diyagramı, u; $+\frac{2}{3}$ yüklü yukarı kuark, d $-\frac{1}{3}$ yüklü aşağı kuark, W^- ; -1 yüklü W bozonu (Wikipedia Feynman Diagram for Beta Decay of The Neutron 2022)

Normal şartlarda doğada bulunan kararsız bir çekirdek kendiliğinden serbest nötron bozunumu yapmaz, ancak çekirdeğin başka bir parçacık ile çarpışmasıyla kararsız hale gelen çekirdekler nötron fırlatabilirler. Örnek olarak berilyum-9 (^9Be) izotopu 1,7 MeV ve üzeri enerjiye sahip γ -fotonu veya α -parçacığı ile çarpıştığında kararsız hale geçerek nötron fırlatır. α -parçacığı ortalama serbest yolu (mean free path) çok kısa bir radyasyon olduğu için yüksek verimli nötron kaynağı için daha iyi bir parçacıktır. Yüksek verimli nötron kaynağı, bozunma şemasında α -bozunması olan izotop ile berilyum karıştırılarak

elde edilebilir. En sık kullanılanları PuBe (plütontum-berilyum) ve AmBe (amerisyum berilyum) şeklindedir (Turner 2007).

2.2 Radyasyon Madde Etkileşimleri

Radyasyon fiziği, iyonlaştırıcı radyasyon ile madde arasında gerçekleşen etkileşimleri, bu etkileşimler sonucu oluşan parçacıkları ve radyasyon yoluyla çevreye aktarılan enerjinin aktarımını inceleyen fizik alanıdır. Radyasyon, elektromanyetik dalgalar veya atom altı parçacıklar şeklinde bir vakum veya maddesel bir ortamda enerji ve madde alışverişi anlamına gelen enerji emisyonu olarak tanımlanabilir. Başka bir deyişle, radyasyon ortamlar arasında hareket halindeki enerji olarak kabul edilir (Fernández vd. 2019).

Radyasyonun madde ile etkileşimleri radyasyonun çeşidine ve sahip olduğu enerjisine göre değişiklik göstermektedir. Örnek olarak elektromanyetik radyasyonun dalga-boyu atomun çapına yakın ise ($\lambda = 10^{-10}$ m civarı) fotoelektrik etki (elektron koparma) veya Compton saçılması yapma olasılığı fazla iken, dalga-boyu çekirdek boyutlarında olduğunda fotonun çekirdek tarafından emilmesi gibi nükleer etkileşimler gerçekleşerek çekirdeğin kararlı yapısı bozulabilir. Daha yüksek enerjilere sahip fotonlar (dalga-boyu çekirdekten daha küçük) ise doğrudan çekirdekteki nükleonlar (çekirdeği oluşturan hadronlar) ile etkileşerek bu nükleonları çekirdekten koparabilir ($\text{Be}(\gamma, n)\text{He}$). Genel olarak; her etkileşimin belirli bir gerçekleşme olasılığı vardır. Bu olasılık radyasyonun çeşidine, temel özelliklerine ve enerjisine bağlıdır (Al-Okour 2021).

Radyasyon ve madde standart modele dahil üç temel kuvvet ile etkileşim gösterirler. Hangi etkileşimin gerçekleşeceği parçacıkların sahip olduğu temel özellikler (elektrik yükü, spin), enerji ve aralarındaki mesafe gibi etkenlere göre değişiklik gösterebilir (Huang 2007, Braibant vd. 2011).

2.3 Radyasyon Hasarı

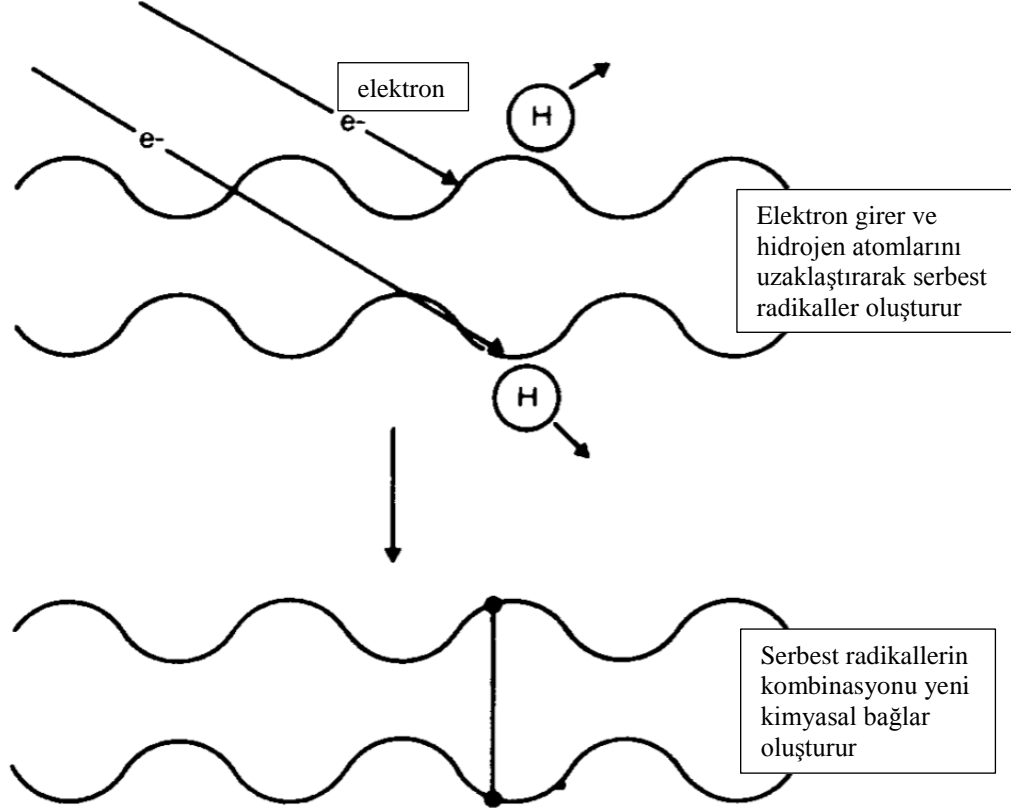
Yüksek enerjili radyasyon, maddesel ortam ile etkileşime girerek malzemenin yapısal özelliklerini değiştirebilir ve malzemeye kalıcı veya geçici hasar verebilir. Bu durum malzemede gözle görülemeyen minör etkilerde bulunabilir iken, malzemenin erime sıcaklığı, elektrik-ısı iletimi, yoğunluğu ve mukavemeti gibi major özelliklerini değiştirerek kullanım kriterlerinin dışına çıkmasına neden olabilir. Bu nedenle radyasyon hasarı özellikle nükleer reaktör tasarımlarında pratik öneme sahiptir (Slater 1951, Tan vd. 2013).

2.3.1 Radyasyon hasarının kimyasal sonuçları

Yüksek enerjili radyasyon atomların orbitallerinde bulunan elektronlara enerji aktararak elektronların atomdan kopmasına yol açar ve iyonlar oluşturur. Bu durum hali hazırda var olan kimyasal bağları kırabilir ve çevrede oluşan iyonlar kendi aralarında etkileşerek rastgele yeni kimyasal bağların oluşmasına sebep olabilir. Biyolojik moleküllerin kimyasal yapılarında yaşanan değişim hastalıklara ve doku ölümü gibi stokastik ve deterministik etkilere yol açabilir (Christensen vd. 2014).

Polimer yapıya sahip uzun moleküllerden (elastomer) oluşan araba lastiği, birbirleri üzerinden kayabilen esnek ve yumuşak bir yapıya sahiptir. Bu özellikler sürtünmeyi artırıcı etkilere sahip olduğu için yol tutuşunu artırma gibi olumlu etkilere neden olsa da sıcaklık ve uzun süreli kullanım gibi faktörlerin oluşturduğu plastik esneklik, olumsuz etkilerin daha baskın hale gelmesine neden olur. Bu durumun dengelenmesi için yapılan deneylerde polimer yapı MeV mertebesinde enerjiye sahip elektronların bombardımanına maruz bırakılır. Elektronlar uzun moleküllerde bulunan karbon-hidrojen bağlarının kopmasına yol açar, karşılıklı polimerlerde oluşan serbest radikaller çapraz bağlara sebep olur. Bu şekilde moleküllerin birbiri üzerinden kayması zorlaşır ve lastik daha elastik bir esnekliğe sahip olur, yani kalıcı şekil kaybı yaşaması için gereken kuvvet görece olarak artar. Daha yüksek miktarlarda doz uygulandığında polimerler arası çapraz bağlar polimerin daha da sertleşmesine yol açarak, kırılma bir hale gelmesine neden olabilir. Şekil 2.8'de gösterilen diyagram enerji yüklü elektronlar ile etkileşen iki

polimerin birbirleri arasında yaptığı çapraz bağı simgelemektedir (Mohammed ve Walker 1986).

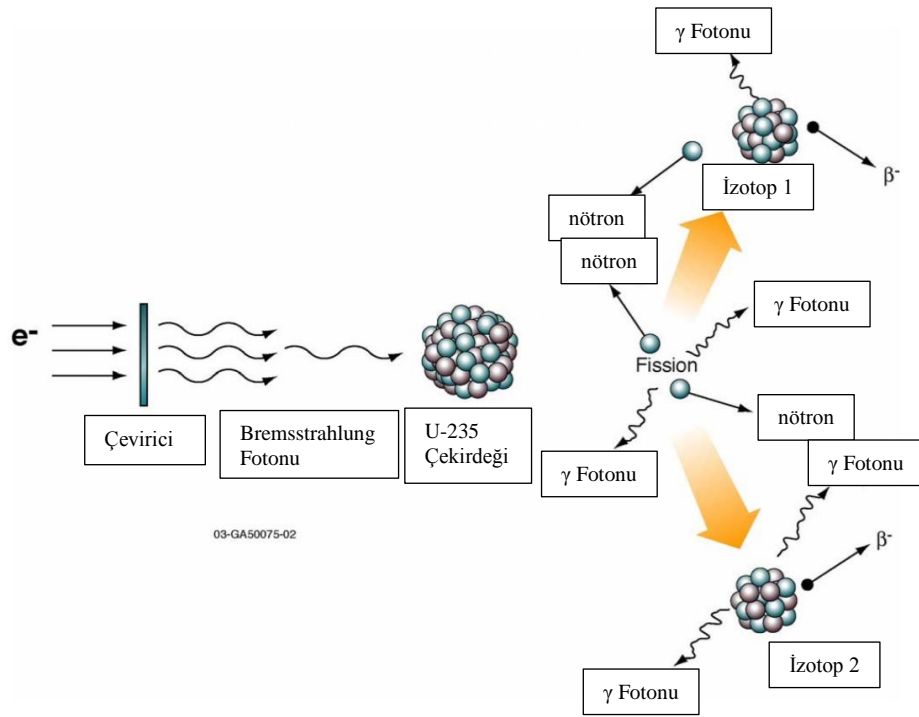


Şekil 2.8 Işınlanma sonrası polimerler arası oluşan çapraz bağ mekanizması (Mohammed ve Walker 1986)

2.3.2 Radyasyon hasarının nükleer sonuçları

Yüksek enerjiye sahip foton veya parçacık bir çekirdek tarafından emilirse uyarılmış duruma geçer, sahip olduğu enerji nükleon bağlanma enerjisinden fazla ise çekirdekten proton, nötron veya α -parçacığı salınmasına neden olabilir. Demirden daha hafif izotoplar için bu nükleer etkileşim endotermik iken daha ağır izotoplarda ekzotermik olabilir ve gerekli eşik enerjisi izotopun çeşidine bağlı değişiklik gösterebilir; örneğin foto-parçalanma (foton emilimi ile parçalanma) berilyum-9 (${}^9\text{Be}$) için bu enerji 1,67 MeV iken karbon-12 (${}^{12}\text{C}$) için 18,72 MeV'dir. Parçalanma sırasında α veya proton salınımı sonucu çekirdeğin proton sayısında yaşanan değişiklik kimyasal değişimlere

neden olacağından dışarıdan görülebilen major değişimlere neden olabilir. Atomik ağırlığı 200 akb'den (atomik kütle birimi) fazla olan izotoplar için fisyon bariyeri aşıldığı takdirde çekirdeğin yakın kütleli iki farklı izotopa bölünmesi de olasıdır, fisyonun tetiklenmesi foton tarafından sağlanır ise bu reaksiyona foto-fisyon denir. Uranyum-238 (^{238}U) için fisyon bariyeri 6,5 MeV iken toryum-232 (^{232}Th) için 6,3 MeV'dir. Elektron demeti ve metal hedef kullanılarak üretilen bremsstrahlung fotonları ile fisyon tetikleme diyagramı Şekil 2.9'da gösterilmiştir (Dickey ve Axel 1975, Clayton 1984).

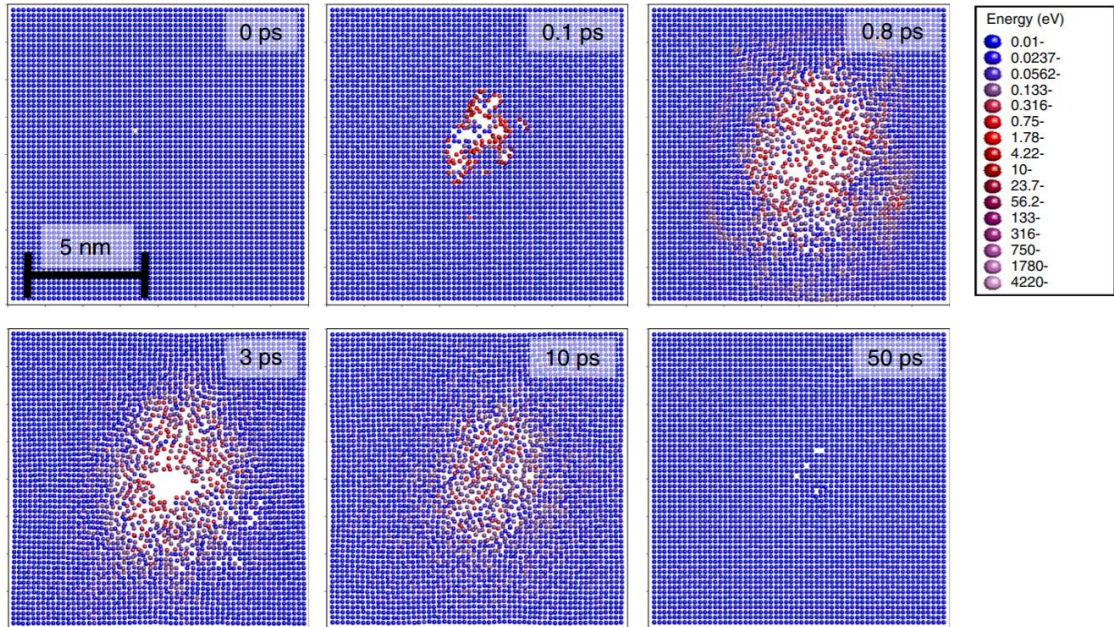


Şekil 2.9 Yüksek enerjili bremsstrahlung fotonları ile tetiklenen ^{235}U fisyonu (Norman vd. 2005)

2.2.3 Radyasyon hasarının termal sonuçları

Radyasyonun çekirdek ile çarpışması sonucu momentum paylaşımı, durağan çekirdeğin yerinden koparılacak çevre çekirdekleri de yerlerinden oynatması ile malzeme üzerinde doğrudan major hasarlar oluşturur. Bu durum özellikle hafif atomlardan oluşan katı yapıları etkiler. Yapılan simülasyonlar neticesinde, çarpışma anında aktarılan kinetik enerji, bir pikosaniye içerisinde öncelikle tek bir çekirdeğin yerinden koparılmasına ardından bu çekirdeğe komşu çekirdeklerin de kısa mesafelerde hareket ederek yolları

üzerindeki çekirdekleri de yerlerinden kopardığı bir çığ etkisi oluşturmasına neden olur. Yaklaşık 50 pikosaniye sonunda çarpışmanın oluşturduğu sıcaklık normal seviyeye geriler ve parçacıkların hareketi durur ancak ilk çarpışmanın gerçekleştiği bölgede atom yoğunluğunun daha az olduğu boşluklar ve çevrelerinde düzensiz öbekler ortaya çıkar. Madde yapısındaki bozulmalar malzemenin dayanıklılık, ısıl ve elektrik iletkenliği ve şeffaf malzemeler için geçirgenlik kaybı gibi etkenlere sebep olabilir. Şekil 2.10'da çarpışma sonucu oluşan çığ simülasyonu sonucu gösterilmiştir. Simülasyon için altın (Au) atomları kullanılmış ve ilk çarpışmayı simüle etmek için tek bir altın atomuna 10 keV kinetik enerji aktarılmıştır (Was ve Andersen 2007, Wetzel vd. 2016, Nordlund vd. 2018).



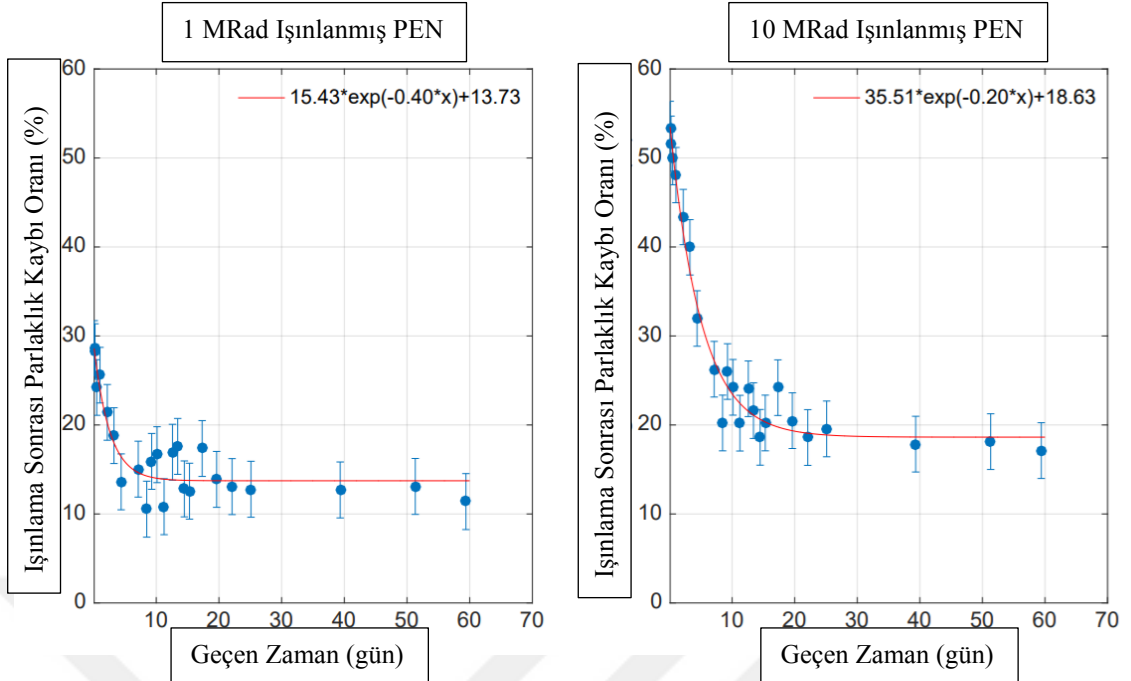
Şekil 2.10 Tek bir altın atomuna aktarılan 10 keV kinetik enerji ile ortaya çıkan çığ efekti simülasyonu sonucu belirli zaman aralıkları içerisinde verilmiş, atomların kinetik enerjileri renkleri ile gösterilmiş ve renk skalası sağ üstte bulunan lejantta gösterilmiştir (Nordlund vd. 2018)

2.4 Radyasyon Hasarının İyileşmesi

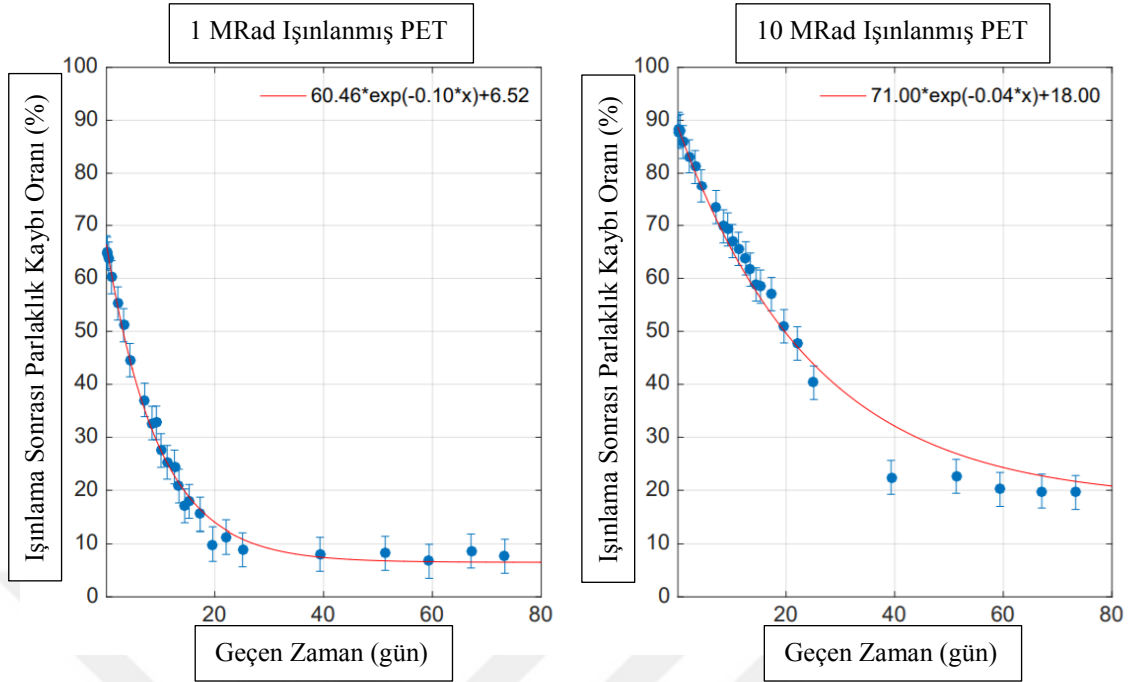
Yüksek doz ile ışınlanma sonrası radyasyonun malzeme üzerinde gözle görülebilir bozulmalara yol açtığı bilinmektedir. Organik yapıli sintilatörler uzun polimer moleküllere sahiptir, normal şartlarda içerisine giren radyasyon parçacığının enerjisini

soğurarak görülebilir spektrumda ışık yayarlar ancak yüksek dozda radyasyona maruz bırakılmak sintilatörün opaklaşmasına ve ışık verimliliğinin (parçacığın enerjisine bağlı üretilen foton sayısı) azalmasına yol açar. Denede kullanılan sintilatörler dahil bazı şeffaf malzemeler radyasyon hasarı sonrası yaşanan ışık geçirgenliği kaybını kısmen geri kazanabilirler, bu durumun potansiyel nedeni hakkında birkaç teori bulunmaktadır. Örneğin ışınlanma sonrası foto-parçalanma ile oluşan yeni radyonüklidler görünür ışığı soğuran kimyasal bağlar kurabilir veya malzeme içerisinde oluşan boşluk ve öbekler ışığın geçmesini engelliyor olabilir. Radyonüklidlerin bozunmasıyla veya oluşan boşluk ve öbekler zamanla eski hallerine gelmesiyle malzeme ışık geçirgenliğini geri kazanıyor olabilir (Wetzel vd. 2016, Nordlund vd. 2018).

Yakın tarihli bir deneyde polietilen naftalin (PEN) ve polietilen tereftalat (PET) malzemelerden üretilmiş sintilatörler 1 ve 10 Mrad doz ile ışınlanmış ve kendi kendilerine iyileşmeleri ile sintilasyon verimleri morötesi lazer ile ölçülmüş ve zamana bağlı hasar grafikleri çıkarılmıştır. Şekil 2.11'de 1 ve 10 Mrad doza maruz bırakılmış PEN örneklerin zamana bağlı hasar (parlaklık kaybı yüzdesi) grafikleri, Şekil 2.12'de 1 ve 10 Mrad doza maruz bırakılmış PET örneklerin zamana bağlı hasar grafikleri verilmiştir.



Şekil 2.11 1 Mrad (solda) ve 10 Mrad (sağda) doza maruz bırakılmış PEN örneklerin zamana bağlı hasar (parlaklık kaybı yüzdesi) grafikleri ve veriye uygulanan fit (Wetzel vd. 2016)

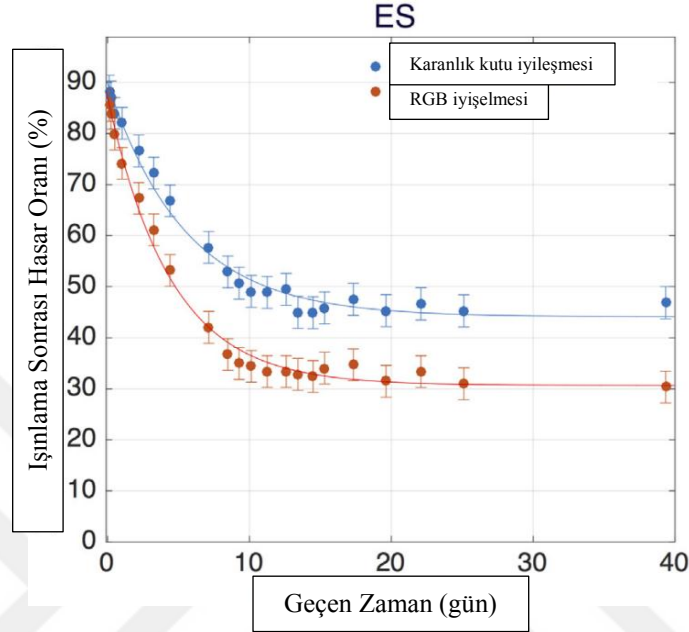


Şekil 2.12 1 Mrad (solda) ve 10 Mrad (sağda) doza maruz bırakılmış PET örneklerin zamana bağlı hasar (parlaklık kaybı yüzdesi) grafikleri ve veriye uygulanan fit (Wetzel vd. 2016)

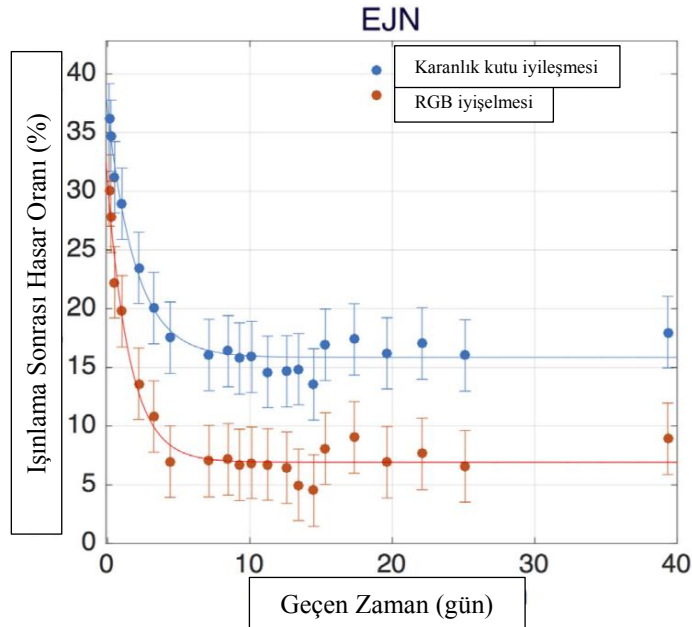
2.5 İyileşme Sürecini Etkileyen Etmenler

Bazı malzemeler radyasyon hasarı nedeniyle değişen özelliklerini geçen zaman ile kısmen veya tamamen geri kazanabilir. Deneylede görüldüğü gibi polimer yapıya sahip ve şeffaf sintilatör malzemeler, radyasyon hasarı sonucu moleküler yapılarında oluşan değişimler nedeniyle ışık geçirgenliği özelliklerini kısmen kaybedebilirler. Esnek moleküler bağlara sahip bazı malzemeler kendi kendilerine bu özelliklerini geri kazanabilirler. Güneş ışığı ile dolaylı temas halinde olan hasarlı sintilatör malzemelerin karanlık kutuda bekletilen örneklerden daha hızlı iyileştiği gözlemlenmiş ve ışık ile uyarılma fenomenini sağlama amaçlı yapay ışık kullanılarak örnekler uyarılmıştır. Yapılan deneylerde elastomer sintilatör (ES), Eljen marka EJ-260 (EJN) ve EJ-260 sintilatörün ömrünü uzatma amaçlı $PbWO_4$ (kurşun tungsten tetra-oksit) ile katkılanmış versiyonu EJ2P 78 kGy doz ile ışınlanmış ve bir grup karanlık kutuda bekletilir iken diğer grup RGB (kırmızı, yeşil ve mavi ışık üreten) LED ile uyarılmıştır. Deney sonrası düzenli olarak morötesi lazer tutulan örneklerin ürettiği ışık ölçülmüş ve ışınlanmamış örnekler ile karşılaştırılmıştır. Böylece 3 farklı sintilatör grubunun karanlık kutuda bekletilen ve RGB LED'ler ile uyarılan verileri karşılaştırılarak iyileşme durumları 40

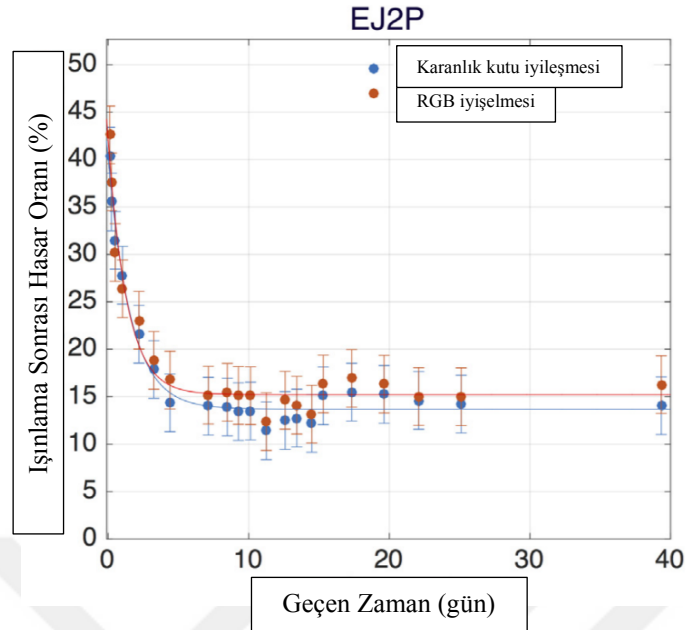
gün boyunca kaydedilmiştir. Karanlık kutu grubu ve RGB LED grubu örneklerinin ışınlanma sonrası aldığı hasarın zamana bağlı grafikleri sırasıyla; ES için Şekil 2.13’de, EJN için Şekil 2.14’de ve EJ2P için Şekil 2.15’te verilmiştir (Wetzel vd. 2017).



Şekil 2.13 ES karanlık kutu (mavi) ve RGB LED (kırmızı) örneklerinin ışınlanma sonrası aldığı hasarın zamana bağlı grafiği (Wetzel vd. 2017)



Şekil 2.14 EJN karanlık kutu (mavi) ve RGB LED (kırmızı) örneklerinin ışınlanma sonrası aldığı hasarın zamana bağlı grafiği (Wetzel vd. 2017)

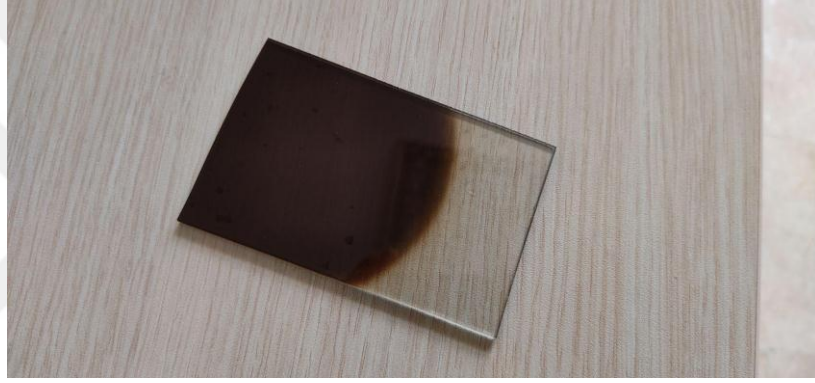


Şekil 2.15 EJ2P karanlık kutu (mavi) ve RGB LED (kırmızı) örneklerinin ışınlanma sonrası aldığı hasarın zamana bağlı grafiği (Wetzel vd. 2017)

3. MATERYAL VE YÖNTEM

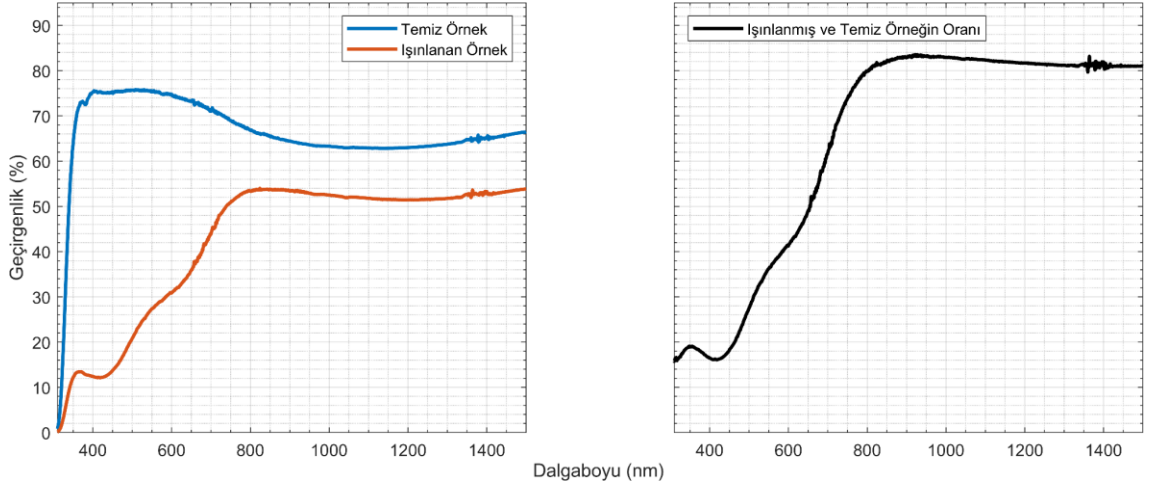
Tez kapsamında gerçekleştirilen deney başlıca ışınlanmış şeffaf örneklerin gördüğü radyasyon hasarının incelenmesi ve hasarın iyileşmesini hızlandıran yöntemlerin test edilmesi üzerine kurulmuştur.

Şekil 3.1’de azami enerji seviyesi 20 MeV olan gama fotonları ile ışınlanmış pencere camı gösterilmektedir. Kullanılan örnek sabit gama demeti altında 45 dakika tutularak yaklaşık 3,5 kGy doza maruz bırakılmıştır.



Şekil 3.1 Radyasyon hasarının şeffaf malzemeler üzerindeki hasarın incelenmesi için hazırlanan örnek

Işık geçirim grafiği Şekil 3.2 ile verilen temiz ve ışınlanmış örneklerin geçirim spektrumu (solda) ve bu spektrumların birbirine olan oranı (sağda) gösterilmiş, bu şekilde radyasyon hasarının etkileri net bir şekilde görülebilir hale getirilmiştir.



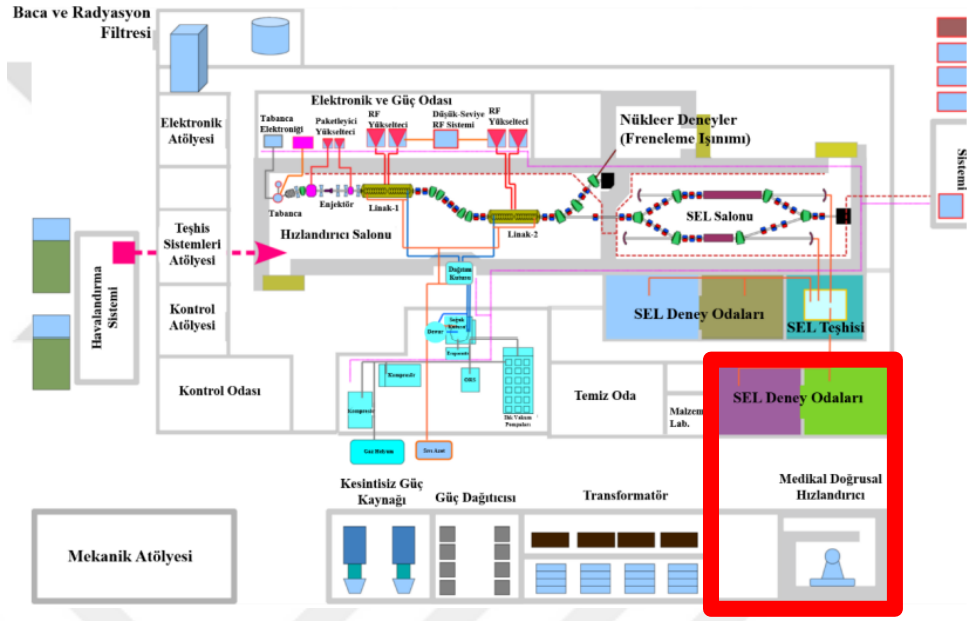
Şekil 3.2 Temiz örnek ile ışınlanmış örneklerin aynı grafikte gösterimi (solda) Temiz örnek ve ışınlanmış örnek arasında oranlama ile hesaplanmış bağlı geçirgenlik kaybı (sağda)

Şekil 3.1 ve Şekil 3.2 de gösterildiği üzere yüksek dozda radyasyonun cam üzerinde ışık geçirgenliğinde yaşanan kayıp gibi gözle görülebilir etkileri olmaktadır. Bazı malzemelerin sahip olduğu yapısal özellikleri sayesinde, bu gibi etkiler malzemenin moleküler gevşemeleri veya güneş ışığı gibi uyarılar nedeniyle yavaşça azalır.

Gerçekleştirilen deneyde farklı LED ışık kaynakları kullanılarak, uyarıcı ışığın dalga boyunun, örneklerdeki radyasyon hasarına bağlı oluşan geçirgenlik kayıpları üzerindeki etkileri incelenmiştir. Bu etkilerin iyileşme hızı ve kalıcı hasar üzerinde ne gibi etkileri olduğu incelenmiştir.

3.1 Deney Düzenegi ve Tasarımı

Deney düzenegi toplamda 4 ana bölümden oluşmaktadır. Bu bölümlerden ilki Şekil 3.3'te gösterilmiş olan, TARLA (Türk Radyasyon ve Hızlandırıcı Laboratuvarı) bünyesinde bulunan Medikal LINAC'tır (Doğrusal Hızlandırıcı) ve örneklerin ışınlanması için kullanılmıştır. İkinci bölüm SEL (Serbest Elektron Lazeri) deney odalarında bulunan Shimadzu UV-3600 Plus UV-VIS-NIR model spektrometredir ve ışınlanmış örneklerin başlangıç geçirgenlikleri ve deney süresince geçirgenlikte oluşan değişimleri ölçmek amacıyla kullanılmıştır.



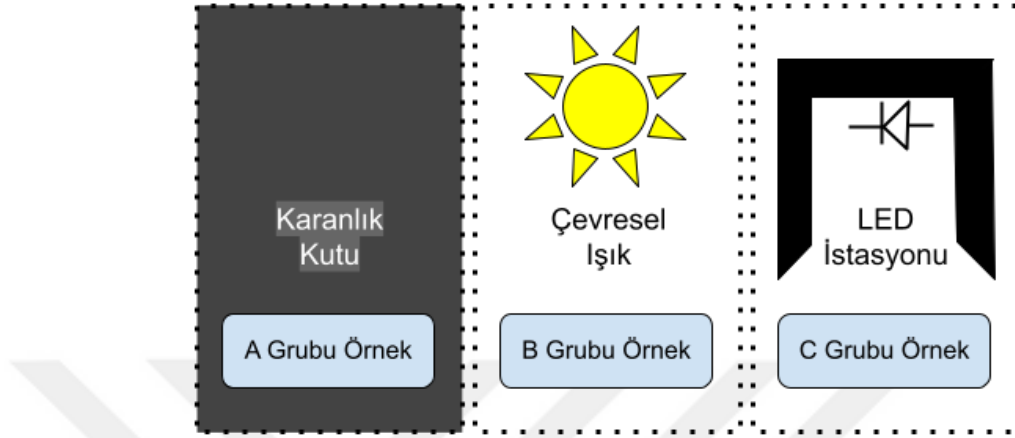
Şekil 3.3 TARLA tesisi şematik görüntüsü, SEL Deney Odaları ve Medikal Doğrusal Hızlandırıcı baskılanmıştır (Aksoy ve Karşlı 2015)

SEL Deney odalarında bulunan ve deneylerde ölçüm amacıyla kullanılan Shimadzu UV-3600 Plus UV-VIS-NIR spektrometre Şekil 3.4’te gösterilmiştir.

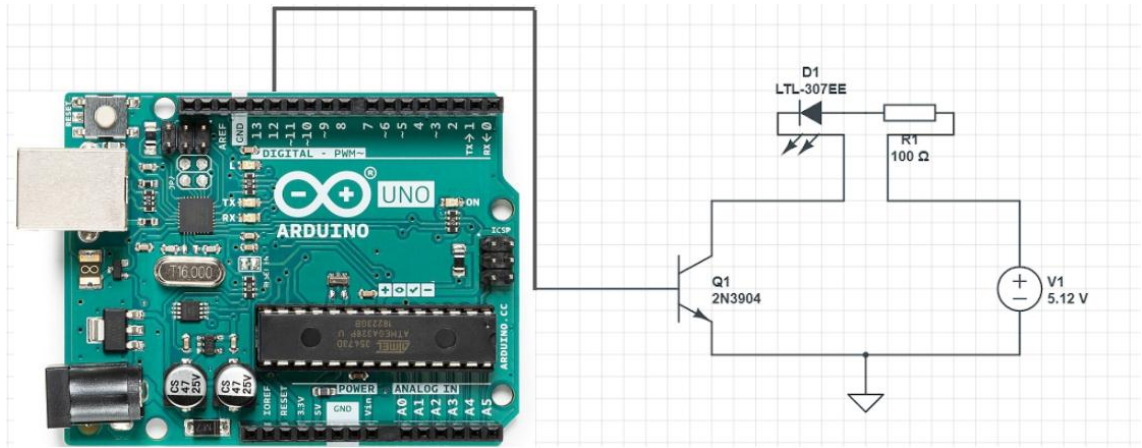


Şekil 3.4 Shimadzu UV-3600 Plus UV-VIS-NIR spektrometre 200 nm (morötesi) ile 2600 nm (yakın kızılötesi) ışık tayfları arasında kaynağa ve bu aralığa duyarlı foton dedektörlerine sahip bir ölçüm aletidir. Ölçüm alanındaki parçaları modifiye edilerek, örneğin geçirgenlik (transmittance) veya yansıma (reflectance) spektrum ölçümleri yapılabilir. (Shimadzu Analytical Instrumentation 2021)

Diğer iki ana bölüm ise Şekil 3.5 ve Şekil 3.16’da gösterilmiş olan, deney için tasarlanmış ve TARLA, TÜBİTAK imkanları ile imal edilmiş olan iyileştirme istasyonları (kısaca istasyonlar) ve istasyonlara enerji sağlayan kare dalga üreticidir.



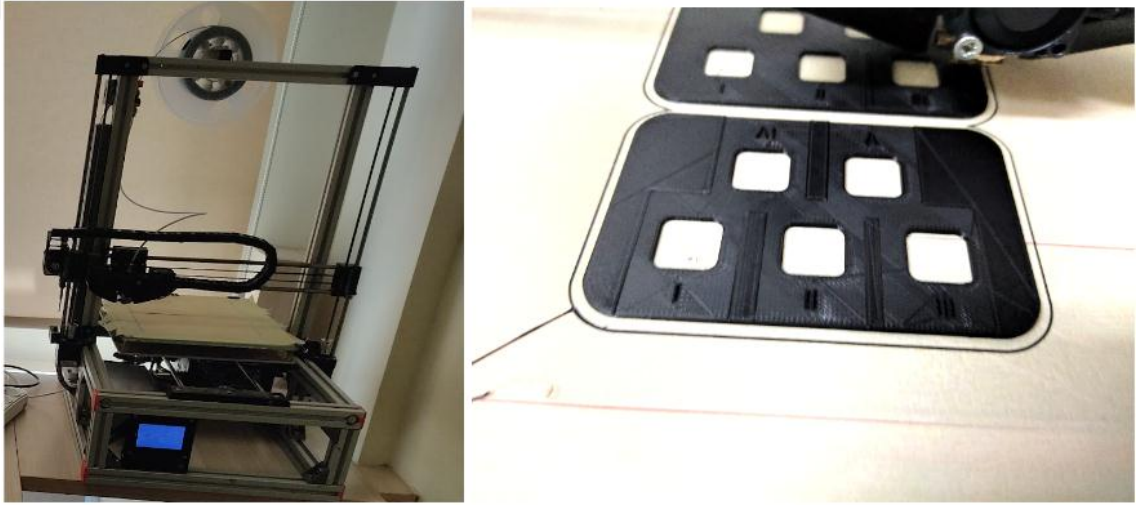
Şekil 3.5 Hazırlanan örneklerin uğradığı ışık geçirimi kaybının iyileştirilmesi için kullanılan ortamlar. A ve B grubu örnekler yüksek kontrollü bir ortamda olmamakla birlikte malzemenin doğal yöntemler ile iyileşmelerini temsil etmektedir, C grubu örnekler ise ışık geçirmeyen ve sıcaklık kontrolü olan bir ortamda bulunur ancak belirli dalga-boyuna sahip LED’ler ile etkileşimine izin verilir. Bu LED’ler 2 grup halinde LED istasyonu-1 ve LED istasyonu-2 şeklinde adlandırılmış yapılara yerleştirilecektir



Şekil 3.6 Programlanabilir işlemci, 2 amper akım kapasiteli N-kanal mosfet ve 5 V DC (doğru akım) kaynağından oluşan ev yapımı kare dalga üreticisi (Arduino Uno Teknoloji 2022)

3.2 Parçaların Üretimi

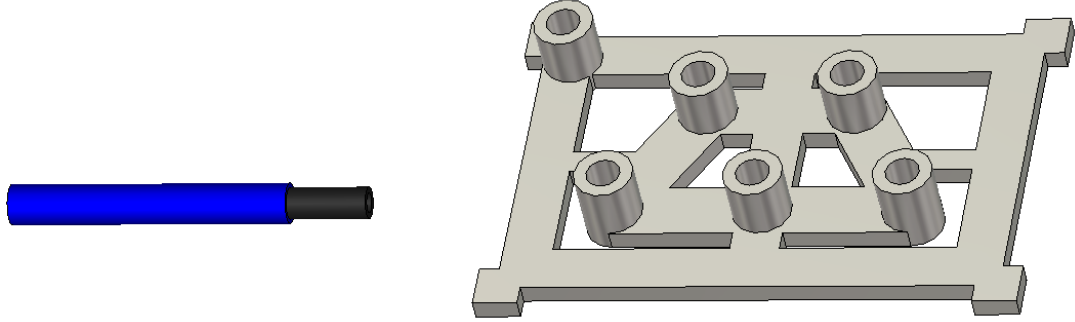
LED istasyonunu ve kare dalga üreticini yapmak için kullanılan parçalar deney için tasarlanmış ve farklı metodlar ile imal edilmiştir. 3 boyutlu yapı malzemeleri “CST Particle Studio” isimli program kullanılarak tasarlanmış ve .stl uzantılı 3B görsel formatında kaydedilmiştir. Ardından “Repetier Host” isimli program aracılığı ile işlenerek .gcode uzantılı dosyalara çevrilmiş ve Şekil 3.7’de gösterilmiş olan, TARLA çalışanları tarafından imal edilen, el yapımı 3 boyutlu baskı makinesi ile PLA (polilaktik asit) filament kullanılarak fiziksel formda üretilmiştir.



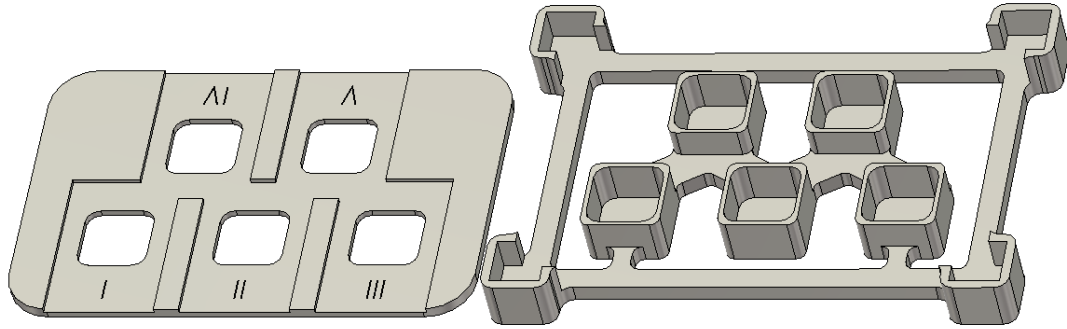
Şekil 3.7 Yapısal malzemelerin üretildiği el yapımı 3 boyutlu baskı makinesinin tüm görüntüsü (solda) ve deney için kullanılacak malzemeler (kılavuz maskesi) basılırken çekilen görüntüsü (sağda)

Deneyde farklı dalga-boylarında ışık üreten LED’lerin örneklerde yaşanan geçirgenlik kaybına olan etkileri incelenmektedir. Bu nedenle LED parlaklıklarının birbirlerine yakın olması deneyin sonuçlarında yaşanacak olan hataları azaltıcı bir faktördür. Bu nedenle malzemelerin yalnızca LED iyileştirme istasyonunun iskeletini oluşturacak şekilde değil, aynı zamanda kalibrasyonun insan hatasından azami ölçüde izole edilmesini sağlayacak şekilde tasarlanması ve üretilmesi gerekmektedir.

3 boyutlu yapısal malzemeler, Şekil 3.8 ve Şekil 3.9’da gösterilen, biri LED’lerin kalibrasyonu için tasarlanmış olup, diğer ikisi deney süresince kullanılacak kılavuz maskesi ve LED kafesini oluşturacak olan toplam 3 çeşit yapıdan oluşmaktadır.



Şekil 3.8 İyileşme istasyonunu oluşturan LED’lerin kalibrasyonunda kullanılacak Ocean Insight marka spektrometre fiber-optik ucu (solda) ve fiber-optik ucu incelenen LED üzerinde sabit tutan kalibrasyon kılavuzu (sağda)



Şekil 3.9 İyileşme ölçümleri yapılan örneklerle deney boyunca bağlı kalacak ve deney sırasında kullanılacak Shimadzu marka spektrometreye uygun şekilde tasarlanmış kılavuz maskesi (solda) ve LED’lerin yerleştirileceği kolimatörleri içeren ve aynı zamanda LED ile uyarım süresince örneği tutacak olan LED kafesi (sağda)

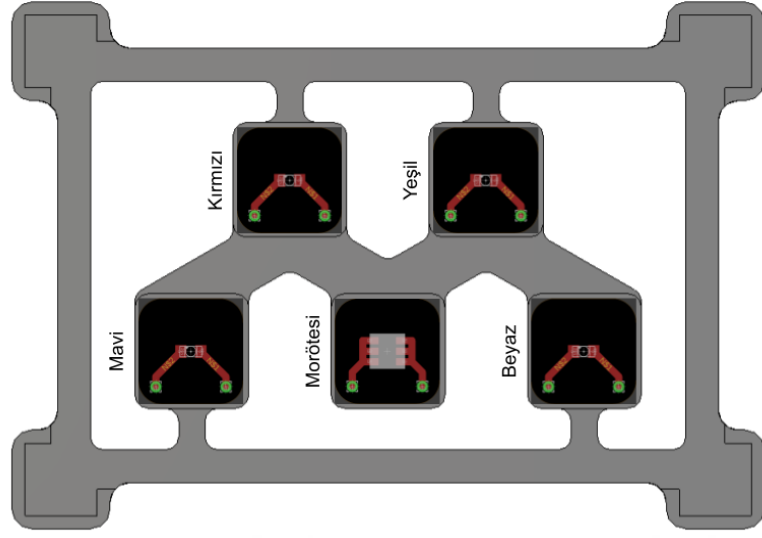
İyileşme istasyonunda morötesi, mavi, yeşil ve kırmızı olacak şekilde 4 adet tek bantlı LED ve çevresel ışığı sembolize etmek için 1 adet beyaz (çok bantlı) LED kullanılmıştır. Mavi, yeşil, kırmızı ve beyaz LED’ler SMD (Surface Mount Device) 1206 (yaklaşık 0,3 x 0,15 mm² alana sahip entegre çip elemanı) şeklinde olup, mor ötesi LED ise SMD 210 SOIC-6 (5,35 mm² alana sahip kare şekilli ve 6 ayaklı entegre çip elemanı) formasyonuna sahiptir.

Hem LED kalibrasyonunda kullanılacak dirençleri hem de LED kafesine yerleştirilecek olan LED kartları SMD formasyonuna sahiptir, yani devre kartı yüzeyine lehimlenerek sabitlenmeleri gerekir. Bu nedenle devrelerin PCB (Printed Circuit Board) olarak kazınması gerekmektedir. Bu işlem için önce PCB'ler "Eagle" isimli programda tasarlanmış ve .gbr uzantılı dosyalar ile Şekil 3.10'da gösterilen, TARLA bünyesinde bulunan LPKF ProtoMat S103 model PCB baskı makinası kullanılarak, bu tasarımlar fiziksel formda üretilmiştir.

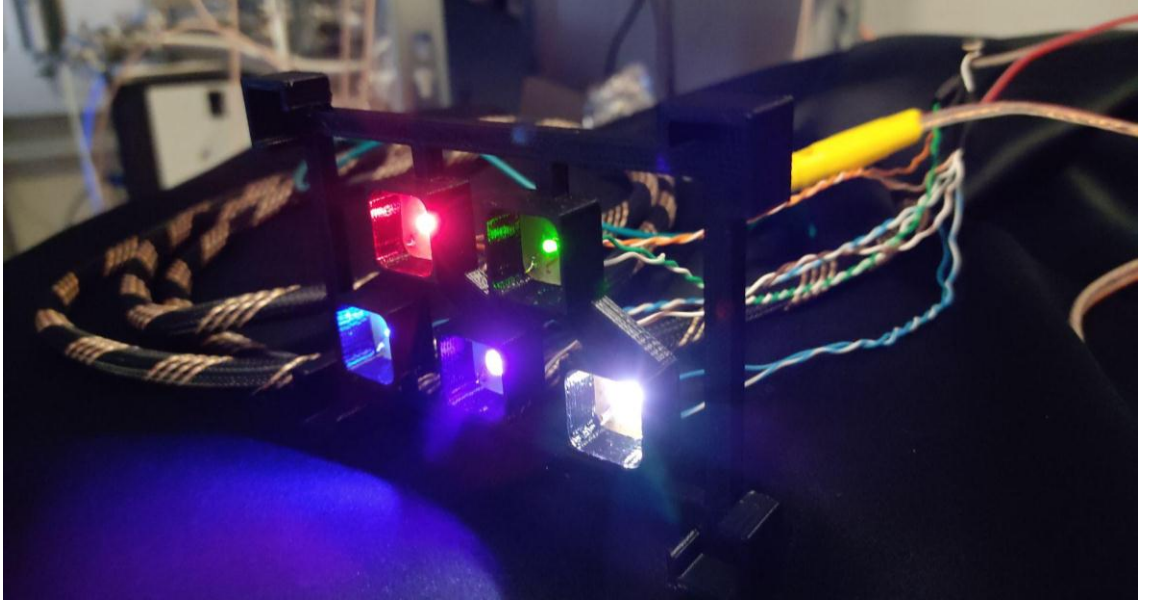


Şekil 3.10 LPKF ProtoMat S103 model baskı makinesi (solda) ve aynı makina kullanılarak deneme amacıyla devre basılırken çekilmiş fotoğrafı (sağda) (LPKF PCB Prototype Technology 2022)

LED kafesi üzerindeki 2 farklı formasyona sahip LED kartları ve bu kartların dizilimleri Şekil 3.11'de verilmiştir. Bir LED istasyonunun kalibrasyon öncesi fotoğrafı Şekil 3.12'de gösterilmektedir.

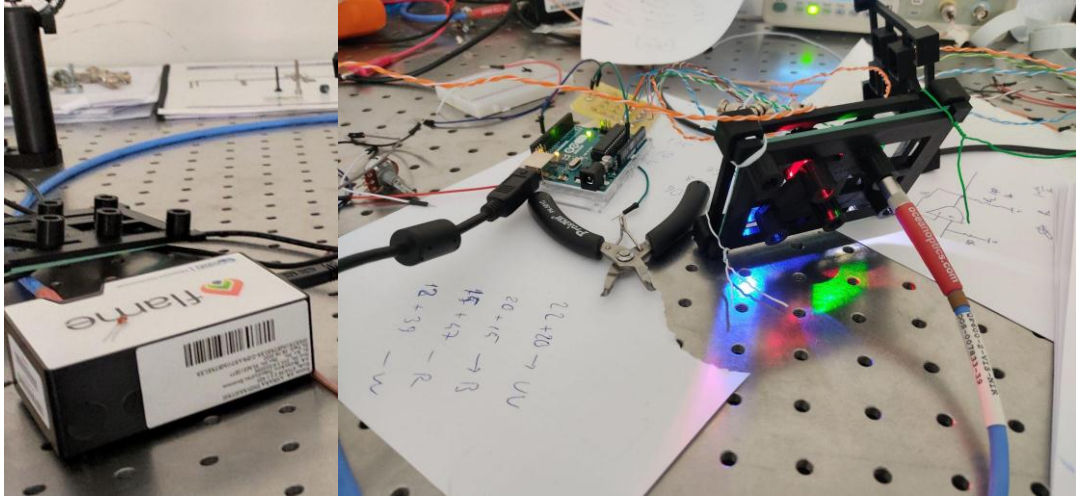


Şekil 3.11 Kolimatörleri ve LED kartlarını içeren LED kafesi. Dizilimler görselde şematize edildiği gibi olup, kolimatörler örnek cam yüzeyine değecek şekilde tasarlanmıştır



Şekil 3.12 LED kafesinin tamamlanmış halinin çalışır durumdaki çekilmiş fotoğrafı. LED'lerin tamamı çalışır durumda olmasına karşın henüz kalibre edilmemiştir, bu nedenle her LED'in parlaklığı farklıdır. Bu durum fotoğrafta yeşil LED'in çok soluk çıkmasının açıklamasıdır

LED kartları, LED kafesi ve kalibrasyon kılavuzu üretildikten sonra Şekil 3.13'de gösterildiği gibi birleştirilmiş ve Ocean Insight marka minyatür spektrometre ile kalibrasyon süreci gerçekleştirilmiştir.

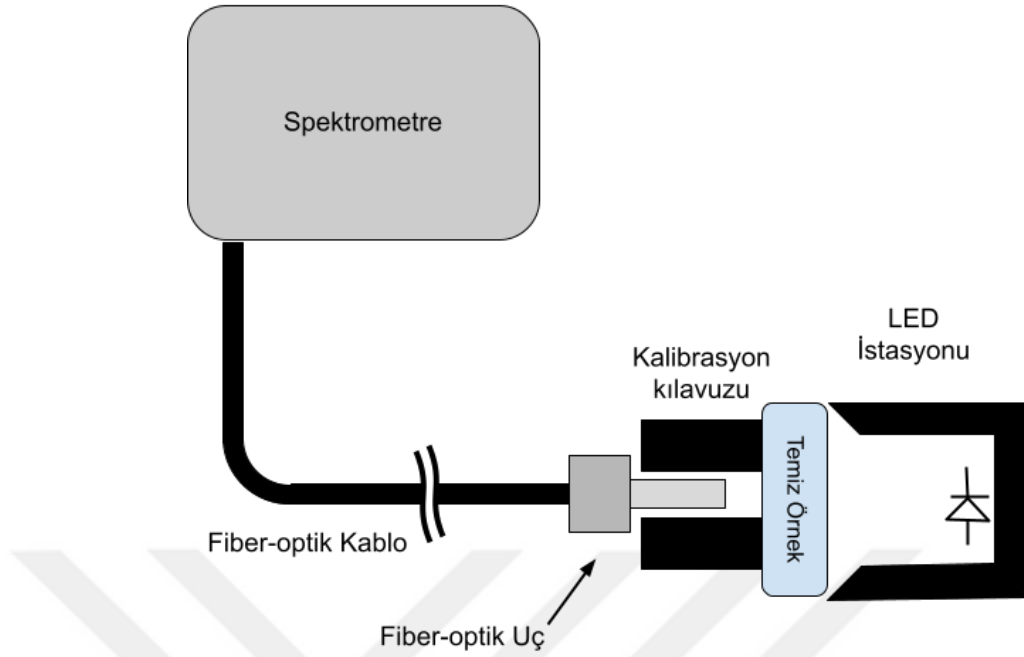


Şekil 3.13 Ocean Insight marka minyatür spektrometre (solda) ve LED kafesi, kalibrasyon kılavuzuna takılı olan fiber-optik kablo (sağda) (Ocean Insight Spectroscopy 2022)

3.3 LED Parlaklıklarının Kalibre Edilmesi

LED İngilizce; *Light Emitting Diode* (Türkçesiyle; ışık yayan diyot) kelimelerinin baş harflerinden oluşturulmuş bir kısaltmadır. Temel olarak valans elektron sayısı 4 olan yarı iletken maddelerden üretilen diyotlar ile aynı çalışma mekanizmasına sahiptir. Aynı diyotlarda olduğu gibi, LED'ler n-tipi ve p-tipi iki bölgeye ayrılır. N-tipi bölge valans elektron sayısı 5 olan fosfor (P) gibi elementler ile katkılanarak üretilir bu nedenle elektronca zengindir. P-tipi bölge ise valans elektron sayısı 3 olan alüminyum (Al) gibi atomlar ile katkılandığı için elektron yoğunluğu daha azdır. Aradaki bu elektron farkı elektrik akımının n-tipi bölgeden p-tipi bölgeye geçişine izin vermezken, ters yönde akımın geçmesine izin verir. LED'ler diğer diyotlardan farklı olarak p ve n bölgeleri üzerinden elektrik akımı geçtiği takdirde görünür bölgede foton üretecek şekilde tasarlanmış özel alaşımlar ile üretilir. Galyum arsenik alaşımı (GaAs (n-tipi bölge için)) ve alüminyum galyum arsenik alaşımı ($Al_xGa_{1-x}As$ (p-tipi bölge için)) en sık kullanılan alaşımlara örnek olarak verilebilir (Schubert vd. 1992).

Kalibrasyon yapılabilmesi için LED istasyonu, kalibrasyon kılavuzu, bir adet ışınlanmamış temiz örnek ve minyatür spektrometre Şekil 3.14'de, kalibrasyon deney düzeneği, basitleştirilmiş diyagramda gösterildiği gibi oluşturulmuştur.



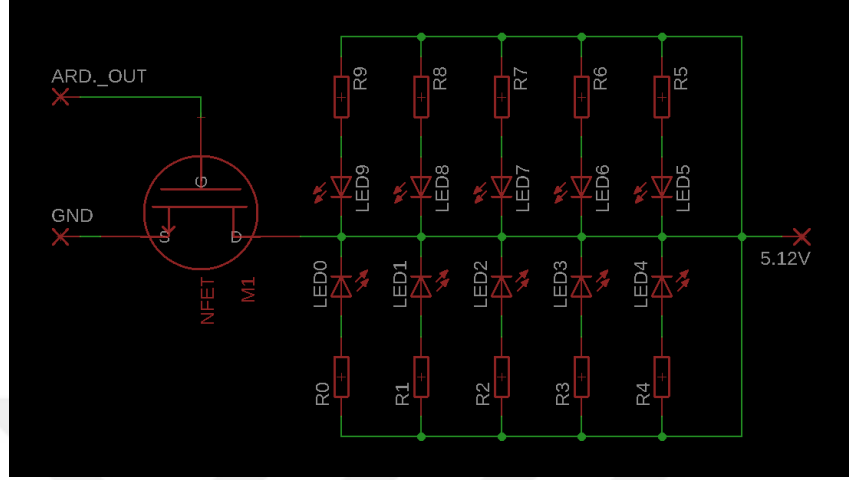
Şekil 3.14 LED parlaklıklarının yakınlştırılarak kalibre edilmesi amacıyla kurulmuş deney düzeneği diyagramı

3.4 Sinyal Jeneratörünün Tasarımı ve Üretimi

Radyasyon Hasarı almış örnekler iyileşme süresince sürekli yanan LED ışığına maruz bırakılmak yerine sabit frekansta açılıp kapanan bir düzenek ile uyarılmıştır. Bu durumun başlıca iki nedeni vardır, ilki sabit frekanslı bir döngü ile aktif olarak çalışan bir dedektör, çalışma frekansına ters fazlı bir iyileşme döngüsüne yerleştirilebilir. Böylece dedektörün yüksek radyasyon etkisi altındaki bölgelerde çalışırken yaşam süresi uzatılabilir. İkinci neden ise hasar görmüş örneklerin iyileşme sürecinin ileri aşamalarına kadar LED istasyonunda kalacak olmalarıdır. Sürekli yerine periyodik çalışma ile iyileşme süresince 24 saat aralıksız çalışması beklenen LED'ler ve MFET üzerindeki ısı birikimi bir ölçüde azaltılabilir ve özellikle LED'lerin deney süresince ısınmaya bağlı performans kayıplarının önüne geçilebilir.

LED düşük gerilim ve akımda çalışabilen bir devre elemanıdır, bu nedenle mantık düzeyinde çalışan elektronik devrelerde gösterge olarak kullanılırlar, mantık düzeyi (logic level) 1 (5 V) olduğunda açılır, düzey 0 (0 V) olduğunda ise kapanırlar. Bu durumda elektrotları açıp kapatmak için bir elektronik işlemci kullanılabilir. Bu durum

bağlanmıştır. LED istasyonu anot ayağından direk DC kaynağa bağlıdır ancak MFET etkin edilmedikçe akım geçişini engeller ve LED'ler ışık üretemez.



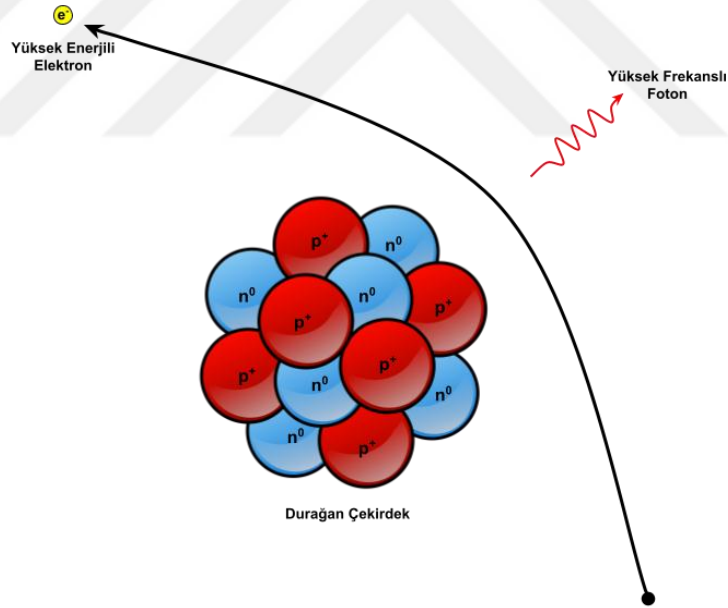
Şekil 3.16 Arduino marka işlemciden aldığı sinyal ile devreyi açıp kapatarak çalışan kare dalga üreticinin ve iki LED istasyonunun birlikte gösterilmiş şematiği

3.5 Radyasyon Hasarı Görmüş Örneklerin Hazırlanması

Temiz örnekleri ışınlamak için TARLA bünyesinde bulunan medikal doğrusal hızlandırıcının ürettiği gama ışını demeti kullanılmıştır. Şekil 3.17'de gösterildiği şekilde, negatif yüklü termiyonik kaynaktan üretilen elektronlar statik hızlandırıcıdan geçerek bir miktar hızlandırılır ve selenoid magnetler sayesinde odaklanarak RF (radyo-frekans) hızlandırıcı kavitesine girer. Son enerjisine (20 MeV) ulaşan elektron demeti, demet yönelimine 45° açı ile yerleştirilmiş tungsten (W) hedef ile çarpıştırılır. Malzeme içerisine nüfuz eden enerji yüklü elektronlar, pozitif yüklü çekirdeklerin elektrik alanından etkilenerek, Şekil 3.18'de gösterildiği gibi, keskin yörüngeler çizerek enerjilerinin bir kısmını gama fotonu olarak serbest bırakırlar.



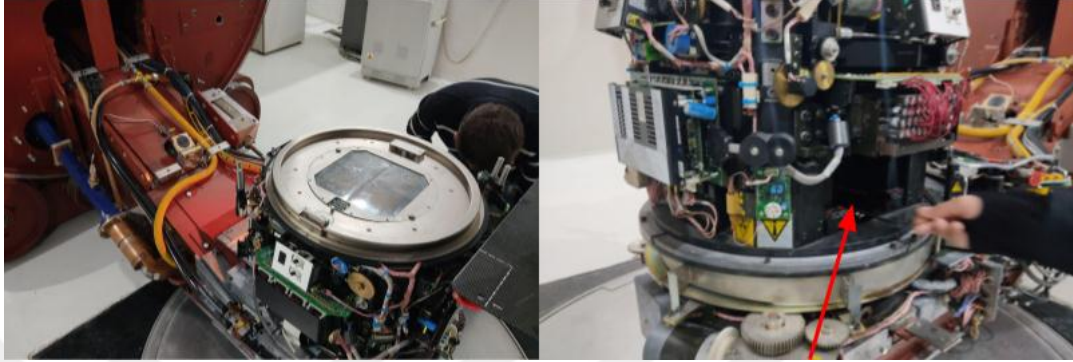
Şekil 3.17 TARLA bünyesinde bulunan medikal doğrusal hızlandırıcı ve gama kaynağının basit modeli



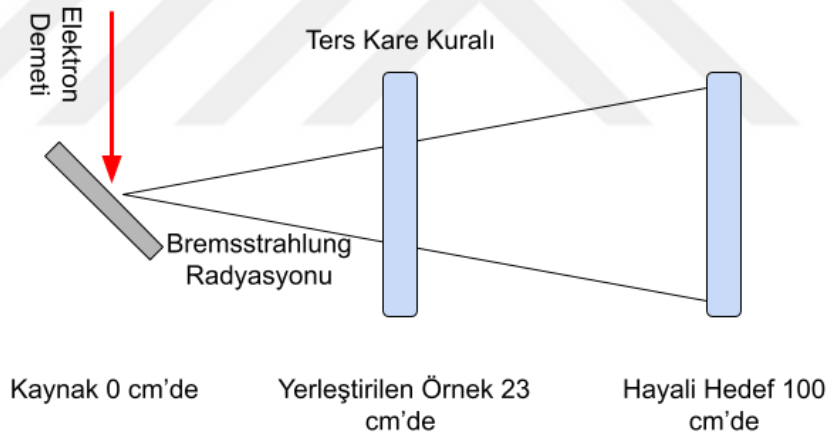
Şekil 3.18 Pozitif yüklü çekirdeklerin elektrik alanından etkilenerek yönelimlerini değiştiren enerji yüklü elektronlar, enerjilerinin bir kısmını kaybederler, bu kayıp enerji Bremsstrahlung radyasyonu olarak açığa çıkar

Şekil 3.19'da medikal doğrusal hızlandırıcının gama kaynağı ve örneklerin yerleştirildiği alan gösterilmiştir. Örnekler, Şekil 3.20'de gösterildiği gibi, gama ışın akısının dolayısıyla radyasyon emme doz hızının verilen değerden (1 metre mesafede

yaklaşık 4,5 Gy /dk) daha yüksek olduğu, tungsten hedefe 23 cm mesafede bulunan bir boşluğa yerleştirilmiştir. Bu şekilde istenilen toplam doz miktarına daha kısa sürede ulaşılmıştır.



Şekil 3.19 Medikal doğrusal hızlandırıcının sonunda modifiye edilmiş Bremsstrahlung kaynağı (solda) ve kırmızı ok ile gösterilen örneğin konulduğu boşluk (sağda)



Şekil 3.20 Yerleştirilen örneğin kaynağın ve hayali hedefin arasında kalan konumu

Hayali hedefteki doz hızı yaklaşık dakikada 4.5 Gy'dir, ters kare kuralına göre yerleştirilen örneğin maruz kaldığı doz hızı yaklaşık dakikada 85 Gy olacaktır. "Fluka" isimli programda yapılan simülasyona göre örneğin bir dakikada emdiği doz 77,8 Gy olarak hesaplanmıştır. Bu hesaba göre altı adet cam örnek 45 dakika ışınlanarak 3,5 kGy ardından üç örnek alınmış ve kalan örnekler 45 dakika daha ışınlanarak toplamda 7 kGy doza ulaşılmıştır. Bu şekilde yarısı 3,5 kGy geri kalan yarısı 7 kGy doza maruz kalan toplam altı örnek elde edilmiştir. Bu örnekler A, B ve C harfleri ile işaretlenerek

iyileşecekleri ortamlara götürülmüşlerdir. Örneklerin kalınlıkları Çizelge 3.1’de gösterilmiştir. Radyasyon oranına bağlı hasar görel olarak iyi bilindiğinden (örneğin Şekil 2.11 ve 2.12), 3,5 kGy toplam doza ışınlanmış ve LED istasyonunda iyileştirilen örneklerin kalınlığı farklıdır.

Çizelge 3.1 Işınlanmış örneklerin kalınlıkları ve belirsizlikleri

Örnek Grubu		Kalınlık (mm)
Karanlık Kutu	3,5 kGy	2,828 ± 0,014
Çevresel Ortam	3,5 kGy	2,773 ± 0,011
LED İstasyonu	3,5 kGy	3,702 ± 0,016
Karanlık Kutu	7,0 kGy	2,789 ± 0,011
Çevresel Ortam	7,0 kGy	2,749 ± 0,019
LED İstasyonu	7,0 kGy	2,810 ± 0,017

3.6 Yöntem

Medikal doğrusal hızlandırıcı ile üretilen gama ışını sodalı cam örnekler üzerine belirli süreler ile gönderilir, 3,5 kGy ve 7 kGy ışınlanmış örnek gruplanır ve spektrometre ile 200 - 1500 nm arası geçirgenlik ölçümleri alınır. Spektrometrik ölçümün ardından örnekler iyileşmeleri için özel bölgelere yerleştirilir ve periyodik olarak geçirgenlik ölçümleri alınmaya devam edilir.

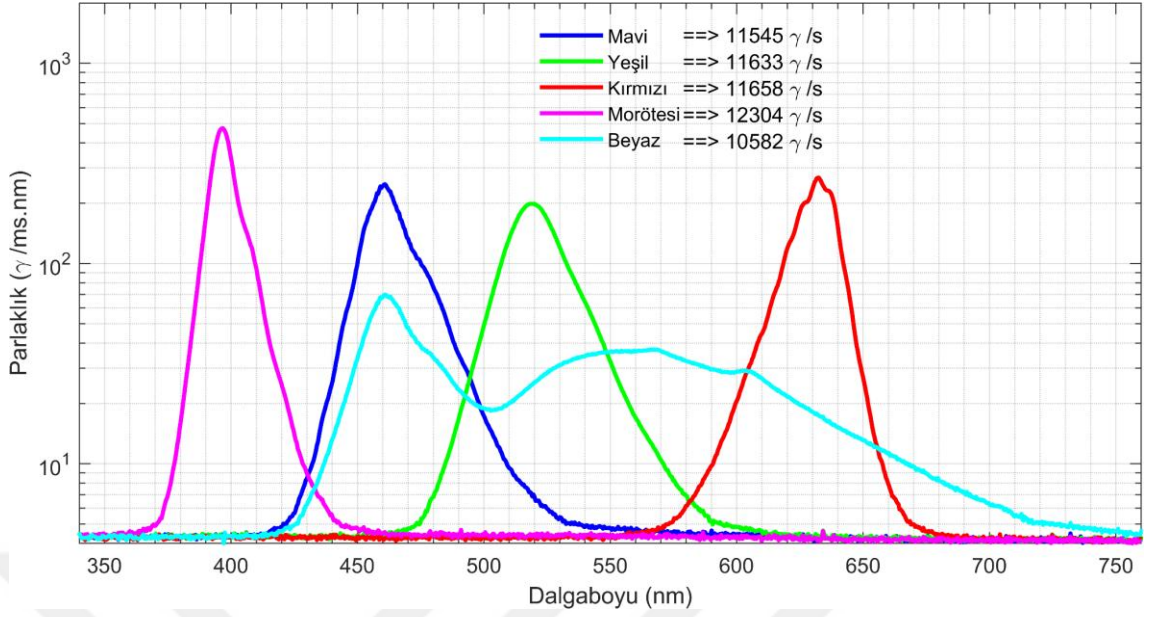
Spektrometre veriyi “.txt” uzantılı dosyalara iki sayı sütunu içerecek şekilde kaydeder, ilk sütun gelen dalga boyu verisini nm birimiyle verirken, ikinci sütun geçirgenlik ölçümünü yüzdelik olarak verir. Burada 0 o dalga-boyunda ışığın örnekten geçmediğini ifade ederken, 100 kaynaktan üretilen tüm ışığın örnekten geçerek dedektöre ulaştığını ifade eder. Zaman verisi, “.txt” uzantılı dosyaların oluşturulma tarihlerini baz alır, bu şekilde ölçümlerin arasındaki zaman farkı analiz sırasında hassas bir şekilde ölçülebilir.

4. ARAŞTIRMA BULGULARI

Tezin bu bölümünde deney bulgularının ve sonuçlarının yanı sıra deney düzeneğinin oluşturulması sürecinde gerçekleştirilen alt deneylere ve sonuçlarına da yer verilmiştir. Bu alt deneyler kısaca LED parlaklıklarının kalibre edilmesi ve oda sıcaklığının LED parlaklığına olan etkilerinin incelenmesini içermektedir. Bölümün devamında ise ışınlanarak radyasyon hasarına uğratılmış örneklerin iyileştirilmesi sırasında alınan veriler ve verilerin analizine yer verilmiştir. Analizler ve ilgili grafikler “Matlab” isimli program ile yapılmıştır. Neticeler Journal of Instrumentation dergisinde yayınlanmıştır (Sahbaz vd. 2022).

4.1 LED Parlaklığı Kalibrasyonu

LED üretimi sırasında malzeme saflığına zarar gelmediği sürece her zaman belirli dalga-boylarında ışık üretirler, fotonun dalga-boyu ile enerjisi arasındaki ilişki ters orantılı olduğu için farklı renk LED’ler aynı voltaj altında farklı sayılarda foton üretirler. Ancak aynı renk LED’ler bile üretimleri sırasında dağıtılmış Bragg yansıtıcıları veya N-P katkılarındaki yoğunluk farkları nedeniyle, LED üzerinde harcanan enerjinin istenilen dalga-boyunda %100 verimlilikle çalışmasını engelleyebilir. Bu nedenle aynı tipte iki LED aynı güçte çalışsalar dahi parlaklıkları arasında farklılıklar oluşabilir. Deneyde geçirgenlik kaybına uğramış örneklerin uyarılması amacıyla kullanılacak olan 5 farklı renge sahip LED’in spektrumları ve integralleri Şekil 4.1’de verilmiştir.



Şekil 4.1 Deneyde geçirgenlik kaybına uğramış örneklerin uyarılması amacıyla kullanılacak LED'lerin spektrum ve integralleri (saniyede algılanan toplam γ sayısı)

Şekil 4.1'de görülen örnek LED'ler Çizelge 4.1'de gösterilen değerler ile çalıştırılmıştır. Normal şartlarda tüm LED'ler tek bir kaynaktan çalıştırılacağı için gerekli akım ve voltaj değerleri her LED'e ayrı olacak şekilde düzenlenmelidir. Ancak LED'ler önerilen değerlerde kullanılmalarına rağmen her LED farklı parlaklık değerlerine sahiptir. Bu durumdan kurtulmak için LED'lerin parlaklığı, akım sınırlayıcı dirençler ile kalibre edilmelidir.

Çizelge 4.1 Deneyde kullanılan LED çeşitleri ve önerilen çalışma aralıkları. (Kırmızı 1206 Formasyonlu SMD LED 2021, Morötesi 5050 Formasyonlu SMD LED 400-405 nm 2021, Yeşil 1206 Formasyonlu SMD LED 2021, Beyaz 1206 Formasyonlu SMD LED 2021, Mavi 1206 Formasyonlu SMD LED 2021)

LED Çeşidi (Rengi)	Dalgaboyu Aralığı (nm)	Azami Gerilim (V)	Azami Akım (A)	SMD Formasyonu
Kırmızı	624	2,4	0,025	1206
Morötesi	400 - 405	3,4	0,060	SMD5050
Yeşil	573	2,4	0,025	1206
Beyaz	380 - 840	3,2	0,025	1206
Mavi	468	3,3	0,025	1206

Parlaklık kalibrasyonu her bir LED ayrı ayrı DC güç kaynağına bağlanıp akım sınırlayıcı görevinde bir adet sabit direnç ve hassas ayar yapabilmek için bir adet 500 Ω potansiyometre devreye seri bağlanarak gerçekleştirilmiştir. Sabit direnç ve potansiyometrenin oluşturduğu toplam direnç, her bir LED için kademeli olarak artacak şekilde uygulanmış ve bu sırada çalışan LED spektrumu Ocean marka spektrometre ile 25'er kez ölçümlenmiştir. Yapılan ölçümler LED rengine ve akım sınırlayıcı direncine göre gruplanmış ve spektrumların integralleri hesaplanmıştır. Sonrasında veriler derlenmiş ve doğrusal fit yöntemi ile optimal bir parlaklık ve buna karşılık dirençler belirlenmiştir. Uygulanan dirençler Çizelge 4.2 ve Çizelge 4.3'te değerlerin ve fitlerin bulunduğu grafik Şekil 4.3'te, fit değerleri ve optimal parlaklık için gerekli dirençler Çizelge 4.4'te verilmiştir.

Çizelge 4.2 İstasyon 1'de kullanılacak LED gruplarının parlaklık optimizasyonu için yapılan deney ve deney için kullanılan eşdeğer akım sınırlayıcı dirençler

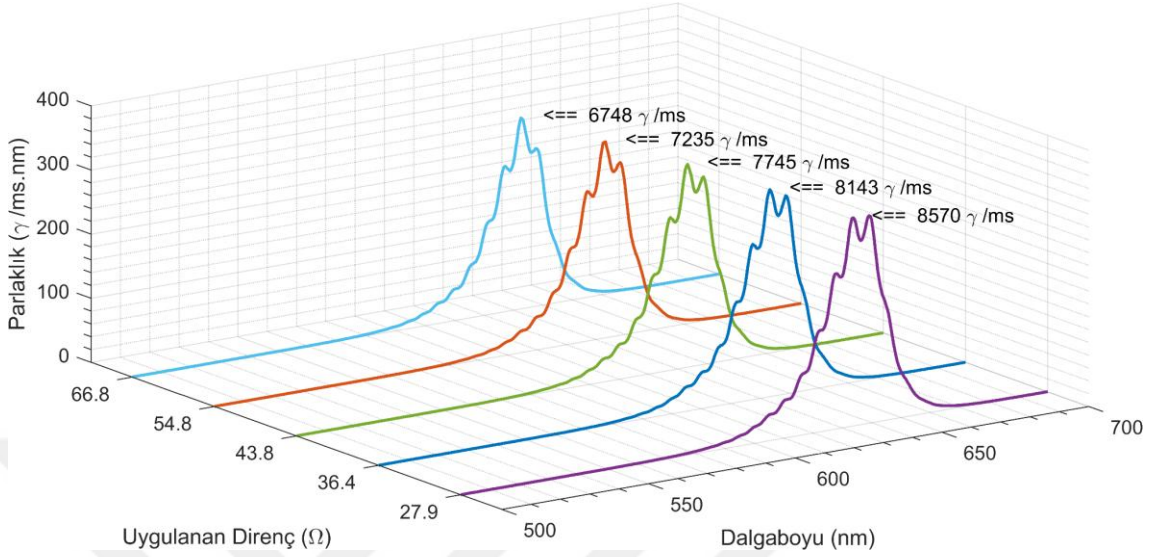
İstasyon 1	Direnç 1 (Ω)	Direnç 2 (Ω)	Direnç 3 (Ω)	Direnç 4 (Ω)	Direnç 5 (Ω)
Mavi	218,3	243,2	268,5	304,7	343,6
Yeşil	622,5	670,0	734,0	822,0	904,0
Kırmızı	130,0	139,6	155,8	171,5	184,7
Morötesi	599,3	645,7	689,0	746,0	787,0
Beyaz	313,6	337,4	373,0	414,0	455,0

Çizelge 4.3 İstasyon 2'de kullanılacak LED gruplarının parlaklık optimizasyonu için yapılan deney ve deney için kullanılan eşdeğer akım sınırlayıcı dirençler

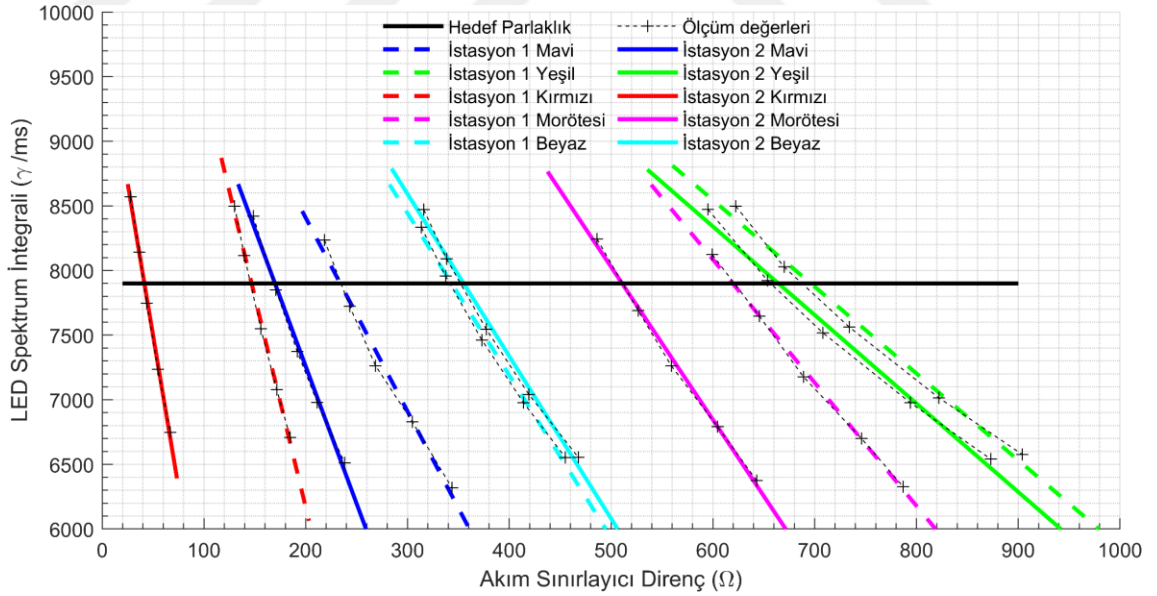
İstasyon 2	Direnç 1 (Ω)	Direnç 2 (Ω)	Direnç 3 (Ω)	Direnç 4 (Ω)	Direnç 5 (Ω)
Mavi	148,4	170,6	191,6	211,3	238,2
Yeşil	595,1	653,7	708,0	794,0	873,0
Kırmızı	27,9	36,4	43,8	54,8	66,8
Morötesi	486,2	526,6	559,2	604,5	643,0
Beyaz	315,9	338,4	377,3	419,2	467,8

Deney sırasında Şekil 4.2'de gösterilen 3 boyutlu grafiğe göre istasyon 2'de kullanılacak kırmızı renkli LED spektrumunun uygulanan akım sınırlayıcının değeri düştükçe yüksek dalga-boyuna yığılma yaptığı gözlenmiştir. Normal şartlarda bu tayf kayması LED sıcaklığın veya üzerinden geçen akımın kritik seviyelere yaklaştığı gösterir. Bu nedenle Şekil 4.3'te görüleceği üzere kırmızı LED'in zarar görmeyeceği bir

parlaklık aralığı hedef parlaklık için uygun görülmüştür. Bu durumda deneyde hedeflenen parlaklık 7900 γ /ms belirlenmiştir.



Şekil 4.2 İstasyonlarda kullanılacak kırmızı LED'ler için uygun akım sınırlayıcı belirlenirken karşılaşılan tayf kayması, gösterildiği üzere sınırlayıcının direnci düştükçe akım geçmesine izin verdiği değer artmakta ve kritik sınırın üzerine geçmektedir

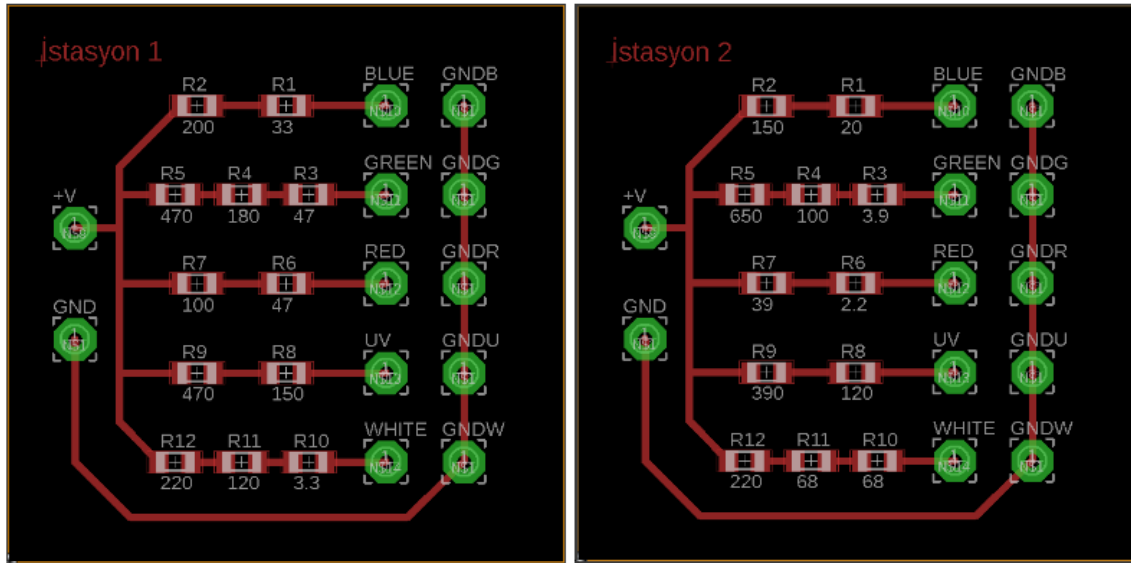


Şekil 4.3 Alınan ölçümler ve doğrusal fit fonksiyonları, her fonksiyonun geçtiği dolayısıyla interpolasyon yöntemi ile hesaplanabileceği ve Şekil 4.1.2'de gösterilen problemten uzak durularak 7900 γ /ms değeri parlaklık hedefi olarak seçilmiştir

Çizelge 4.4 Yapılan deneye göre hesaplanan fit sabitleri, fit fonksiyonu ve gerekli olan direnç değerleri

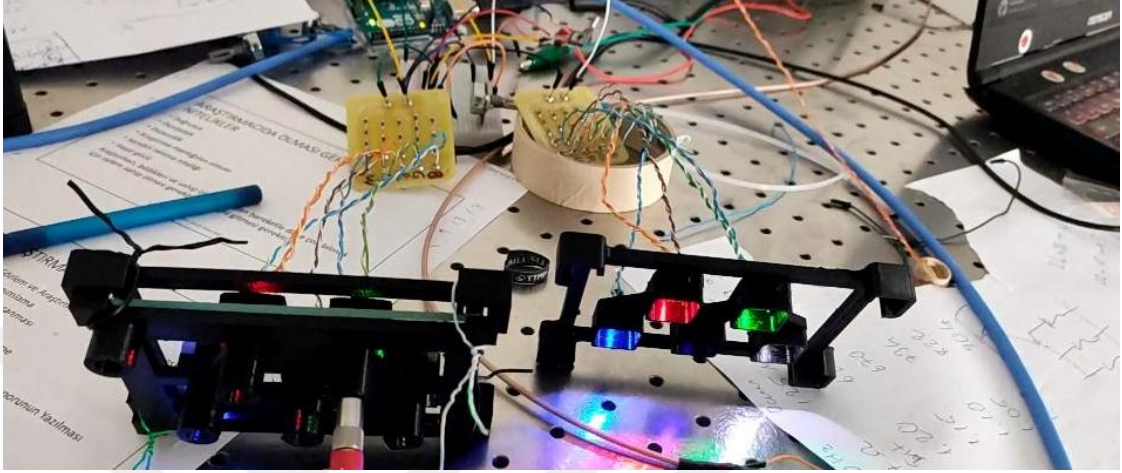
$I_v(R) = a \times R + b$						
Renkler	İstasyon 1			İstasyon 2		
	a (γ /ms. Ω)	b (γ /ms)	R (Ω)	a (γ /ms. Ω)	b (γ /ms)	R (Ω)
Mavi	-14,97	11401	234	-21,24	11505	170
Yeşil	-6,71	12571	696	-6,85	12449	664
Kırmızı	-32,59	12685	147	-47,09	9851	41
Morötesi	-9,53	13804	619	-11,82	13937	511
Beyaz	-12,55	12207	343	-12,56	12360	355

Akım sınırlayıcının devre kartı parça üretimi alt başlığında anlatıldığı gibi LPKF ProtoMat S103 model baskı makinesi ile 35 μ m kalınlıkta bakır (Cu) ile kaplı, FR4 malzeme üzerine kazınarak hazırlanmak üzere tasarlandı. Bileşke dirençler, Şekil 4.4'te görüleceği üzere, elimizde bulunan 1206 SMD formasyonuna sahip sabit dirençler ile hazırlandı. Bu nedenle hedef parlaklık için hesaplanan direnç değerlerine yakın sonuçlar almak için ikili ve üçlü gruplar halinde tasarlandı.



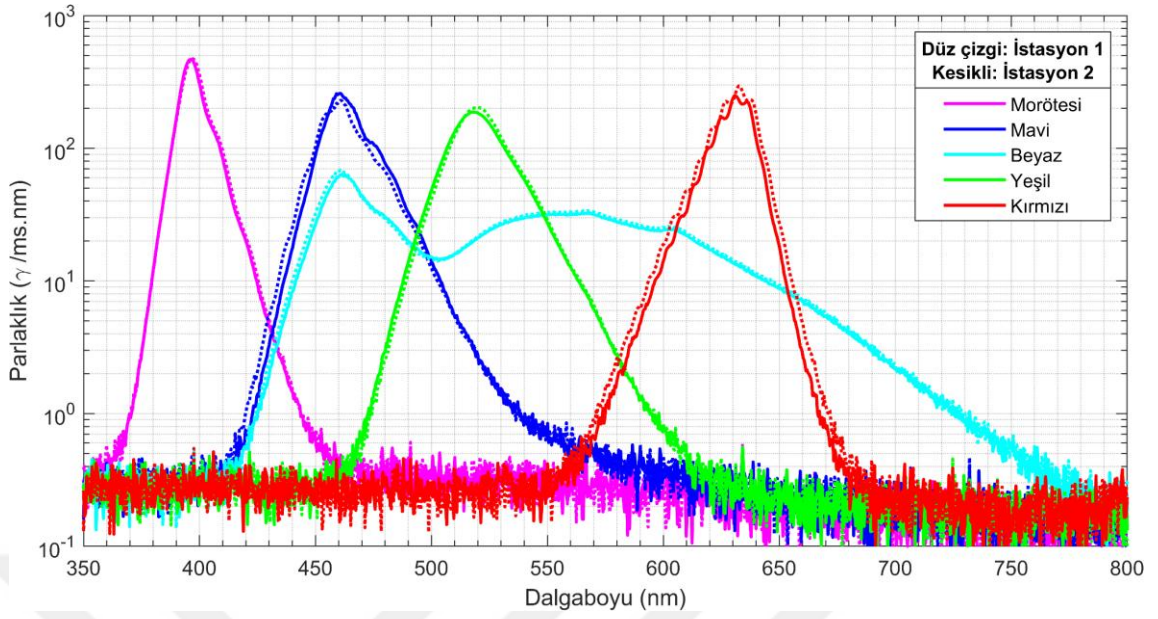
Şekil 4.4 İstasyon 1 (solda) ve İstasyon 2 (sağda), LED kafesine gerekli akımı sağlama amacıyla, "Eagle" isimli programda tasarlanmıştır. Tasarım baskı makinasından hazırlandıktan sonra üzerinde yazılı direnç değerlerine sahip elemanlar ile birleştirilecektir

Akım bölücü üzerinde bulunan çıkışlar ile LED kafesinde bulunan girişler CAT6 kablo içerisinde çıkarılan yalıtımlı kablolar ile birleştirilerek LED istasyonları, Şekil 4.5'te gösterildiği üzere, tamamlanmıştır.

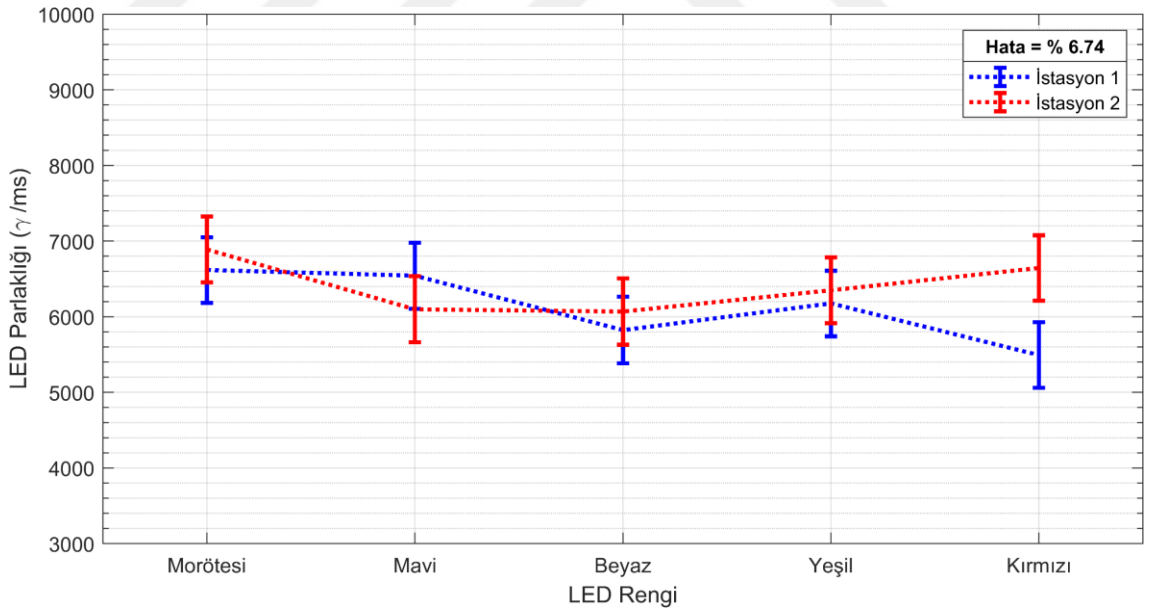


Şekil 4.5 Birleştirilmiş akım sınırlayıcılar ve LED kafeslerinin oluşturduğu, LED istasyonları kalibrasyon testleri yapılırken gösterilmiştir

Kalibrasyon sonrası, iki LED istasyonunda bulunan 5 ayrı LED'den ayrı ayrı 25'er spektrum ölçülmüş, ardından alınan toplam 250 spektrum verisi gruplanıp ortalaması alındıktan sonra hesaplanan spektrumlar, üst üste çizilmiş biçimde Şekil 4.6'da gösterilmiştir. Hesaplanan nümerik integral ve hataları her bir LED rengine bağlı olarak Şekil 4.7'de gösterilmiştir. Bu şekle göre tüm parlaklıklar hata sınırları içerisinde tutarlı bir şekilde kalibre edilmiştir. Tüm LED parlaklık hata ortalamaları; %0,2, her biri %1,5 hata oranına sahip toplam 24 SMD direnç; %7,3 ve minyatür spektrometreden kaynaklanan %1 hata eklendiğinde toplam hata %7,4 olarak hesaplanmıştır.



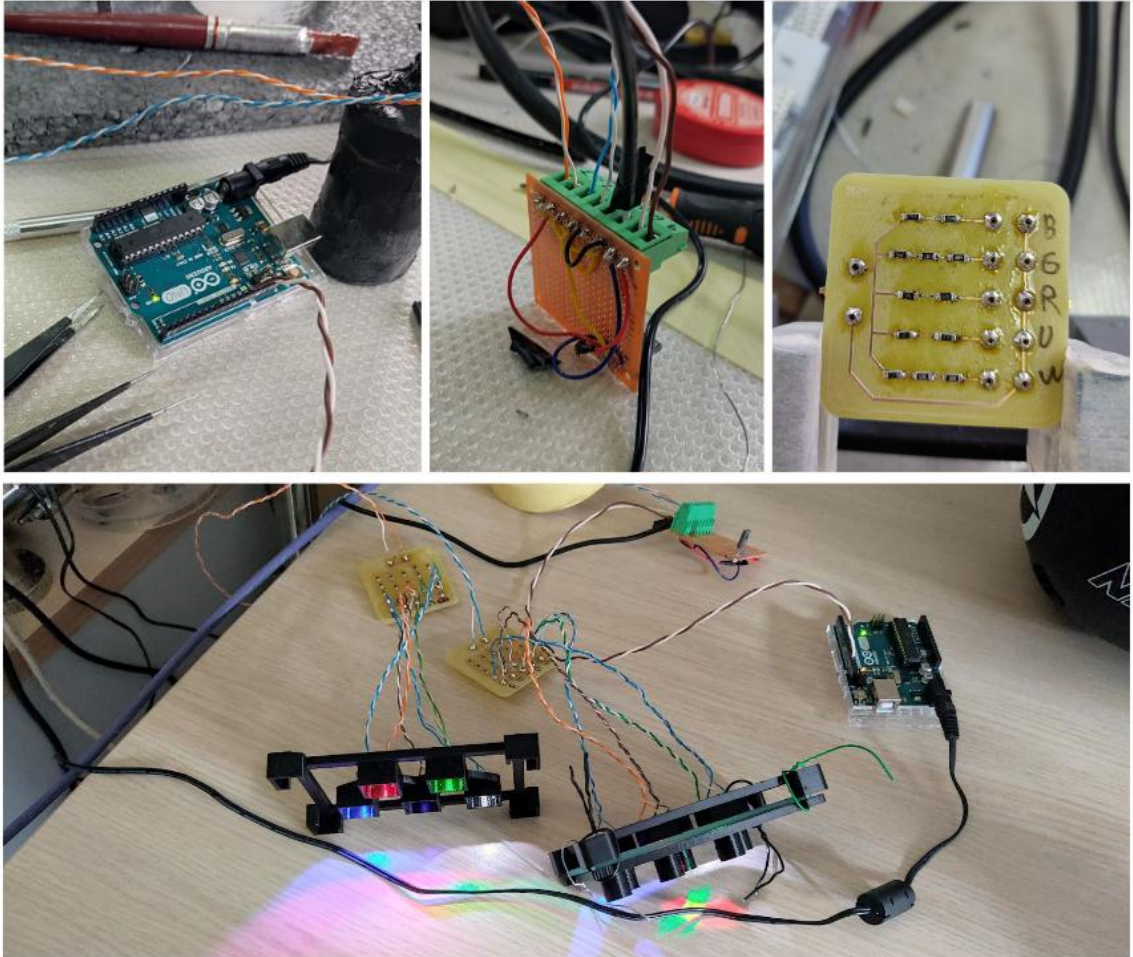
Şekil 4.6 Kalibrasyon testi süresince alınan ölçümlerden alınan verinin ortalamasıyla oluşturulmuş LED rengine ve LED istasyonuna bağlı olarak ayrılmış spektrumlar



Şekil 4.7 Kalibrasyon verisi ile hesaplanmış nümerik integral ortalamaları ve hataları

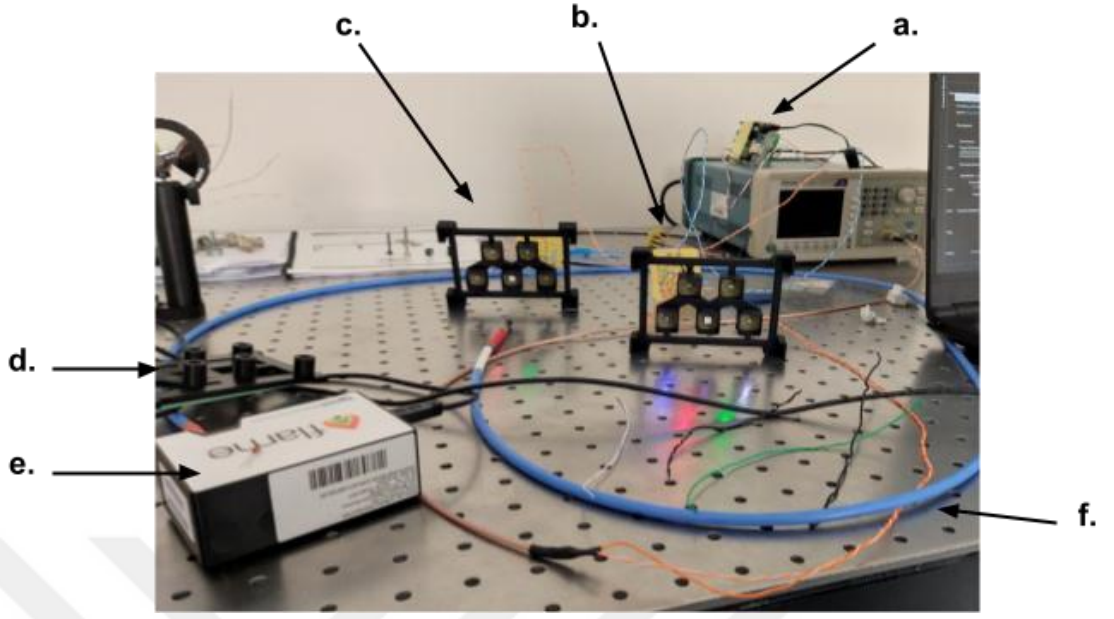
Şekil 4.8'de işlemci, kare dalga üretici ve LED kafeslerinden birine bağlanmak için üretilmiş akım sınırlayıcı gösterilmiştir, sol-üst ve orta-üst resimde bulunan işlemci ile dalga üretici birbirine kahverengi-beyaz sarmal kablo ile bağlanmıştır, bu kablo dalga

üreteciye siyah kablo ile bağlanmış 5 V gerilime sahip DC kaynağı açıp kapatmak ile görevlidir. Yine ortada görülen turuncu ve mavi sarmal kablolar alt resimde gösterildiği gibi LED istasyonlarına bağlanmış ve DC kaynağın gücünü istasyonlarda bulunan LED'lere aktarmıştır.



Şekil 4.8 Arduino marka işlemci (sol-üst), işlemci tarafından çalıştırılan dalga üretici (orta-üst), istasyon 1 için üretilmiş akım sınırlayıcı (sağ-üst) ve tüm sistemlerin çalışır durumda tamamlanmış hali (alt)

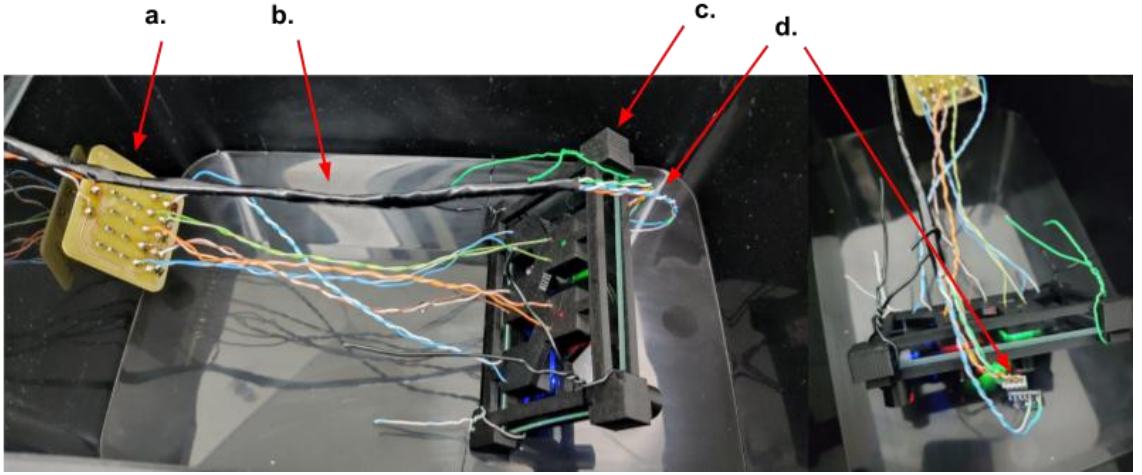
Sistem tamamlandıktan sonra Şekil 4.9'da gösterildiği üzere tüm sistem son bir LED kalibrasyon testine sokulmuştur, görselde kalibrasyon testi sırasında kullanılan tüm araçlar gösterilmiştir.



Şekil 4.9 Tamamlanmış örnek iyileştirme sistemi; **a.** kare dalga üretici, **b.** akım sınırlayıcı, **c.** LED kafesi, **d.** kalibrasyon kılavuzu, **e.** minyatür spektrometre, **f.** fiber-optik kablo

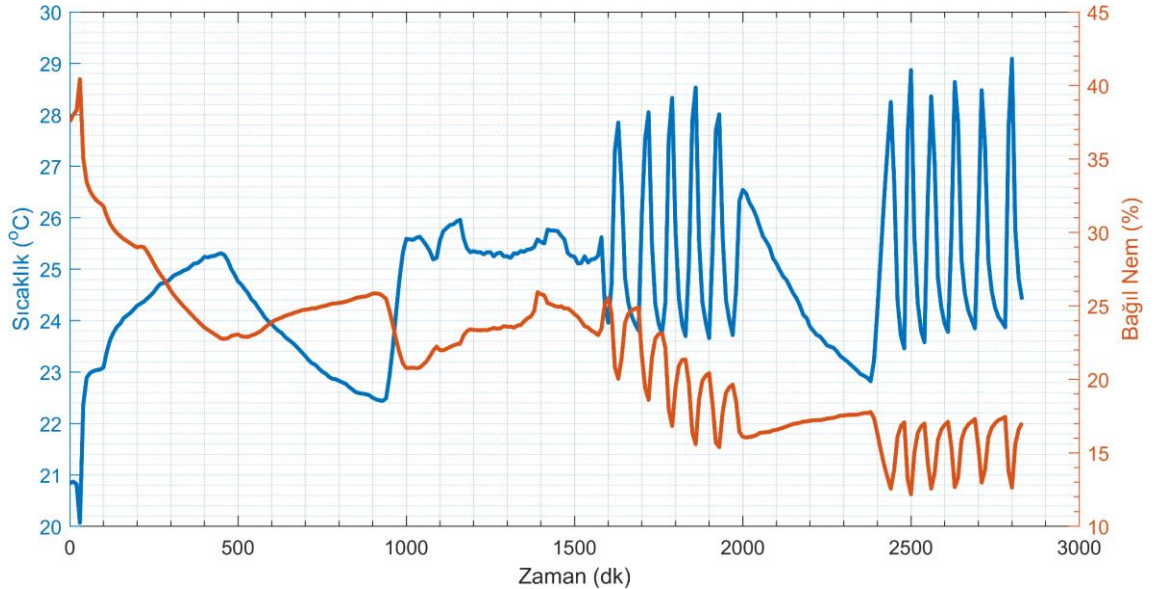
4.2 LED İstasyonu Sıcaklığa Bağlı Performans Deneyi

LED'ler yarı iletken yapıya sahip oldukları için termostatın aktif olduğu bir odada sistemin çalışması hafta sonu boyunca kontrol edilmiştir. Ölçümün yapılması için BME280 sıcaklık, basınç ve nem sensörü işlemciye bağlanmış, 10 dakika aralıkla ölçüm alınmış ve aynı model başka işlemci ile LED istasyonu çalıştırılmıştır. Bu sırada morötesi LED üzerine bağlanan minyatür spektrometre ile aynı zaman aralığında spektrumlar kaydedilmiştir. Şekil 4.10'da deney sırasında spektrometrenin ortam ışığından etkilenmemesi için kapalı kutuya BME280 ile yerleştirilen LED kafesi gösterilmektedir (Arduino BME280 Sensor 2022).

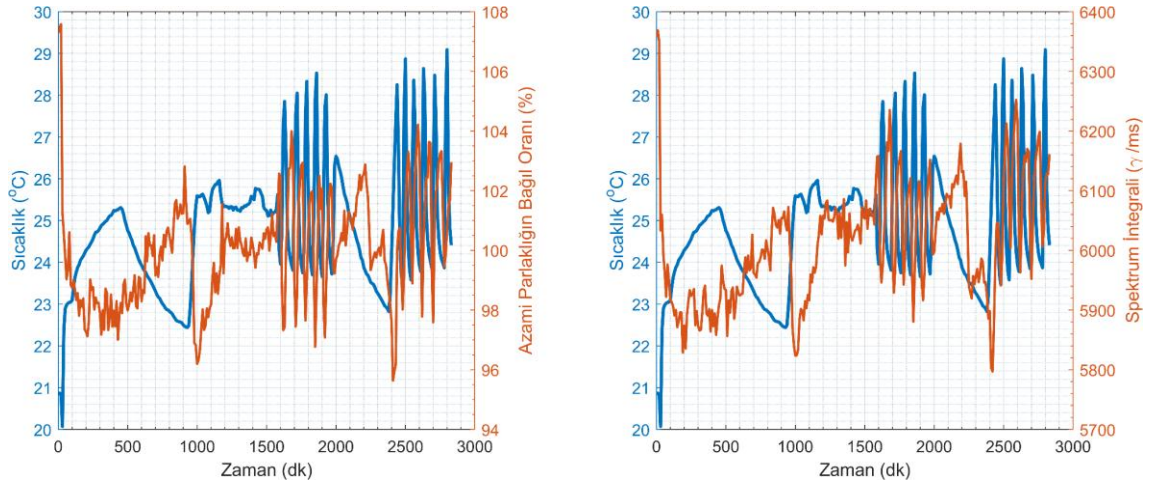


Şekil 4.10 Termostatın 25 °C ayarlandığı TARLA C-103 (muayene odası) no'lu odada kapalı kutu içerisine yerleştirilen deney düzeneği; **a.** akım sınırlayıcı, **b.** BME280 sensör ve LED kabloları, **c.** LED kafesi, **d.** BME280 sensör

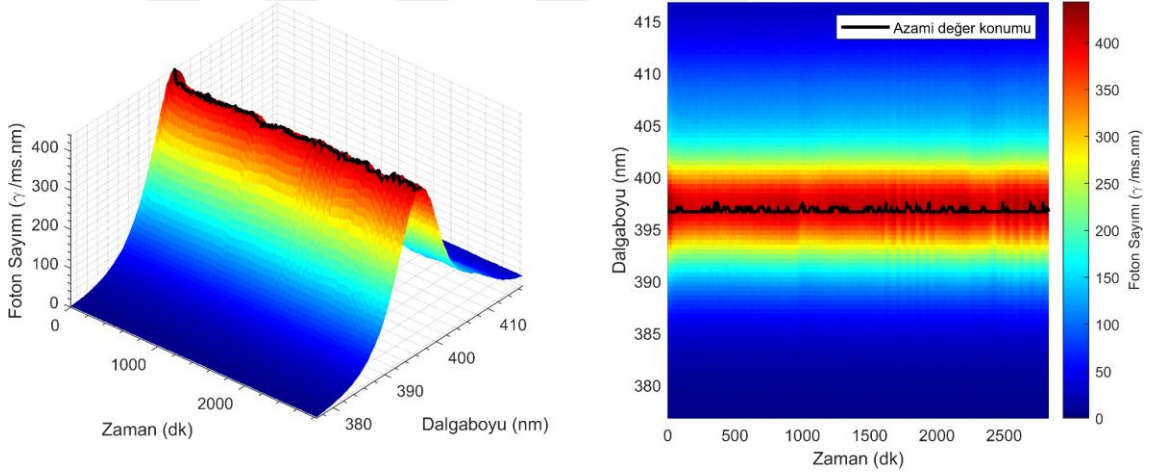
Şekil 4.11'de gösterildiği üzere sıcaklık 20 °C ila 30 °C arasında çok düzensiz bir çizgide ilerlemiş ve onu takip eden bağıl nem oranı %10 ile %40 arasında gidip gelmiştir. Şekil 4.12'de gösterildiği üzere bu sıcaklık koşulları LED'in hem tepe parlaklık düzeyini hem de toplam parlaklığını etkilemiştir. Şekil 4.13'de gösterildiği üzere sıcaklık değişimi LED'in baskın dalga-boyunu da bir miktar etkilemiştir.



Şekil 4.11 İki gün boyunca alınmış ölçümlere göre, TARLA C-103 no'lu odanın sıcaklık ve bağıl nem değerleri

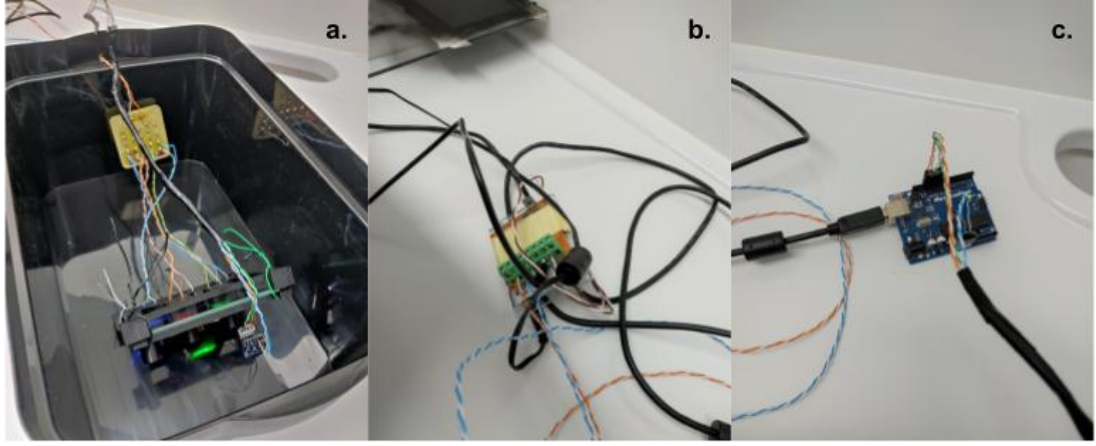


Şekil 4.12 İki gün boyunca alınmış ölçümlere göre, TARLA C-103 no'lu odada bulunan morötesi LED'in tepe nokta bağıl parlaklık oranı (solda) ve aynı LED'in hesaplanan toplam parlaklığı yani integrali (sağda)



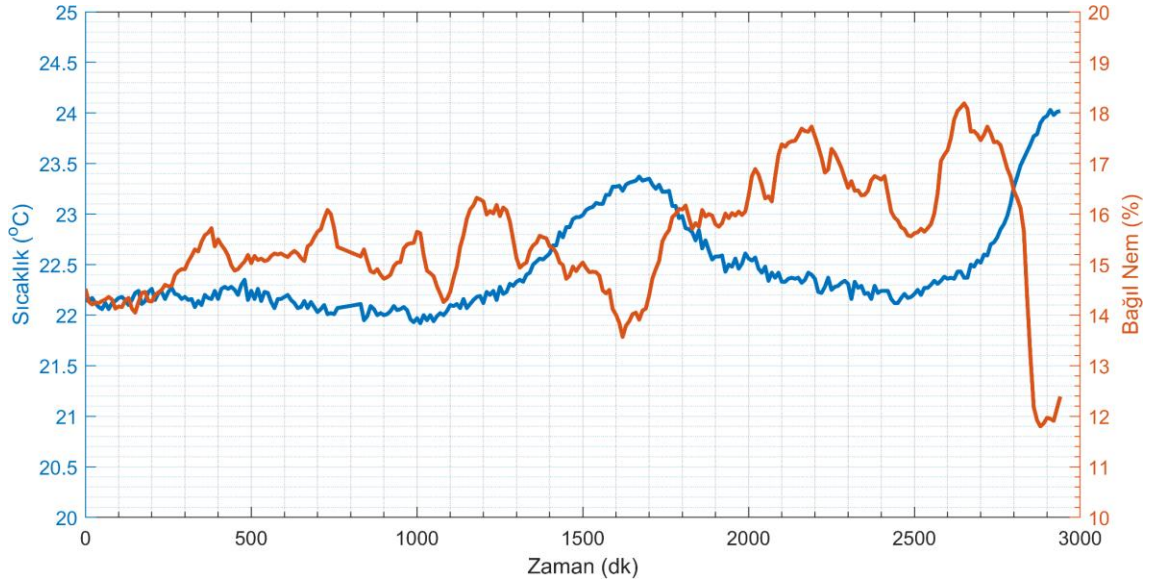
Şekil 4.13 İki gün boyunca alınmış ölçümlere göre, TARLA C-103 no'lu odada bulunan morötesi LED'in spektrum tepe noktasının dalga-boyunda yaşanan ufak değişimin 3B görüntüsü (solda) ve üstten görüntüsü (sağda)

Deneyde her ne kadar spektrum tepe noktası deneyin geri kalanını etkileyecek ölçüde değişmese de yalnızca iki gün içerisinde parlaklıkta %6'dan fazla değişiklik gözlenmiştir. Yalnızca iki gün içerisinde gündüz-gece geçişlerinde yaşanan 10 °C değişikliğin, ucu açık olduğu öngörülen bu uzun deneyi tehlikeye atabileceği düşünülmüştür. Bu nedenle aynı deney iki gün süreyle sıcaklık kontrolü daha iyi olan TARLA SEL deney odalarında, boş bir çeker ocakta tekrarlanmıştır. Yeni deney düzeneği Şekil 4.14'te gösterilmiştir.

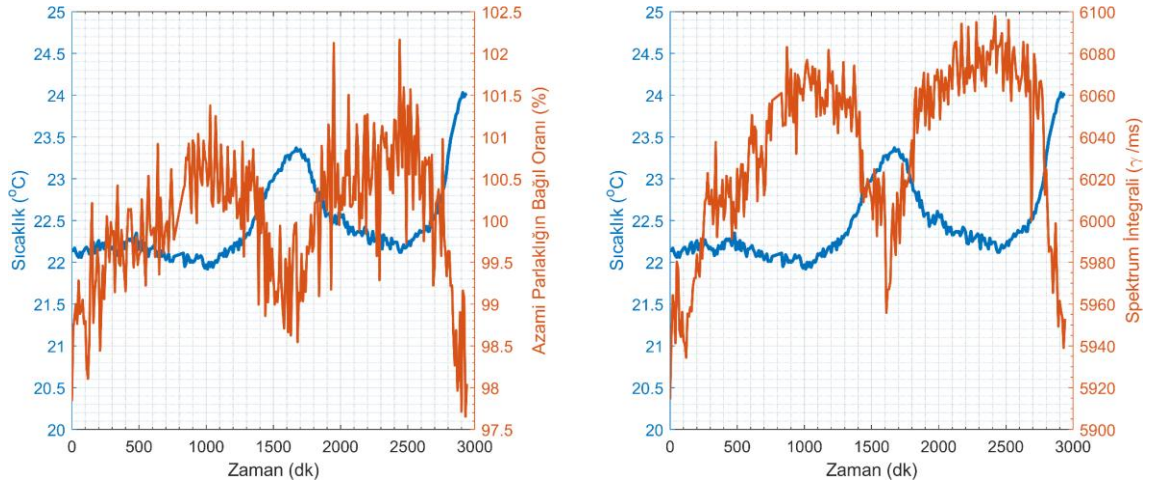


Şekil 4.14 Çeker ocakta tekrarlanan deneyin çeşitli bileşenleri; **a.** LED istasyonunun ve BME280 dedektörün bulunduğu karanlık kutu, **b.** LED istasyonunun çalışmasını sağlayan kare dalga üretici, **c.** karanlık kutu içerisindeki veriyi okuyan ve kaydeden işlemci

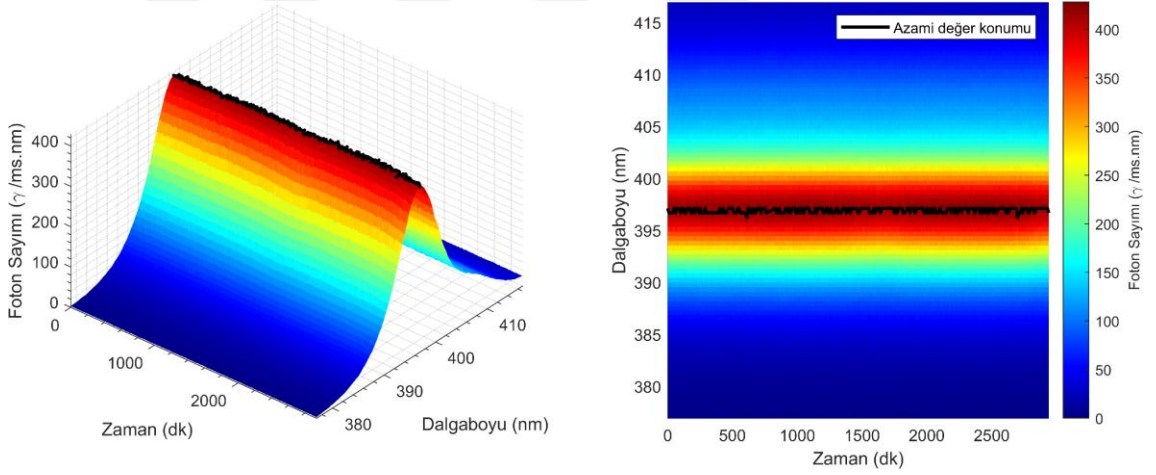
Çeker ocakta tekrarlanan deneyden alınan veriler ile oluşturulmuş sıcaklık ve nem grafiği Şekil 4.15’de, sıcaklığa bağlı azami parlaklık ve toplam parlaklık grafiği Şekil 4.16’da ve zamanla spektrum tepe noktasında yaşanan değişimin grafiği Şekil 4.17’de gösterilmiştir.



Şekil 4.15 İki gün boyunca alınmış ölçümlere göre, TARLA SEL deney odalarının sıcaklık ve bağıl nem değerleri



Şekil 4.16 İki gün boyunca alınmış ölçümlere göre, TARLA SEL deney odalarında bulunan morötesi LED'in tepe nokta bağlı parlaklık oranı (solda) ve aynı LED'in hesaplanan toplam parlaklığı yani integrali (sağda)

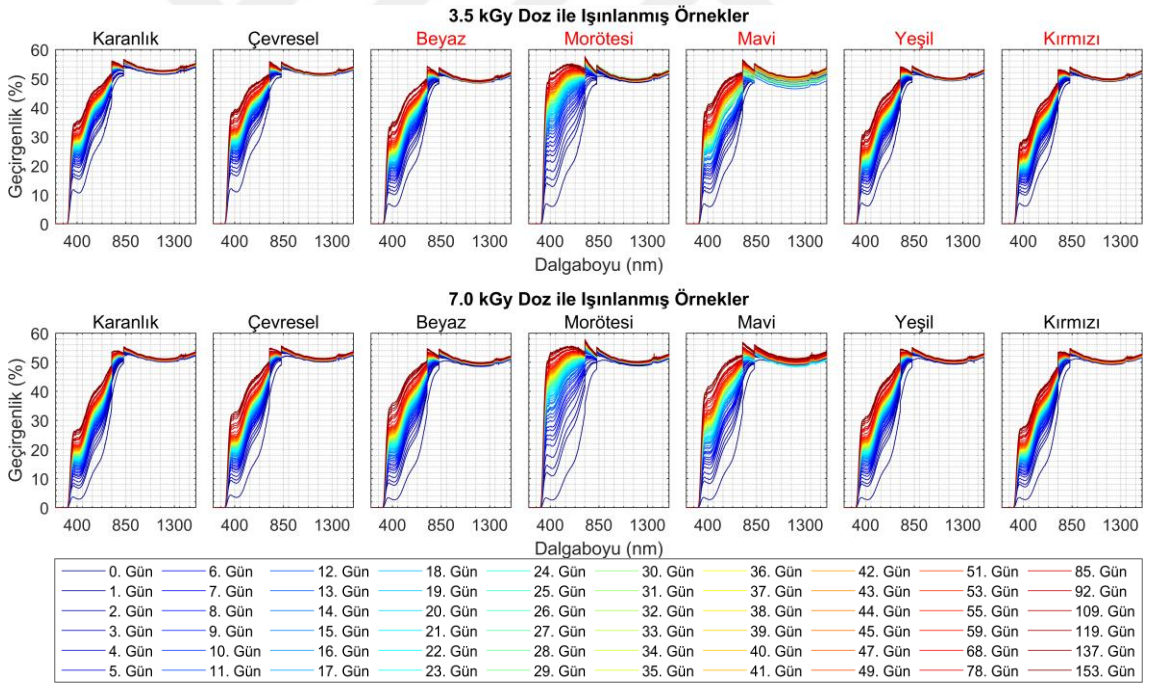


Şekil 4.17 İki gün boyunca alınmış ölçümlere göre, TARLA SEL deney odalarında bulunan morötesi LED'in spektrum tepe noktasının dalga-boyunda yaşanan ufak değişimin 3B görüntüsü (solda) ve üstten görüntüsü (sağda)

LED istasyonu ortamı ile ilgili çalışma sonuçlarına göre iki gün boyunca, LED ile iyileştirilmenin yapılacağı çeker ocakta azami 2 °C sıcaklık değişimi yaşanmış ve spektrumun tepe noktasında bir kayma gözlenmemekle beraber parlaklıkta yalnızca %2 değişiklik kaydedilmiştir.

4.3 Veri İşlenme Metodları

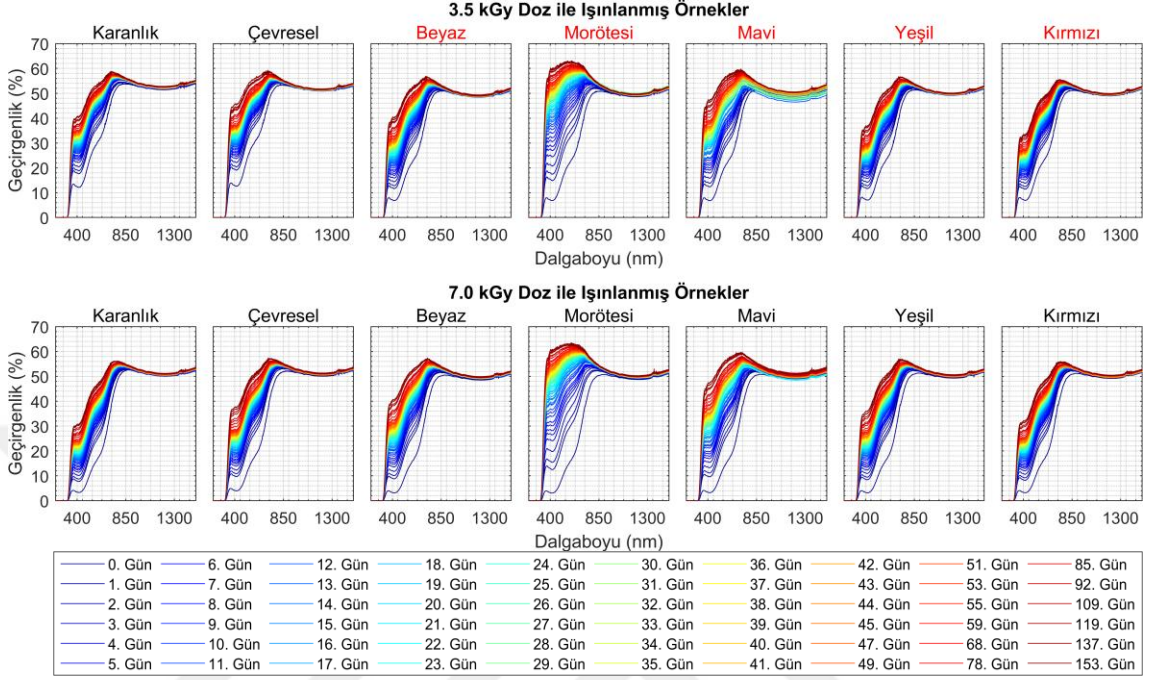
Örneklerin ışınlanmasının ardından Shimadzu UV-3600 Plus UV-VIS-NIR model spektrometre ile ilk 44 gün günlük ölçüm, 45 ile 55 gün arasında gün aşırı ölçüm, sonrasında ise düzenli olmayan aralıklar ile ölçüm alınmış ve deneyin başlamasının ardından 153 gün sonra sonlandırılmıştır. İlk ölçüm tarihi 4 Mayıs 2021, son ölçüm tarihi ise 4 Ekim 2021 olup toplamda 60 günlük spektrum verisi alınmıştır. Ölçümü alınan örnekler aldığı doz miktarına göre ikiye bölünmüştür, bu iki örnek grubunda bir adet karanlık kutu (A grubu), bir adet çevresel ışık (B grubu) ve beş adet LED (C grubu) örnek seti vardır. Bazı günler ise mutlak hasar hesaplaması yapılması amacıyla temiz (ışınlanmamış) örnek spektrumu alınmıştır. Şekil 4.18’de alınan tüm orijinal veri örnek grubuna göre sıralanmış şekilde gösterilmiştir. 3,5 kGy C örnek grubundaki kalınlık farkı kırmızı grafik başlıkları ile gösterilmiştir.



Şekil 4.18 200-1500 nm aralığında alınan tüm verinin örnek gruplarına göre sıralanmış grafikleri

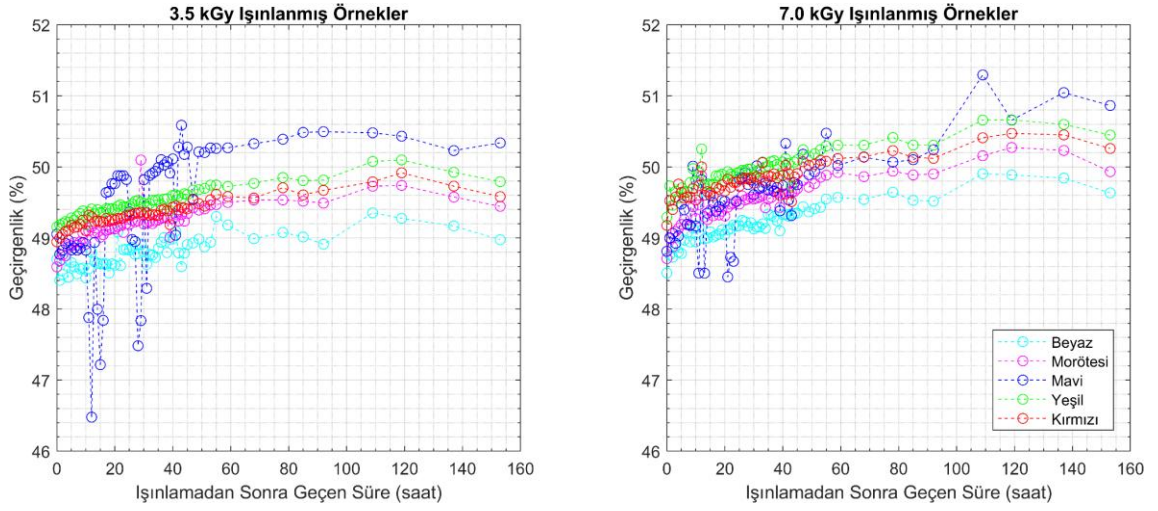
Kullanılan spektrometre ölçüm sırasında 830 nm’de ışık kaynağı, 720 nm’de ise kromatör değiştirmektedir. %4 mertebesinde olan cihaz kalibrasyon probleminin neticesi olan ve Şekil 4.18’de görülen spektrumlardaki ilgili süreksizlikler, kararlı

kızılötesi bandı baz alınarak matematiksel olarak giderilmiş ve Şekil 4.19’da gösterilen grafikler oluşturulmuştur.



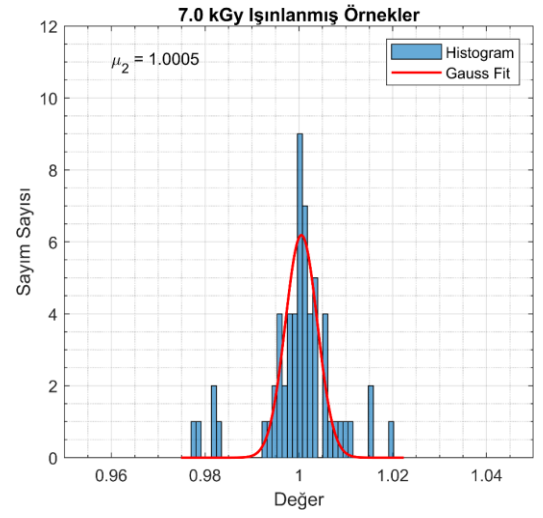
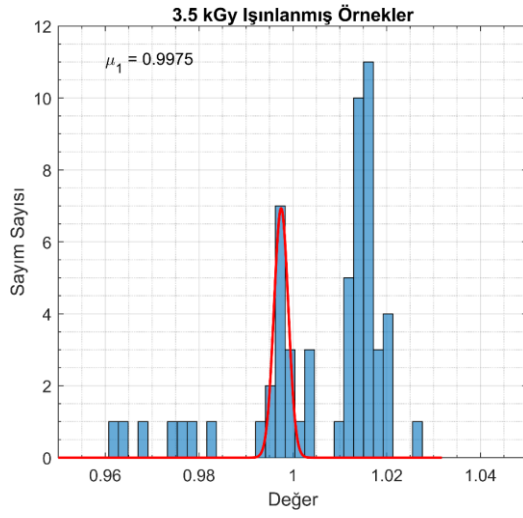
Şekil 4.19 Alınan verilerde 830 nm ve 720 nm dalga boyuna denk gelen veriler kırılmanın yaşandığı konumun öncesi ile sonrası arasında oranlama yapılarak oluşturulan grafikler

Örneklerin boyutu ile spektrometrenin örnek konulan boşluğun boyutu arasındaki minimal farktan kaynaklı olarak mavi renkli LED ile yapılan iyileştirme ölçümlerinde özellikle ölçümlerin ilk günlerinde düzensizlik olduğu görülmüştür. Düzensizliğin mertebesini anlamak için 1100 nm ile 1300 nm arasında ortalama alınmış ve Şekil 4.20’de gösterilen grafiklerde karşılaştırılmıştır.

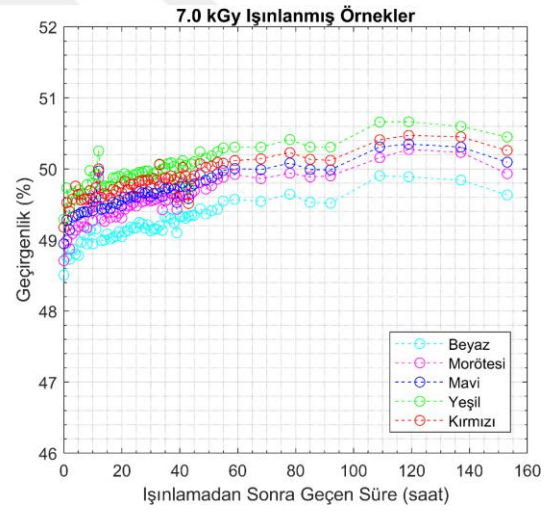
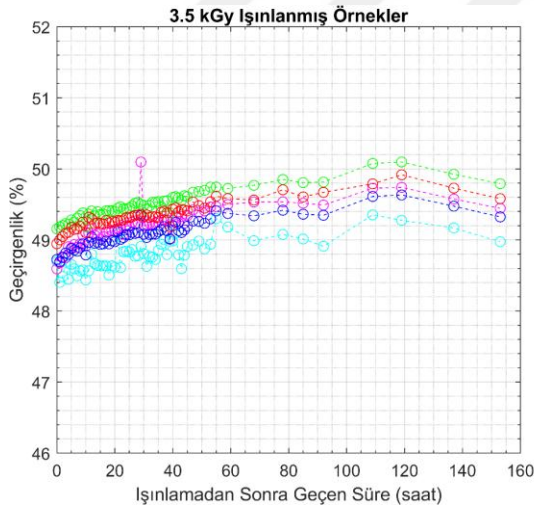


Şekil 4.20 Kızılötesi tayf içerisinde bölgesel çukur oluşturan 1100 nm - 1300 nm aralığı ortalamaları ışınlanma sonrasında geçen sıraya göre dizilmiştir

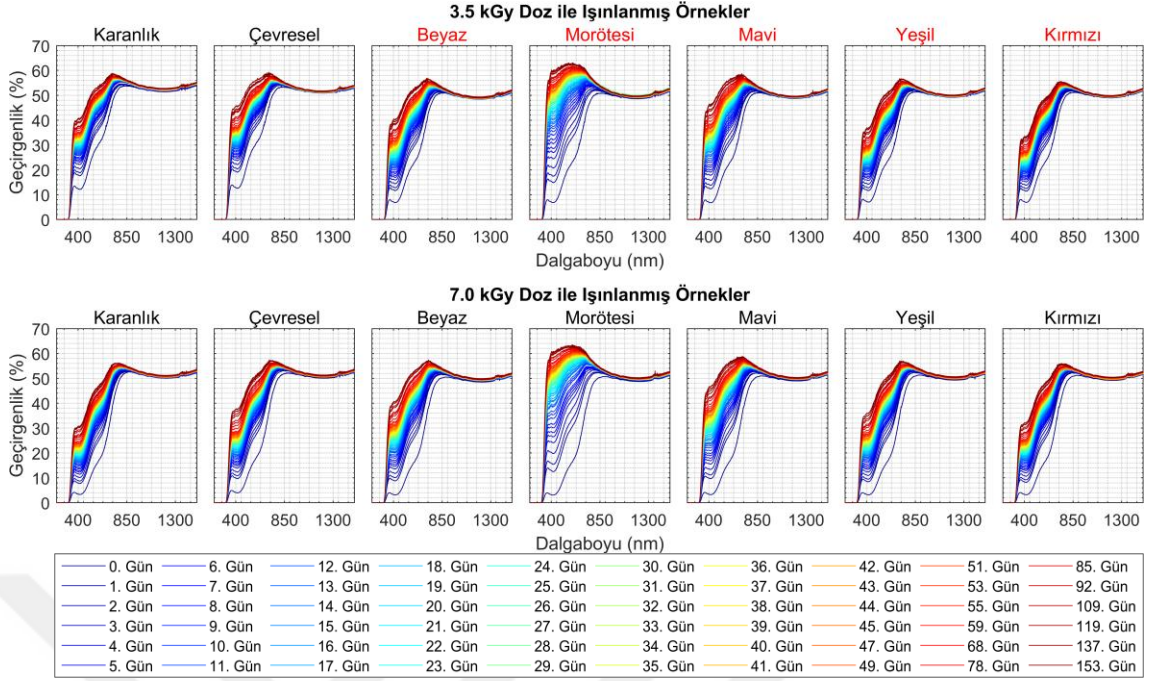
7 kGy örneklerde ciddi bir fark olmasa da, 3,5 kGy mavi örneğinin verilerinin diğer örneklerden sistematik olarak daha yukarıda olduğu görülmüştür. Bu kaymanın boyutunu öğrenmek ve en uygun düzeltme için mavi LED geçirgenlik değerlerinin diğer LED değerlerinin ortalamasına oranının histogramı alınıp, dağılımın her iki doz seviyesindeki ortak tutarlı kısmına gauss fonksiyonu fit edilmiştir. Histogramlar, uygulanan fit eğrisi ve μ (ortalama) değerleri Şekil 4.21’de gösterilmiştir. Ortalama değerler düzeltme sabitleri olarak kullanılmıştır. Düzenleme uygulandıktan sonra 1100 nm ile 1300 nm arasında ortalama tekrar incelenmiş ve Şekil 4.22’de gösterilmiştir. Düzenlemeler sonrası tüm spektrumlar Şekil 4.23’de gösterilmiştir.



Şekil 4.21 Bölgesel çukur oluşturan 1100 nm - 1300 nm arası ortalaması alınan mavi örnek değerlerinin, diğer örneklerin ortalamaları arasında yapılan oranın histogramları, histogramlara uygun oluşturulan fit eğrileri ve fit eğrilerinin μ değerleri

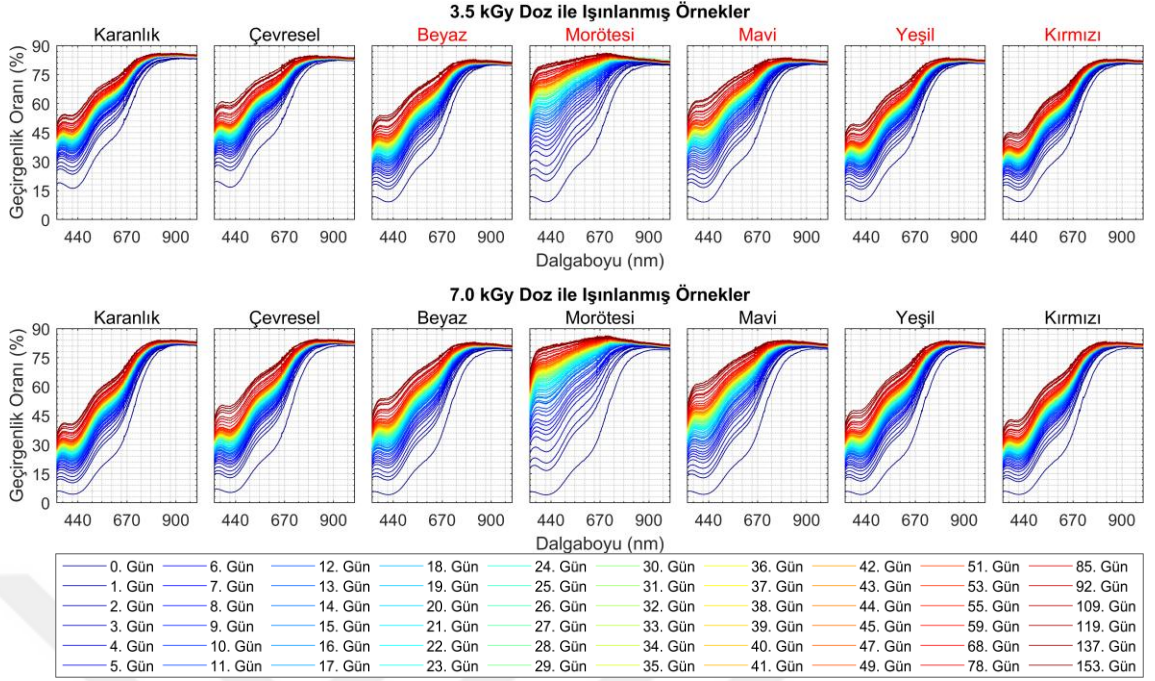


Şekil 4.22 Kızılötesi bölgesi, yerel çukur noktalarının düzeltme yapıldıktan sonraki grafikleri ışınlanma sonrasında geçen sıraya göre dizilmiştir



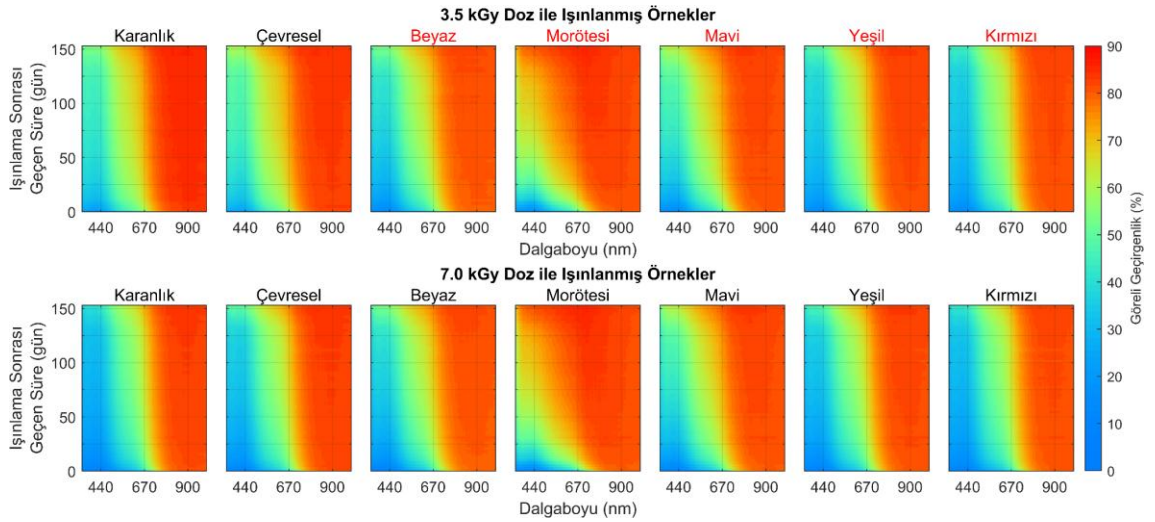
Şekil 4.23 Mavi örneklerde yapılan kızılötesi bölge düzeltmesi sonrası oluşturulan yeni spektrum grafikleri

Şekil 3.2’de gösterilen ışınlanmamış temiz cam ile yapılan ölçüm, geçirgenlik kaybını hesaplama amacıyla alınmıştır. Bu temiz örnek verileri Şekil 4.23’de gösterilmiş grafikleri oluşturan mutlak geçirgenlik verileri ile oranlanarak görel geçirgenlik verileri hesaplanmıştır. 3,5 kGy C grubu örneklerdeki kalınlık farkı nedeniyle hem 3 mm hem de 4 mm kalınlıkta temiz örneklerde ölçüm yapılmış ve bu ölçümler ilgili örnekler ile oranlanarak görel geçirgenlik seviyeleri hesaplanmıştır. Temiz örnekler radyasyon hasarına uğramadan önce de ışık spektrumunun tamamını eşit oranda geçirmezler. Görel geçirgenlik oranları ile örnek spektrumlarında ölçülen geçirgenlik kayıplarının kaynağının radyasyon hasarı olup olmadığı tespit edilebilecektir. Görel geçirgenlik oranları, hasar ve iyileşmenin en baskın ve pratik uygulamalar açısından en etkili olduğu, 340 nm ile 1000 nm arasında kalan grafikleri Şekil 4.24’de gösterilmiştir.



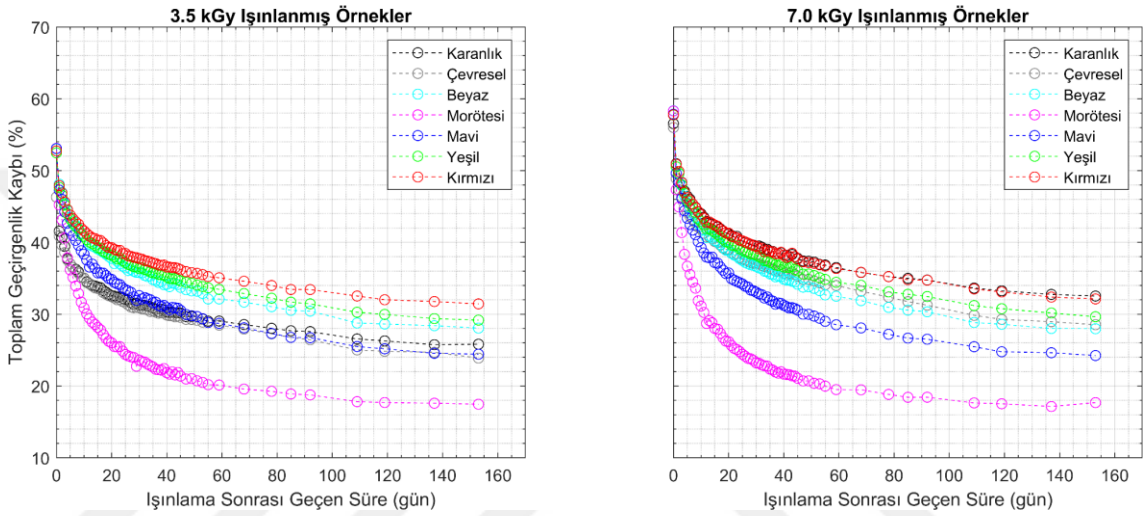
Şekil 4.24 Işınlanmış örnekler ile temiz örneklerin mutlak geçirgenlik oranları arasında yapılan oranlama ile hesaplanmış göreceli geçirgenlik oranları

Şekil 4.25’de gösterilen, aynı göreceli geçirgenlik oranlarından yararlanarak üretilmiş haritalar renk paletine göre yüzdelik oran vermektedir. Grafiklere göre morötesi LED ile uyarılan örneklerde, özellikle kırmızı turuncu renk aralığında, göze çarpan iyileşme görülmektedir.



Şekil 4.25 Işınlanmış örnekler ile temiz örneklerin mutlak geçirgenlik oranları arasında yapılan oranlama ile hesaplanmış göreceli geçirgenlik haritaları

Şekil 4.25’de gösterilmiş göreceli geçirgenlik haritaları hangi LED ışığının daha etkin bir iyileşme sağladığını bize göstermektedir, ancak bu haritaların geometrisi matematiksel bir model oluşturmak için fazla karmaşıktır. Bu nedenle model haritalar üzerinden değil haritaları oluşturan eğrilerin 340 nm ile 1000 nm arasında alınan integralleri ile hesaplanan toplam geçirgenlik kaybı üzerinden yapılacaktır. Toplam geçirgenlik kaybı Şekil 4.26’da gösterilmiştir.



Şekil 4.26 Göreceli geçirgenlik oranlarının 340 nm ile 1000 nm arasında alınan integralleri ile hesaplanan toplam geçirgenlik kaybı

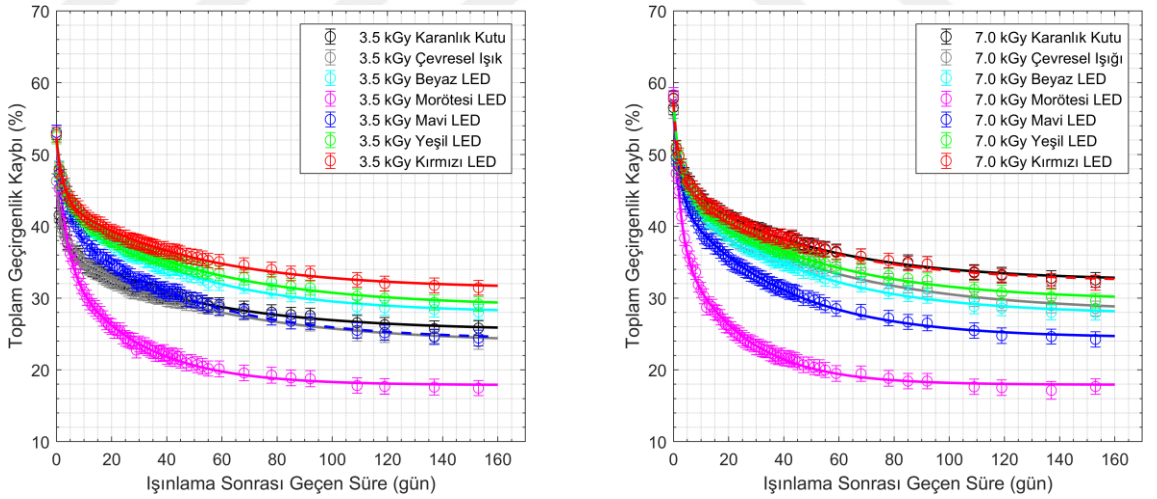
Şekil 4.26’da 3,5 kGy ışınlanmış örneklerdeki kalınlık farkının toplam geçirgenlik kaybına yapmış olduğu etki de göze çarpmaktadır. 7 kGy ışınlanmış örnek gruplarının gösterildiği grafiğe göre, kırmızı LED ışığının iyileşme üzerine neredeyse hiç etkide bulunmamış olduğu, bu örneğin hasar çizgisinin karanlık kutuda bekletilen örnek ile aynı çizgide ilerlediğinden belirlenmektedir. Benzer şekilde çevresel ışığın yeşil LED ile beyaz LED arasında bir etkiye sahip olduğu görülmektedir. İyileşme oranlarına yapılan en büyük etkinin ise önce morötesi LED’den sonra mavi LED’den geldiği görülmektedir.

4.4 Analiz Yöntemleri ve Sonuçları

Bu çalışmada radyasyon hasarından iyileşme sürecinin, tüm iyileşme mekanizmalarında yaklaşık etki gösteren hızlı bir iyileşme süreci ile iyileşme mekanizmalarına kritik bağlılık gösteren uzun süreli bir iyileşme sürecinin kombinasyonu olduğu tespit edilmiştir. Bu durumda örneklerdeki hasarı simgeleyecek en uygun matematiksel eşitlik, 4.1’de gösterildiği şekilde, birisi hızlı ($\tau_{hızlı}$) diğeri yavaş ($\tau_{yavaş}$), iki eksponansiyel bileşenin ve bir sabit sayının toplanması ile elde edilebilir. Bu sabit sayı, zamandan bağımsız olduğu için, denklem t sonsuza gittiğinde bu sabite eşit olacaktır. Bu nedenle sabit sayı, kalıcı hasar anlamına gelmektedir.

$$TGK(t) = A \cdot \exp\left(\frac{-t}{\tau_{hızlı}}\right) + B \cdot \exp\left(\frac{-t}{\tau_{yavaş}}\right) + C \quad (\text{Eşitlik 4.1})$$

Şekil 4.27’de verilen toplam geçirgenlik kaybı, trapezoid nümerik integralden kaynaklanan hata çizgileri ve bu geçirgenlik kaybına uygulanan fit eğrileri gösterilmiştir.



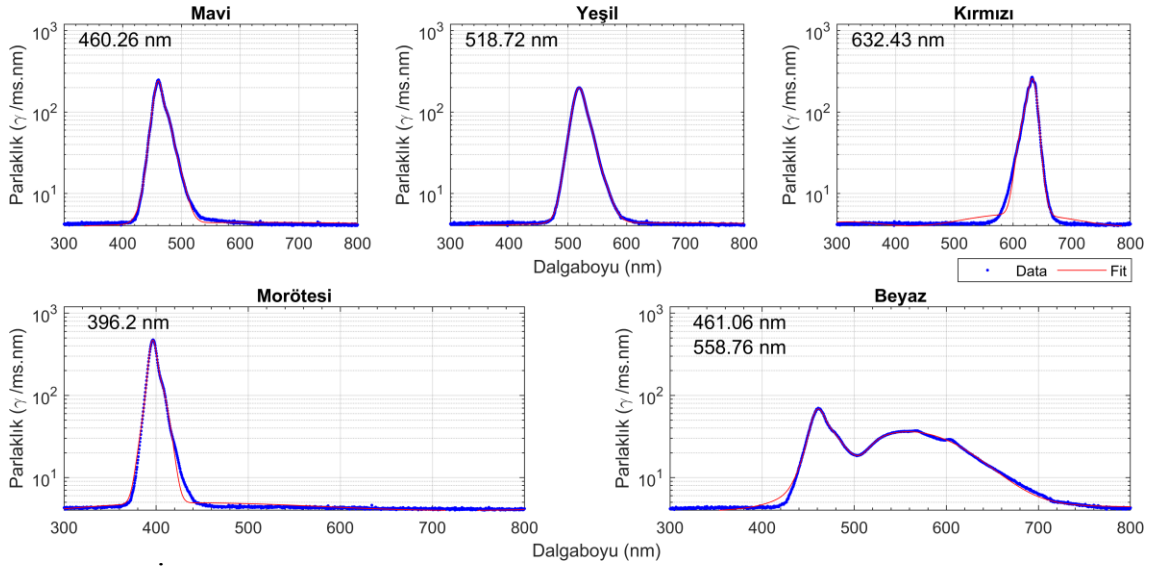
Şekil 4.27 Toplam geçirgenlik kaybı, trapezoid nümerik integralden kaynaklanan hata çizgileri ve bu geçirgenlik kaybına uygulanan fit eğrileri

Grafiklerde görüldüğü üzere farklı ortamların hem iyileşme hızlarına hem de kalıcı hasar oranlarına etkisi olmuştur, bu durum Çizelge 4.5’te de net bir şekilde görülebilmektedir.

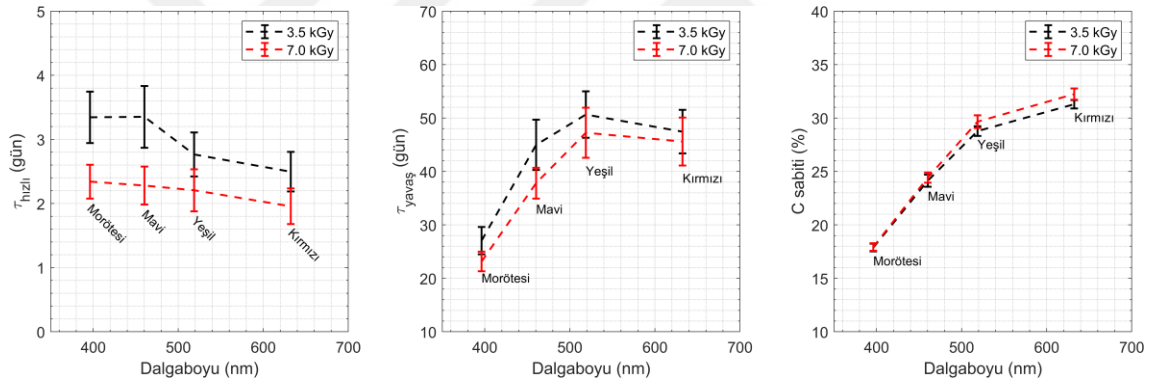
Çizelge 4.5 Toplam geçirgenlik kaybına uygulanan fit eğrilerini oluşturan sabitler

Örnek Seti	Ortam	A Sabiti (%)	$\tau_{hızlı}$ (gün)	B sabiti (%)	$\tau_{hızlı}$ (gün)	C sabiti (%)
3,5 kGy	Karanlık Kutu	9,31±0,50	2,78±0,31	11,07±0,35	49,47±4,95	25,45±0,41
	Çevresel Işık	9,03±0,78	2,26±0,40	12,96±0,56	53,65±7,08	23,74±0,68
	Beyaz LED	8,91±0,71	2,74±0,44	15,62±0,47	44,29±4,00	27,89±0,48
	Morötesi LED	16,91±1,13	3,34±0,40	17,35±0,95	27,06±2,56	17,88±0,36
	Mavi LED	11,47±0,81	3,35±0,48	16,54±0,57	44,98±4,71	24,13±0,57
	Yeşil LED	8,98±0,54	2,76±0,34	14,13±0,38	50,65±4,35	28,78±0,45
	Kırmızı LED	8,60±0,52	2,50±0,31	12,35±0,34	47,45±4,08	31,29±0,39
7,0 kGy	Karanlık Kutu	9,78±0,64	2,53±0,34	13,75±0,42	46,89±4,44	32,38±0,47
	Çevresel Işık	11,23±0,89	1,95±0,31	16,19±0,64	53,90±6,25	28,00±0,77
	Beyaz LED	12,02±0,79	2,17±0,29	17,92±0,49	43,24±3,47	27,72±0,51
	Morötesi LED	19,77±1,16	2,34±0,26	19,87±0,88	23,14±1,83	17,93±0,35
	Mavi LED	13,46±0,86	2,28±0,30	19,21±0,53	37,80±2,87	24,43±0,48
	Yeşil LED	11,20±0,82	2,21±0,33	16,15±0,53	47,24±4,68	29,65±0,60
	Kırmızı LED	10,85±0,76	1,96±0,28	14,20±0,47	45,59±4,49	32,24±0,52

Şekil 4.29'da çizelgede verilen iyileşme değerleri ile iyileştirme amaçlı kullanılan LED'lerin baskın dalga boyu karşılaştırılmıştır, bu arada Şekil 4.28'de ise bu karşılaştırma için gerekli baskın dalga boyunu ölçerken kullanılan spektrum ve bu spektruma uygulanan gauss fitleri gösterilmiştir. Grafiklerde aynı zamanda baskın dalga boyu da belirtilmiştir. Beyaz LED'in spektrumu tek bir tepeye sahip olmadığı için ürettiği ışığın iyileşme üzerine etkileri tek bir dalgaboyuna indirgenemez. Bu nedenle iyileşme parametrelerinin, dalga-boyu ilişkisi değerlendirilemez.



Şekil 4.28 İyileştirme aşamasında kullanılan farklı LED renklerinin ürettiği spektrumlar, bu spektrumlara uygulanan fit eğrileri ve fit eğrilerinden hesaplanan etkin dalga boyları



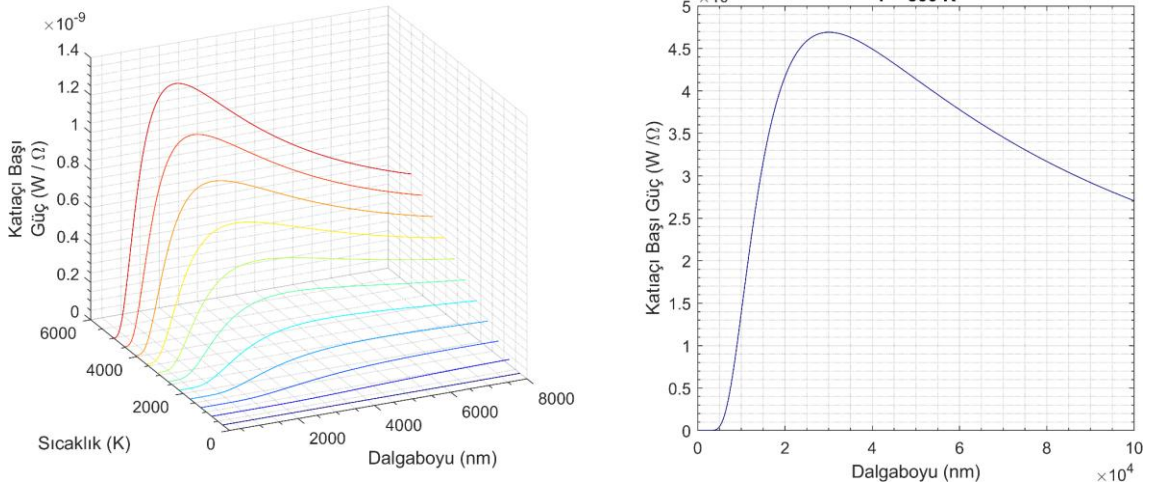
Şekil 4.29 Fit eğri denklemini oluşturan iyileşme değerleri ile iyileştirme amaçlı kullanılan LED'lerin baskın dalga boyu karşılaştırılması, burada beyaz LED tek bir tepe üretmediği için grafikte yer verilmemiştir

Çizelge 4.5 ve Şekil 4.29'a bakılırsa hızlı iyileşme zaman sabiti ($\tau_{hızlı}$) hata aralığı göz önünde bulundurulduğunda, kullanılan LED dalga boyundan minimal seviyede etkilenmektedir. Büyük olasılıkla enerji yüklü fotonlar ile etkileşen atomlar yer değiştirmiş ve moleküler iç strese neden olmuştur. Ardından bu stres 7 kGy örnekleri için 6 gün (yaklaşık $3 \times \tau_{hızlı}$), 3,5 kGy örnekleri için 9 gün içerisinde etkisini kaybetmiştir. Stresin oluşturduğu enerjide 3,5 kGy örnekleri ile 7 kGy örnekleri arasında fark gözlenmektedir. Bunun nedeninin ise soğurulan toplam doz farkından kaynaklanan başlangıç koşullarındaki farklılık olduğu düşünülmektedir. Özetle daha

çok enerji soğuran 7 kGy üzerinde daha yüksek mekanik stres oluşmuş ve bu enerji daha hızlı boşalmıştır. Örnekler arasındaki kalınlık farkı nedeniyle hassas bir karşılaştırma yapmak mümkün olmamakla birlikte hızlı iyileşme sürecinin örnekler arasında kayda değer farklılık göstermemesi nedeniyle daha hassas bir karakterizasyona gerek yoktur.

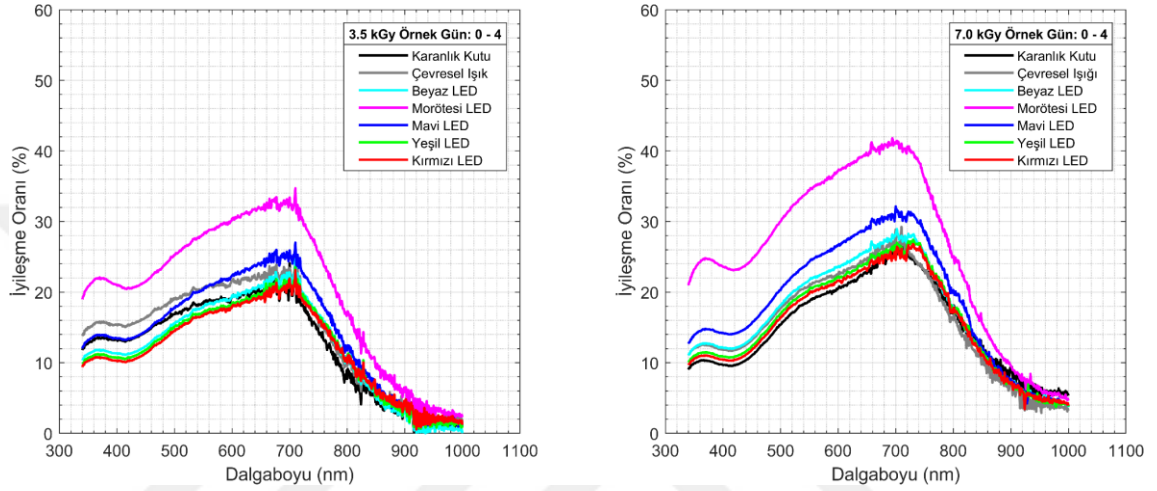
Yavaş iyileşme zaman sabiti ($\tau_{\text{yavaş}}$) incelendiğinde ise $\tau_{\text{hızlı}}$ gibi her örnekte bulunan ancak yavaş iyileşme katsayısına (B) bakıldığında özellikle karanlık kutu örneği için görece zayıf kalmış bir etkenden kaynaklanmalıdır. Bu etken, karanlık kutu örneği hariç diğer her örneğin çokça maruz kaldığı ışık olmalıdır. Çevresel ortamda ve LED istasyonlarında bekletilen örnekler bilinçli olarak ışık ile uyarılmışlardır ve bu nedenle iyileşme katsayısı büyüktür. Buna karşın karanlık kutu içerisindeki örnek yalnızca karacisim ışımından kaynaklanan düşük enerjili kızılötesi ışınlar ile etkilemiş bu nedenle iyileşme katsayısı diğerlerine kıyasla küçük kalmıştır. Sıcaklığa bağlı karacisim ışımaları fonksiyonu eşitlik 4.2’de ve bu fonksiyonun oluşturduğu grafik Şekil 4.30’da gösterilmiştir (Rybicki ve Lightman 1979).

$$B_{\nu}(T) = \frac{2\nu^2}{c^2} \frac{h\nu}{\exp(h\nu/kT)-1} \quad (\text{Eşitlik 4.2})$$

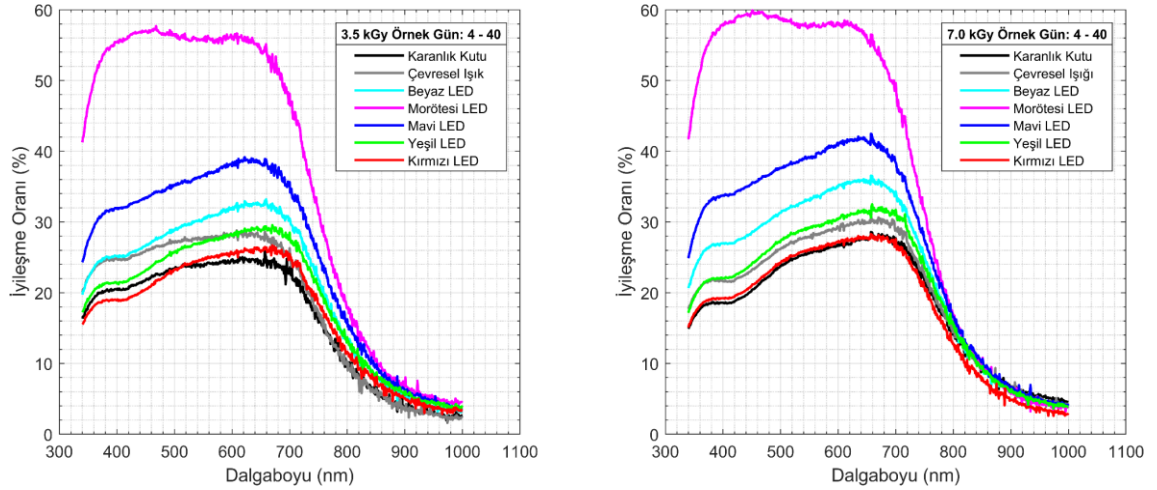


Şekil 4.30 Çeşitli sıcaklıklara sahip malzemenin yüzeyinden yayılan ışığın spektrumu (solda), 300 K yani yaklaşık oda sıcaklığında olan bir malzemenin yüzeyinden yayılan ışığın spektrumu (sağda)

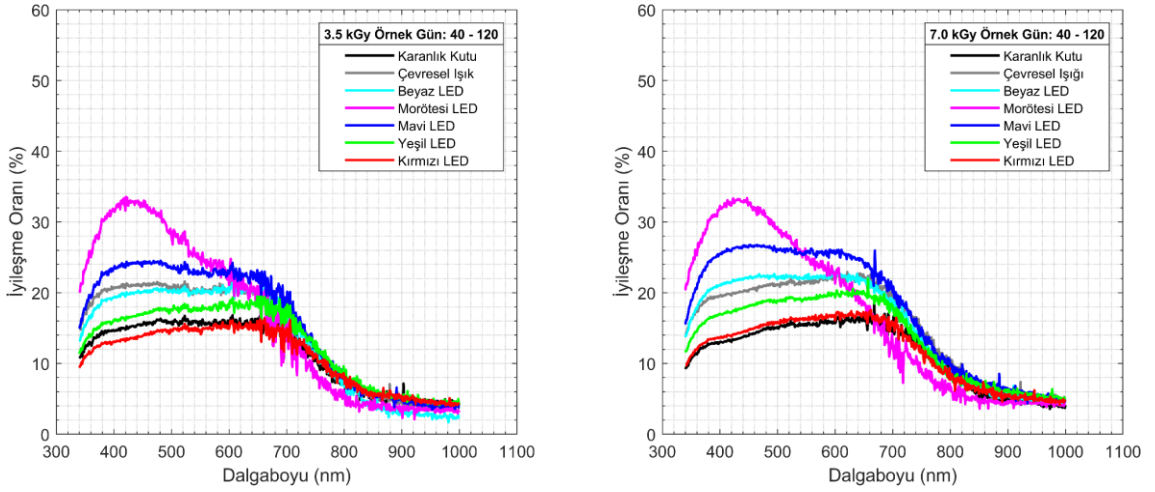
Radyasyon hasarındaki iyileşmenin spektral özelliklerini incelemek için, çeşitli iyileşme koşulları altında ve kısa, orta ve uzun vadede gerçekleşen iyileşme oranları Şekil 4.31, 4.32 ve 4.33’de gösterilmiştir. Şekil 4.31 0 ile 4. günler arası iyileşme oranlarını, Şekil 4.32 4 ile 40. gün arası iyileşme oranlarını ve Şekil 4.33’de 40 ile 120. gün arası iyileşme oranlarını göstermektedir.



Şekil 4.31 ilk gün ile 4. gün arası ölçülen spektral iyileşme oranları



Şekil 4.32 4. gün ile 40. gün arası ölçülen spektral iyileşme oranları



Şekil 4.33 40. gün ile 120. gün arası ölçülen spektral iyileşme oranları

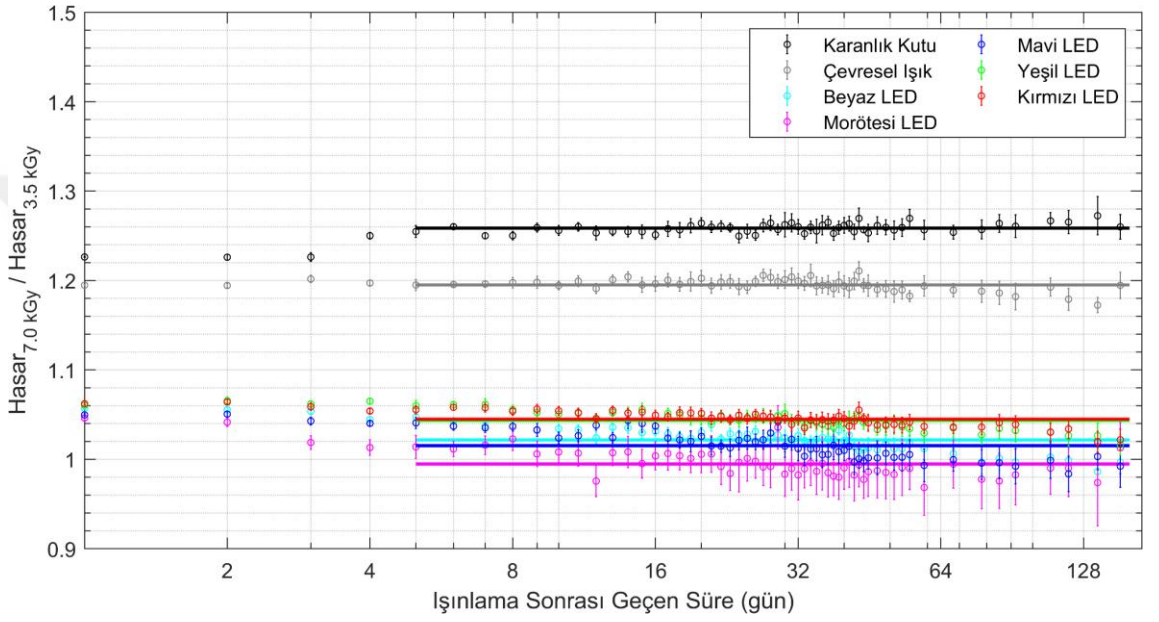
İlk 4 günün iyileşme oranlarına bakıldığında iyileşme rejimlerinin tüm doz miktarları, örnek kalınlıkları ve iyileşme mekanizmaları için benzer bir karakter sergilediği görülmektedir. İyileşme oranlarında biri 360 nm, diğeri 680 nm’de iki temel pik gözlenmektedir. 7 kGy örneklerine ait oranlar incelendiğinde ise karanlık kutu şartlarındaki iyileşmenin, tahmin edildiği gibi, diğer tüm örneklerin gerisinde kaldığı gözlemlenmiştir. LED altında iyileşme koşulları arasında beklenen karakteristik sıralama, morötesi, mavi, beyaz, yeşil ve kırmızı olarak ölçülmüştür.

4. gün ile 40. gün aralığındaki oranlar incelendiğinde 360 nm pikinin tüm iyileşme oranlarında mevcut olduğu gözlemlenmektedir. Bu zaman aralığındaki iyileşmelerde, sadece morötesi LED koşullarında gözlenen 440 nm civarındaki pikin ortaya çıkması kayda değerdir. Takipçisi olan mavi LED koşullarında dahi gözlenmeyen bu özellik orta vadeli iyileşmelerin baskın özelliğidir.

40 ve 120. günler arasındaki zaman diliminde ise, morötesi ışığın küçük dalga boyuna sahip spektrumda iyileşme hızı hala en önde olmasına rağmen büyük dalga boyuna sahip frekansta durum tersine dönmüştür. Bu grafik ise bize morötesi ışığın iyileştirme etkisinin uzun vadede doyuma ulaştığını göstermektedir.

4.5 Tartışma

Kalınlık farkının iyileşme mekanizmasına etkilerini araştırmak için Şekil 4.34’de gösterilen oranlar incelenmiş ve 7 kGy ve 3,5 kGy örnek grubu arasındaki oranın çoğunlukla düz çizgi halinde olduğu gözlenmiştir. Düz çizgiler sabit sayılar olup değerleri Çizelge 4.5’da verilmiştir.

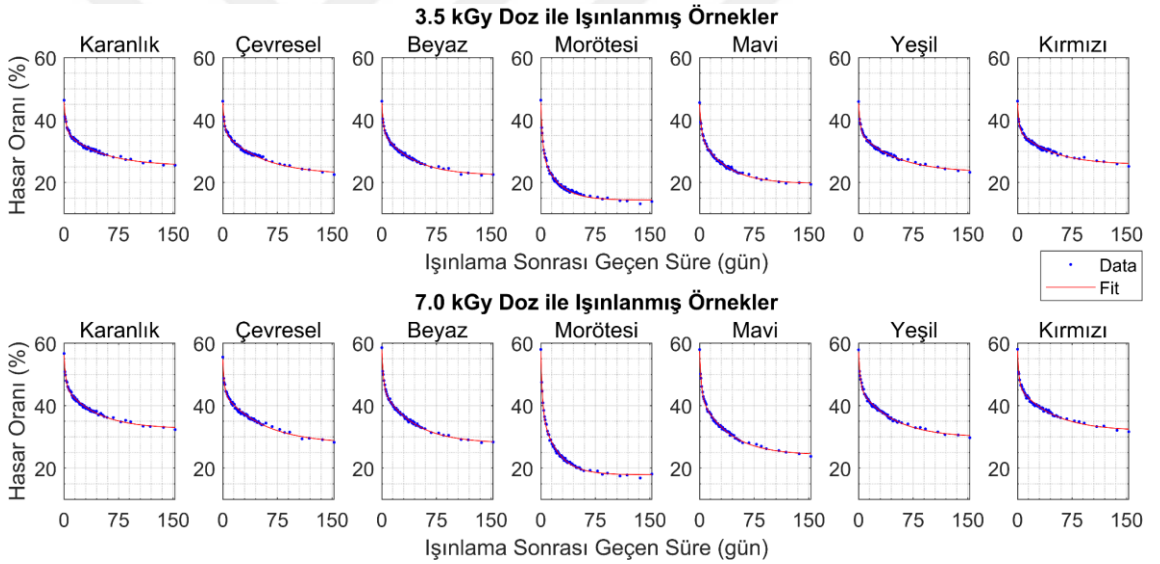


Şekil 4.34 7 kGy örneklerin kalıcı hasarları ile 3,5 kGy örneklerin toplam geçirgenlik kayıpları arasındaki oran ve bu oranlara ilk 4 günü dahil etmeden uygulanmış doğrusal fit eğrileri

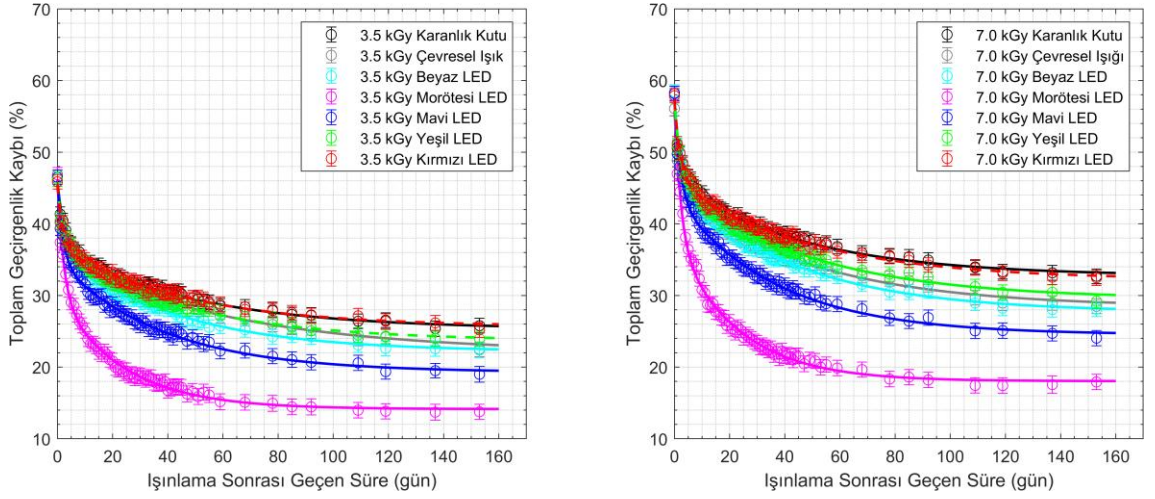
Çizelge 4.6 7 kGy örneklerin kalıcı hasarları ile 3,5 kGy örneklerin toplam geçirgenlik kayıpları (TGK) arasındaki oranlara ilk 4 günü dahil etmeden uygulanmış doğrusal fit eğrileri

Referans Denklem	Örnek	TGK Oranları
$y = \text{TGK}_{7\text{ kGy}} / \text{TGK}_{3,5\text{ kGy}}$	Karanlık Kutu	1,259±0,001
	Çevresel Işık	1,195±0,002
	Beyaz LED	1,022±0,004
	Morötesi LED	0,995±0,004
	Mavi LED	1,015±0,004
	Yeşil LED	1,043±0,003
	Kırmızı LED	1,045±0,002

Şekil 4.34 ve Çizelge 4.6 incelendiğinde karanlık kutu ve çevresel ışık toplam geçirgenlik kaybı oranları ortalamasının 1,227 olduğu görülebilir. Buna göre 7 kGy ile ışınlanan örnekler, aynı kalınlıktaki 3,5 kGy ile ışınlanan örneklerden %23 daha fazla hasar almıştır. Buna karşın ortalama oran LED ışığı ile uyarılmış örneklerde 1,024 olup 7 kGy örneklerin yalnızca % 2,4 daha fazla hasar aldığını göstermektedir. Neticelerin, farklı kalınlıklardaki örneklerin radyasyon hasarı ve iyileşmelerini tahmin gücünü araştırmak için 3,5 kGy LED grubu örneklerin iyileşme trendleri bu katsayı ile çarpılarak tekrar analiz edilebilir. Ek olarak spektrometrenin % 1 hata payını simüle etme amaçlı her günün TGK verisi -0,5 ile 0,5 arasında rastgele bir sayı ile toplanmıştır. Katsayılar uygulandıktan sonra her TGK ve uygulanan fit eğrileri Şekil 4.35’de ayrı ayrı, Şekil 4.36’da ise üst üste verilmiştir.



Şekil 4.35 7 kGy LED grubu örneklerin TGK eğrileri ve katsayılar uygulandıktan sonraki 3,5 kGy LED grubu örnekleri için TGK eğrileri ve uygulanan fitler

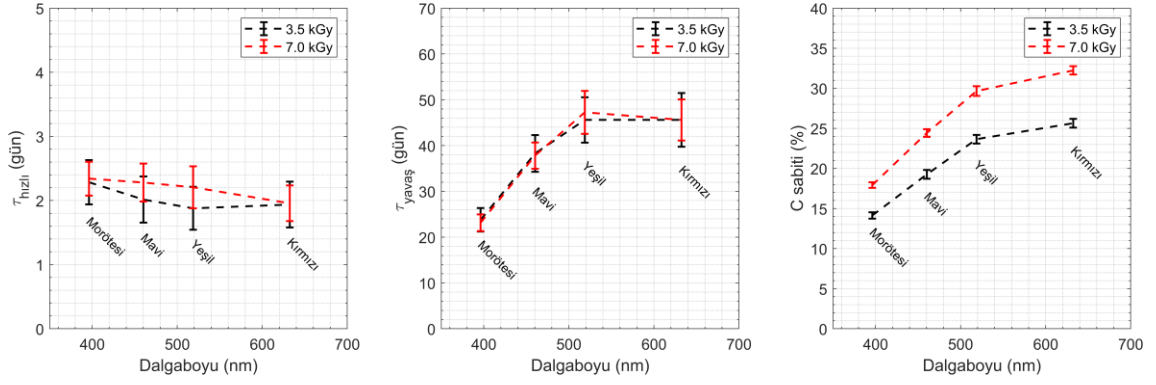


Şekil 4.36 3,5 kGy LED grubu örneklerin verilerine hesaplanan katsayılar uygulandıktan sonraki TGK ve uygulanan fit eğrileri

Çizelge 4.7’de yeniden düzeltilmiş toplam geçirgenlik kaybına uygulanan fit eğrilerini oluşturan sabitler verilmiştir.

Çizelge 4.7 Düzeltilmiş toplam geçirgenlik kaybına uygulanan fit eğrilerini oluşturan sabitler

Örnek Seti	Ortam	A Sabiti (%)	$\tau_{hızlı}$ (gün)	B sabiti (%)	$\tau_{hızlı}$ (gün)	C sabiti (%)
3,5 kGy	Karanlık Kutu	9,31±0,50	2,78±0,31	11,07±0,35	49,47±4,95	25,45±0,41
	Çevresel Işık	9,03±0,78	2,26±0,40	12,96±0,56	53,65±7,08	23,74±0,68
	Beyaz LED	9,22±1,01	1,97±0,44	14,52±0,60	41,89±5,05	22,15±0,62
	Morötesi LED	16,09±1,26	2,28±0,35	15,90±0,93	23,78±2,56	14,14±0,40
	Mavi LED	11,20±0,98	2,02±0,36	15,53±0,58	38,28±4,00	19,26±0,55
	Yeşil LED	8,97±0,79	1,88±0,33	13,20±0,49	45,58±4,94	23,65±0,54
	Kırmızı LED	8,68±0,79	1,94±0,36	11,20±0,49	45,60±5,87	25,64±0,54
7,0 kGy	Karanlık Kutu	9,78±0,64	2,53±0,34	13,75±0,42	46,89±4,44	32,38±0,47
	Çevresel Işık	11,23±0,89	1,95±0,31	16,19±0,64	53,90±6,25	28,00±0,77
	Beyaz LED	12,02±0,79	2,17±0,29	17,92±0,49	43,24±3,47	27,72±0,51
	Morötesi LED	19,77±1,16	2,34±0,26	19,87±0,88	23,14±1,83	17,93±0,35
	Mavi LED	13,46±0,86	2,28±0,30	19,21±0,53	37,80±2,87	24,43±0,48
	Yeşil LED	11,20±0,82	2,21±0,33	16,15±0,53	47,24±4,68	29,65±0,60
	Kırmızı LED	10,85±0,76	1,96±0,28	14,20±0,47	45,59±4,49	32,24±0,52



Şekil 4.37 Düzeltilen Fit eğri denklemini oluşturan iyileşme değerleri ile iyileştirme amaçlı kullanılan LED'lerin baskın dalga boyu karşılaştırılması, burada beyaz LED tek bir tepe üretmediği için grafikte yer verilmemiştir

Uygulanan katsayıların etkinliği 3,5 kGy ve 7 kGy sonuçlarının tutarlılığından anlaşılabilir. Yeni fitler ile elde edilen katsayılar incelendiğinde hızlı iyileşme zaman sabitinin ($\tau_{\text{hızlı}}$) örneğin maruz kaldığı doza minimal seviyede bağlı olduğu anlaşılmaktadır. Şekil 4.36 ile karşılaştırıldığında $\tau_{\text{hızlı}}$ değerleri daha düz bir dizilime sahiptir ve bu hızlı iyileşmenin LED iyileştirme mekanizmasının detaylarına minimal seviyede bağlı olduğunun göstergesidir. Orta grafikte yer alan $\tau_{\text{yavaş}}$ sabiti ele alınırsa, aynı şekilde örneğin maruz kaldığı radyasyon dozundan bağımsız bir değere yaklaştığını görürüz. $\tau_{\text{yavaş}}$ ile uyarılma dalga-boyu arasındaki genel trende bakılırsa dalga-boyu küçüldükçe sabit küçülmekte yani iyileşme hızı artmaktadır. Sağ grafiğe bakıldığında ise çok farklı bir sonuç ile karşılaşılır. Şekil 4.36'da verilen görselde neredeyse çakışık çizilen C sabiti, yani kalıcı hasar, Şekil 4.37'de maruz kalınan doz oranıyla ters güdüme olduğu görülmektedir. Uyarılmak için kullanılan ışığın dalga-boyu azaldıkça C sabitinin de azalmış olduğu görülmektedir. Bu nedenle rahatça söylenebilir ki, iyileştirme uygulamasında kullanılan LED dalga-boyu küçüldükçe hem iyileşme hızı artmakta, hem de daha etkin bir iyileşme gerçekleşmektedir.

4.6 Sistemik Hatalar

Deney düzeneğinin kurulumunda ve kalibrasyon sürecinde kullanılan aletlerin sebep olduğu hataların birikmesi sonucu sonuçları etkileyerek ölçüm belirsizliğine yol açabilecek sistemik hatalar bulunmaktadır. Bazı durumlarda sistemik hataların oluşturduğu etkiler düzeltme faktörleri ile giderilebilirken ölçüme dayalı hatalar ise aynı

veri kaynağının çok sayıda ölçülmesi ile azaltılabilir.

LED parlaklıklarının kalibrasyonu kısmında LED istasyonlarında bulunan LED'lerin parlaklıkları arasında %6-7'lik fark olduğu ölçülmüştür, bu farkın sistematik hata dahilinde olduğuna karar vermek için parlaklığı etkileyebilecek sistematik hataların elde edilmesi ve toplanması gerekmektedir. Bu nedenle minyatür spektrometrenin ölçüm süresi ile LED'lerin açık kalma süreleri arasındaki senkronizasyon problemleri ve/veya LED'in üzerinde oluşabilecek empedans değişikliklerinden ortaya çıkabilecek ölçüm hatalarının ölçüme nasıl bir etkide bulunduğu ölçülmelidir. LED istasyonunda bulunan toplamda 10 LED spektrumu 25'er kez ölçülmüştür, ardından toplam parlaklıkların hesaplanması için integralleri alınıp elde edilen verilerden standart sapma hesaplanmıştır. İntegralleri hesaplamak için kullanılan trapezoid metodunun öngördüğü hata dahilinde toplamda LED parlaklık ölçümlerinden kaynaklanan hata %0,2 bulunmuştur. LED istasyonunun yapımında akım sınırlayıcı olarak kullanılan SMD tipi dirençler standart %1,5 civarı bir direnç belirsizliğine sahiptir, 2 LED istasyonunda toplamda 24 adet bulunduğu için dirençlerin belirsizliğe katkısı %7,3 hesaplanır. Minyatür spektrometrenin ölçüm hatası %1 olduğuna göre LED parlaklıkları arasındaki göreceli farklılık %7,4'ü geçmemelidir. LED'ler arası kalibrasyon yapıldıktan sonra elde edilen verilere göre (Şekil 4.6) en parlak olan, istasyon 2 morötesi LED ile en sönük olan, istasyon 1 kırmızı LED arasındaki parlaklık farkı %6,7 ölçülmüştür ve bu oran hesaplanan sistematik hatadan küçük olduğu için problem oluşturmamaktadır.

Örneklerde yapılan toplam geçirgenlik kaybı ölçümlerinde karşılaşılan sistematik hatalardan birisi Shimadzu spektrometrenin %1 hata oranı ve diğeri integral hesaplama için kullanılan trapezoid metodunun neden olduğu hatadır. Bu hata oranları Şekil 4.4.1'de zamana bağlı hasar oranları ve uygulanan fit değerleriyle birlikte verilmiştir ve grafiğe göre fit eğrileri ile hata parametreleri arasında fark görülmemektedir.

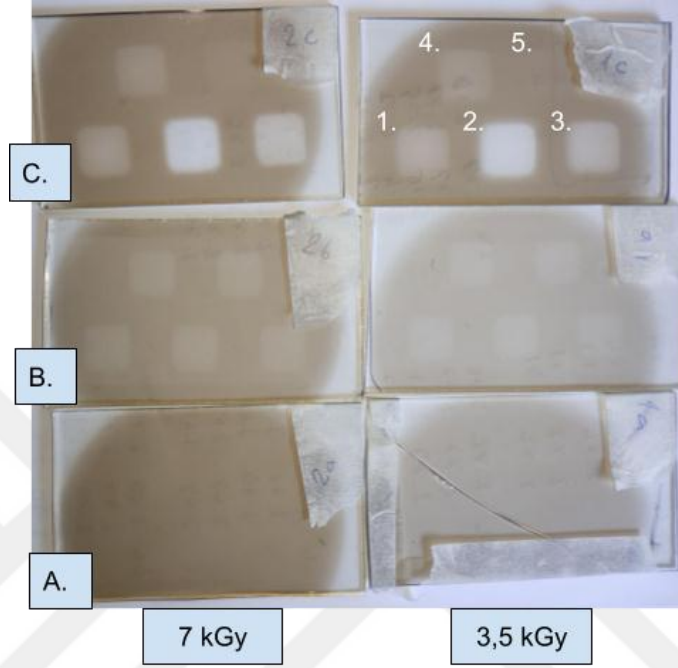
Doz oranındaki belirsizlik, örneklerin merkezlerinin buldukları hassas pozisyona bağlı olarak 7 kGy için %4,2 ve 3,5 kGy için %3,9 olarak hesaplanmıştır. Dolayısıyla, belirsizlikleriyle birlikte toplam dozlar $7,0 \pm 0,3$ kGy ve $3,5 \pm 0,1$ kGy olarak ifade edilebilir.

5. SONUÇ

Radyasyon malzeme ile karşılaştığında, enerjisi, çeşidi gibi pek çok değişkene bağlı olarak çok çeşitli etkileşim gösterebilir. Bu etkileşimler moleküler bağları sağlam kuvars gibi kristallerde görsel değişimlere sebep olmayabilir. Ancak deneylerde görüldüğü gibi kimyasal açıdan daha kararsız ve şeffaf malzemeler, moleküler yapılarında oluşan değişimler nedeniyle ışık geçirgenliği özelliklerini kısmen kaybedebilirler. Esnek moleküler bağlara sahip bazı malzemeler kendi kendilerine bu özelliklerini geri kazanabilirler ancak yine de bu hasar tamamen giderilemez. Uyarılma amaçlı LED kullanılarak plastik sintilatörlerin uğradığı radyasyon hasarından iyileşmelerinin hızlandığı ve nihai hasarın daha düşük seviyelere geldiği gözlenmiştir. Ancak LED uyarımlı iyileşme üzerine, bu tez çalışmasına kadar, sistematik bir çalışma yapılmamıştır.

Tez çalışmaları kapsamında gerçekleştirdiğimiz deneyde amorf yapıya sahip pencere camı kullanılmıştır. Örnekler 87,5 Gy/dakika doz hızında, 3,5 kGy ve 7 kGy toplam doza maruz kalacak şekilde ışınlanmış ve iyileşme ortamlarına göre 3 gruba ayrılmışlardır. A grubu örnekler sıcaklık kontrolü bulunan kapalı bir kutuda karanlıkta bekletilmiş, C grubu örnekler A grubu ile aynı ortamda ancak 5 farklı spektrumda ışık ile uyarılacak şekilde LED istasyonlarında bekletilmiştir. B grubu örnekler ise sıcaklık ve ışık kontrolü olmayan bir ortamda, güneş ve floresan ışığına gelişigüzel maruz bırakılmıştır. Bu şekilde hangi ortamın hasar görmüş örneklerin iyileşmeleri üzerinde daha etkili olduğu test edilmiştir. Şekil 5.2'deki fotoğrafta örneklerin iyileşme ölçümleri tamamlandıktan sonraki görüntüleri yer almaktadır. Bu görselde gösterilen fotoğrafa göre B ve C grubu örneklerde iyileşmenin baskın olduğu yani daha açık renkli alanlar bulunmaktadır. Bunun nedeni, örnek üzerine yerleştirilen kılavuz maskeleri ışığı B grubu için kısmen, C grubu için tamamen engellenmesidir. C grubunda ise bu açık renkli alanlar arasında farklılık göze çarpar. Bunun nedeni, iyileşme sırasında LED istasyonu ile hizalanan kılavuz maskelerinin, her bir bölgeye ancak tek bir LED'den yayılan ışığı başarıyla iletmesidir. Bu şekilde tek parça malzeme üzerinde birbirlerinden farklı iyileşme ortamları sağlanmış olur. Farklı iyileşme koşullarına sahip bölgelerin en açık renkli olanı 2 numaralı bölgedir, bu bölge doğrudan yalnızca 395 nm dalga

boyunda ışık yayan morötesi LED ile uyarılmıştır. A grubu örneklerine ise aynı kılavuz maskesi takılı olmasına rağmen bu bölgeler göze çarpmaz çünkü, bu örneklerin kılavuz takılı olmayan yüzeyleri çevresel ışık koşullarına tamamen açıktır.



Şekil 5.1 İyileşme ölçümleri sonrasında örneklerin fotoğrafları. Burada örnekler dikey olarak ışınlandıkları doz miktarına göre, yatay olarak buldukları iyileşme ortamına göre gruplanmıştır, A grubu karanlık kutu, B grubu çevresel ortam, C grubu LED istasyonudur ve LED rengi sıralaması; 1 beyaz LED, 2 morötesi LED, 3 mavi LED, 4 yeşil LED ve 5 kırmızı LED şeklindedir

Shimadzu marka spektrometre kullanılarak, örneklerin ışık geçirgenliği, 200 nm ile 1500 nm arasında, periyodik spektrum ölçümleri alınarak kaydedilmiştir. Kaydedilen verilere göre örneklerin toplam ışık geçirgenliklerinin yanı sıra, spektral geçirgenliği bilgisine de ulaşılmıştır. Işınlanmamış örneklerin geçirgenlik spektrumları ile zamana bağlı iyileşme verileri hesaplanmıştır.

İlk 4 gün için (Şekil 4.31) baskın iyileşme nedeninin moleküler stresin boşalması ile ortaya çıktığı düşünülmektedir. Bu evrede tüm örneklerde göze çarpan 2 iyileşme oranı piki bulunmaktadır, birisi 360 nm dalga-boyuna denk gelirken diğeri 680 nm dalga-boyuna denk gelmektedir. Morötesi ışık ile uyarılan örnekteki iyileşme oranı diğer

örnekler ile karşılaştırıldığında görülebilir bir şekilde daha yukarıda iken diğer örneklerde fark daha az belirgin olmakla birlikte sıralama azalan şekilde; morötesi, mavi, beyaz, yeşil ve kırmızı olarak ölçülmüştür.

Sonraki iyileşme periyoduna yani 4. gün ile 40. gün arasında (Şekil 4.32) gerçekleşen iyileşme bize moleküler stres boşalmasının, iyileşme üzerine olan etkisinin zayıflamış ve dış koşulların, yani ışık uyarımının daha etkin hale geçtiğini göstermektedir. Bu nedenle uyaran etkenlerin etkilerinin çok daha baskın hale geldiği gözlenmiştir. Ek olarak 360 nm ve 680 nm’de bulunan iyileşme piklerine ek olarak, yalnızca morötesi ışık ile uyarılan örnekte bulunan ve 440 nm’ye denk gelen bir pik bulunmaktadır. Böylelikle, morötesi ışık, görünür bölgedeki spektral iyileşme eğrisinin %55-%60 arasında yaklaşık olarak düzlemsel bir şekil almasına neden olmuştur. Morötesi ışık ile uyarılan örnekte ölçülen iyileşme oranının öncelikle 680 nm civarında başlayıp sonradan daha düşük dalga-boylarında hızlandığı söylenebilir.

40. gün ile 120. gün arasında (Şekil 4.33) ise göze çarpan en önemli detaylardan birisi, morötesi ışığın iyileşme oranının 680 nm üzerinde doygunluğa ulaşmış ve diğer spektrumların seviyesine gerilemiş olmasıdır. 440 nm civarındaki baskın pik ile morötesi ışık ile iyileşme hala diğer renklerin üzerinde bulunmaktadır. Diğer örneklerin iyileşme oranı spektrumlarının 4. gün ile 40. gün arasında morötesi ışığın neden olduğu iyileşme spektrumuna benzer ancak daha aşağıda olacak bir şekle girdiği görülmektedir. İlk 4 gün içerisinde iyileşme oranlarında olduğu gibi LED altında iyileşme koşulları arasında beklenen karakteristik sıralama, morötesi, mavi, beyaz, yeşil ve kırmızı neredeyse tüm deney süreci boyunca gözlemlenmiştir.

Işık uyarımının iyileşme hızına olan etkilerini tartışmak için, aynı kalınlıklarda olan örneklerin oluşturduğu, 7 kGy ile ışınlanmış örneklerin verilerine bakmak daha mantıklı olacaktır. 800 nm ile 1000 nm arasında göze çarpan bir farklılık olmasa da, 200 nm ile 800 nm arasında özellikle morötesi ışığın iyileşme konusunda çok etkin bir hızlandırıcı olduğu görülmektedir. Tüm örnekler bakıldığında ise iyileşme hızlarına göre sıralanmış örnekler şu şekildedir; En yüksek hızlı iyileşme morötesi LED ile uyarılan örnek, ikinci sırada mavi LED ile uyarılan örnek, üçüncü sırada beyaz LED ile uyarılan örnek,

dördüncü sırada yeşil LED ve çevresel ile uyarılan örnekler ve sonuncu sırada kırmızı LED ile uyarılan örnek ve karanlık kutuda bekletilen örnek bulunmaktadır.

Toplam geçirgenlik kayıplarının zamana bağlı değişimlerine (Şekil 4.29), iki eksponansiyel bileşeni ve bir sabit değeri olan denkleme karşılık gelecek şekilde fit yapılmıştır. Bu iki eksponansiyel bileşenden ilki, deneyin başladığı ilk günlerde çok hızlı bir iyileşme sağlayacak ancak etkisini kısa sürede kaybedecektir. Bu bileşene hızlı iyileşme zaman sabiti ($\tau_{\text{hızlı}}$) denmiştir. $\tau_{\text{hızlı}}$ ifadesinin boyutu ile zaman t ifadesi doğrudan ilişkilidir ve t ifadesi, $\tau_{\text{hızlı}}$ ifadesinin 3 katı büyüklüğe ulaştığında eksponansiyel ifade %5'e yaklaşmış olur. Bu nedenle eksponansiyel ifadenin, genel denklem üzerindeki etkisini kaybetmiş olduğu söylenebilir. Aynı ilişki yavaş zaman sabiti ($\tau_{\text{yavaş}}$) için de geçerlidir. Kalıcı toplam geçirgenlik kaybı (C) veya kalıcı hasar oranı iki eksponansiyel ifade ile toplanır ve bu şekilde t ifadesi ne kadar büyürse büyüsün, fonksiyonun C değerinin altına inmesi mümkün değildir.

7 kGy dozlanmış örneklerde, karanlık kutu koşulu hızlı ve yavaş zaman sabitleri $2,53 \pm 0,34$ gün ve $46,89 \pm 4,44$ gündür. En etkin iyileşme morötesi LED ile uyarılma koşulu için kaydedilmiş olup hızlı ve yavaş zaman sabitleri $2,34 \pm 0,26$ gün ve $23,14 \pm 1,83$ gün olarak hesaplanmıştır. Karanlık kutu ve morötesi LED uyarım koşulları için kalıcı hasar % $32,38 \pm 0,47$ ve % $17,93 \pm 0,35$ olarak elde edilmiştir. Dolayısıyla, morötesi LED uyarımı karanlık kutu koşuluna göre %51 daha hızlı iyileşme ve %45 daha iyi toplam iyileşme ile sonuçlanmaktadır. Mavi LED uyarımı ise karanlık kutu koşuluna göre %19 daha hızlı iyileşme ve %25 daha iyi toplam iyileşme ile sonuçlanmaktadır. Kırmızı LED uyarımı karanlık kutu şartı ile eşleniktir. Yeşil LED uyarımı ile iyileşme karanlık kutu koşulundan daha iyi ancak çevresel ışık ve beyaz LED koşullarından daha kötüdür. Bu bulgular, 580 nm üzerindeki uyarıcı dalga boyunun etkin olmadığını, 500 – 580 nm aralığının ise minimal etkiye sahip olduğunu göstermektedir. Radyasyon hasarından iyileşmenin ölçülebilir etkileri 500 nm'den küçük uyarıcı dalga boylarında gözlenmektedir. Yavaş iyileşme sabitleri ve kalıcı hasar açıkça azalan dalga boyu ile azalan trendler göstermektedirler.

3,5 kGy dozlanmış örnekler diğer örneklerden %33 daha kalındır. Dolayısıyla, bu çalışma, toplam doz ve örnek kalınlığının etkilerinin aynı anda incelenmesine olanak vermektedir. Yüksek dozun karanlık kutu ve çevresel ışık koşullarındaki ortalama etkisi %23'tür. Örnek kalınlığından kaynaklı etki ise ortalama %2,4'tür ve bu oranların sabitliği, bu çalışma ile elde edilen neticelerin, deney koşullarının çok ötesinde bir tahmin gücü olduğunu göstermektedir. Bu tahmin gücü, uygun ölçekleme katsayıları kullanılarak bu çalışma kapsamında doğrulanmıştır. Aynı örnek malzemesi ile gerçekleştirilecek farklı toplam doz ve kalınlıkları içerecek tüm deneylerin neticeleri, bu çalışmada elde edilen sonuçlar ile öngörülebilir.

5.1 Öneri

Şekil 4.4.3'te gösterilen $\tau_{yavaş}$ ve C sabiti grafiklerine göre hem iyileşme hızı hem de hasarın giderilebileceği azami sınır uyarılmak için kullanılan ışığın dalga-boyunun küçülmesinden olumlu etkilenmektedir. Bu durum göz önünde bulundurulduğunda deneyde kullanılan 395 nm dalga-boyuna sahip ışık kaynaklarından daha kısa dalga-boyuna sahip kaynaklar kullanılarak iyileşmenin karakterizasyonu test edilmelidir. Örneğin, aynı görseldeki C sabiti grafiğinden ekstrapolasyon ile hesaplama yapılırsa, 300 nm dalga boyuna sahip ışık kaynağı ile uyarılan örneklerin kalıcı hasar oranının % 10'un altına indirilebileceği öngörülmektedir.

Deneyde örnek malzemesi olarak amorf kristal yapıya sahip sodalı cam kullanılmıştır. Bu çalışma kapsamında, sodalı cam ile gerçekleştirilecek farklı toplam doz ve kalınlıkları içerecek tüm deneylerin neticeleri, bu çalışmada elde edilen sonuçlar ile öngörülebilir. Farklı malzemeler ve farklı doz oranları ayrıca çalışılmalıdır. Benzer deneyler polimer yapıya sahip sintilatörler için de gerçekleştirilmelidir. Bu durumda yüksek dozda ışınlanma yüzünden sintilasyon verimini kaybetmiş malzemeler ışık ile uyarılma metodu ile iyileştirilebilir veya dedektörler inaktif durumda iken, sintilatörler dedektörden dışarı çıkarılmadan, dahili LED'ler ile uyarılarak kullanım ömürleri uzatılmış dedektörler tasarlanıp test edilebilir.

KAYNAKLAR

- Ahmed, S. N. (2007). Physics and Engineering of Radiation Detection. 51
- Aksoy, A., & Karsli, O. (Eds) 2015. The Technical Design Report of Turkish Accelerator and Radiation Laboratory in Ankara. Institute of Accelerator Technologies (IAT), Ankara University, Ankara, Turkey.
- Allen, T. R. ve Was, G. S. (2007). Radiation-enhanced diffusion and radiation-induced segregation. In Radiation Effects in Solids. Springer, Dordrecht. 123-151.
- Al-Okour, A. (2021). Radiation Physics: Radiation interaction with matter. Materials Today: Proceedings. doi:10.1016/j.matpr.2020.11.566
- Arduino BME280 Sensor. (2022). Web sitesi. <http://cactus.io/hooks/sensors/barometric/bme280/hookup-arduino-to-bme280-barometric-pressure-sensor>. Erişim tarihi: 13.03.2022
- Arduino Uno Teknoloji. (2022). Web sitesi. <https://pixabay.com/tr/illustrations/arduino-arduino-uno-teknoloji-2168193/>. Erişim tarihi: 12.03.2022
- Arduino. (2022). Web sitesi. <https://www.arduino.cc>. Erişim tarihi: 12.03.2022
- Beyaz 1206 Formasyonlu SMD LED. (2021). Web sitesi. <https://www.direnc.net/1206-kilif-smd-led-beyaz-everlight-45-112mcd>. Erişim tarihi: 08.01.2021
- Braibant, Sylvie; Giacomelli, Giorgio; Spurio, Maurizio (2011). Particles and Fundamental Interactions: An Introduction to Particle Physics (illustrated ed.). Springer Science & Business Media. 109
- Choi, S.-K., Olsen, S. L., Adachi, I., Aihara, H., Aulchenko, V., Aushev, T., ... Bedny, I. (2008). Observation of a Resonancelike Structure in the $\pi^+\psi'$ Mass Distribution in Exclusive $B \rightarrow K\pi^+\psi'$ Decays. Physical Review Letters, 100(14). doi:10.1103/physrevlett.100.142001
- Christensen, D. M., Iddins, C. J., & Sugarman, S. L. (2014). Ionizing Radiation Injuries and Illnesses. Emergency Medicine Clinics of North America, 32(1), 245–265. doi:10.1016/j.emc.2013.10.002
- Clayton, D. D. (1984). Principles of Stellar Evolution and Nucleosynthesis. University of Chicago Press. 519
- Climate Change and Anthropogenic Greenhouse Warming: 1824-1995 arası yayınlanan makaleler kullanılarak hazırlanmış kümülatif yazı. (2022) Web sitesi. http://nsdl.library.cornell.edu/websites/wiki/index.php/PALE_ClassicArticles/GlobaWarming.html. Erişim tarihi: 02.04.2022

- Datta, A. K. & Rakesh, V. (2013). Principles of Microwave Combination Heating. *Comprehensive Reviews in Food*. doi:10.1111/j.1541-4337.2012.00211.x
- Dembinski, H. (2018). "Data-driven model of the cosmic-ray flux and mass composition from 10 GeV to 10^{11} GeV". *Proceedings of Science*. doi:10.22323/1.301.0533
- Dickey, P. A., & Axel, P. (1975). U238andTh232Photofission and Photoneutron Emission near Threshold. *Physical Review Letters*, 35(8), 501–504. doi:10.1103/physrevlett.35.501
- Dictionary.com “radiation” (2022). Web sitesi. <https://www.dictionary.com/browse/radiation#:~:text=The%20emission%20and%20propagation%20of,Radiotherapy>. Erişim tarihi: 02/07/2022
- Donald Blaufox, M. (1996). Becquerel and the discovery of radioactivity: Early concepts. *Seminars in Nuclear Medicine*, 26(3), 145–154. doi:10.1016/s0001-2998(96)80019-5
- Fernández, J. & Rubio, M. & Bradley, D. (2019). Radiation Physics and Chemistry. Bölüm 154.
- Haigh, J. D. (2007). The Sun and the Earth’s Climate. *Living Reviews in Solar Physics*, 4. doi:10.12942/lrsp-2007-2
- Hitchcock, R. Timothy (2004). Radio-frequency and Microwave Radiation. American Industrial Hygiene Assn.
- Huang, K. (2007). *Fundamental Forces of Nature: The story of gauge fields*. World Scientific.
- ICRP Yayını (2007) “ICRP Publication 103 The 2007 Recommendations of the International Commission on Protection”. ICRP.
- Infrared Spectroscopy, Michigan State Üniversitesi Arşivleri. (2022). Web sitesi. <https://web.archive.org/web/20071027110406/http://www.cem.msu.edu/~reusch/VirtualText/Spectrpy/InfraRed/infrared.htm>. Erişim tarihi: 02.04.2022
- Ishii, K. (2006). Continuous X-rays produced in light-ion–atom collisions. *Radiation Physics and Chemistry*, 75(10), 1135–1163. doi:10.1016/j.radphyschem.2006.04.008
- Kırmızı 1206 Formasyonlu SMD LED. (2021). Web sitesi. <https://www.direnc.net/1206-kilif-smd-led-kirmizi-everlight-57mcd>. Erişim tarihi: 08.01.2021
- König, D., Hiller, D., Wilck, N., Berghoff, B., Müller, M., Thakur, S., ... Knoch, J. (2018). Intrinsic ultrasmall nanoscale silicon turns n-/p-type with SiO₂/Si₃N₄-coating. *Beilstein Journal of Nanotechnology*, 9, 2255–2264. doi:10.3762/bjnano.9.210

- Krane, Kenneth S. (1988). *Introductory Nuclear Physics*. John Wiley & Sons. sayfa. 246–269
- Krane, Kenneth S. (1988). *Introductory Nuclear Physics*. John Wiley & Sons. sayfa. 539-542
- Kwan-Hoong, Ng. (2003). "Non-Ionizing Radiations – Sources, Biological Effects, Emissions and Exposures" Proceedings of the International Conference on Non-Ionizing Radiation at UNITEN ICNIR2003 Electromagnetic Fields and Our Health.
- Lawrence Berkeley National Laboratory (2000). "Beta Decay". Nuclear Wall Chart. United States Department of Energy.
- LPKF PCB Prototype Technology. (2022). Web Sitesi. <https://www.lpkf.com/en/>. Erişim tarihi: 06.03.2022
- Mavi 1206 Formasyonlu SMD LED. (2021). Web sitesi. <https://www.direnc.net/1206-kilif-smd-led-mavi-everlight-2850-72mcd>. Erişim tarihi: 08.01.2021
- Mohammed, S. A. H., & Walker, J. (1986). Application of Electron Beam Radiation Technology in Tire Manufacturing. *Rubber Chemistry and Technology*, 59(3), 482–496. doi:10.5254/1.3538211
- Morötesi 5050 Formasyonlu SMD 400-405 nm. (2021). Web sitesi. <https://urun.n11.com/led-ampul/uv-led-smd-5050-diyot-chip-400-455nm-P142206999>. Erişim tarihi: 08.01.2021
- Nasa Share The Science. "X-ray" (2022). Web sitesi. https://science.nasa.gov/ems/11_xrays. Erişim tarihi: 03.04.2022
- Nordlund, K., Zinkle, S. J., Sand, A. E., Granberg, F., Averback, R. S., Stoller, R., ... Simeone, D. (2018). Improving atomic displacement and replacement calculations with physically realistic damage models. *Nature Communications*, 9(1). doi:10.1038/s41467-018-03415-5
- Norman, D. R., Jones, J. L., Haskell, K. J., Vanier, P. E., & Forman, L. (2005) Active Nuclear Material Detection and Imaging. *IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record*, doi:10.1109/nssmic.2005.1596423
- Novelize, R. (1997). *Squire's Fundamentals of Radiology*. Harvard University Press. 5th edition.
- Novelline, Robert (1997). *Squire's Fundamentals of Radiology*. Harvard University Press. 5. Basım.
- Ocean Insight Spectroscopy. (2022). Web Sitesi. <https://www.oceaninsight.com>. Erişim tarihi: 06.03.2022

- Pal, G. K., & Pal, P. (2001). "Bölüm 52". Textbook of Practical Physiology (1st ed.). Chennai: Orient Blackswan. 387. ISBN 978-81-250-2021-9. Retrieved 11 October 2013.
- Rastogi, R. P., Sonani, R. R., & Madamwar, D. (2017). UV Photoprotectants From Algae—Synthesis and Bio-Functionalities. *Algal Green Chemistry*, 17–38. doi:10.1016/b978-0-444-63784-0.00002-3
- Reference Solar Spectral Irradiance: Air Mass 1.5 (2011). Nasa Web Arşivi. https://web.archive.org/web/20110127004149/http://missionscience.nasa.gov/ems/10_ultravioletwaves.html. Erişim tarihi: 02.04.2022
- Rogalski, A. (2019). *Infrared and terahertz detectors* (3rd ed.). Boca Raton, FL: CRC Press. Sayfa. 929.
- Rybicki, B., & Lightman, P. (1979). *Radiative Processes In Astrophysics*. WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KgaA
- Sahbaz, K. K., Bilki, B., Dapo, H., Karşlioglu, I.G., Kaya, C., Kaya, M., & Tosun, M. (2022). Systematic study of LED stimulated recovery of radiation damage in optical materials, *Journal of Instrumentation*, JINST 17 P05002, doi:10.1088/1748-0221/17/05/P05002
- Schubert E. F., Wang Y. - H., Cho A. Y., Tu L. - W., Zydzik G. J. (1992). Resonant cavity light-emitting diode. *Applied Physics Letters*, 60(8), 921–923. doi:10.1063/1.106489
- Serway, R. A. (1990). *Physics for Scientists & Engineers* (3rd ed.). Saunders. 1150.
- Sharma, Shatendra (2008). *Atomic and Nuclear Physics*. Pearson Education India. 478.
- Shimadzu Analytical Instrumentation. (2021). Web Sitesi. <http://www.ssi.shimadzu.com>. Erişim tarihi: 15.06.2021
- Slater, J. C. (1951). The Effects of Radiation on Materials. *Journal of Applied Physics*, 22(3), 237–256. doi:10.1063/1.1699937
- Strauss, C. E. M., & Funk, D. J. (1991). Broadly tunable difference-frequency generation of VUV using two-photon resonances in H₂ and Kr. *Optics Letters*, 16(15), 1192. doi:10.1364/ol.16.001192
- Tan, L., Allen, T. R., & Busby, J. T. (2013). Grain boundary engineering for structure materials of nuclear reactors. *Journal of Nuclear Materials*, 441(1-3), 661–666. doi:10.1016/j.jnucmat.2013.03.050
- Turner, J., E. (2007) *Atoms, Radiation, and Radiation Protection*. WILEY-VCH. 3. basım. 209-214.
- Turner, J., E. (2007) *Atoms, Radiation, and Radiation Protection*. WILEY-VCH. 3. basım. 65-75.

- Türkçe Bilgi “Kızılötesi” (2022). Web sitesi. <https://www.turkcebilgi.com/kizilotesi>. Erişim tarihi: 02.04.2022
- Uo, M., Wada, T., & Sugiyama, T. (2015). Applications of X-ray fluorescence analysis (XRF) to dental and medical specimens. *Japanese Dental Science Review*, 51(1), 2–9. doi:10.1016/j.jdsr.2014.07.001
- Uzan, J. P. & Leclercq, B. (2008). *The Natural Laws of the Universe: Understanding Fundamental Constants*. Translated by Robert Mizon. Springer-Praxis. 43.
- Was, G. S., & Andresen, P. L. (2007). Stress Corrosion Cracking Behavior of Alloys in Aggressive Nuclear Reactor Core Environments. *CORROSION*, 63(1), 19–45. doi:10.5006/1.3278331
- Wetzel, J., Tiras, E., Bilki, B., Onel, Y., & Winn, D. (2016). Radiation damage and recovery properties of common plastics PEN (Polyethylene Naphthalate) and PET (Polyethylene Terephthalate) using ^{137}Cs gamma ray source up to 1.4 Mrad and 14 Mrad. *Journal of Instrumentation*, 11(08), P08023–P08023. doi:10.1088/1748-0221/11/08/p08023
- Wetzel, J., Tiras, E., Bilki, B., Onel, Y., & Winn, D. (2017). Using LEDs to stimulate the recovery of radiation damage to plastic scintillators. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 395, 13–16. doi:10.1016/j.nimb.2017.01.081
- Wikipedia Diagram of Alpha Decay (2022). Web sitesi. https://en.wikipedia.org/wiki/Alpha_particle#/media/File:Alpha_Decay.svg. Erişim tarihi: 03.04.2022
- Wikipedia Diagram of Beta Decay (2022). Web sitesi. https://en.wikipedia.org/wiki/Beta_particle#/media/File:Beta-minus_Decay.svg. Erişim tarihi: 03.04.2022
- Wikipedia Diagram of Bremsstrahlung Production (2022). Web sitesi. <https://en.wikipedia.org/wiki/Bremsstrahlung#/media/File:Bremsstrahlung.svg>. Erişim tarihi: 03.04.2022
- Wikipedia Diagram of Cosmic Particle Interactions (2022). Web sitesi. https://en.wikipedia.org/wiki/Cosmic_ray#/media/File:Atmospheric_Collision.svg. Erişim tarihi: 11.04.2022
- Wikipedia Feynman Diagram for Beta Decay of The Neutron. (2022) Web sitesi. https://en.wikipedia.org/wiki/Free_neutron_decay#/media/File:Beta_Negative_Decay.svg. Erişim tarihi: 11.04.2022
- Wikipedia Scheme Decay of Cobalt-60 (2022). Web sitesi. https://en.wikipedia.org/wiki/File:Cobalt-60_Decay_Scheme.svg. Erişim tarihi: 03.04.2022

Williams, D. L. (2015). Light and the evolution of vision. *Eye*, 30(2), 173–178. doi:10.1038/eye.2015.220

Wolfram Research, Radiation (2022). Web sitesi. <https://scienceworld.wolfram.com/physics/Radiation.html>. Erişim tarihi: 30.03.2022

Yeşil 1206 Formasyonlu SMD LED. (2021). Web sitesi. <https://www.direnc.net/1206-kilif-smd-led-yesil-everlight-22mcd>. Erişim tarihi: 08.01.2021

Yue, A. T., Dewey, M. S., Gilliam, D. M., Greene, G. L., Laptev, A. B., Nico, J. S., ... Wietfeldt, F. E. (2013). Improved Determination of the Neutron Lifetime. *Physical Review Letters*, 111(22). doi:10.1103/physrevlett.111.222501



EKLER

EK-1 Kullanılan kodlar ve veriler

Verilerin okunması, analizi ve sonuçların kaydı için hazırlanmış kodlar (Matlab) 26 Nisan 2022 tarihinde oluşturulmuş github uzantılı bulut sistemine eklenmiştir. Web sitesi. <https://github.com/BeatusRex/IRRAD> Erişim tarihi: 29.05.2022

Veriler ve yedek kodlar (Matlab) 29 Mayıs 2022 tarihinde oluşturulmuş google uzantılı bulut sistemine de eklenmiştir. Web sitesi. <https://drive.google.com/drive/u/0/folders/1SifN2fD5X9pju-tT-fUicErhy3tiPGS9> Erişim tarihi: 29.05.2022

EK-2 Tez Konusu ile İlgili Yapılan Yayınlar

Sahbaz, K. K., Bilki, B., Dapo, H., Karslioglu, I.G., Kaya, C., Kaya, M., & Tosun, M. (2022). Systematic study of LED stimulated recovery of radiation damage in optical materials, Journal of Instrumentation, JINST 17 P05002, doi:10.1088/1748-0221/17/05/P05002