

**DOĞAL BOR MİNERALLERİ KULLANARAK
RADYASYON DOZİMETRESİ GELİŞTİRİLMESİ**

**DEVELOPING RADIATION DOSIMETER BY USING
NATURAL BORON MINERALS**

ELİF BAŞTUĞ BADEMCI

Prof. Dr. ŞEYDA ÇOLAK
Tez Danışmanı

Hacettepe Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin
Polimer Bilimi ve Teknolojisi Anabilim Dalı İçin Öngördüğü
YÜKSEK LİSANS TEZİ
Olarak Hazırlanmıştır.

Canım Aileme

ÖZET

DOĞAL BOR MİNERALLERİ KULLANARAK RADYASYON DOZİMETRESİ GELİŞTİRİLMESİ

Elif BAŞTUĞ BADEMCI

Yüksek Lisans, Polimer Bilimi ve Teknolojisi Bölümü

Tez Danışmanı: Şeyda ÇOLAK

26.01.2022, 126 sayfa

Bu tez çalışmasında; iyonlaştırıcı radyasyonun bulunduğu bölgelerde yaşayan ve/veya çalışan farklı sektördeki insanların soğurdıkları radyasyon dozunun belirlenebilmesi için, doğal bor minerallerinden radyasyon dozimetresi olarak geliştirilmesi amaçlanmıştır. Bu çalışmada Balıkesir'de Bigadiç bölgelerinden farklı bölgelerinden temin edilen doğal bor minerallerinden **Kolemanit-1, Kolemanit-2, İnyoit ve Üleksit** kullanılmıştır. Kayaç olarak temin edilen minerallerin yapı analizi **X-Işını Difraksiyon Yöntemi (XRD)** ve **Taramalı Elektron Mikroskop (SEM)** ve **Enerji Dağılımlı X-Işını Spektroskopisi (EDX)** analizi ile gerçekleştirilmiştir. XRD sonuçlarına göre, doğal bor minerali Kolemanit-1 ve Kolemanit-2 monoklinik yapıda olup, kristalit boyutları sırasıyla 39,45 nm ve 39,36 nm'dir. Doğal bor minerali Üleksit triklinik yapıdadır ve kristalit boyutu 41,26 nm'dir. Doğal bor minerali İnyoit ise monoklinik yapıda olup kristalit boyutu 39,37 nm'dir. Yapı morfolojisi için SEM analizi, elementel analiz için de EDX analizi gerçekleştirilmiştir. Elementel analiz sonucunda, doğal bor minerali Kolemanit örneğinin yapısında B,O,Sr,Ca elementleri, doğal bor minerali Üleksit örneğinin yapısında C,O,Na,Ca elementleri, doğal bor minerali İnyoit örneğinin yapısında ise O,Ca elementleri tespit edilmiştir. Tez süresince çalışılan doğal Bor mineralleri farklı ışınlama kaynakları ile **cGy** (1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10 cGy), **Gy** (6,9) ve **kGy** (1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 kGy) mertebelerinde ışınlanmıştır. Bu ışınlama

çalışmalarına ek olarak örneklerin **UV ışınlama** çalışmaları da gerçekleştirilmiştir. Geliştirilmesi amaçlanan radyasyon dozimetresi malzemesinin incelenmesi, ağırlıklı olarak **Elektron Spin Rezonans (ESR) Spektroskopisi** ile yapılmıştır. ESR için optimum deney şartlarının belirlenmesi için mikrodalga gücü ve modülasyon genliği çalışmaları yürütülmüş ve optimum mikrodalga gücü 1 mW ve optimum modülasyon genliği 1 G olarak belirlenmiştir. ESR spektroskopisinde önemli bir spektral parametre olan spektroskopik yarıma çarpanı g-değeri; doğal bor minerali Kolemanit-1 ve Kolemanit-2 örneği için sırasıyla 2,0021 ve 2,0011 olarak belirlenmiştir. Doğal bor minerali Üleksit örneği için g-değeri 2,0016 ve İnyoit için ise 2,0009'dur. Tepeden tepeye çizgi genişliği ΔH_{pp} değeri ise Kolemanit-1 için 4,56 G, Kolemanit-2 için 7,10 G, Üleksit için 6,55 G ve İnyoit için 6,32 G'dir. Tez kapsamında incelenen doğal Bor minerallerinin doza bağımlılıklarının cGy ve Gy ışınlamaları için çok düşük olduğu, kGy mertebesindeki ışınlamalar için ise tüm örnekler için ESR sinyal şiddet değerlerinde artış olduğu görülmüştür. İncelenen numuneler arasında doz- cevap bulguları en yüksek olan numune **Kolemanit-1** ve **Kolemanit-2** olarak belirlenmiştir. Bununla beraber ışınlanan örneklerinin ESR sonuçları detaylandırıldığında, ışınlanan örneklerin bazı radyasyona hassas ve kararlı rezonans piklerinin dozimetrik amaçlı kullanılabilceği sonucuna varılmıştır. Bu bağlamda ışınlanan doğal Bor minerallerinden oluşturulan doz-cevap eğrileri ve zaman incelemesi çalışmaları irdelendiğinde; **Kolemanit-1** ve **Kolemanit-2** örnekleri için sırasıyla 2 nolu ve 4 nolu rezonans piklerinin radyasyona duyarlı olmaları ve daha kararlı olmaları (zamana bağlı sönüm oranında azalma Kolemanit-1'de %40, Kolemanit-2'de %20) nedenleri ile doz ölçümlerinde kullanılabilceği sonucuna varılmıştır. **Üleksit** ve **İnyoit** için ise, sırasıyla 7 nolu ve 8 nolu rezonans piklerinin toplamının (orta pik) dozimetrik özelliğinin fazla olduğu sonucuna ulaşılmıştır. UV ışınlamanın etkisi ile ışınlanmış ve ışınlanmamış Kolemanit-1 ve Kolemanit-2'de spektrumdaki pik şiddetlerinde anlamlı bir fark olmamıştır, Üleksit ve İnyoit'de spektrumdaki mangan pik şiddetlerinde artış olmuştur. Tez kapsamında; incelenen örneklerin dozimetrik özelliklerinin belirlenmesi amacıyla kullanılan ESR ölçümlerine tamamlayıcı bilgiler verebilmesi amacıyla **Termolüminesans (TL)** çalışmaları da cGy, Gy ve kGy mertebelerinde ışınlanan örnekler için yürütülmüştür. Gerçekleştirilen TL

alışmaları, ışınlanmış ve ışınlanmamış doğal Bor minerallerinde anlamlı bir farkın olmadığını göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: Bor, Kolemanit, İnyoit, Üleksit, Dozimetre, Radyasyon, ESR, TLD, XRD, SEM, EDX

ABSTRACT

DEVELOPING RADIATION DOSIMETER BY USING NATURAL BORON MINERALS

Elif BAŞTUĞ BADEMCI

Master's Degree, Department of Polymer Science and Technology

Supervisor: Şeyda ÇOLAK

26.01.2022, 126 page

In this thesis study; it is aimed to develop a radiation dosimeter by using natural boron minerals in order to determine the radiation dose absorbed by people living and/or working in different sectors where ionizing radiation is present. In this study, natural boron minerals **Colemanite-1**, **Colemanite-2**, **Inyoite** and **Ulexite** obtained from different regions of Bigadiç in Balıkesir were used. The structural analysis of the minerals obtained as rocks was carried out by **X-Ray Diffraction Method (XRD)** and **Scanning Electron Microscope (SEM)** and **Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy (EDX)** analysis. According to XRD results, natural boron mineral Colemanite-1 and Colemanite-2 are in monoclinic structure, and their crystallite dimensions are 39.45 nm and 39.36 nm, respectively. The natural boron mineral ulexite has a triclinic structure and its crystallite size is 41.26 nm. The natural boron mineral Inyoite has a monoclinic structure and its crystallite size is 39.37 nm. SEM analysis for structural morphology and EDX for elemental analysis were performed. As a result of the elemental analysis, B,O,Sr,Ca elements were determined in the structure of the natural boron mineral Colemanite sample, C,O,Na,Ca elements in the structure of the natural boron mineral Ulexite sample, and O,Ca elements in the structure

of the natural boron mineral Inyoite sample. The natural Boron minerals studied during the thesis are **cGy** (1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10 cGy), **Gy** (6.9) and **kGy** (1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 kGy) with different irradiation sources. In addition to these irradiation studies, **UV irradiation** studies were also carried out. The examination of the radiation dosimeter material, which is aimed to be developed, was dominantly

carried out by **Electron Spin Resonance (ESR)** spectroscopy. In order to determine the optimum experimental conditions for ESR, microwave power and modulation amplitude studies were carried out and the optimum microwave power was determined as 1 mW and the optimum modulation amplitude as 1 G. The spectroscopic splitting factor g-value, which is an important spectral parameter in ESR spectroscopy; natural boron mineral was determined as 2.0021 and 2.0011 for the sample Colemanite-1 and Colemanite-2, respectively. The g-value is 2.0016 for the natural boron mineral Ulexite and 2,0009 for Inyoite. Peak-to-peak line width ΔH_{pp} value is found to be 4.56 G for Colemanite-1, 7.10 G for Colemanite-2, 6.55 G for Ulexite, and 6.32 G for Inyoite. It was observed that the dose dependence of the natural Boron minerals examined within the scope of the thesis was very low for cGy and Gy level irradiations, while there was an increase in ESR signal intensity values for all samples for irradiations carried out kGy range. Among the samples examined, among the samples examined, the highest dose-response curves were determined for **Colemanite-1** and **Colemanite-2**. However, when the ESR results of the irradiated samples are detailed, it is concluded that some radiation sensitive and stable resonance peaks of the irradiated samples can also be used for dosimetric purposes. In this context, when the dose-response curves and time studies data obtained from irradiated natural Boron minerals; it was concluded that the 2nd and 4th resonance peaks for **Colemanite-1** and **Colemanite-2** samples, respectively, can be used in dose measurements because they are sensitive to radiation and more stable (time-dependent damping reduction 40% in Colemanite-1, 20% in Colemanite-2). For **Ulexite** and **Inyoite**, it was concluded that the sum of the 7th and 8th resonance peaks (middle peak) had a high dosimetric feature, respectively. There was no significant difference in the peak intensities in the spectrum of Colemanite-1 and Colemanite-2, irradiated and unirradiated with the effect of UV

irradiation, there was an increase in the peak intensities of manganese in the spectrum of Ulexite and Inyoite. Within the scope of the thesis; **Thermoluminescence (TL)** studies were also carried out for the samples irradiated at cGy, Gy and kGy levels in order to get complementary information to the ESR data obtained to determine the dosimetric properties of the examined samples. The TL studies carried out showed that there was no significant difference between irradiated and non-irradiated natural Boron minerals.

Keywords: Boron, Colemanite, Inyoite, Ulexite, Dosimeter, Radiation, ESR, TLD, XRD, SEM, EDX

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	iv
TEŞEKKÜR.....	vii
İÇİNDEKİLER.....	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xii
TABLolar DİZİNİ.....	xv
SİMGELEr VE KISALTMALAR.....	xvi
1.GİRİŞ.....	1
2.KURAMSAL BİLGİLER.....	4
2.1.Polimer.....	4
2.1.1.Polimerlerin Sınıflandırılması.....	4
2.1.2. Polimerlerin Kullanımı ve Uygulama Alanları.....	5
2.1.3.Polimerlerin Geri Dönüşümü ve Çevre ile İlişkisi.....	6
2.1.4. Polimerlerin Radyasyon Alanında Kullanılması.....	6
2.1.5. Radyasyon Doz Ölçümünde Polimer Kullanımı.....	7
2.2.Bor.....	10
2.2.1. Bor Kullanım Alanları.....	12
2.3. Radyoaktivite.....	13
2.4. Radyasyon ve Radyasyonun Sınıflandırılması.....	15
2.5.Radyasyonun Madde ile Etkileşimi.....	17
2.5.1.Alfa Parçacığının Madde ile Etkileşimi.....	17
2.5.2. Beta Parçacığının Madde ile Etkileşimi.....	18
2.5.3. Nötron Parçacığının Madde ile Etkileşimi.....	20
2.5.4. Gama Işını ve X- Işınının Madde ile Etkileşimi.....	20
2.6.Radyasyonun Sağlık Üzerine Etkileri.....	24
2.7.Radyasyondan Korunma.....	26
2.8.Radyasyon Dozimetreleri.....	27
2.8.1. Film Dozimetreler.....	28
2.8.2.Jel Dozimetreleri.....	29
2.8.3.Termolüminesans Dozimetreleri (TLD).....	30
2.8.4.Optik Uyarmalı Lüminesans Dozimetreleri (OSL).....	31
2.8.5.ESR Dozimetreleri.....	32
2.9.Elektron Spin Rezonans (ESR) Spektroskopisi.....	32
2.9.1.Spektroskopik Yarılma Çarpanı (g).....	38

2.9.2.Aşırı İnce Yapı Sabiti	38
3.DENEYSEL ÇALIŞMALAR	40
3.1.Bor Minerallerinin Hazırlanması.....	40
3.2. Bor Minerallerinin Işınlama İşlemleri	41
3.3. Kullanılan Deneysel Tekniklerin Çalışma İlkeleri	42
3.3.1.X-Işını Difraktometresi (XRD) Yöntemi	43
3.3.2.Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) Yöntemi	44
3.3.3.Elektron Spin Rezonans (ESR) Spektroskopisi	45
3.3.4.Termoluminesans (TL) Yöntemi.....	47
4.DENEYSEL BULGULAR VE TARTIŞMA	48
4.1. Doğal Bor Minerali Kolemanit-1 Örneği için Elde Edilen Bulgular	48
4.1.1. Doğal Bor Minerali Kolemanit-1 Örneği için XRD Bulguları	48
4.1.2. Doğal Bor Minerali Kolemanit-1 Örneği için SEM Bulguları.....	50
4.1.3. Doğal Bor Minerali Kolemanit-1 Örneği için ESR Bulguları	52
4.1.3.1. Doğal Bor Minerali Kolemanit-1 için Mikrodalga Gücü Doyum Çalışmaları	53
4.1.3.2. Doğal Bor Minerali Kolemanit-1 için Modülasyon Genliği Çalışmaları	54
4.1.3.3. Doğal Bor Minerali Kolemanit-1 Örneği için Doz-Cevap Çalışmaları	55
4.1.3.3.1. Kolemanit-1 Örneği için cGy Mertebesinde Doz-Cevap Çalışmaları	55
4.1.3.3.2. Kolemanit-1 Örneği için Gy Mertebesinde Doz-Cevap Çalışmaları.....	57
4.1.3.3.3. Kolemanit-1 Örneği için kGy Mertebesinde Doz-Cevap Çalışmaları	57
4.1.3.4 Doğal Bor Minerali Kolemanit-1 Örneği için UV Işınlama Çalışmaları	60
4.1.3.5. Doğal Bor Minerali Kolemanit-1 Örneği için Zaman İncelemesi Çalışmaları	61
4.1.4. Doğal Bor Minerali Kolemanit-1 Örneği için TL Bulguları.....	64
.....	64
4.2. Doğal Bor Minerali Kolemanit-2 Örneği için Elde Edilen Bulgular	65
4.2.1. Doğal Bor Minerali Kolemanit-2 Örneği için XRD Bulguları	65
4.2.2. Doğal Bor Minerali Kolemanit-2 Örneği için SEM Bulguları.....	67
4.2.3. Doğal Bor Minerali Kolemanit-2 Örneği için ESR Bulguları	68
4.2.3.1. Doğal Bor Minerali Kolemanit-2 Örneği için Mikrodalga Gücü Doyum Çalışmaları	69
4.2.3.2. Doğal Bor Minerali Kolemanit-2 Örneği için Modülasyon Genliği Çalışmaları	70

4.2.3.3. Doğal Bor Minerali Kolemanit-2 Örneği için kGy Mertebesinde Doz-Cevap Çalışmaları	71
4.2.3.4. Doğal Bor Minerali Kolemanit-2 Örneği için UV Işınlama Çalışmaları	75
4.2.3.5. Doğal Bor Minerali Kolemanit-2 Örneği için Zaman İncelemesi Çalışmaları	76
4.2.4. Doğal Bor Minerali Kolemanit-2 Örneği için TL Bulguları.....	79
4.3. Doğal Bor Minerali Üleksit Örneği İçin Elde Edilen Bulgular	80
4.3.1. Doğal Bor Minerali Üleksit Örneği İçin XRD Bulguları.....	80
4.3.2. Doğal Bor Minerali Üleksit Örneği İçin SEM Elde Edilen Bulgular	83
4.3.3. Doğal Bor Minerali Üleksit Örneği İçin ESR Bulguları.....	84
4.3.3.1. Doğal Bor Minerali Üleksit Örneği İçin Mikrodalga Gücü Doyum Çalışmaları	85
4.3.3.2. Doğal Bor Minerali Üleksit Örneği İçin Modülasyon Genliği Çalışmaları	86
4.3.3.3. Doğal Bor Minerali Üleksit Örneği İçin Doz-Cevap Çalışmaları	87
4.3.3.3.1. Doğal Bor Minerali Üleksit Örneği İçin cGy Mertebesinde Doz-Cevap Çalışmaları	87
4.3.3.3.2. Doğal Bor Minerali Üleksit Örneği İçin Gy Mertebesinde Doz-Cevap Çalışmaları	88
4.3.3.3.3. Doğal Bor Minerali Üleksit Örneği İçin kGy Mertebesinde Doz-Cevap Çalışmaları	89
4.3.3.4. Doğal Bor Minerali Üleksit Örneği İçin UV Işınlama Çalışmaları	92
4.3.3.5. Doğal Bor Minerali Üleksit Örneği İçin Zaman İncelemesi Çalışmaları	93
4.3.4. Doğal Bor Minerali Üleksit Örneği İçin TL Bulguları	95
4.4. Doğal Bor Minerali İnyoit Örneği için Elde Edilen Bulgular	96
4.4.1. Doğal Bor Minerali İnyoit Örneği için XRD Bulguları	96
4.4.2. Doğal Bor Minerali İnyoit Örneği için SEM Bulguları	99
4.4.3. Doğal Bor Minerali İnyoit Örneği için ESR Bulguları	100
4.4.3.1. Doğal Bor Minerali İnyoit Örneği için Mikrodalga Gücü Doyum Çalışmaları	101
4.4.3.2. Doğal Bor Minerali İnyoit Örneği için Modülasyon Genliği Çalışmaları	102
4.4.3.3. Doğal Bor Minerali İnyoit Örneği için Doz-Cevap Çalışmaları.....	103
4.4.3.3.1 Doğal Bor Minerali İnyoit Örneği için cGy Mertebesinde Doz-Cevap Bulguları	103

4.4.3.3.2. Doğal Bor Minerali İnyoit Örneği için Gy Mertebesinde Doz-Cevap Bulguları	104
4.4.3.3.3. Doğal Bor Minerali İnyoit Örneği için kGy Mertebesinde Doz-Cevap Bulguları	105
4.4.3.4. Doğal Bor Minerali İnyoit Örneği için UV Işınlama Çalışmaları	108
4.4.3.5. Doğal Bor Minerali İnyoit Örneği için Zaman İncelemesi Çalışmaları	109
4.4.4. Doğal Bor Minerali İnyoit Örneği için TL Bulguları.....	111
5.SONUÇ VE TARTIŞMA.....	112
6.KAYNAKÇA	117
EKLER.....	122
EK 1 – Radyasyon Dozu ve Radyasyon Doz Birimleri	122
EK 2 - Tezden Türetilmiş Yayınlar	124
EK 3 - Tez Çalışması Orijinallik Raporu	125
ÖZGEÇMİŞ.....	126

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1. Bor Cevheri	10
Şekil 2. Hafif çekirdekler için kararlılık bandı (Khan, 2010)	14
Şekil 3. Elektromanyetik dalga (EMD) Spektrumu (Martin, 2013).	15
Şekil 4. Doğal ve Yapay Radyasyon Kaynak Dağılım Yüzdeleri (AFAD, 2020)	16
Şekil 5. Bragg Eğrisi	18
Şekil 6. Beta Parçacığının Madde ile Etkileşimi	19
Şekil 7. X-Işını Oluşumu	19
Şekil 8. Gama Işını ve X-Işını Madde Etkileşimi Türleri	21
Şekil 9. X ve Gama ışınları ile madde etkileşim eğrisi (baskın etkileşimler dikkate alınmıştır) (Krane, 1988),	23
Şekil 10. Radyasyon-Madde Etkileşim Girciliği	24
Şekil 11. Aktif Kişisel Dozimetre Örnekleri	27
Şekil 12. Film Dozimetre Okuyucu ve Film Dozimetre Örnekleri	28
Şekil 13. Jel Dozimetre Örneği	29
Şekil 14. Termolüminesans Olay	31
Şekil 15. Kart ve yüzük tipi TLD örnekleri (TAEK, 2012)	31
Şekil 16. OSL Dozimetre Örnekleri	32
Şekil 17. Manyetik dipol moment gösterimi	33
Şekil 18. Serbest bir elektronun H_0 dış manyetik alanı içinde (a) spin yörünge ve toplam açısal momentum vektörleri ve (b) bunlara karşılık gelen manyetik moment vektörleri	33
Şekil 19. Zeeman Etkisi	35
Şekil 20. Serbest elektron için enerjinin H_0 alanına göre değişimi	37
Şekil 21. ESR spektrumu, soğurma eğrisi ve soğurma eğrisinin birinci türev eğrisi	37
Şekil 22. Doğal Bor Kayaç Mineralleri	40
Şekil 23. Kayaç Örneklerinin toz haline getirilmesi	41
Şekil 24. Tez kapsamında kullanılan ışınlama kaynakları	42
Şekil 25. Bragg Yasası	43
Şekil 26. Rigaku D/Max 2200 XRD Ölçüm Cihazı	44
Şekil 27. Bruker D2 Phaser TWO-THETA XRD Ölçüm Cihazı	44
Şekil 28. SEM Çalışma İlkesi	44
Şekil 29. SEM Cihazı	45
Şekil 30. ESR Cihazı	45
Şekil 31. Elektron Spin Rezonans (ESR) spektrometresi diyagramı	46
Şekil 32. TL Cihazı	47
Şekil 33. Kolemanit-1 doğal Bor minerali için XRD Spektrumu	48
Şekil 34. Kolemanit-1 Örneği için SEM Görüntüleri	50
Şekil 35. Kolemanit -1 Örneği için EDX Spektrumu	51
Şekil 36. Işınlanmamış ve Işınlanmış Kolemanit-1 Örneği için ESR Spektrumları	52
Şekil 37. 8 kGy Işınlanmış Kolemanit-1 örneği için Mikrodalga Gücü Doyum Eğrileri	53

Şekil 38. 8 kGy Işınlanmış Kolemanit-1 örneği için Modülasyon Genliği Eğrileri	55
Şekil 39. Işınlanmamış ve cGy mertebesinde ışınlanmış Kolemanit- 1 Örneği için ESR Spektrumları.....	56
Şekil 40. Kolemanit-1 Örneği için Doz-Cevap Verileri	56
Şekil 41. Işınlanmamış ve 6.9 Gy mertebesinde ışınlanmış Kolemanit- 1 Örneği için ESR Spektrumları.....	57
Şekil 42. Işınlanmamış ve kGy mertebesinde ışınlanmış Kolemanit- 1 Örneği için ESR Spektrumları.....	58
Şekil 43. Işınlanmış (kGy mertebesinde) Kolemanit-1 Örneği için Doz-Cevap Eğrileri	59
Şekil 44. Işınlanmış (kGy mertebesinde) Kolemanit-1 Örneği için Doz-Cevap Eğrileri	59
Şekil 45. Işınlanmamış ve UV Işınlanmış Kolemanit -1 Örneği için ESR Spektrumları	61
Şekil 46. Doğal Bor Minerali Kolemanit-1 Zaman İncelemesi Bulguları	62
Şekil 47. Doğal Bor Minerali Kolemanit-1 Zaman İncelemesi Bulguları	63
Şekil 48. Kolemanit -1 Örneği için TL Çalışması	64
Şekil 49. Kolemanit-2 doğal Bor minerali için XRD Spektrumu	65
Şekil 50. Kolemanit-2 Örneği için SEM Görüntüleri	67
Şekil 51. Doğal Bor Minerali Kolemanit-2 Örneği için EDX Spektrumu.....	67
Şekil 52. Işınlanmamış ve Işınlanmış Kolemanit- 2 Örneğinin ESR Spektrumları	68
Şekil 53. 8 kGy Işınlanmış Kolemanit-2 örneği için Mikrodalga Gücü Doyum Eğrileri	69
Şekil 54. 8 kGy Işınlanmış Kolemanit-2 örneği için Modülasyon Genliği Eğrileri	71
Şekil 55. Işınlanmamış ve kGy mertebesinde ışınlanmış Kolemanit- 2 Örneği için ESR Spektrumları.....	72
Şekil 56. kGy mertebesinde ışınlanmış Kolemanit-2 için Doz-Cevap Eğrileri..	73
Şekil 57. kGy mertebesinde ışınlanmış Kolemanit-2 için Doz-Cevap Eğrileri..	73
Şekil 58. Işınlanmamış ve UV Işınlanmış Kolemanit -2 Örneği için ESR Spektrumları	75
Şekil 59. UV Işınlanmış Kolemanit -2 Doz-Cevap Bulguları	75
Şekil 60. Doğal Bor Minerali Kolemanit-2 Örneği için Zaman İncelemesi Bulguları.....	77
Şekil 61. Doğal Bor Minerali Kolemanit-2 Örneği için Zaman İncelemesi Bulguları.....	77
Şekil 62. Kolemanit -2 Örneği için TL Çalışması	79
Şekil 63. Üleksit doğal Bor minerali İçin XRD Spektrumu	80
Şekil 64. Üleksit Örneği İçin SEM Görüntüleri	83
Şekil 65. Üleksit Örneği İçin EDX Spektrumu	83
Şekil 66. Işınlanmamış ve UV – Işınlanmış Üleksit Örneği için ESR Spektrumları	84
Şekil 67. 8 kGy Işınlanmış Üleksit örneği için Mikrodalga Gücü Doyum Eğrileri	85
Şekil 68. 8 kGy Işınlanmış Üleksit Örneği için Modülasyon Genliği Eğrisi	86

Şekil 69. cGy mertebesinde ışınlanmış Üleksit Örneği için ESR Spektrumları.	87
Şekil 70. Üleksit Örneği İçin Doz-Cevap Verileri.....	88
Şekil 71. Işınlanmamış ve 6.9 Gy mertebesinde ışınlanmış Üleksit Örneği için ESR Spektrumları.....	89
Şekil 72. Işınlanmamış ve kGy mertebesinde ışınlanmış Üleksit Örneği için ESR Spektrumları.....	90
Şekil 73. Işınlanmış (kGy mertebesinde) Üleksit Örneği için Doz-Cevap Eğrisi	91
Şekil 74. UV Işınlanmış Üleksit Örneği için ESR spektrumları.....	92
Şekil 75. UV ışınlanmış Üleksit Doz-Cevap Bulguları	93
Şekil 76. Doğal Bor Minerali Üleksit Örneği için Zaman İncelemesi Bulguları ...	94
Şekil 77. Üleksit Örneği için TL Çalışması	95
Şekil 78. Doğal Bor Minerali İnyoit Örneği için XRD Spektrumu.....	96
Şekil 79. Doğal Bor Minerali İnyoit Örneği için SEM Görüntüleri	99
Şekil 80. İnyoit Örneği için EDX Spektrumu.....	99
Şekil 81. Işınlanmamış ve Işınlanmış İnyoit Örneği için ESR Spektrumları	100
Şekil 82. 8 kGy Işınlanmış İnyoit örneği için Mikrodalga Gücü Doyum Eğrisi .	101
Şekil 83. 8 kGy Işınlanmış Üleksit örneği için Modülasyon Genliği Eğrisi	102
Şekil 84. Işınlanmamış ve cGy mertebesinde ışınlanmış İnyoit Örneği için ESR Spektrumları	103
Şekil 85. İnyoit Örneği için Doz-Cevap Çalışması	104
Şekil 86. Işınlanmamış ve 6.9 Gy mertebesinde ışınlanmış İnyoit Örneği için ESR Spektrumları.....	105
Şekil 87. Işınlanmamış ve kGy mertebesinde ışınlanmış İnyoit Örneği için ESR Spektrumları	106
Şekil 88. Işınlanmış (kGy mertebesinde) İnyoit Örneği için Doz-Cevap Eğrileri	107
Şekil 89. UV Işınlanmamış ve Işınlanmış İnyoit örneği için ESR Spektrumları	108
Şekil 90. UV ışınlanmış İnyoit Doz-Cevap Bulguları.....	109
Şekil 91. Doğal Bor minerali İnyoit Zaman İncelemesi Bulguları	110
Şekil 92. İnyoit Örneği için TL Çalışması.....	111

TABLULAR DİZİNİ

Tablo 1. Bor Mineralleri, Bileşimleri ve Bulunduğu Yataklar (Boren, 2021)	11
Tablo 2. Bor Yatakları Rezerv Kapasiteleri (Boren, 2021)	11
Tablo 3. Doğal ve Yapay Radyasyon Kaynaklarından Maruz Kalınan Doz (TAEK, 2020)	17
Tablo 4. Belirlenen Doz Sınırları (TAEK, 2020)	26
Tablo 5. Kolemanit-1 Örneği için XRD Analiz Sonuçları	49
Tablo 6. Doğal Bor Minerali Kolemanit-1 Örneği için hesaplanan d değerleri .	49
Tablo 7. Doğal Bor Minerali Kolemanit-1 Örneği için Hesaplanan Tanecik Boyut Değerleri	50
Tablo 8. Doğal Bor Minerali Kolemanit-1 Örneği için Mikrodalga Gücü Doyum Bulguları	54
Tablo 9. Doğal Bor Minerali Kolemanit-1 Örneğinin kGy mertebesindeki ışınlamaları için edilen Doz-Cevap Bulguları ($I = a + b * D$)	60
Tablo 10. Doğal Bor Minerali Kolemanit-1 Örneği için Zaman İncelemesi Bulguları	63
Tablo 11. Doğal Bor Minerali Kolemanit-2 Örneği için XRD Sonuçları.....	66
Tablo 12. Doğal Bor Minerali Kolemanit-2 Örneği için hesaplanan d değerleri	66
Tablo 13. Doğal Bor Minerali Kolemanit-2 Örneği için Hesaplanan Tanecik Boyut Değerleri	66
Tablo 14. Doğal Bor Minerali Kolemanit-2 Örneği için Mikrodalga Gücü Doyum Bulguları	70
Tablo 15. Doğal Bor Minerali Kolemanit-2 Örneğinin kGy mertebesindeki ışınlamaları için edilen Doz-Cevap Bulguları ($I = a + b * D$)	74
Tablo 16. Doğal Bor Minerali Kolemanit-2 Örneği için Zaman İncelemesi Bulguları	78
Tablo 17. Üleksit Örneği İçin XRD Sonuçları	80
Tablo 18. Doğal Bor minerali Üleksit Örneği için hesaplanan d değerleri	81
Tablo 19. Doğal Bor Minerali Üleksit Örneği İçin Hesaplanan Tanecik Boyut Değerleri	82
Tablo 20. Doğal Bor Minerali Üleksit Örneği İçin Mikrodalga Gücü Doyum Bulguları	86
Tablo 21. Doğal Bor Minerali Üleksit Örneğinin kGy mertebesindeki ışınlamaları için edilen Doz-Cevap Bulguları ($I = a + b * D$).....	91
Tablo 22. Doğal Bor Minerali Üleksit Örneği İçin Zaman İncelemesi Bulguları	94
Tablo 23. Doğal Bor minerali İnyoit Örneği için XRD Analiz Sonuçları	97
Tablo 24. Doğal Bor Minerali İnyoit Örneği için X-ışınları hesaplanan d değerleri	97
Tablo 25. Doğal Bor Minerali İnyoit Örneği için Hesaplanan Tanecik Boyut Değerleri	98
Tablo 26. Doğal Bor minerali İnyoit Örneği için Mikrodalga Gücü Doyum Bulguları	102
Tablo 27. Doğal Bor Minerali İnyoit Örneğinin kGy mertebesindeki ışınlamaları için edilen Doz-Cevap Bulguları ($I = a + b * D$).....	107
Tablo 28. Doğal Bor Minerali İnyoit Örneği için Zaman İncelemesi Bulguları .	110

SİMGELER VE KISALTMALAR

BOREN	Ulusal Bor Araştırma Enstitüsü
ICRP	Uluslararası Radyolojik Koruma Komisyonu
XRD	X – Işınları Kırınımı
ESR	Elektron Spin Rezonans
EPR	Elektron Paramanyetik Rezonans
TLD	Termolüminesans Dozimetrisi
SEM	Taramalı Elektron Mikroskobu
EDX	Enerji Dağılımlı X-Işını Spektroskopisi
OSL	Optik Uyarmalı Lüminesans
UV	Ultraviyole
ΔH_{pp}	Tepeden Tepeye Çizgi Genişliği
I_{pp}	Tepeden Tepeye Sinyal Şiddeti
g	Spektroskopik Yarılma Çarpanı (Landé Çarpanı)
μ	Manyetik Dipol Moment
μ_B	Bohr Manyetonu

1. GİRİŞ

Radyasyon, enerji ve momentum taşıyan elektromanyetik dalga veya parçacık olarak tanımlanabilir. Nobel Fizik ve Kimya ödülüne layık görülen Marie Curie, çalışma arkadaşları Henri Becquerel ve Pierre Curie'nin de çalışmalarını yürüttüğü Uranyum radyoaktif elementi ile radyoaktivite kavramını 1800'li yılların sonlarına doğru ön plana çıkarmıştır. Uranyumun Radon ve Polonyuma bozunumunu tanımlayan Curie'ler, yüksek enerjili radyasyonun mekanizmasının anlaşılmasında önemli katkı sağlamıştır. 1.Dünya Savaşı esnasında Radyoloji teknolojisinin temelini oluşturan Marie Curie'nin, radyasyon doz aşımı sebebiyle de hayatını kaybettiği bilinmektedir. 1895 yılında Wilhelm Conrad Röntgen X-ışınlarını keşfederek tıp tarihine Röntgen filminin adı yazdırmış oldu, Wilhem Conrad Röntgen de fazla X-ışınına maruz kalması sebebiyle parmaklarını kaybetmiştir. Marie Curie'nin çalışmaları radyoaktivitenin temelini oluşturmanın yanı sıra, Curie'nin ve Röntgen'in çalışma sonuçlarından radyasyonun dokuda bıraktığı hasar ile radyasyonun zararlarını ve radyasyondan korunmanın önemini vurgular nitelikte olduğunu söyleyebiliriz.

Birçok doğal ve yapay radyasyon kaynağı mevcuttur. Bu tez çalışması kapsamında iyonize radyasyon kaynakları (cGy, Gy, kGy) ve iyonize olmayan UV radyasyon kaynağı ile yapılan ışınlama etkilerinin incelenmesi amaçlanmıştır. İyonlaştırıcı etkiye sahip radyasyon türlerinin insan vücudunda akut ve stokastik etkileri bilindiğinden, radyasyon çalışanlarının mesailerı boyunca soğurdukları radyasyon doz miktarının belirlenmesi ve bu doz değerlerinin Uluslararası Radyolojik Koruma Komisyonu (ICRP) tarafından belirlenen radyasyon doz limit değerlerini aşmadığının belgelenmesi yasal bir zorunluluktur. Bu sebeple radyasyon çalışanlarının *yaka kartı, yüzük, bilezik* vb. şekillerde imal edilen kişisel dozimetre kullanmaları zorunlu hale gelmiştir (TAEK, 2000 Yönetmelik). Tez kapsamında; radyasyon, radyasyonun madde ile etkileşme türleri, radyasyonun sağlık üzerine etkileri ve radyasyon dozimetre türleri açıklanmıştır. Dozimetre sistemleri genelde pahalı sistemler olup ülkemizde üretilmeyerek yurtdışından ithal edilmektedir. Bu tez çalışmasında; pahalı olan bu sistemlerin yerleştirilmesi de amaçlanarak araştırmalara başlanmıştır. En kararlı izotopları ^{10}B ve ^{11}B olan Bor elementinin, ^{10}B izotopunun yüksek termal nötron tutma (3837

barn) özelliği gösterdiği ve nükleer malzeme olarak nükleer enerji santrallerinde kullanıldığı bilinmektedir. Bu sebeple bu tez kapsamında, Tübitak'ın öncelikli alan konuları içerisinde yer alması ve ülkemizde rezerv kapasitesi çok yüksek (%73) olması sebepleri ile **doğal Bor minerallerinin** ve **doğal Bor minerali katkı polimerlerin** kişisel radyasyon dozimetre ve/veya geriye dönük radyasyon dozimetre malzemeleri olarak kullanılabilirliğinin araştırılmasına karar verilmiştir. Bununla beraber literatür bilgilerinden, özellikle katkılanmamış polimerlerin ergime sıcaklıklarının genelde düşük olduğu, mekanik dirençlerinin genelde fazla olduğu ve daha çok yalıtkan özellik gösterdikleri, bu sebeplerle radyasyon doz ölçümleri için çoğunlukla iletkenlikleri katkılama ile artırılmış polimer malzemelerin tercih edildiği bilinmektedir. Bu nedenle tez kapsamında katkısız polimerler yerine doğal Bor minerali katkı polimer malzemelerin kullanımının araştırılması uygun görmüştür. Ancak katkısız doğal Bor mineralleri ile ulaşılan deneysel bulgular Bor minerallerinin de yüksek ışınlama dozlarında bile dozimetrik özelliklerinin yüksek olmadığını gösterdiği için tez çalışmalarında doğal Bor minerali katkı polimer malzemelerin deneysel çalışmalarına yer verilmemiştir. Aynı zamanda tez süresince yaşanan Covid-19 pandemi koşulları da tez çalışmalarının özellikle deneysel kesiminin yürütümünde zorluklara neden olduğundan, tez kapsamında sadece dört farklı doğal Bor minerali kullanarak radyasyon dozimetresi geliştirilme çalışmaları yapılabilmiiştir. Doğal Bor minerallerinin kişisel radyasyon dozimetresi olarak kullanımının araştırıldığı az sayıda çalışmanın olduğu (Topaksu ve ark., 2015; Kalita ve ark., 2021; Yüksel, 2013; Gündoğmuş, M., 2015) olduğu bilinmektedir. Bu bağlamda tez kapsamında ulaşılan sonuçlar literatüre yapılacak katkılar ağıısından oldukça önemlidir.

Tezin amaçlarından bir diğeri, incelenen doğal Bor minerallerinin geriye dönük radyasyon doz ölçümünde kullanılabilmesi olduğu için, incelenen örneklerde saflaştırılma işlemine gidilmemiş, örnekler olası bir radyasyon kazası esnasında ortamda kolayca ve işlenmemiş şekilde bulunabilecek doğal Bor kayaçlarından temin edilmiştir. Tez çalışması süresince doğal kayaç olarak temin edilen Bor minerallerinden **Üleksit**, **İnyoit** ve farklı iki yerleşkelere ait **Kolemanit** (Kolemanit-1, Kolemanit-2) minerallerinin kişisel radyasyon dozimetresi olarak kullanılabilirliği, **Elektron Spin Rezonans (ESR)** spektroskopisi ağıırlıklı olacak şekilde incelenmiştir. Çalışmada ESR yönteminin ağıırlıklı kullanılmasının sebebi,

ESR'nin ışınlanmaya maruz kalan minerallerde oluşan serbest radikal tür ve miktarları hakkında önemli spektral bilgiler vermesidir. Örnekler doğal kayalardan elde edildiğinden öncelikle **X-Işını Difraktometresi (XRD)**, **Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM)** ve **Enerji Dağılımlı X-Işını Spektroskopisi (EDX)** ile doğal minerallerin yapısal analizleri gerçekleştirilmiş ve incelenen örneklerin yapıları belirlenmiştir. Çalışmanın ilerleyen süreçlerinde ESR spektroskopisi ile ulaşılan bulgular, **Termolüminesans (TL)** yöntemi kullanılarak doğrulanmaya çalışılmıştır. Termolüminesans yöntemi, ESR bulgularına tamamlayıcı bilgiler verebilmesi açısından tercih edilmiştir.

2. KURAMSAL BİLGİLER

2.1. Polimer

Polimerler, hayatımızın bir parçası olup gündelik hayatımızda da yaygın olarak kullandığımız yapıştırıcı, sentetik lif, bazı boyalar ve kauçuk gibi ürünlerin temel hammaddesini oluşturur. Polimer en genel tanımıyla, *monomer* yapıların kimyasal bağlarla bir araya gelmesiyle oluşmuş büyük molekül ağırlıklı yapılardır.

2.1.1. Polimerlerin Sınıflandırılması

Polimerleri, aşağıda verildiği gibi, farklı kategorilerde sınıflandırmak mümkündür.

Moleküler ağırlıklarına göre polimerler, oligomer veya makromolekül olarak gruplandırılmaktadır. Küçük molekül ağırlıklı polimerler *oligomer* olarak tanımlanmaktadır. İki monomerin birleşmesi *dimer*, üç monomerin birleşmesi *trimer* olarak bilinmektedir ve zincir büyümesi bu şekilde devam etmektedir (Guerra ve Lima, 2013).

Doğada bulunup bulunmamasına göre polimerler, doğal ve sentetik polimerler olarak iki grupta sınıflandırılmaktadır. Doğal polimerlere; DNA zinciri, enzim gibi yapılar örnek verilebilir. Sentetik polimerler ise doğada hazır bulunmayan üretimi seri imalatta olan naylon ve PVC gibi katkılı polimer ürünleridir.

Organik ya da inorganik olmalarına göre polimerler, iki kategoride sınıflandırılmaktadır. Karbon atomları içeren polimerlere *organik polimer*, karbon atomu içermeyen atomlara ise *inorganik polimer* denilmektedir. Organik polimerlere, polietilen, polipropilen gibi malzemeler örnek verilebilir. İnorganik polimerlere, silikon ve boratlar örnek verilebilir.

Isıya karşı gösterdikleri davranışa göre polimerler, termoset, termoplastik ve elastomer olarak gruplandırılabilir. *Termoset polimerler*, sert polimer olup ısı ile tekrardan şekillendirilememektedir. *Epoksiler*, poliüretanlar, fenolikler vb.

termoset plastiklere örnek verilebilir. *Termoplastik polimerler*, plastik olarak adlandırıldığımız polimerlerdir. Isı etkisiyle yumuşayan ve yeniden şekillendirilebilen günlük hayatımızda da kullandığımız birçok üründe kullanılan polimer türüdür. *Polietilen*, polivinil klorür gibi malzemeler termoplastik malzemelere örnek verilebilir. *Elastomerler*, esnek ve elastik malzemelerdir. Çekme ile uzama eğilime girerler ve kuvvet kaldırıldığında eski haline dönerler. *Kauçuklar* elastomer malzemedir.

Zincirin kimyasal ve fiziksel yapısına göre polimerler, düz, dallanmış, çapraz bağlı ve ağ yapıda polimerler olarak gruplandırılır.

Zincir yapısına göre polimerler, homopolimer, kopolimer ve terpolimer olarak adlandırılmaktadır. Polimer sentezinde birden fazla tür monomer kullanılabilir. Aynı tür monomer yer alıyorsa *homopolimer*, iki farklı monomer birimi yer alıyorsa *kopolimer*, üç farklı monomer yer alıyorsa *terpolimer* olarak tanımlanır (Saçak, 1998).

Sentezlenme mekanizmalarına göre polimerler, temelde polimerler sentezlenme mekanizmalarına göre *basamaklı polimerizasyon* (kondenzasyon polimerizasyonu) ve *katılma polimerizasyonu* (zincir polimerizasyonu) olarak ikiye ayrılır. Katılma polimerizasyonu, *radikalik* ve *iyonik zincir polimerizasyonu* olmak üzere iki alt grupta tanımlanmaktadır (Saçak, 1998).

2.1.2. Polimerlerin Kullanımı ve Uygulama Alanları

Gündelik hayatımızın parçası olan polimerlerin birçok avantajı bulunmaktadır. Polimerlerin avantajları, kolaylıkla şekil verilebilmesi, kimyasallara karşı dayanıklı olması, tekrar kullanılabilir olması ve ucuz olması gibi özellikleridir. Polimerlerin dezavantajı olarak ise, çoğunluğunun petrol kaynaklı olması sebebiyle kaynağının yenilenememesi, kansere sebebiyet verilebilmesi, düşük sıcaklıkta ve güneş ışığında kırılgan olabilmesi ve ısı direncinin düşük olması olarak sıralanabilir (Saçak, 1998).

Teknolojik gelişmeler polimer malzemelerin uygulama alanlarının genişlemesine sebep olmaktadır ve polimer malzemelere gerekli katkıları ile iletken özelliklerin kazandırılması, renk değiştiren jeller ile üç boyutlu modellemeler gibi alanlarda akıllı ve manyetik özellik gösteren polimerlerin kullanımı ile de karşılaşılmaktadır. Polimerlerin; fiberler, filmler, boyalar, tekstil, filament, membranlar, yapıştırıcılar, sızdırmazlık uygulamaları, köpükler, absorplayıcı, radyasyon dedektörleri, radyasyon zırh malzemesi gibi malzemeler ile havacılık ve otomotiv sanayilerinde de uygulama alanları bulunmaktadır.

2.1.3. Polimerlerin Geri Dönüşümü ve Çevre ile İlişkisi

Polimerlerin çoğunluğunun hammaddesinin petrol kaynaklı olması ve gündelik hayatımızın bir parçasının polimer esaslı ürünler olması çevre kirliliğini kaçınılmaz hale getirmektedir. Polimerler 1-7 aralığında hangi hammaddeden yapıldığı numaralandırılarak geri dönüşüm işlemine tabii tutulmaktadır. 1 numara PET (polietilen tereftalat), 2 numara HDPE (yüksek yoğunluklu polietilen), 3 numara PVC (polivinil klorür), 4 numara LDPE (düşük yoğunluklu polietilen), 5 numara (polipropilen), 6 numara PS (polistiren) ve 7 numara diğer ürünler (su damacaneleri, güneş gözlükleri gibi) olarak bilinmektedir.

2.1.4. Polimerlerin Radyasyon Alanında Kullanılması

Tez çalışması kapsamında, ülke olarak dünya rezervinde birinci olduğumuz doğal Bor minerali ve Bor katkılı polimer malzemeler kullanılarak radyasyon dozimetresi geliştirilmesi hedeflenmiştir. Doğal Bor minerali ile bilgiler Bölüm 2.2'de detaylı verilmektedir. Polimer malzemelerin radyasyon doz ölçümünde kullanılmasının yanı sıra, havacılık, tıbbi uygulamalar ve nükleer endüstrisinde yüksek radyasyona dayanıklı soğurucu zırh malzemeleri olarak kullanıldığı da bilinmektedir (Drobny, 2012).

Havacılık alanında, radyasyonun polimerik malzemeler üzerine olan etkileri, uyduların ve diğer uzay araçlarının tasarımının gelişmesi amaçlı polimer malzemelerin kullanımı her geçen gün artmaktadır. Havacılıkta yapısal uygulamalar için kullanılan grafit elyaf takviyeli kompozitler gibi malzemeler,

yüksek mukavemet ve ağırlık oranları nedeniyle tercih edilmektedir. Bu tür kompozitlerin aynı zamanda radyasyona yeterince dirençli olması gerekmektedir. Bu uygulamalar için kompozit matris malzemeleri, 103 kGy'de radyasyon direncine sahip epoksi reçineleri ve 105 kGy'lik bir dozda 1 MeV elektron ile maruz kaldıktan sonra yapısal değişiklik göstermeyen siyanat ester reçinelerini kullanılmaktadır (Drobny, 2012). Bu bağlamda birçok polimer malzemelerin radyasyona dirençli olduğu söylenebilir.

İyonize radyasyonun kullanıldığı **sterilizasyon işlemi** ile polimer malzemelerde hastalığa sebep olabilecek kimyasal kalıntıları/mikrobiyel yükleri yok etmek mümkündür. Bu uygulamanın daha çok sağlık alanında yapıldığı görülmektedir. Termoplastikler, termosetler ve elastomerlerin birçoğu 50 kGy ışınlama dozuna kadar sterilizasyon işleminde dayanıklı kaldığı bilinmektedir (Drobny, 2012).

Nükleer sanayi uygulamalarında; polimer malzemeler conta, hortum, ısı yalıtımı, elektrik izolasyonları, sızdırmazlık gibi amaçlar için de kullanılmaktadır. PTFE (teflon), PE (polietilen), EPDM (etilen propilen dien) gibi malzemeler nükleer sanayi uygulamalarında kullanılan başlıca polimerlerdir (More ve ark., 2021).

2.1.5. Radyasyon Doz Ölçümünde Polimer Kullanımı

Polimerler genellikle mekanik dayanıklılıklarının yüksek olması, yalıtkan malzemelere yakın özellik göstermeleri, ısı dirençlerinin düşük olması vb. nedenler ile radyasyona duyarlı malzeme olarak kabul edilmezler ve bu nedenle radyasyon doz ölçümlerinde inorganik malzemelerden daha az kullanılırlar. Ancak son dönemlerde yapılan bazı çalışmalarda, polimerlere yapılan bazı katkılamaların, boya madde eklemelerinin polimerlerin elektriksel özelliklerinde artışa neden olduğu görülmüştür (TAEK-Teknik Rapor, 2011; Tanrıku ve ark., 2017; Öztürk, 2018; Alashrah ve El-Ghoul, 2021; İpek, 2021; BOREN, 2022). Bu nedenle günümüzde radyasyon doz ölçümünde kullanılabilen PMMA, Polianilin, Polivinil gibi polimer örneklerine, özellikle boya madde katkısı da içeren ve sağlık alanında kullanılan radyokromik film dozimetreleri eklenmiştir. Polimerlerin doz ölçümlerinde kullanıldığı çalışmaların bir kısmı aşağıda özetlenmiştir.

Okuma tekniği spektrofotometre olan radyokromik filmlerin (2.8.1 bölümünde de anlatılmıştır), boyalı ve şeffaf plastik filmler örnekleri mevcuttur (Drobny, 2012). Ticari olarak yaygın olarak kullanılan film dozimetrelere, poliamid (naylon), poliklorostiren polivinil bütiral, selüloz triasetat, PMMA (polimetilmetakrilat örnek verilebilir. Yapısı polimer olan radyokromik filmlerin görece ucuz ve radyasyona duyarlı olmaları bir üstünlük olarak kabul edilse de, genellikle ısı kararlılıkları düşük olan bu malzemelerin nem, kir gibi çevresel koşullardan etkilenmeleri, UV ışığına karşı dirençli olmamaları, ışlandıktan ancak 24 saat sonra doğru soğurulan doz değerini göstermeleri ve hassasiyetlerinin gafkromik film dozimetrelere göre daha az olması dezavantajları olarak kabul edilir. Radyokromik filmlerde doz ölçümü, ışınlama etkisi ile polimer matrisindeki değişikliklerden ziyade, polimer malzemeye katılanmış boya malzemesinde ışınlama dozu ile doğru orantılı oluşan renk değişikliğinin sonucudur.

Zamorano, Andersen ve arkadaşlarının radyokromik ve radyoflorojenik katihal polimer dozimetresi malzemesi olarak Polietilen glikol-diakrilat (PEGDA) ve 2-Hidroksietil-metakrilat (HEMA) polimerlerini kullandığı ESR çalışmasında da (2019), ışınlama ile malzemedede oluşan serbest radikal konsantrasyonun, ışınlanan polimer matrisinden değil, radyokromik boyadan kaynaklandığı sonucuna ulaşılmıştır.

Alante ve Campos'un yürüttüğü ticari polikarbonat ile gama ışını radyasyon dozimetresi geliştirme çalışmasında (2010); 1-150 kGy doz aralığı için tekrarlanabilir ve doğrusal davranış göstermesi sebebi ile polikarbonatın dozimetrik malzeme olarak kullanılabileceği sonucuna ulaşılmıştır ancak doz duyarlılığı için ısı direnci düşük bu malzemenin düşük sıcaklıkta depolanması gerektiği ve malzemenin kararlılığının az olması sebebi ile doz ölçümünün 24 saat içerisinde yapılması gerektiği de belirtilmiştir.

TAEK tarafından yürütölen çalışma gereğince (TAEK-Teknik Rapor, 2011); polianilin'in iletkenlik özelliği yüksek bir polimer olduğu kabul edilir ve bu bağlamda diğer kullanım alanlarına ek olarak polianilin yüksek enerji radyasyon sensörü olarak da kullanılır. Saf polianilin (PANİ) ve bu polimerin polivinil klorür (PVC) ile hazırlanmış kompozitlerinin yüksek enerjili radyasyonla etkileşmesi sonucunda,

malzemenin iletkenlik özelliğinde meydana gelen değişiklikler ile radyasyon ölçümü yapmak mümkün olmaktadır.

Alashrah, Ghoul ve arkadaşlarının yapmış oldukları çalışmada (2021), polivinil alkol/nitro mavi tetrazolyum nanokompozit filmler (PVA/NBT) ile X -Işınına duyarlı radyasyon dozimetresi geliştirilmesi hedeflenmiştir. Bu çalışmada katkı malzemesinin radyasyona duyarlılığı sonucunda bu malzemenin düşük doz dozimetresi olarak kullanılabilceği sonucuna ulaşmıştır.

Bilindiği kadarıyla literatürde Bor katkılı polimer malzemeler ile gerçekleştirilmiş dozimetrik çalışma bulunmamaktadır. Ancak literatürde doğal Bor mineraline yapılan katkıların (Mg, Cu, vb.) incelendiği çalışmalarda (BOREN, 2022; İpek, 2021; Öztürk, 2018; Tanrıkulu ve ark., 2017), inorganik malzeme olan Bor malzemesine yapılan katkılamalar ile genel olarak malzemenin mekanik özelliklerinin arttığı ifade etmektedir. Malzemenin mekanik özelliklerin artışının ise genel olarak doz hassasiyeti ile ters orantılı olduğu düşünülmektedir (İpek, 2021). Literatür bilgileri, katkılanmamış doğal Bor minerallerinin doz hassasiyetlerinin de düşük olduğunu göstermiştir. Bu tez çalışmasında ulaşılan deneysel bulgular ışığında (Kesim 4) da; katkılanmamış Doğal Bor minerallerinin doz hassasiyetlerinin cGy, Gy, kGy, UV doz çalışmaları için yüksek olmadığı görülmüştür. Literatür bulguları polimer malzemelerin de radyasyona genel anlamda dirençli olduğu savını desteklediği için, tezin başlangıç amaçlarından olan “Bor katkılanmış Polianilin vb. polimerlerde dozimetrik araştırmaların yapılması” konusunda ilerleme olmamıştır. Bu konuda detaylı deneysel bulgular elde edilememesinin önemli sebeplerinden bir diğeri ise, ülkemizi de yoğun etkisi altına alan pandemi (Covid-19) koşullarında kompozit malzeme hazırlama, ışınlama, deneysel ekipmanlara ulaşma gibi tezin yürütümünde yaşanan zorluklardır. Bu gerekçelerle son durumda tezin içeriği, doğal Bor minerallerini kullanarak radyasyon dozimetresi geliştirilmesi kapsamında geliştirilmiştir. Doğal Bor minerallerinin radyasyon malzemesi olarak kullanımları ile elde edilen deneysel bulgular Kesim 3 ve Kesim 4’de detaylandırılmıştır.

2.2.Bor

Bor minerali, beyaz kayayı andıran, çok sert, ısıya dayanıklı olan ve diğer elementlerle bileşik halinde bulunarak doğada yer almaktadır (Şekil 1). Bor mineralleri, topraktan çıkarıldıktan sonra kırma, eleme, yıkama ve öğütme işlemlerini müteakip kullanıma hazır hale getirilmektedir ve tabiatta yaklaşık 230 çeşit bor minerali bulunmaktadır.

Bor, periyodik tabloda “B” simgesi ile gösterilen, atom numarası 5, atom ağırlığı 10,81, yoğunluğu 2,84 g/cm³, erime noktası 2076 °C ve kaynama noktası 3927 °C olan metalle ametal arası yarı iletken özelliğe sahip bir elementtir.



Şekil 1. Bor Cevheri

Bor elementinin izotopları, ⁸B, ¹⁰B, ¹¹B, ¹²B ve ¹³B'dir. En kararlı izotopları ¹⁰B ve ¹¹B'dir. Bu izotopların tabiatta bulunma oranları sırasıyla %19,1- 20,3 ve %79,7- 80,9'dir. ¹⁰B izotopu, çok yüksek termal nötron tutma (3837 barn) özelliği göstermektedir. Bu sebeple Bor malzemesinin, nükleer malzemelerin bulunduğu alanlarda ve nükleer enerji santrallerinde kullanılması tercih edilmektedir. Ülkemizde ise ¹⁰B izotop oranı yüksek bor cevher yatakları bulunmaktadır.

Dünyadaki önemli bor yatakları Türkiye, Rusya ve ABD'de yer almaktadır. Ticari bor rezerv bölgeleri ise; ABD Kaliforniya Eyaletinin güneyinde yer alan “Mojave Çölü”, Güney Amerika'da yer alan “And Kemerı”, Türkiye'nin de yer aldığı “Güney-Orta Asya Orojenik Kemerı” ve Doğu Rusya'dır (Boren, 2021).

Bor mineralleri, bünyelerinde değişik oranlarda bor oksit (B₂O₃) içeren mineraller olup; ülkemizde yaygın olarak bulunan bor mineralleri, **Tinkal**, **Kolemanit** ve

Üleksit'dir. Ülkemizde bulunan başlıca bor minerallerinin bileşimi ve B₂O₃ yüzdesi Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Bor Mineralleri, Bileşimleri ve Bulunduğu Yataklar (Boren, 2021)

Mineral	Bileşim	B ₂ O ₃ %	Bulunduğu Yataklar
tinkal (borax)	Na ₂ B ₄ O ₇ .10H ₂ O	36,5	Türkiye (Kırka), ABD, Arjantin, Bolivya, Hindistan
kernit (rasorit)	Na ₂ B ₄ O ₇ .4H ₂ O	51	Türkiye, ABD, Arjantin, Çin
üleksit (boronatrokalsit)	NaCaB ₅ O ₉ .8H ₂ O	43,0	Türkiye, Sırbistan, ABD, Şili, Peru, Bolivya, Çin
kolemanit	Ca ₂ B ₆ O ₁₁ .5H ₂ O	50,8	Türkiye (En büyük rezerv)
pandermit (priseit)	CaB ₁₀ O ₁₉ .7H ₂ O	49,8	Türkiye (Kırka, Bigadiç), Peru
havlit	Ca ₄ Si ₂ B ₁₀ O ₂₃ .5H ₂ O	44,5	Türkiye (Bigadiç, Susurluk)
borasit	Mg ₃ B ₇ O ₁₃ Cl	62,2	Türkiye (Kırka, Emet, Bigadiç)

Türkiye'de bilinen bor yatakları çoğunlukla Kırka/Eskişehir, Bigadiç/Balıkesir, Kestelek/Bursa ve Emet/Kütahya'da yer almaktadır. Tablo 2'de ülkemizdeki bor yatakları rezerv kapasiteleri verilmiştir.

Tablo 2. Bor Yatakları Rezerv Kapasiteleri (Boren, 2021)

Bölge	Mineral Cinsi	Toplam (Ton)
Emet	kolemanit-üleksit-probertit	1.811.072.520
Kırka	Tinkal	824.720.950
Bigadiç	kolemanit-üleksit	628.350.480
Kestelek	Kolemanit	5.254.920
	Toplam	3.269.398.870

Bor elementinin çeşitli metal ve ametal elementleriyle yaptığı bileşiklerin gösterdiği değişik özellikler, endüstride pek çok çeşit Bor bileşiğinin kullanılmasına imkân sağlamaktadır. Dünya fiili Bor üretimi 2018 yılında ise yaklaşık 4,1 milyon ton civarında gerçekleşmiştir. Fiili bor üretiminde Türkiye %59

pay ile birinci sırada yer almıştır. Türkiye önemli bir **Kolemanit**, **Tinkal** ve **Üleksit** üreticisi olmanın yanı sıra, **Boraks**, **Susuz Boraks**, **Borik Asit** veya **Bor Trioksit** gibi işlem görmüş bor ürünleri üreten bir ülkedir.

2.2.1. Bor Kullanım Alanları

Bor minerallerinin en fazla kullanım alanlarından birisi cam sanayisidir. Bor, **cam üretiminde** akışkanlığı artırmakla birlikte, yüzey sertliği ve dayanıklılığını yükseltmektedir. Bor, borosilikat cam, tekstil tipi ve izolasyon tipi cam elyaflarında, sıvı kristal göstergelerinde, özel fırın kaplarında, laboratuvar malzemelerinde, arabaların far ve sinyal camlarında, cam yününde kullanılmakta ve bunun yanı sıra bor içeren bazı özel camlar uzay sanayinde, elektronik endüstrisinde ve nükleer reaktörlerde de kullanım alanı bulunmaktadır (Boren, 2021).

Seramik sanayisinde bor, sır ve fritlerde, ısısal açıdan uyum sağlaması, sırrın ısısal genleşme kat sayısının düzenlenmesini sağlaması, mekanik gücü ve çizilme direncini artırması sebepleri ile kullanılmaktadır. Ayrıca bor seramik malzemelerde suyun ve kimyasalların etkilerine karşı da direnç artırıcı olarak tercih edilmektedir.

Temizleme ve beyazlatma sanayinde bor, deterjan, sabunlara bor katkılanarak mikrop öldürücülük, beyazlatıcı etkisini artırmak ve ağartıcı özelliğini sağlamak amacıyla kullanılmaktadır.

Ahşap, selülozik yalıtım, PVC ve tekstil gibi alanlarda bor ilavesi ile oksijen temasını keserek yanmaya karşı alev geciktirici özelliği sağlanmaktadır.

Tarım alanında bor, tohum üretiminde kayıpların azalmasını sağlamak amacıyla hücredeki şeker geçişini, hücre bölünmesi ve gelişimini, fotosentez metabolizmasını düzenlemektedir.

Uçak ve havacılık endüstrisinde bor, aerodinamikteki gelişmeler, yüksek ısıya dayanımlı gövde, düşük ağırlık yüksek kapasite ve benzeri uygulamalar üzerinde

geliştirilen tasarım çalışmaları havacılık ve uzay sanayinde kompozit malzeme kullanımında ön plana çıkmaktadır.

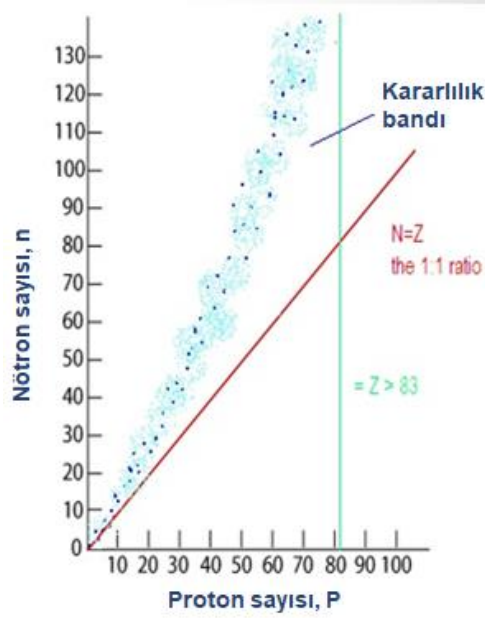
Enerji alanında bor, hidrojeni depolama özelliğinin yanı sıra, yakıt pillerinde doğrudan yakıt olarak da kullanılabilir.

Nükleer uygulamalarda bor, atom reaktörlerinde borlu çelikler, bor karbürler ve titan bor alaşımları olarak kullanım alanı bulmaktadır. Yaklaşık her bir bor atomu bir nötron absorbe etmektedir. Bu nedenle, atom reaktörlerinin kontrol sistemleri ile soğutma havuzlarında ve reaktörün alarm ile kapatılmasında bor (^{10}B) kullanılmaktadır.

Sağlık alanında bor, kalsiyum, magnezyum ve fosfor dengesini ayarlamakta olup sağlıklı kemiklerin oluşumuna, kasların ve beyin fonksiyonlarının gelişimine katkı sağlamaktadır.

2.3. Radyoaktivite

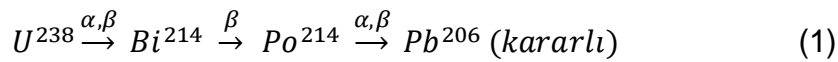
Radyoaktivite teorisinin temeli atom çekirdeğinin kararlı olup olmaması özelliğine dayanarak açıklanmaktadır. Çekirdeğin kararlılığı ise özellikle küçük atom numaralı çekirdekler için, çekirdeğin sahip olduğu nötron ve proton sayıları arasındaki dengeye bağlıdır. Hafif kararlı çekirdeklerde nötron ve proton sayıları eşittir (Khan, 2010). Şekil 2'de görüldüğü üzere proton sayısı 83 (Bizmut)'dan daha fazla proton içeren çekirdekler kararsızdır (Khan, 2010).



Şekil 2. Hafif çekirdekler için kararlılık bandı (Khan, 2010)

Kararsız çekirdeklere “**radyoaktif çekirdek**” veya “**radyonüklit**” de denilmektedir. Kararsız çekirdekler, kararlı hale geçebilmek için proton ve nötron sayılarını eşitleme eğilimine girerler ve *parçacık türünde* alfa, beta gibi ışımaların yani sıra gama ışını gibi *elektromanyetik dalga (emd) tipinde* ışımalar gerçekleştirirler. Atom çekirdeğinin kendiliğinden ışımaya yapmasına “**radyoaktivite**” denir.

Konuyu açıklamak üzere bir örnek vermek gerekirse; radyoaktif çekirdek olan Uranyum-238 (U^{238})’in kararlı çekirdek olan Kurşun-206 (Pb^{206})’a dönüşümü ve ışımaya türleri (1) numaralı denklem ile gösterilmektedir. Bu dönüşüm esnasında oluşan Bizmut-214 (Bi^{214}) ve Polonyum- 214 (Po^{214}) kararsız radyoaktif çekirdekleri oluşmaktadır.



Tüm radyoaktif çekirdekler, elementin türünden ve yaydıkları radyasyonlardan bağımsız olarak **radyoaktif bozunma yasasına** bağlıdır (Martin, 2013). Radyoaktif bozunma yasasına göre; N_0 çekirdeklerin başlangıçtaki sayısı ve λ

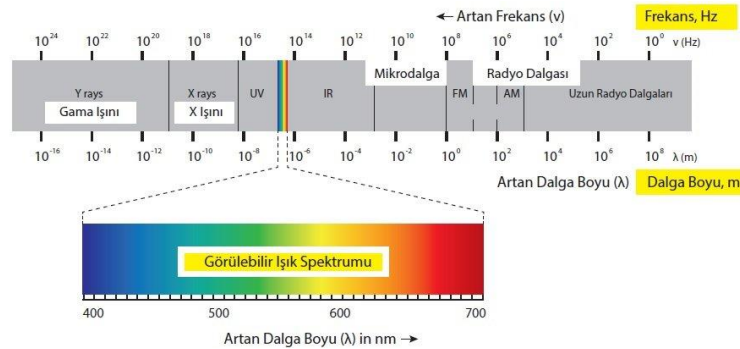
birim zaman başına bozunma ihtimali olmak üzere, t zaman sonraki mevcut ürün çekirdek sayısı, (2) nolu denklem ile verilmektedir.

$$N = N_0 e^{-\lambda t} \quad (2)$$

Radyoaktif çekirdeklerin proton sayısının yarısının bozunması için gereken süreye **yarı ömür** ($t_{1/2}$) denilmektedir. Her radyoaktif elementin yarılanma süresi farklıdır ve o elementin karakteristik özelliğini belirtmektedir (Martin, 2013).

2.4. Radyasyon ve Radyasyonun Sınıflandırılması

Radyasyon; ortamda elektromanyetik dalga veya yüklü / yüksüz parçacıklar tarafından taşınan enerji olarak tanımlanabilir. Türlerin spesifik özelliklerinden önce genel olarak tanımlamaları Şekil 3’de belirtildiği gibi dalga boyu-enerji ilişkisi açısından elektromanyetik dalga (emd) spektrumu ile ifade edilebilmektedir.



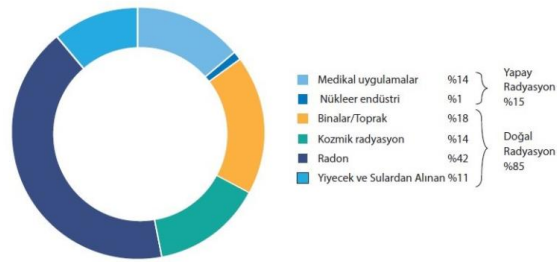
Şekil 3. Elektromanyetik dalga (EMD) Spektrumu (Martin, 2013).

Radyasyonu “**iyonlaştırıcı radyasyon**” ve “**iyonlaştırıcı olmayan radyasyon**” olmak üzere iki farklı türde sınıflandırabiliriz.

İyonlaştırıcı olmayan radyasyon, enerjisi 10 eV’dan düşük olup etkileştiği maddede iyonlayıcı özellik oluşturamayan radyasyon türüdür. **Radyo dalgaları**, **mikrodalgalar**, **kızılötesi dalgalar**, **görünür ışık** ve **mor ötesi ışık (100-400nm)** iyonlaştırıcı olmayan radyasyon türleridir (Martin, 2013). **İyonlaştırıcı radyasyon** ise, enerjisi 10 eV’dan yüksek olup etkileştiği maddeyi iyonlaştıran radyasyon türüdür. İyonlaştırıcı radyasyon türleri, **alfa parçacıkları**, **beta parçacıkları**, **nötronlar** gibi parçacık türü ve **UV ışınları** (UV-C: 200 – 280 nm) **X-ışınları**,

gama ışınları gibi dalga türündedir (Martin, 2013). Bu tez çalışmasında; seçilen farklı doğal bor örneklerine düşük ve yüksek dozlu (cGy, Gy, kGy) X / gama ışınlarının ve UV ışınlamasının etkileri incelenecektir.

Radyasyon aynı zamanda “**doğal radyasyon**” ve “**yapay radyasyon**” olarak da sınıflandırılmaktadır. Şekil 4’de gösterilen dağılımında, dünya genelinde %85 oranında doğal radyasyon kaynağına ve %15 oranında da yapay radyasyon kaynağına maruz kalındığı görülmektedir.



Şekil 4. Doğal ve Yapay Radyasyon Kaynak Dağılım Yüzdeleri (AFAD, 2020)

Doğal radyasyon kaynakları arasında yüksek yüzde Şekil 4’de gösterildiği gibi **Radona** aittir. Yeryüzünde birçok radyoaktif elementler bulunmaktadır. Radyoaktif elementlerin bozunması sonucunda yayılan miktar olarak en etkili izotoplardan birisi radondur (TAEK, 2020). Radon, havada gaz halinde olup solunum yoluyla da maruz kaldığımız bir radyasyon kaynağıdır. **Kozmik ışınlar** ise yıldızlar ve güneşler aracılığıyla maruz kaldığımız doğal radyasyon kaynağıdır (Yüksel, 2014). Tükettiğimiz besinler (deniz ürünleri vb.) ve insan vücudunda bulunan mineraller (potasyum-40 vb.) aracılığıyla da radyasyona maruz kalmaktayız (Yüksel, 2014).

Yapay radyasyon kaynakları arasında ise yüzde değeri yüksek olan, medikal uygulamalardır. Medikal uygulamalara örnek olarak; tıpta tanı ve tedavide kullanılan **radyografi, nükleer tıp ile görüntüleme ve radyoterapi** örnek olarak verilebilir. Diğer yapay radyasyon kaynakları kullanıcı temelli olup, endüstri, tarım, hayvancılık ve araştırmalarda kullanılmaktadır (Yüksel, 2014).

Doğal ve yapay radyasyon kaynaklarından maruz kalınan radyasyon dozunun dünya ortalaması 2,7 mSv/yıl'dır. Bu dozun radyasyon kaynaklarına göre dağılımı ise Tablo 3'de verilmiştir (TAEK, 2020).

Tablo 3. Doğal ve Yapay Radyasyon Kaynaklarından Maruz Kalınan Doz (TAEK, 2020)

Radyasyon türü	Maruz kalınan doz	Radyasyon türü	Maruz kalınan doz
Kozmik	0,39 mSv	Serpinti	0,007 mSv
Gama	0,46 mSv	Mesleki	0,002 mSv
İç Işıma	0,23 mSv	Atıklar	0,001 mSv
Radon	1,30 mSv	Tüketici Ürünleri	0,0005 mSv
Tıbbi	0,30 mSv		

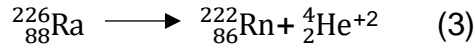
2.5.Radyasyonun Madde ile Etkileşimi

Tezin amaçlarından olan radyasyona maruz kalan radyasyon çalışanlarını göz önünde bulundurduğumuzda, radyasyonun madde ile etkileşimi incelemek kaçınılmaz hale gelmektedir.

2.5.1.Alfa Parçacığının Madde ile Etkileşimi

Atom numarası yüksek olan radyoaktif ağır çekirdekler madde ile etkileşimi sonucunda genellikle alfa parçacığı yayılımı yapmaktadır. Alfa parçacığı yüklü (+2 değerlikli) helyum atomu olması sebebiyle etkileştiği madde ile enerjisini kaybederek, çoğunlukla çekirdek üzerinde *uyarılmaya* ve *iyonlaşmaya* sebebiyet vermektedir. Enerjileri ise 4-8 MeV aralığındadır (Özdemir, 2015).

Alfa bozunmasına örnek olarak radyum çekirdeğinin bozunması verilebilir. Radyum çekirdeğinin iki proton ve iki nötron kaybederek radon çekirdeğine bozunması (3) nolu denklemde gösterilmiştir.



Alfa parçacığının madde içerisindeki enerji kaybı ise (4) nolu denklemde “**bethe formülü**” ile ifade edilerek Şekil 5’de gösterilen “Bragg Eğrisi” ile tanımlanmaktadır (Podgorsak, 2010).



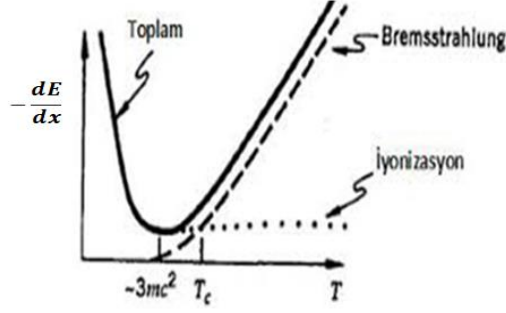
Şekil 5. Bragg Eğrisi

$$-\left\langle \frac{dE}{dx} \right\rangle = \frac{4\pi}{mc^2} \frac{nZ^2}{\beta^2} \left(\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0} \right)^2 \left\{ \ln \left(\frac{2mc^2\beta^2}{V(1-\beta^2)} \right) - \beta^2 \right\} \quad (4)$$

Alfa parçacığının madde içerisinde kat ettiği yol boyunca kaybettiği enerjiye yönelik matematiksel denklemde geçen negatif işaret, yüklü parçacığın enerji kaybını ifade etmektedir. Bethe denkleminde; parçacığın enerjisi E , kat ettiği yol mesafesi x , elektron yoğunluğu n , ağır yüklü parçacık için elektrik yükü Z , $\beta = v/c$ (v : parçacığın hızı, c : ışık hızı), Malzemenin ortalama uyarılma potansiyeli V , durdurma gücü dE/dx terimleri ile ifade edilmektedir (Podgorsak, 2010).

2.5.2. Beta Parçacığının Madde ile Etkileşimi

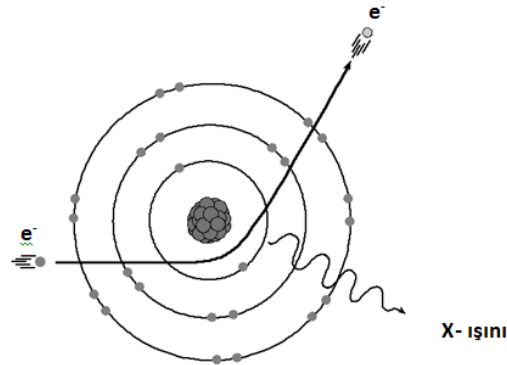
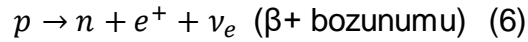
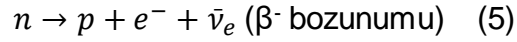
Alfa parçacığına göre daha hafif olan beta parçacığı ± 1 yüklüdür ve madde içerisinde ilerlerken çoğunlukla *iyonlaşmaya* ve *frenleme (bremmsstrahlung)* etkisi ile X-ışınlarının oluşumuna sebebiyet vermektedir (Podgorsak, 2010).



Şekil 6. Beta Parçacığının Madde ile Etkileşimi

Beta parçacığının madde içerisinde yol alırken kaybettiği enerji diyagramı Şekil 6'da verilmiştir. Çekirdeğin içerisinde proton-nötron dönüşümleri beta parçacıklarını oluşturur. Bir nötronun protona dönüşmesi (*negatron, β^- bozunumu*) ya da bir protonun nötrona dönüşmesi (*pozitron, β^+ bozunumu*) olarak tanımlanır. Bazı durumlarda ise çekirdeğe çok yakın olan bir elektronun çekirdek tarafından yakalanması sonucu bir protonun bir nötrona dönüşmesi, *elektron yakalama* olarak adlandırılmaktadır (Khan; Podgorsak, 2010).

Beta bozunumu, pozitron bozunumu ve elektron yakalama mekanizmaları sırasıyla (4), (5) ve (6) nolu denklemlerle gösterilmiştir.



Şekil 7. X-Işını Oluşumu

Madde içinde temelde iyonlaşmaya neden olan beta parçacıklarının enerjisi 1 MeV veya daha fazla olduğunda Şekil 7'de görüldüğü gibi atom çekirdeğinin

güçlü Coulomb alanı tarafından frenlenerek yavaşlaması sonucu enerji kaybeder. Kaybedilen enerji de **frenleme radyasyonu** veya **Bremmsstrahlung** adı verilen X-Işını olarak adlandırılmaktadır (Martin, 2013).

2.5.3. Nötron Parçacığının Madde ile Etkileşimi

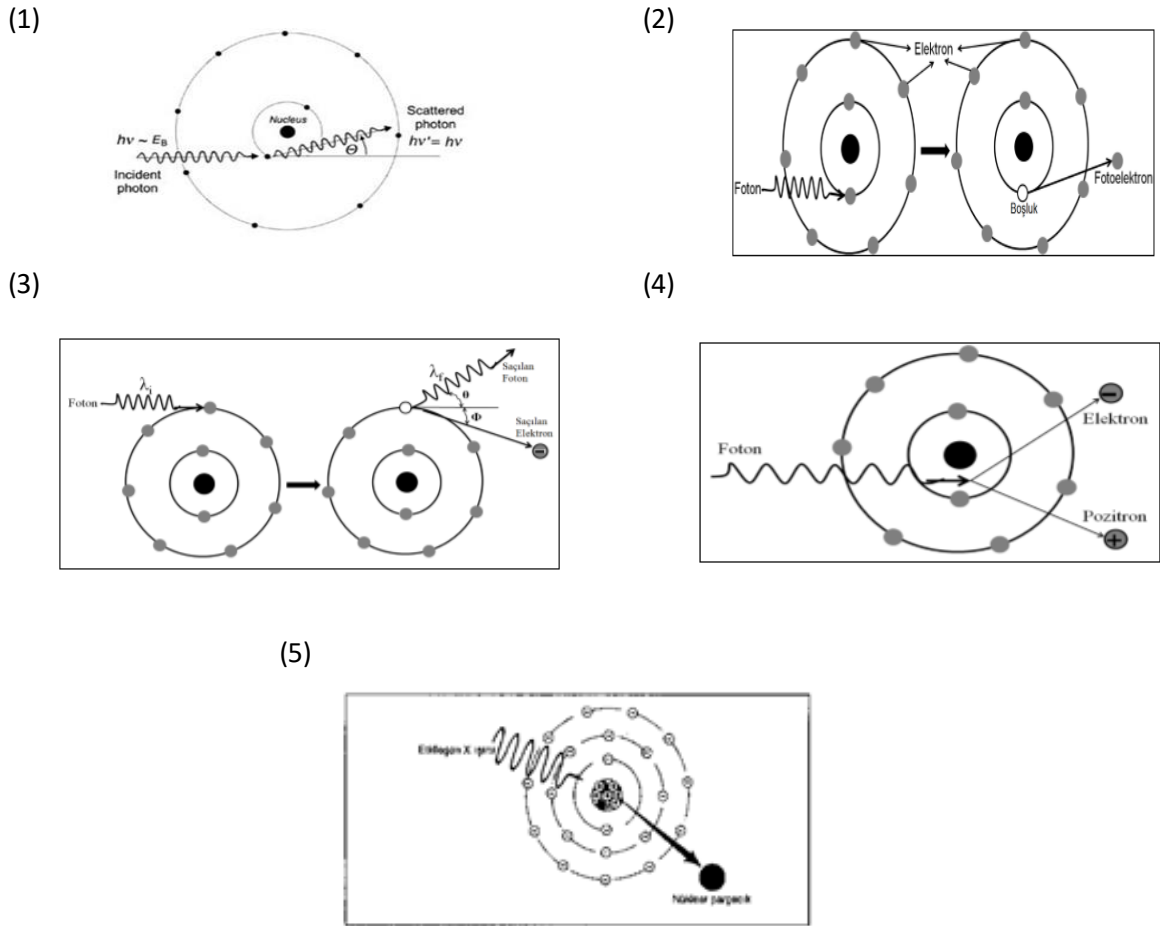
Çekirdek reaksiyonları sonucu veya çekirdek bölünmeleri sonucu oluşan nötron parçacıkları yüksüzdür ve giricilikleri çok yüksektir. Madde içerisinde çok çabuk nüfuz edebilirler. Doğrudan iyonlaşmaya sebep olmamakla birlikte, iyonlaşmaya sebep olan alfa, beta parçacıklarının salınımına ve gama ışını salınımına yol açarlar (Özdemir, 2015). Nötron parçacıkları enerji seviyelerine göre “**Ultra soğuk nötron**”, “**Soğuk nötron**”, “**Termal nötron**”, “**Epitermal nötron**”, “**Orta ve Hızlı nötron**” olmak üzere 6 çeşit türden oluşmaktadır (TAEK, 2020). Nötronlar enerjilerine bağlı olarak madde ile **elastik saçılma**, **inelastik saçılma**, **radyoaktif yakalama ve fisyon** gibi etkileşimler yaparlar. **Elastik saçılma**; nötronlar için temel etkileşimdir, nötron ile etkileştiği çekirdek arasında kinetik enerji aktarımı gerçekleşmesi sonucu oluşmaktadır. **Inelastik saçılma**, yeterince enerji taşıyan bir nötronun (1 MeV civarı) etkileştiği çekirdeği uyarmasıdır. **Radyoaktif yakalama**, nötronun etkileştiği çekirdeğe tutunarak açığa gama ışını salınması olayıdır. **Fisyon**, genellikle büyük atomlu çekirdeklerin parçalanması anlamına gelmektedir. Çekirdeklerin parçalanması sonucu nötron salınımı gerçekleşir. Salınan nötronlar ortamda yer alan diğer fisyon oluşturabilecek çekirdeklere çarparak zincirleme şekilde nötron salınımı gerçekleştirebilirler (TAEK, 2020).

2.5.4. Gama Işını ve X- Işınının Madde ile Etkileşimi

Atomda iç elektron geçişleri sonucunda **X-ışınları**, çekirdekte yüksek enerjiden temel enerji seviyesine geçişlerle ise **gama ışınları** oluşmaktadır. İyonlaştırıcı elektromanyetik radyasyon türlerine örnek olan X-Işını ve gama ışınının madde ile etkileşiminin anlaşılması da tezin amacı açısından önemli bir diğer konudur. Gama ışınları elektromanyetik spektrumda en kısa dalga boylu ve en yüksek enerjili elektromanyetik radyasyondur (Grupen, 2010). Enerjileri 150 keV-10 MeV

aralığındadır. X-ışınları ise elektromanyetik spektrumda enerjisi gama ışınlarına göre daha az olan elektromanyetik radyasyon türüdür. Enerji aralığı 20-150 keV'dir.

X-ışını ve Gama ışını madde ile; **“Rayleigh saçılması”**, **“fotoelektrik etki”**, **“compton saçılması”**, **“çift oluşumu”** ve **“fotodisintegrasyon”** gibi etkileşim türleri gerçekleştirirler.



Şekil 8. Gama ışını ve X-ışını Madde Etkileşimi Türleri

Rayleigh Saçılması (Koherent Saçılma); enerjisi 10 keV'un altında olan fotonlar madde ile etkileştiklerinde koherent saçılma da denilen Rayleigh saçılmasına yol açmaktadır. Rayleigh saçılmasında; atom uyarılır, uyarılan atom eşit enerjili bir foton salınımı yaparak taban enerji seviyesine ulaşmaktadır. Gelen ve salınan fotonun dalga boyu ve enerjisi aynıdır, momentum korunumu gereği salınan foton dar bir açı ile Şekil 8 (1)'de gösterildiği gibi salınım yapmaktadır (Podgorsak, 2010).

Fotoelektrik Etki; enerjisi (10 keV-0,5 MeV) fotonlar madde ile etkileşimleri esnasında fotoelektrik etki gözlenmektedir. Fotoelektrik etkide, atom yörüngesindeki elektronlar enerjisi yörünge elektronunun atoma bağlanma enerjisinden büyük olan gelen foton ile etkileşme sonucunda Şekil 8 (2)'de gösterildiği gibi yörüngesinden kopmaktadır. Kopan bu elektrona **fotoelektron** denir (Podgorsak, 2010). Fotoelektronun kinetik enerjisi ise (8) nolu denklemde belirtildiği gibi gelen fotonun enerjisinden, elektronun atoma bağlanma enerjisinin farkına eşittir.

$$h\nu \text{ (gelen foton enerjisi)} = \text{kinetik enerji (fotoelektron)} + \Phi \text{ (kopan malzemenin iş fonksiyonu)} \quad (8)$$

Fotoelektrik etki gelen fotonun, iç ve dış yörünge elektronları ile etkileşmesi şeklinde oluşabilir. İç yörüngedeki elektronun koparılması sonucunda, boşalan enerji düzeyine üst yörüngeden başka bir elektronun geçmesi ile Şekil 7'de gösterildiği gibi karakteristik X ışını meydana gelmektedir (Podgorsak, 2010).

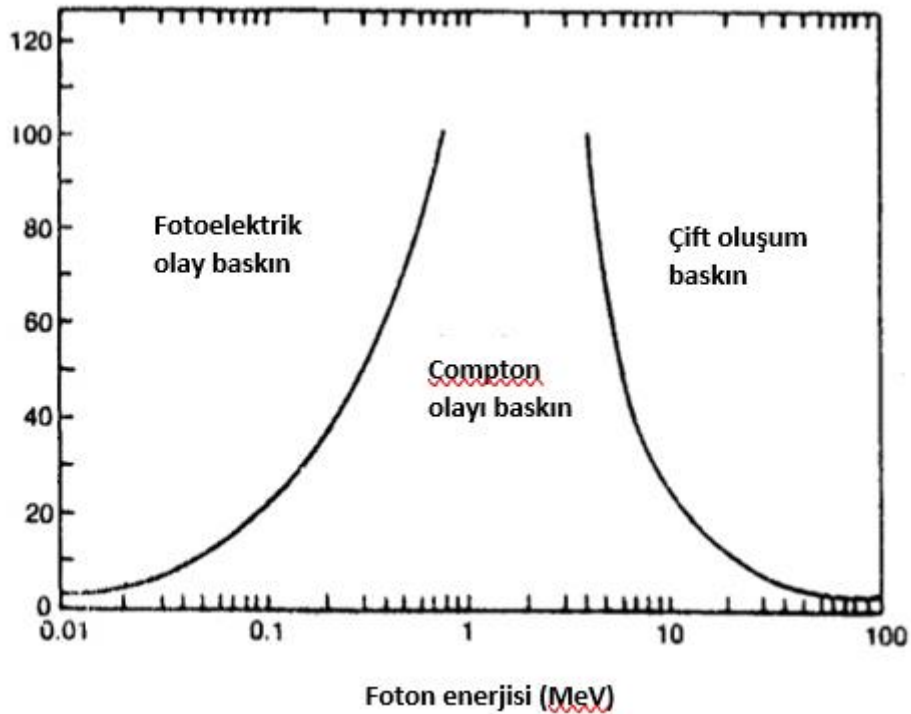
Compton Saçılması; genellikle atomun dış yörüngelerinde atoma zayıf bağlı elektronlar ile gelen foton arasındaki etkileşim türüne örnektir. Yüksek enerjiye sahip fotonlar ($0,5 \text{ MeV} < E < 10 \text{ MeV}$) dış yörünge elektronları ile etkileşmesi esnasında, elektronu yörüngeden fırlatmaktadır. Gelen foton ise kalan enerjisi ile, Şekil 8 (3)'de gösterildiği gibi, geliş doğrultusundan Θ açısı yaparak saçılma gerçekleştirmektedir (Podgorsak, 2010). Compton Saçılmasında gelen foton, enerjisinin bir kısmını yörünge elektronuna aktararak yoluna devam eder. Atoma zayıf bağlı olduğu ve başlangıçta durduğu kabul edilen yörünge elektronu ise etkileşim sonrasında, enerji ve momentum korunum kanunları gereğince, enerji ve momentum kazanır.

Çift Oluşumu; fotonun enerjisi ($E > 1,2 \text{ MeV}$) çok yüksek ise, etki ettiği çekirdek alanından geçerken çift oluşumu meydana gelmektedir. Foton enerjisini bırakarak ortamı terk ettiği sırada biri pozitif diğeri negatif olmak üzere, her birinin enerjisi 0.511 MeV olan, momentum korunumu gereğince birbirleriyle 180 derece zıt yönlerde iki elektron salınımı gözlenir. Çift oluşumu etkisine, ortamdaki

elektron ve pozitron çiftlerinin birleşmesi ile oluşan “yok olma radyasyonu (anhilasyon radyasyonu)” da eşlik edebilir. (Podgorsak, 2010).

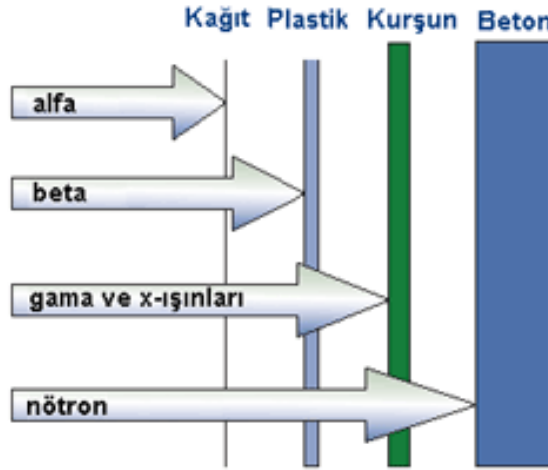
Fotodisintegrasyon; enerjisi yüksek fotonun ($E > 20$ MeV) çekirdek tarafından soğurulması sonucu çekirdek parçalanır, açığa nötron, proton ve parçalanma ürünleri çıkar bu olaya fotodisintegrasyon denir (Podgorsak, 2010).

Fotoelektrik Etki, Compton Saçılması ve Çift Oluşumu etkileşimleri, foton enerjisi ve etkileştiği maddenin atom numarasına göre değişiklik göstermektedir. Düşük foton enerjili (\sim keV) radyasyon ve yüksek Z değerli malzemeler arasındaki etkileşmelerde genellikle Fotoelektrik Etki, orta dereceli enerjili fotonlarla (maddenin Z değerinden bağımsız olduğu kabul edilir) genellikle Compton Saçılması, yüksek enerjili fotonlar ($E \geq 1,2$ MeV) ve yüksek Z değerli madde etkileşimlerinde ise genellikle Çift Oluşumu olayları Şekil 9’da gösterildiği gibi daha baskındır (Krane, 1988).



Şekil 9. X ve Gama ışınları ile madde etkileşim eğrisi (baskın etkileşimler dikkate alınmıştır) (Krane, 1988),

Radyasyonun madde içerisinde ilerleme miktarı, yani **girciliği (penetrasyonu)** ise radyasyonun enerjisine ve radyoaktif izotopun kütlesine bağlıdır (Podgorsak, 2010).



Şekil 10. Radyasyon-Madde Etkileşim Girciliği

Şekil 10'da görüldüğü üzere girciliği en yüksek olan parçacık nötrondur sonrasında ise sırayla gama, X-ışınları, beta parçacığı ve alfa parçacığıdır. *Alfa parçacığı*, havada 5 cm, yumuşak dokuda ise 100 µm kadar ilerleyebilir, kâğıt gibi ince levhalarla durdurulabilme özelliğine sahiptir. Havada 70-80 cm ilerleyebilen *beta parçacıkları* ise plastik malzemeler, alüminyum levhalarla durdurulabilir. *Gama ve X-ışınları* ise kurşun malzeme ile durdurulabilir. *Nötronlar* sadece kalın beton, su veya bor katkılı malzemelerle zırhlanarak durdurulabilirler (Özdemir, 2015).

2.6.Radyasyonun Sağlık Üzerine Etkileri

İyonlaştırıcı radyasyon ülkemizde çoğunlukla teşhis ve tedavi amaçlı olarak tıbbi uygulamalarda, endüstride ve tüketici ürünlerinde kullanılmaktadır. İyonlaştırıcı radyasyonun canlı organizma ile etkileşimi risk unsuru olup genellikle hasarla sonuçlanmaktadır (Yüksel, 2014).

Radyasyonun canlı organizma ile etkileşimi *fiziksel kademe*, *kimyasal kademe* ve *biyolojik kademe* olmak üzere üç aşama ile özetlenebilir. **Fiziksel Kademe**, kısa bir süre içerisinde (10^{-18} - 10^{-12} s) atom veya moleküllerde uyarılma ve

iyonlaşmanın gerçekleştiği kademedir. **Kimyasal Kademe**, 10^{-12} - 10^{-6} s sonrasında canlı organizmadaki genellikle su molekülünün iyonlaştırıcı radyasyonla etkileşmesi sonucu serbest radikallerin olduğu kademedir. **Biyolojik Kademe**, 10^{-6} s-yıllar arasındaki sürelerde mutasyon, kanser oluşumu ve hücre organizma ölümünün gerçekleştiği kademedir.

Radyasyonla etkileşme sonucu canlı organizmada oluşabilecek biyolojik hasarlar Somatik etki ve Genetik etki olarak iki grupta incelenebilir. **Somatik etki** ve **genetik etki** geç etkiler olduğundan stokastik etkiler olarak değerlendirilir.

Somatik etki, ışınlanan kişinin kendisinde ortaya çıkan etkilerdir ve maruz kalınan radyasyon dozunun miktarına bağlı olarak *erken ortaya çıkan somatik etkiler*, *geç ortaya çıkan somatik etkiler* olarak ikiye ayrılmaktadır. Radyasyonla etkileşme sonucu canlı organizmada oluşabilecek somatik etki **stokastik (geç) etki** ve **deterministik (akut) etki** olarak iki grupta incelenebilmektedir.

Stokastik Etki; radyasyon dozunun düşük olduğu, belirli bir eşik değere sahip olmadığı durumlarda ışınlamadan en az 50 gün sonrasında gözlenen geç etkilerdir. Erken ortaya çıkan somatik etkilere örnek olarak saç dökülmesi ve deride kızarıklar verilebilir ve kısa süre sonra yeni saçlar çıktığı bilinmektedir. Geç ortaya çıkan somatik etkiler ise radyasyona maruz kaldıktan yıllar sonra ortaya çıkan etkilerdir, kanser ve katarakt oluşumu bu duruma örnek olarak verilebilir. **Deterministik (akut) etki**; Eşik doz limiti 0,25 Gy olan ve gözlenme süresi 50 günden az sürede canlı organizmalarda ortaya çıkan biyolojik etkidir. Hücre ölümü, kısırlık vb. hasarlar deterministik etkilerin sonucudur (Mraz, 2017).

Genetik etki ise radyasyona maruz kalan kişinin kendinde değil de daha sonraki nesillerinde ortaya çıkan, kişinin üreme organlarındaki hasarların sonucudur.

Akut radyasyon sendromu (ARS) ise; vücudun lokal bir bölgesinin veya tamamının, çok kısa süreler içerisinde çok yüksek dozda (3 mSv veya 150 rad) radyasyona maruz kalması sonucu ortaya çıkan hasardır. ARS'ye örnek olarak "hematolojik sendromlar", "gastrointestinal sendrom" ve "merkezi sinir sistemi sendromu" verilebilir.

2.7.Radyasyondan Korunma

İyonlaştırıcı radyasyonun canlı organizmaya etkisi sonucu oluşturduğu hasarlar oldukça zararlı etkilere sahiptir. Dünyada ICRP (Uluslararası Radyolojik Koruma Komisyonu) ve ülkemizde TAEK (Türkiye Atom Enerjisi Kurumu) radyasyondan korunma konusunda öneriler ve rehberlik sağlama misyonuyla çalışmalar yürütmektedir.

Radyasyondan korunmada **zaman**, **mesafe** ve **zırhlama** olmak üzere üç temel fiziksel kural söz konusudur. Zaman, radyasyonla temas süresini kısaltmayı amaçlar ve soğurulan doz zaman ile doğru orantılıdır. Mesafe, ters kare yasası gereğince ($1/r^2$) radyasyon kaynağında olabildiğince uzak durmayı gerektirir. Zırhlama ise radyasyona maruz kalmak kaçınılmaz olduğu durumda radyasyon kaynağından yayınlanan radyasyon miktarını azaltmaya yönelik olarak radyasyon türüne uygun zırh malzemesi (beton, kurşun vb) kullanılmasıdır. Uluslararası Radyolojik Koruma Komisyonu (ICRP) tıpta radyasyondan korunmada önlem olarak üç temel prensip üzerinde durmaktadır. **Gereklilik (Justification)**; tıbbi olarak gerekmeyen durumlarda hastaya hiçbir radyasyon uygulamasına izin verilmemesini, **Etkinlik (Optimization)**; mümkün en düşük doz miktarı ile tetkikler yapılmasını, bu şekilde ALARA (As Low As Reasonably Achievable) ilkesine uyulmasını, **Kişisel doz-risk sınırları (Dose Limits)** ise; Soğurulmasına izin verilen doz sınırlarına uygun ışınlama dozlarının kullanılmasını gerektirir. Radyasyon çalışanları ve halk için belirlenen doz limitleri Tablo 4'de verilmiştir.

Tablo 4. Belirlenen Doz Sınırları (TAEK, 2020)

		Radyasyon Çalışanları	Halk
Etkin Doz Sınırı	Ardışık 5 yılın ortalaması	20 mSv	1 mSv
	Herhangi bir yılda	50 mSv	5 mSv
Yıllık Eşdeğer Sınırı	Organ Doz	Göz merceği	150 mSv
		Deri (cm ²)	500 mSv
		Eller ve ayaklar	500 mSv

Radyasyon çalışanları veya radyasyona maruz kalan kişiler, radyasyondan korunmak amacıyla kişisel koruyucu ekipmanlar (gözlük, eldiven, önlük, radyasyon dozimetreleri vb.) kullanmak zorundadırlar.

2.8.Radyasyon Dozimetreleri

Dozimetri, radyasyon dozunun ölçüm işlemine verilen addır. Radyasyon yayan cihaz veya radyoaktif maddelerle çalışan kişilerin maruz kaldığı radyasyon dozunu ölçmeye yarayan cihazlara “**dozimetre**” denilmektedir. Dozimetreler aktif ve pasif dozimetreler olmak üzere iki ana gruba ayrılmaktadır.

Aktif dozimetreler, anlık doz bilgisini dozimetre okuyucularıyla belirlemeyi sağlayan ve alarm sistemi entegre edilerek istenilen doz bilgisinde kullanıcıyı bilgilendirme özelliğine sahip dozimetrelerdir. Aktif dozimetreler, Şekil 11’de gösterildiği gibi **yaka kartı**, **yüzük** ve **bileklik** şeklinde olabilmektedir. Yapıldıkları malzemeye bağlı olarak dedektörler; gaz dolu dedektörler, katihal dedektörleri olarak sınıflandırılır.



Şekil 11. Aktif Kişisel Dozimetre Örnekleri

Pasif dozimetreler, doz sonucunun okunması için laboratuvarlarda işlemlere tabii tutulması gereken, anlık doz bilgisinin ve doz hızı değerlerinin direkt

gözlenemediği aygıtlardır. Yaygın kullanılan pasif dozimetreler, **elektron spin rezonans dozimetreleri (ESR)**, **termolüminesans dozimetreleri (TLD)**, **optik uyarmalı lüminesans dozimetreleri (OSL)**, **film dozimetreleri**, **jel dozimetreleri**, **fricke dozimetreleri** vb. olarak sınıflandırılabilir. Bu tez çalışması kapsamında doğal kayaç olarak temin edilen Bor örneklerinden pasif türde dozimetre geliştirilmesi amaçlanmıştır.

2.8.1. Film Dozimetreler

Film dozimetreleri **radıyografik** ve **radıyokromik** filmler olmak üzere iki türdür. Radıyografik film dozimetreleri, radyasyona duyarlı gümüş ve brom kristallerini içeren ince bir film tabakasından oluşan dozimetre sistemidir ve doz ölçümünde kullanılan en eski yöntemlerdendir. Radıyografik film dozimetreler, iyonlaştırıcı radyasyona maruz kaldıklarında, gümüş ve brom iyonları oluşur (Ag^+ , Br^-), bu etki banyo işlemi sonrasında optik kararma olarak gözlenmektedir. $AgBr$ yapısı **radıyografik film** olarak adlandırılmaktadır. Densitometre (yoğunluk ölçer) adı verilen bir cihazla filmin kararma derecesi belirlenmektedir. Kararma derecesi radyasyon dozunun bir ölçüsüdür ve filmin tipine, banyo süresine, sıcaklığa, radyasyon türüne ve enerjisine göre değişmektedir. Şekil 12'de kişisel film dozimetre ve okuyucu örnekleri gösterilmiştir.



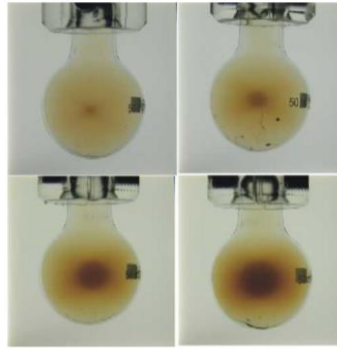
Şekil 12. Film Dozimetre Okuyucu ve Film Dozimetre Örnekleri

Film dozimetrelerinin avantajları; yüksek çözünürlüğü, doz bilgisinin tekrardan okunabilirliği, her radyasyon türünün bilgisini bağımsız vermesi olarak söylenebilmektedir. *Film dozimetrelerin dezavantajı* ise, sıcaklık ve nem gibi ortam koşullarından etkilenmeleri ve yöne bağımlı olmaları olarak bilinmektedir.

Radyokromik filmler, %9 hidrojen, %60,6 karbon, %11,2 azot ve%19,2 oksijenden oluşan, doku eşdeğeri olan polimer yapılardır. Radyasyona maruz kaldığı film renk değiştirerek (mavi tonlarda) kullanıcıları bilgilendirmektedir. En yaygın olarak kullanılanı *gafkromik* filmlerdir (Izewska ve Rajan, 2005). Radyokromik filmler hakkında bilgiler bölüm 2.1.5’de de verilmiştir.

2.8.2.Jel Dozimetreleri

Jel dozimetri sistemleri, Şekil 13’de gösterildiği gibi bağıl doz ölçümleri için kullanılabilen 3 boyutlu dozimetrelere dir. **Fricke jel dozimetri sistemleri**, (9) nolu denklem ile ifade edilen Fe⁺² iyonlarının etkileştikleri iyonlaştırıcı radyasyon ile oksitlenerek Fe⁺³ iyonlarına dönüşme esasına dayanmaktadır. Fe⁺² iyonlarının oksitlenmesi doğrudan soğurulan radyasyon dozu ile orantılıdır.



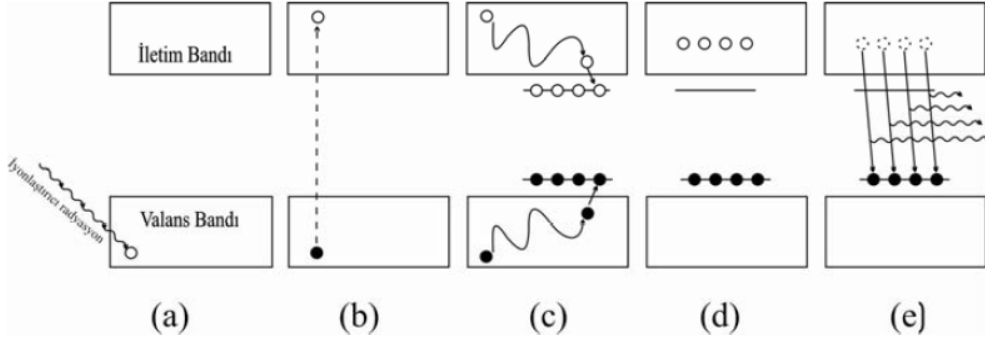
Şekil 13. Jel Dozimetre Örneği

Polimer jel dozimetrelereli, üç boyutlu doz dağılımı verisi elde etmeye olanak sağlayan, yumuşak doku eş değeridir, farklı şekillerde üretilmesi mümkün dozimetrelere dir. Su yoğunluğu fazla olan jel dozimetrelere nin ışınlama sonrası radyasyonu ne kadar soğurduğunun ölçüsü su moleküllerini radyolize etmesi ile ilişkilidir. Üretilen bazı polimer jel dozimetrelere , *metaakrilik asit*, *askorbik asit*, *jelatin* vb. malzemelerden yapılabilir.

2.8.3. Termolüminesans Dozimetreleri (TLD)

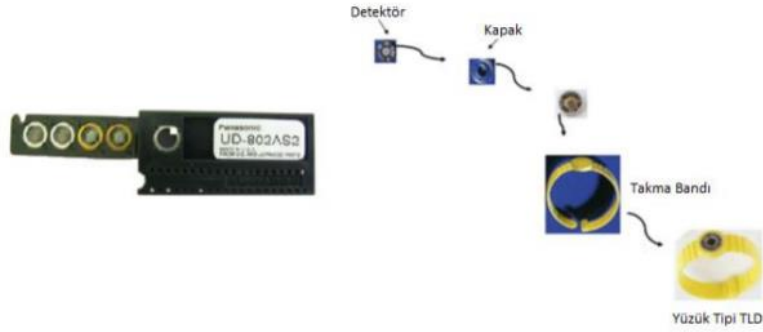
Bazı malzemeler radyasyona maruz kaldıklarında radyasyon enerjisinin bir kısmını soğurmaktadır. Radyasyon enerjisini soğuran kristaller çeşitli şekilde tekrardan uyarıldıklarında soğurdukları enerjilerini mor ötesi, kızıl ötesi veya görünür ışık formunda dışarıya yaymaktadırlar. Şekil 14'de gösterildiği gibi, bu olaya **lüminesans** denilmektedir. Lüminesans olayının, “*Floresans, Fotolüminesans, Termolüminesans, Sonolüminesans, Katodolüminesans, Elektrolüminesans, Tribolüminesans, Radyolüminesans, Biyolüminesans, Piezolüminesans*” gibi birçok türü vardır.

Termolüminesans olayının oluşma mekanizması Şekil 14'de detaylı olarak gösterilmiştir. Bir yalıtkan ya da yarıiletken kristal, iyonlaştırıcı radyasyona maruz kaldığında enerji soğurur (Şekil 14a). Bu enerji soğurumu, valans bandındaki elektronların bir kısmının serbest kalmasına ve kristal içerisinde serbest elektron – hol çiftlerinin meydana gelmesine neden olur (Şekil 14b). Serbest kalan elektronlar iletim bandında ve hol valans (değerlik) bandında hareket ederler. Bu hareket sırasında serbest yük taşıyıcıları, zıt işaretli başka yük taşıyıcılar ile yeniden birleşebilir ya da kristal içerisindeki kusur ve safsızlıklar tarafından meydana getirilmiş olan yük taşıyıcı tuzaklara yakalanabilirler (Şekil 14c). Tuzaklara yakalanan elektronlar, ortamın sıcaklığı ve tuzak seviyesinin tuzak derinliğine bağlı olarak, tuzaklarda bir süre kalırlar. İyonlaştırıcı radyasyonun ortamdaki uzaklaştırılmasının ardından kristal kontrollü olarak ısıtılır. Isıtma sürecinde tuzaklardaki yük taşıyıcılar yakalandıkları tuzaklardan kaçabilecek kadar kinetik enerjisi kazandıklarında, serbest kalarak yeniden iletim bandına geçerler (Şekil 14d). Serbest kalan elektronlar, kristal içerisinde hareket ederken zıt işaretli yük taşıyıcıları ile yeniden birleşirler ve eğer yeniden birleşme olayı ışınımlı ise “lüminesans olayı” gerçekleşir ve bir foton yayınlanır (Şekil 14e). Yayılan ışık fotonları fotoçoğaltıcı tüpler aracılığıyla çoğaltılır ve elektriksel sinyale dönüştürülür. Bu mekanizma ile gözlenen foton sayısı, TLD kristali üzerine düşen radyasyon miktarı ile doğru orantılıdır. Isı etkisi ile oluşan bu lüminesans olayı “**Termolüminesans Olayı**” olarak tanımlanır.



Şekil 14. Termolüminesans Olay

Termolüminesans dozimetreler (TLD), farklı tipteki termolüminesans kristalleriyle uygun filtrelerin kullanıldığı sistemlerdir, şematik gösterimi ise Şekil 15'de verilmiştir. Bu tip dozimetrelerde TL kristalinin ısıtılmasıyla açığa çıkan ışık, radyasyon dozunu belirlemektedir.



Şekil 15. Kart ve yüzük tipi TLD örnekleri (TAEK, 2012)

TLD dozimetrelerin avantajları; doz ölçme aralıklarının geniş olması (cGy-kGy), doz-cevap sürelerinin kısa olması, tekrar kullanılabilir olmaları, farklı türdeki radyasyona duyarlı olmalarıdır. Yüksek sıcaklık ve nem gibi çevresel koşullardan etkilenmesi ve soğurulan dozun sadece 1 kez okunabilmesi ise dezavantaj olarak bilinmektedir.

2.8.4. Optik Uyarmalı Lüminesans Dozimetreleri (OSL)

OSL dozimetresi, karbon katkılı alüminyum oksitli ($Al_2O_3:C$) bir çip (yaklaşık $1mm^3$ 'lük) ve bu çipin yerleştirildiği Şekil 16'da gösterildiği gibi plastik bir kaptan

oluşmaktadır. OSL dozimetreleri ile TLD dozimetrelerinin çalışma mekanizmaları oldukça benzerdir, bu dozimetreleri birbirlerinden ayıran en önemli özellik, kristalin sıcaklık etkisi ile değil ışık yoluyla uyarılmasıdır. Bölüm 2.7.3'de detaylı olarak termoluminesans dozimetrelerinden (TLD) bahsedilmiştir.



Şekil 16. OSL Dozimetre Örnekleri

OSL dozimetrelerinin, doz okuma hassasiyetleri yüksektir. Doz bilgisinin tekrardan okunabilirliği OSL dozimetreleri için avantajdır, bu dozimetrelerin ışık hassasiyetlerinin fazla olması sebebiyle ölçüm yapılmadıklarında ışıktan korunmaları gerekmektedir.

2.8.5.ESR Dozimetreleri

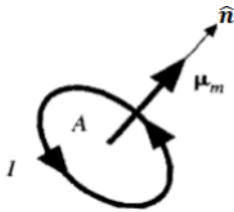
Bölüm 2.9'da detaylı olarak Elektron Spin Rezonans (ESR) tekniği ile ilgili bilgi verilmiştir.

2.9.Elektron Spin Rezonans (ESR) Spektroskopisi

Elektron Spin Rezonans Spektroskopisi (ESR) veya Elektron Paramanyetik Rezonans Spektroskopisi (EPR), dış manyetik alan varlığında atom ve moleküllerin yapısının incelenmesinde kullanılan bir manyetik rezonans yöntemidir. ESR, manyetik alana maruz bırakılan atom veya moleküllerin çiftlenimsiz elektronlarının mikrodalga (MD) enerjisi soğurması esasına dayanır (Poole,1972), manyetik momentlere ilişkin enerji düzeyleri arasındaki geçişleri inceler ve malzemelerin manyetik özellikleri hakkında bilgiler verir.

Malzemelerin manyetik özellikleri, sahip oldukları manyetik dipol momentlerine bağlıdır. Paramanyetik malzemelerde elektron spinleri, dış manyetik alan uygulanmadığında rasgele dağılmış iken, dış manyetik alan etkisinde ise, uygulanan manyetik alan yönünde kalıcı bir manyetik dipol momente sahip olurlar.

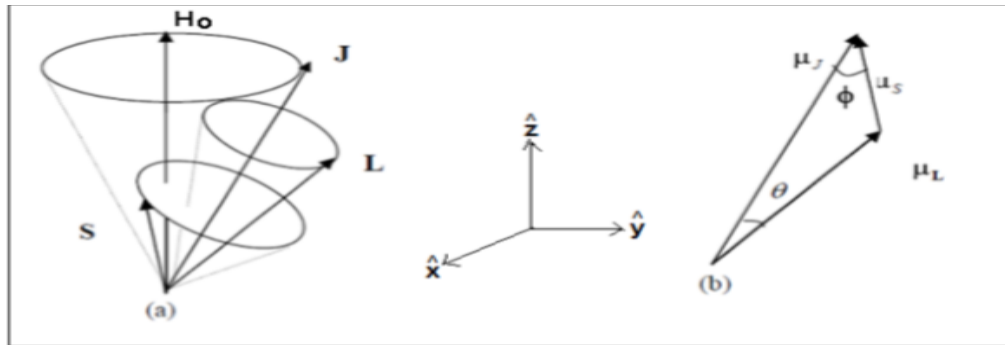
Manyetik dipol moment, A alanına sahip bir akım halkasından geçen akımın, Şekil 17’de gösterildiği gibi, halka düzlemine dik μ_m manyetik dipol momentini oluşturur (bağıntı 10).

$$\mu_m = IA\hat{n} \quad (10)$$


Şekil 17. Manyetik dipol moment gösterimi

Atom yörüngesinde dönen elektronun açısal momentumu bir manyetik momente karşılık gelir. Atom yörüngesindeki elektron “spin açısal momentini (S)” ve “yörünge açısal momentini (L)” olmak üzere iki farklı manyetik dipol momente sahiptir. Elektronun toplam manyetik dipol momentini (μ_j) bağıntı (11) ile ifade edilir.

$$\mu_j = \mu_S + \mu_L \quad (11)$$



Şekil 18. Serbest bir elektronun H_o dış manyetik alanı içinde (a) spin yörünge ve toplam açısal momentum vektörleri ve (b) bunlara karşılık gelen manyetik moment vektörleri

Elektronun toplam açısal momentumu, manyetik momenti ile orantılıdır. Bu orana “jiromanyetik katsayısı (γ)” denir (Bağıntı 12). Jiromanyetik oran katsayısı (13) nolu bağıntı ile ifade edilir.

$$\mu = \gamma j \quad (12)$$

$$\gamma = \frac{q}{2mc} \quad (\text{emb}) \quad (13)$$

Bağıntıda geçen q , elektronun yükü, m , elektronun kütlesi, c ise ışık hızıdır. Elektronun S spin açısal momentumuna karşılık gelen manyetik moment bağıntı (14) ile ifade edilir.

$$\mu_s = \frac{-e}{m_e c} S \quad (14)$$

Elektronun yörüngesinden kaynaklanan L yörüngesel açısal momentuma karşılık gelen manyetik moment bağıntısı (15) ile ifade edilir.

$$\mu_l = \frac{-e}{2m_e c} L \quad (15)$$

Çok elektronlu makroskopik sistemlerde ise, yörünge ve spin açısal momentum (16) nolu bağıntı ile ifade edilir.

$$\mu = -g \frac{e}{2m_e c} S \quad (16)$$

Toplam açısal momentum ise bağıntı (17) ile ifade edilir.

$$J = S + L \quad (17)$$

Bu bağıntıda geçen g “**spektroskopik yarıma çarpanı (g değeri)**” olarak adlandırılır. Serbest elektronun spektroskopik yarıma çarpanı 2,0023’dür. Elektronun manyetik momenti ise, manyetik momentum birimi olan **bohr magnetonu μ_B** bağıntı (18) ile tanımlanır.

$$\mu_B = \frac{eh}{2m_e c} = 9,273 \times 10^{-24} \text{ (J/T)} \quad (18)$$

(17) bağıntı ve (18) bağıntıları kullanılarak manyetik moment bağıntı (19) ile ifade edilir.

$$\boldsymbol{\mu} = -g\mu_B\mathbf{S}/\hbar \quad (19)$$

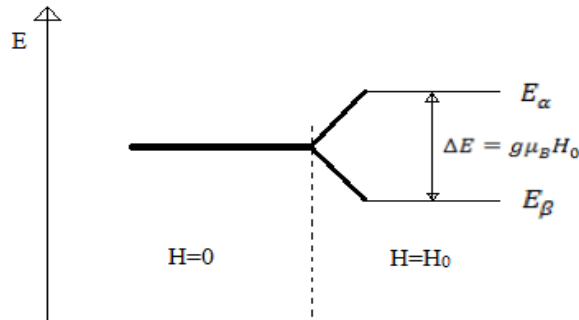
\mathbf{S} açısal momentum vektörü kesikli değerler alır ve S büyüklüğü bağıntı (20) ile ifade edilir.

$$|\mathbf{S}| = \hbar[S(S + 1)]^{1/2} \quad (20)$$

Spin açısal momentumunun z doğrultusundaki bileşeni ($\hbar S_z$) kesin olarak belirlenebilir ve bu bileşen S ile $-S$ aralığında $(2S+1)$ tane değer alır ve maksimum manyetik moment bağıntı (21) ile ifade edilir.

$$\mu_z = -g\mu_B S_z = -\gamma_e \hbar S_z \quad (21)$$

Spini $s = \frac{1}{2}$ olan serbest elektron \hbar büyüklüğünde manyetik alana maruz kaldığında **Zeeman Etkisi** sonucu, çakışık olan enerji düzeylerinde Şekil 19'da görüldüğü gibi yarılmalar gerçekleşir.



Şekil 19. Zeeman Etkisi

H_0 dış manyetik alanı içindeki $\boldsymbol{\mu}$ manyetik momentine sahip bir dipolün enerjisi, z kuantumlanma doğrultusu olarak alındığında bağıntı (22) ile ifade edilir.

$$\mathcal{H} = g\mu_B H_0 S_z \quad (22)$$

$S_z = \pm \frac{1}{2}$ olan serbest elektron için özvektörleri $|\alpha\rangle$ ve $|\beta\rangle$ 'dir. " $g\mu_B H_0$ " skaler bir nicelik olduğundan, serbest elektron için öz enerji ifadeleri aşağıda verilen (23a) ve (23b) bağıntıları ile ifade edilir.

$$E_\alpha = +\frac{1}{2}g\mu_B H_0 \quad (23a)$$

$$E_\beta = -\frac{1}{2}g\mu_B H_0 \quad (23b)$$

Şekil 19'da belirtildiği gibi, manyetik alan etkisi, aralarında ΔE kadar enerji farkı olan enerji düzeyleri yaratır. Bu enerji düzeyleri arasındaki fark, bağıntı (24) ile ifade edilir.

$$\Delta E = g\mu_B H_0 \quad (24)$$

İncelenen sisteme ΔE enerji farkına eşit olan mikrodalga (MD) enerjisi verilmesi durumunda, bu enerji sistem tarafından soğurulur. Soğurulan MD enerjisi ile ΔE arasındaki ilişki bağıntı (25) ile ifade edilir. Bu bağıntıya "**rezonans koşulu**" denir. Bağıntıda geçen h ; planck sabiti ve ν_0 ise MD frekansıdır.

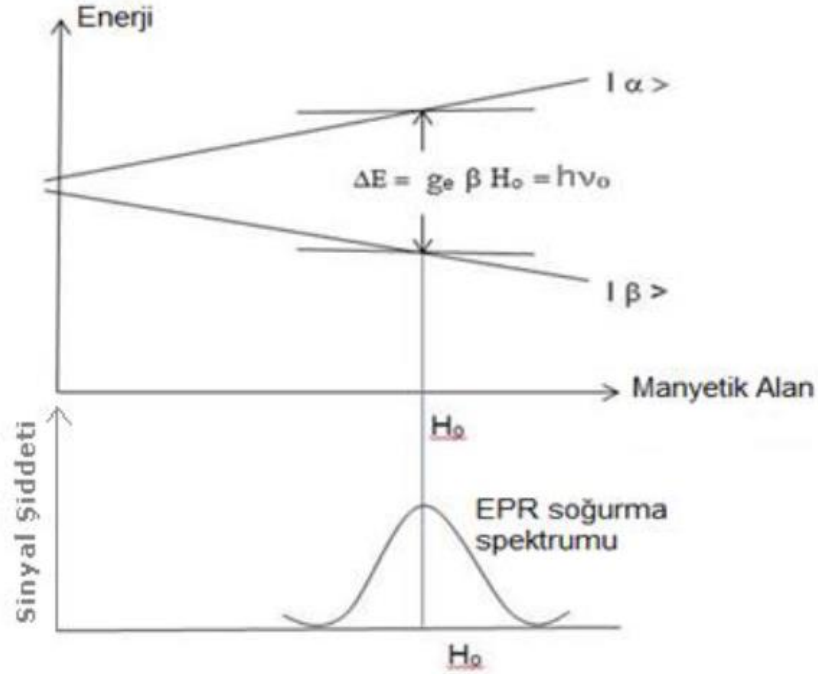
$$h\nu_0 = \Delta E \quad (25)$$

Rezonans koşulu, manyetik alan ile MD frekansını birbirine bağlayan çizgisel bir ifadedir (Apaydın,1991). Pratikte ise bu koşul MD frekansı veya dış manyetik alan değerlerinden birinin değiştirilmesi ile sağlanmaktadır.

Manyetik alan sabit bir H_0 değerinde iken düzeyler arasındaki enerji farkı, (26) nolu bağıntıda olduğu gibidir ve bu durumda rezonans koşulu (27) nolu bağıntı ile tanımlanır. Bu bağıntıya uyacak şekilde spin sisteminin soğurduğu enerjinin gözlenmesi Şekil 20'de belirtildiği gibi ESR spektrumu olarak nitelendirilir.

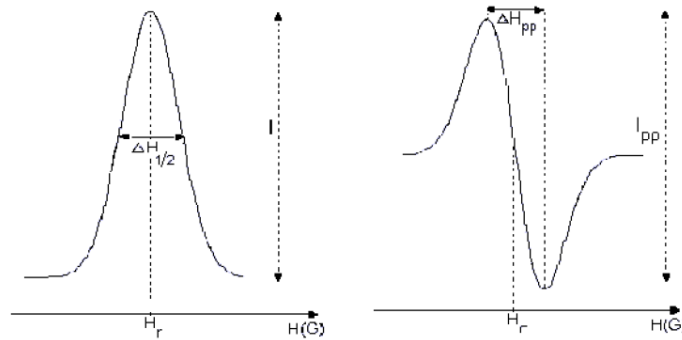
$$\Delta E = E_\alpha - E_\beta = g\mu_B H_0 \quad (26)$$

$$h\nu_0 = g\mu_B H_0 \quad (27)$$



Şekil 20. Serbest elektron için enerjinin H_0 alanına göre değişimi

ESR spektrometrelerinde genellikle, frekans sabit tutularak manyetik alan değiştirilmektedir ve çözücülüğün artırılması, gürültü düzeyinin düşürülmesi gibi nedenlerden dolayı soğurma eğrisinin Şekil 21’de görüldüğü gibi birinci türevi çizdirilerek ESR spektrumu kaydedilir.



Şekil 21. ESR spektrumu, soğurma eğrisi ve soğurma eğrisinin birinci türev eğrisi

Şekil 21’de görülen H_r incelenen örneğin rezonans alan değerini, ΔH_{pp} tepeden tepeye çizgi genişliğini, I ise ESR sinyal şiddetini göstermektedir (Apaydın,1991). Soğurma eğrisinin altında kalan alan veya çizgi genişliğinin sabit olması

durumunda birinci türev eğrisinin tepeden tepeye yüksekliği, incelenen örneğin sahip olduğu manyetik birimlerin sayısı ile orantılıdır. ESR sinyal şiddeti örnek içerisinde bulunan radikal miktarı hakkında bilgi verir.

2.9.1. Spektroskopik Yarılma Çarpanı (g)

Bir manyetik sistemde, manyetik alana maruz bırakılan tüm çiftlenimsiz elektronların aynı manyetik momente sahip olması durumunda, spektrometre ile alan taraması yapıldığında gözlenecek rezonanslarının tümünün, bağıntı (28) ile verilen rezonans alanında ortaya çıkması beklenir.

$$H_r = \frac{h\nu_0}{g\mu_B} \quad (28)$$

Ancak farklı çevrelerdeki çiftlenmemiş elektronlar farklı g spektroskopik çarpanına sahip olduğu için farklı manyetik alan değerlerinde farklı merkezlere ait ESR sinyallerinin ortaya çıkmaktadır. g değeri; paramanyetik merkezin enerji seviyeleri, moleküller arasındaki etkileşme, yerel simetri, moleküler dağılım ve komşu atomların yeri ve yapısı gibi temel bilgiler verir. Atomun spektroskopik yarılma çarpanı bağıntı (29) ile ifade edilir.

$$g = 1 + \frac{J(J+1) + S(S+1) - L(L+1)}{2J(J+1)} \quad (29)$$

2.9.2. Aşırı İnce Yapı Sabiti

Bir serbest radikalın ya da çiftlenimsiz elektronun manyetik alan ile etkileşimi sonucu ESR spektrumunda tek bir çizgi gözlenmesi beklenir ve bu çizgi g değeri hakkında bilgiler verir. Spektrumda birden fazla çizgi olması durumunda yapıda farklı etkileşimlerin de olduğu söylenebilir. Genellikle bu etkileşim, çiftlenimsiz elektronun bağlı olduğu çekirdek veya komşu çekirdek ile etkileşmeleri sonucu ortaya çıkan **“aşırı ince yapı etkileşmeleri”** olarak tanımlanır (Apaydın,1991).

Aşırı ince yapı etkileşmesi, *yönsemez ve yönser* olmak üzere iki grupta bağıntı (30) ile ifade edilir. A_S ; yönsemez aşırı ince yapı sabitini, A_P ; yönser aşırı ince yapı sabitini, θ ; çiftlenimsiz elektronun üzerinde konumlandığı p orbitali ile uygulanan manyetik alan arasındaki açıyı göstermek üzere, aşırı ince yapı sabiti; $A_S - A_P$ ile $A_S + 2A_P$ arasında değişim gösterir ve matematiksel ifadesi (30) nolu bağıntı ile verilir (Apaydın,1991).

$$A = A_S + A_P [3 \cos^2(\theta) - 1] \quad (30)$$

Yönsemez aşırı ince yapı etkileşmesi, "**Fermi Değme Etkileşmesi**" olarak da isimlendirilir. Yönsemez aşırı ince yapı etkileşmesini temsil eden enerji hamiltoniyeni, bağıntı (31) ile ifade edilir. Bu bağıntıda geçen $|\psi(0)|^2$ elektronun çekirdekte bulunma olasılığını, g ve g_n sırasıyla elektron ve çekirdek için spektroskopik yarıma çarpanlarını, β ve β_n sırasıyla elektron için bohr manyetonunu ve çekirdek için manyetik momenti, I ve S ise sırasıyla çekirdek ve elektron için açısal momentum değerlerini ifade etmektedir.

$$\mathcal{H} = \left(\frac{8\pi}{3}\right) |\psi(0)|^2 g \beta g_n \beta_n S \cdot I \quad (31)$$

Çiftlenimsiz elektronun, çekirdek kuantum sayısı $I = 1/2$ olması sebebi ile n tane proton ile etkileşmesi durumunda $(2n+1)$ tane rezonans çizgisi gözlenir ve bu çizgilerin sayı ve şiddet oranları pascal üçgeni katsayıları ile tanımlanmaktadır. Zeeman ve Aşırı ince yapı etkileşmesinin birlikte var olduğu durum için toplam hamiltoniyen bağıntı (32) ile ifade edilir.

$$\mathcal{H} = g \mu_B H_0 S + h A S \cdot I \quad (32)$$

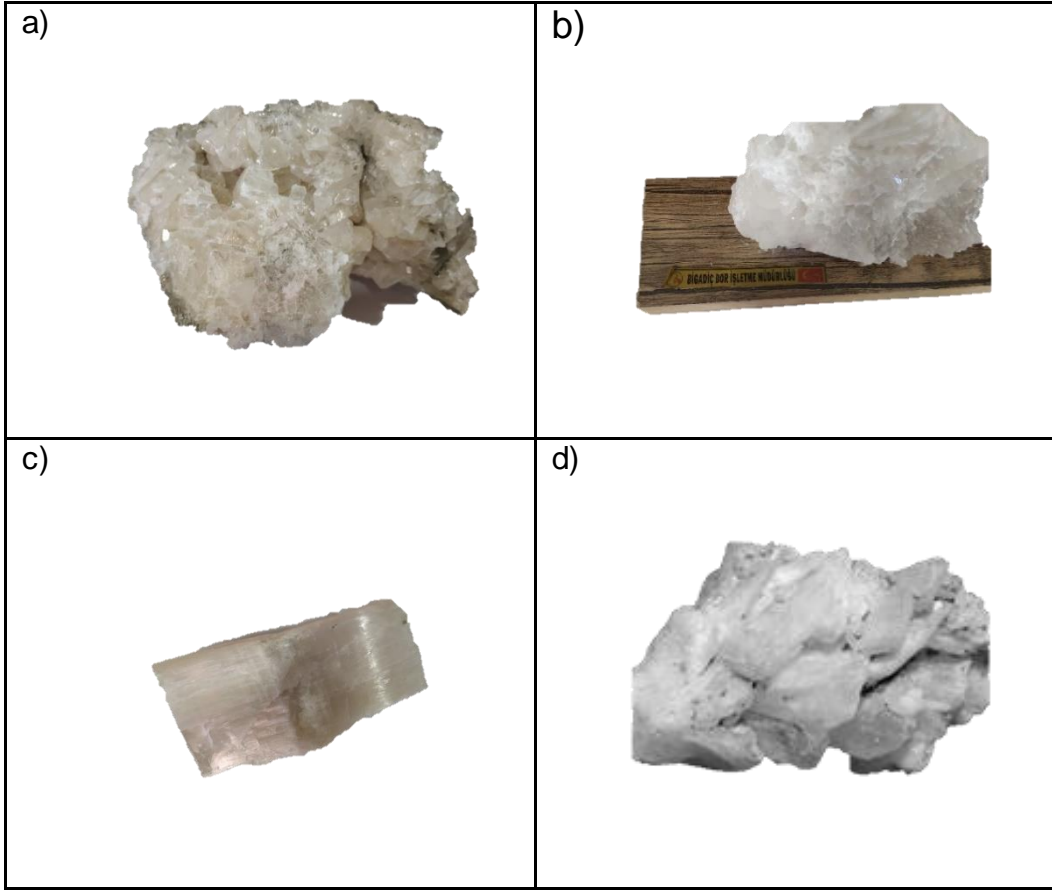
Bağıntı (32)'de ifade edilen A aşırı ince yapı sabitidir ve rezonans çizgileri arasındaki uzaklığın bir ölçüsüdür. I ise çekirdeğin spin kuantum sayısıdır.

ESR çok farklı alanlarına uygulama alanına sahiptir. Örnek uygulamalardan bazıları, biyolojik ve radyasyon dozimetresi uygulamaları, arkeolojik / jeolojik yaş tayini, ışınlanmış gıdaların tespiti uygulamaları vb. olarak tanımlanabilir.

3.DENEYSEL ÇALIŞMALAR

3.1.Bor Minerallerinin Hazırlanması

Tez kapsamında dozimetrik özellikleri incelenen **Kolemanit-1**, **Kolemanit-2**, **Üleksit ve İnyoit** doğal Bor mineralleri, Balıkesir'in Bigadiç Bölgesinin farklı yörelerinden alınan doğal Bor minerallerine aittir. Hacettepe Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü'nden temin edilen Bor kayaç örneklerine ait resimler Şekil 22'de verilmiştir.



Şekil 22. Doğal Bor Kayaç Mineralleri
a) Kolemanit-1 b) Kolemanit-2 c) Üleksit d) İnyoit

Deney analizleri için doğal bor kayaç minerallerinin Bor'dan zengin kesimleri, Şekil 23'de gösterildiği gibi, agat havanda dövülerek toz haline getirilmiş ve analizler toz örnekler üzerinden gerçekleştirilmiştir.



Şekil 23. Kayaç Örneklerinin toz haline getirilmesi

3.2. Bor Minerallerinin Işınlama İşlemleri

Dozimetrik özellikleri irdelenerek kişisel dozimetre olarak kullanılıp kullanılmayacağı araştırılan toz haline getirilmiş doğal Bor mineralleri, farklı doz skalaları olan **cGy**, **Gy** ve **kGy** mertebelerinde, farklı ışınlama kaynakları kullanılarak ışınlanmıştır.

Doğal bor kayaç minerallerinin cGy mertebesi ışınlamaları, Hacettepe Üniversitesi Hastanesi Onkoloji Anabilim Dalı bünyesinde bulunan **Varian Clinac DHX High Performance + 80 MLC Linear Hızlandırıcı** cihazı ile 6 MeV enerji ile **1 cGy**, **3 cGy**, **5 cGy**, **7 cGy** ve **10 cGy** olmak üzere beş farklı doz değerinde gerçekleştirilmiştir. Gy mertebesinde ışınlamalar Orta Doğu Teknik Üniversitesi Kimya Bölümü'nde bulunan doz hızı 13,5 Gy/saat olan **Gammacell-220 model ⁶⁰Co gama kaynağı** kullanılarak **2,2 Gy**, **4,3 Gy** ve **6,9 Gy** değerlerinde gerçekleştirilmiştir. kGy mertebesinde gerçekleştirilen ışınlama çalışmaları için ise, Türkiye Atom Enerjisi Kurumu'nda bulunan doz hızı 1,1 kGy/saat olan "**İzotop**" marka, "**Ob-Servo Sanguis ⁶⁰Co Research Irradiator**" model gama ışınlama cihazı kullanılmıştır ve ışınlamalar **1 kGy**, **2 kGy**, **3 kGy**, **4 kGy**, **5 kGy**, **6 kGy**, **7 kGy** ve **8 kGy** toplam 8 farklı doz değerlerinde yürütülmüştür. Tez kapsamında irdelenen doğal Bor minerallerinin dozimetrik özelliklerinin genel olarak yüksek olmadığı görüldüğünden, tezdeki sonuçlar ağırlıklı olarak kGy mertebesindeki ışınlama bulgularının değerlendirmesi üzerine olmuştur.

Doğal Bor minerallerinin **UV ışınlanması** ise, Hacettepe Üniversitesi Fizik Mühendisliği Bölümü, Manyetik Rezonans Laboratuvarı'nda bulunan **Hitachi U-1900 marka UV cihazı** ile gerçekleştirilmiştir. UV ışınlama çalışmaları süresince, UV lambasının çalışma gücü **950 W** olarak kullanılmış ve UV lambası ile ışınlanan örnekler arasındaki mesafe yaklaşık **55 cm**'de tutulmuştur. UV ışınlama çalışmaları süresince ortam sıcaklığının ortalamada sabit kaldığı kullanılan bir termometre ile belirlenmiştir.



Şekil 24. Tez kapsamında kullanılan ışınlama kaynakları

- a) cGy mertebesindeki ışınlamalar için kullanılan ışınlama kaynağı, b) Gy mertebesindeki ışınlamalar için kullanılan ışınlama kaynağı, c) kGy mertebesindeki ışınlamalar için kullanılan ışınlama kaynağı

3.3. Kullanılan Deneysel Tekniklerin Çalışma İlkeleri

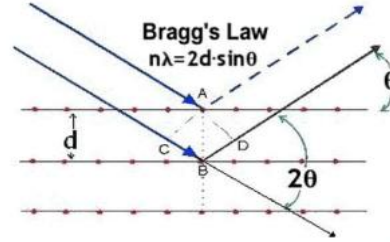
Tez süresince doğal Bor minerallerinin elde edilen deneysel bulgular için X-Işını Difraktometresi (XRD), Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) Yöntemi, Elektron Spin Rezonans (ESR) Spektroskopisi ve Termoluminesans (TL) Yöntemi teknikleri kullanılmıştır. Bu kesimde bu deneysel tekniklerin çalışma ilkeleri açıklanacaktır.

3.3.1.X-Işını Difraktometresi (XRD) Yöntemi

X-Işını Difraktometresi (XRD) kristaldeki örgü parametreleri ile aynı mertebede dalga boyuna sahip X-Işını dalgalarının kristal ile kırınımına uğraması teorisine dayanmaktadır. XRD, minerallerin ve kayaçların tanımlanmasında, sentezlenen malzeme yapı tayininde sıklıkla tercih edilen bir yöntemdir. XRD'nin avantajı, kristal yapıları hakkında parmak izi hassasiyetinde veri toplayabilmesidir.

X-ışınları kristal yapı üzerine düşürüldüğünde, ışınlar katı yüzeyden geliş açılarıyla tam yansımaya uğrarlar ve kristal yapıdaki atomların paralel düzlemleri tarafından saçılırlar. Bu saçılım *kırınım* olarak adlandırılır. X-ışınlarının kristal yapıdaki bu kırınımı *Bragg Yasası* (bağıntı 33) ile açıklanır (Cullity, 1996). Bağıntıda geçen n ; kırınım sabiti, λ ; dalgaboyu, d ; kristalde düzlemler arası mesafe, θ ise kırılma açısıdır (Cullity, 1996).

$$2d\sin\theta = n\lambda \quad (33)$$



Şekil 25. Bragg Yasası

Tez kapsamında XRD çalışmaları için **Rigaku D/Max 2200 XRD ölçüm sistemi** kullanılmıştır. XRD yöntemi ile yapıları analiz edilmek istenen doğal kayaçlardan elde edilmiş ve toz haline getirilmiş **Kolemanit-1**, **Üleksit** ve **İnyoit** numuneleri ince lamel yardımıyla XRD cihazının tutucu kısmına yerleştirilmiş, 5°- 60° saçılma açıları için veriler alınmıştır. Kolemanit-2 örneği ise başka bir araştırma laboratuvarında yer alan **Bruker D2 Phaser TWO-THETA (deg) X-ray; Cu/30kV/10mA Cu** kaynaklı X-ışını tüpüne sahip XRD cihazı ile analiz edilmiştir. Analiz 10° ile 80° aralığında gerçekleştirilmiştir.



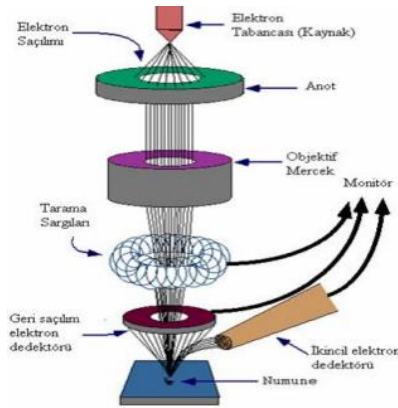
Şekil 26. Rigaku D/Max 2200 XRD Ölçüm Cihazı



Şekil 27. Bruker D2 Phaser TWO-THETA XRD Ölçüm Cihazı

3.3.2.Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) Yöntemi

Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) yöntemi için görüntü; yüksek gerilim ile hızlandırılmış elektronların, Şekil 28'de gösterildiği gibi yüksek vakum altında numune üzerine odaklanması, bu elektron demetinin numune yüzeyini taraması sırasında elektron ve numune atomları arasında oluşan çeşitli girişimler sonucunda meydana gelen etkilerin uygun algılayıcılarda toplanması ve sinyal güçlendiricilerinden geçirildikten sonra bir katot ışınları tüpünün ekranına aktarılmasıyla elde edilir.



Şekil 28. SEM Çalışma İlkesi

SEM analizlerinde temel olarak algılanan numuneler ikincil elektronlar olarak tanımlanmaktadır. İkincil elektronlar numune yüzeyinin 10 nm veya daha yüzeysel bölgesinden geldiği için numunenin yüksek çözünürlüğe sahip topografik görüntüsünün elde edilmesinde kullanılmaktadır (ODTÜ, Merlab,2020).

SEM analizleri, yüksek vakum ve düşük vakum olmak üzere iki kategoride yapılmaktadır. Yüksek vakum; iletken örnekler, toz örnekler, ince filmler ve kaplanmış yalıtkan örnekler için uygulanmaktadır. Düşük vakum, kaplama yapılmamış yalıtkan örnekler, polimerler ve cam örnekler için uygulanmaktadır.



Şekil 29. SEM Cihazı

Numuneler için SEM analizleri Orta Doğu Teknik Üniversitesi Merkez Laboratuvarı'nda bulunan Şekil 29'da gösterilen **QUANTA 400F Field Emission Cihazı**'nda yüksek vakum koşullarında gerçekleştirilmiştir. Cihaz 1,2 nm çözünürlüğe sahiptir.

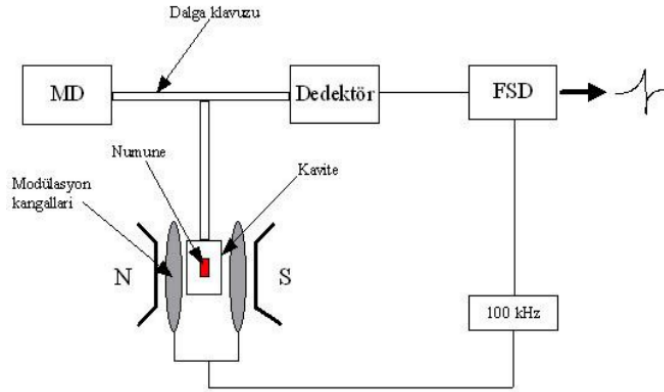
3.3.3. Elektron Spin Rezonans (ESR) Spektroskopisi

Doğal bor minerallerinin dozimetrik çalışmaları temelde, Hacettepe Üniversitesi, Fizik Mühendisliği Bölümü Manyetik Rezonans Laboratuvarı'nda bulunan **Bruker EMX-131 X-band (9.3 GHz) ESR spektrometresi** kullanılarak yürütülmüştür.



Şekil 30. ESR Cihazı

ESR spektrometresi, Şekil 30'da görüldüğü gibi, sabit frekansta ve değiştirilebilir genlikte mikrodalga üreten bir **klystron** (mikrodalga kaynağı), mikrodalgayı örnek üzerine ve örnekten yansıyan dalgayı da kristal dedektöre taşıyabilen bir **dalga kılavuzu**, bir **mikrodalga kavitesi**, değeri çizgisel olarak değiştirilebilen durgun dış manyetik alan oluşturan bir **elektromıknatis**, rezonans sinyali algılayan bir **kristal dedektör**, bir çift **modülasyon bobini**, bir **yükselteç**, bir **faz duyarlı dedektör** ile **kaydediciden** oluşmaktadır.



Şekil 31. Elektron Spin Rezonans (ESR) spektrometresi diyagramı

Elektromıknatisin kutupları arasında, incelenecek numunenin içine konulduğu yan yüzlerine modülasyon bobinleri yerleştirilmiş mikrodalga kavitesi bulunmaktadır. Bu kavite dalga kılavuzu aracılığı ile dört kollu bir köprüye bağlıdır. Klystronun ürettiği MD, köprü yardımıyla kaviteye gönderilmektedir. Köprü dengeye getirildiğinde kristal dedektörden akım geçmemektedir. Rezonans durumunda ise kavite içindeki örnek MD enerjisi soğurmaktadır ve bunun sonucu olarak köprünün dengesi bozulmaktadır ve kristal dedektörden akım geçmektedir. Bu akım değişiminin neden olduğu sinyal yükseltilecek faz duyarlı dedektöre gönderilmektedir. Burada, gelen sinyal modülasyon sinyali ile kıyaslanmaktadır ve sonuç kaydediciye ulaşmaktadır. Statik manyetik alan çizgisel olarak tarandığında, bu yöntemle rezonans çizgisinin her noktası ile ilgili bilgi kaydedicide spektrum olarak ortaya çıkmaktadır. Genelde ESR spektrometreleri enerji soğurma eğrilerinin birinci türevini çizerler (Apaydın, 1991).

3.3.4. Termolüminesans (TL) Yöntemi

Tez kapsamında doğal bor minerallerinin dozimetrik irdelemelerinde ESR spektroskopisi bulgularına tamamlayıcı bilgiler verebilmesi amacıyla Termolüminesans (TL) tekniği de kullanılmıştır. Numunelerin TL analizlerinde, Hacettepe Üniversitesi, Nükleer Bilimler Enstitüsü'nde bulunan **Harshaw TLD 3500 okuyucu** kullanılmış, deneysel çalışmalar oda sıcaklığında yürütülmüştür.



Şekil 32. TL Cihazı

Bazı kristal yapılar, uygun elementlerle katkıldıklarında veya ışındıklarında vb. radyasyona duyarlı hale gelirler. Daha sonra bu kristallerin ısıtılması ile ışın meydana gelir. Bu ışık, foto çoğaltıcı tüpler tarafından algılanarak, ışığın şiddetiyle orantılı olarak doz bilgisine ulaşılır. Isı ile uyarılma sonucu elde edilen bu ışınma "**termolüminesans**" olarak adlandırılır. Termolüminesans çalışmalarında kullanılacak kristallerin ölçüme hazır hale getirilmesi için yapılması gereken bazı işlemler vardır. Kristallerin içerdiği doz bilgisinin sıfırlanması, yani tuzaklarda bulunan elektronların çıkarılması amacıyla yapılan ısıtma işlemine "**tavlama**" denilmektedir. Tavlama sıcaklığı, kullanılacak kristale uygun olarak seçilmelidir. Isıtılan kristalden yayınlanan ışık, okuyucu tarafından elektriksel yük olarak algılanır. Bu yük miktarına karşı gelen doz değerinin doğrudan okunabilmesi için okuyucu kalibrasyon faktörünün belirlenir.

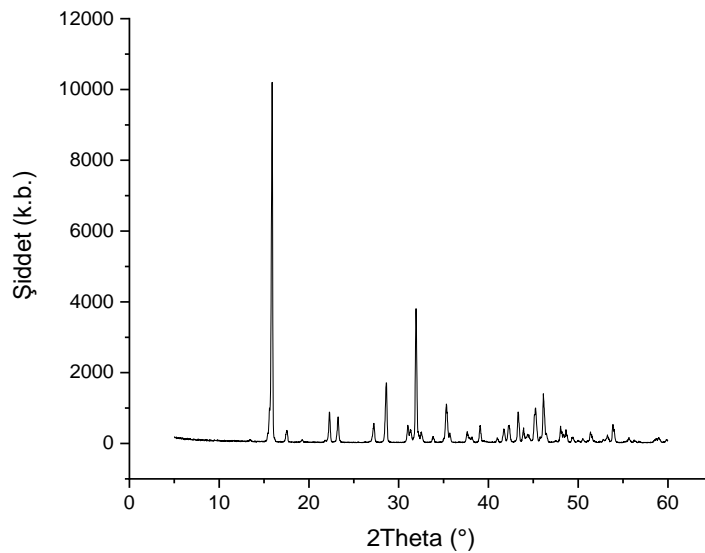
4.DENEYSEL BULGULAR VE TARTIŞMA

Balıkesir-Bigadiç bölgesinden kayaç formunda temin edilen ve deneye hazırlama aşamasında toz haline getirilen doğal Bor minerallerinin öncelikli olarak XRD çalışmaları yapılmış ve bu şekilde yapı analizleri ile numunelerin tanımlamaları doğrulanmıştır. Aynı zamanda numunelerin yapı morfolojilerinin analizi için SEM analizi, elementel analizleri için de EDX çalışmaları gerçekleştirildi. Tüm tez çalışmaları süresince; ışınlanan örneklerde ışınlama etkisi ile oluşturulan radikallerin analizi ve numunelerin dozimetrik özelliklerinin tespiti için ESR spektroskopisi ve ESR ile birlikte tamamlayıcı bilgi veren TL çalışmaları yürütülmüştür.

4.1. Doğal Bor Minerali Kolemanit-1 Örneği için Elde Edilen Bulgular

4.1.1. Doğal Bor Minerali Kolemanit-1 Örneği için XRD Bulguları

X-Işınları Toz Kırınım Metresi (XRD) kullanılarak analiz edilen Kolemanit-1 örneği için kaydedilen XRD spektrum Şekil 33'de verilmiştir. Kolemanit-1 doğal Bor minerali için elde edilen XRD spektrumu Dicvol04 programı ile analiz edilmiş ve örneğe ait birim hücre parametreleri olan a, b ve c parametre bilgileri Tablo 5'de verilmiştir.



Şekil 33. Kolemanit–1 doğal Bor minerali için XRD Spektrumu

Tablo 5. Kolemanit-1 Örneği için XRD Analiz Sonuçları

Kapalı İsim	Yapı	Birim Hücre Parametreleri		
		a	b	c
Ca ₂ B ₆ O ₁₁ .5H ₂ O	Monoklinik	8,90	11,27	6,23

Elde edilen bulgular grafik çizim programı kullanılarak çizdirildi. Bragg bağıntısı olan $2d\sin\theta = n\lambda$ ifadesi kullanılarak d (kristalde düzlemler arası) değerleri ve yarı yükseklikteki tam genişlik (FWHM) değerleri hesaplandı. K=0,9 ve $\lambda(\text{Cu}) = 0,15406$ nm kabul edilerek, Scherrer eşitliği $d_{hkl} = \frac{K\lambda(\text{Cu})}{(FWHM)\cdot\cos\theta}$ ile tanecik boyutu hesabı yapıldı ve ulaşılan sonuçlar Tablo 6 ve Tablo 7'de verildi.

Tablo 6. Doğal Bor Minerali Kolemanit-1 Örneği için hesaplanan d değerleri

Pik Konumları (2θ)	d(Å)
15,90	5,57
22,32	3,98
23,26	3,82
27,24	3,27
28,60	3,12
31,00	2,88
31,92	2,80
35,30	2,54
39,12	2,30
41,80	2,16
42,28	2,14
43,28	2,09
43,32	2,00
45,20	1,97
46,14	1,90
48,06	1,87
51,40	1,78
53,90	1,70

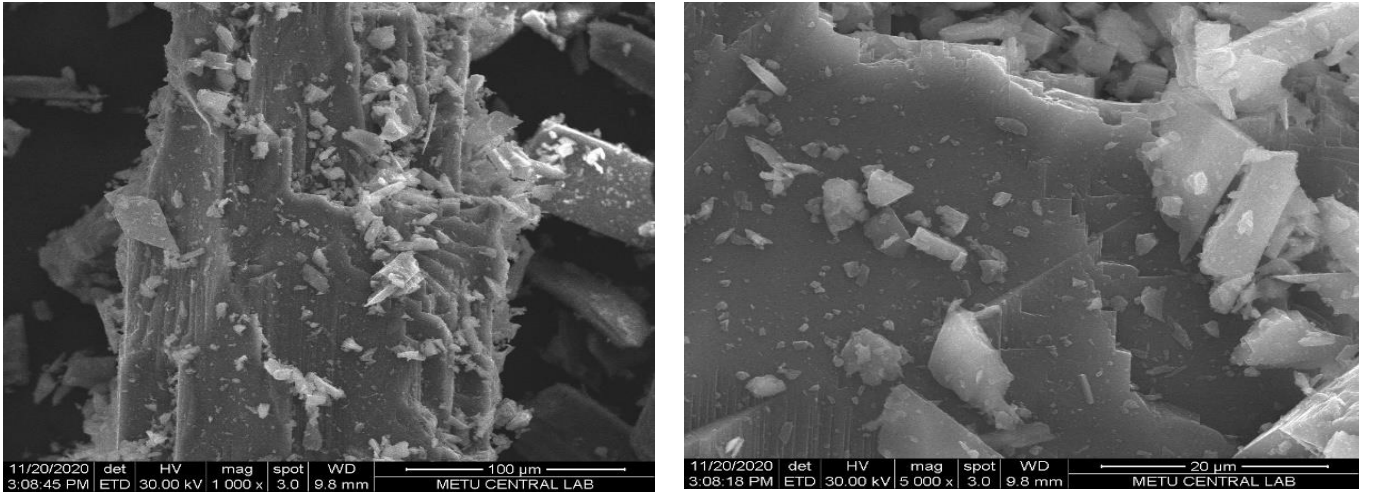
Tablo 7. Doğal Bor Minerali Kolemanit-1 Örneği için Hesaplanan Tanecik Boyut Değerleri

Pik Konumları (2θ)	FWHM	Tanecik Boyutu (nm)
15,8829	0,17066	47,0011
28,60819	0,19811	41,3833
31,94049	0,18256	45,2629
35,32971	0,25698	32,4438
43,33168	0,19622	43,5643
45,22729	0,2936	29,3117
46,15907	0,23242	37,1545

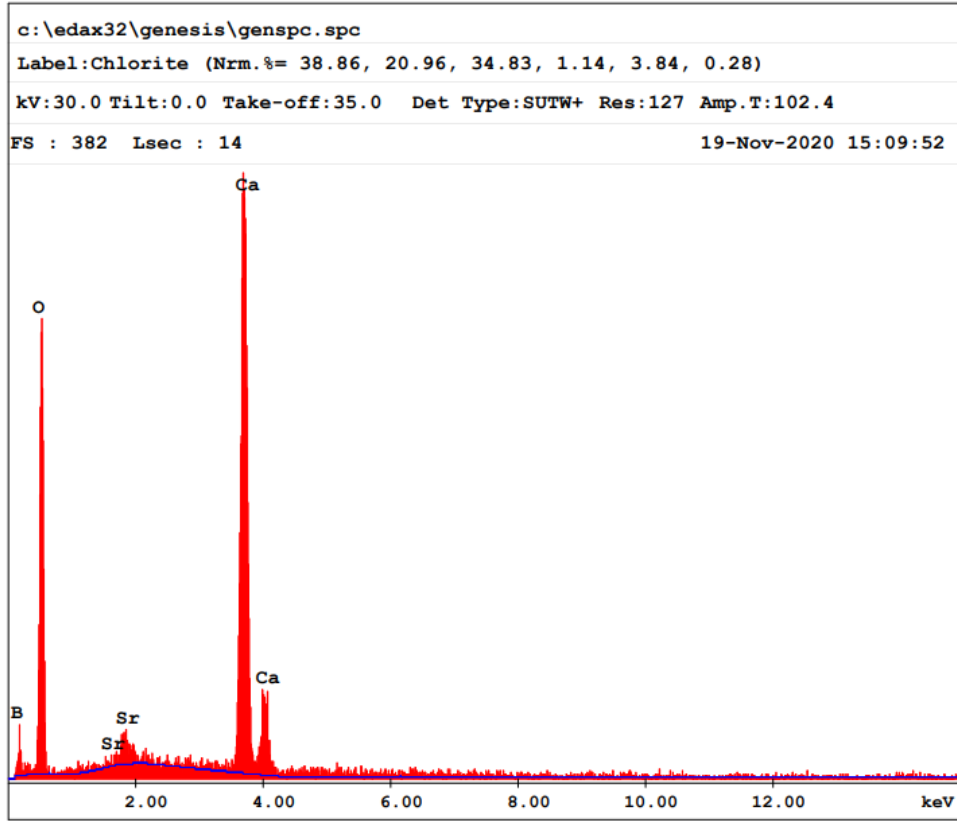
XRD sonuçlarında elde edilen pik açıları ve yarı şiddet genişlik (FWHM) değerleri grafik programı ile belirlenmiş ve Scherrer eşitliği kullanılarak kristalit boyutları hesaplanmıştır. Kristalit boyutlarının ortalaması 39,445 nm olarak bulunmuştur.

4.1.2. Doğal Bor Minerali Kolemanit-1 Örneği için SEM Bulguları

Doğal Bor minerallerinden Kolemanit-1 örneğinin yapısal özellikleri hakkında bilgi veren SEM görüntüsü Şekil 34'de, elementel analiz bilgisi veren EDX bulguları ise Şekil 35'de verilmiştir.



Şekil 34. Kolemanit-1 Örneği için SEM Görüntüleri



Şekil 35. Kolemanit -1 Örneği için EDX Spektrumu

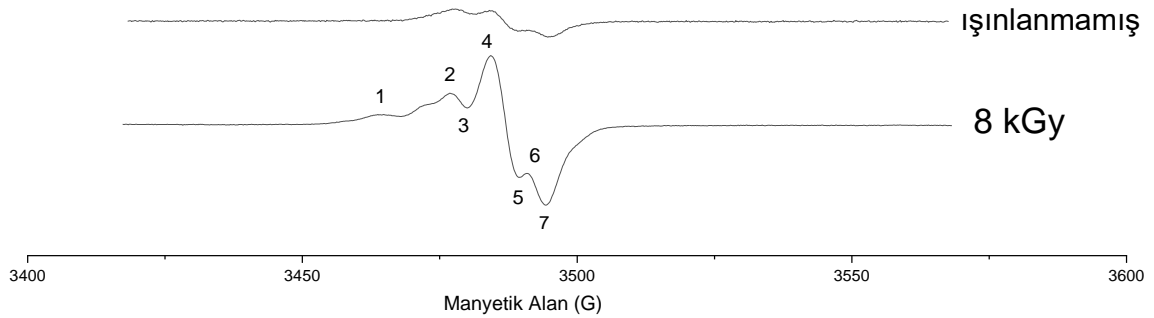
Elde edilen SEM bulguları örneğin yüzey morfolojisi ve boyutları ile ilgili önemli bilgiler verirken, EDX sonuçları gereğince örnek yapısında %47 oranında Bor, %40,83 oranında Oksijen, %1,02 oranında Stronsiyum ve %11,04 oranında Kalsiyum bulunduğu sonucuna ulaşılmıştır.

4.1.3. Doğal Bor Minerali Kolemanit-1 Örneği için ESR Bulguları

Tezin amacı olan doğal Bor minerallerinin dozimetrik özelliklerinin irdelenmesinde ağırlıklı olarak Elektron Spin Rezonans (ESR) spektroskopisi kullanılmıştır. Kolemanit-1 örneği için optimum deney parametreleri aşağıda verilmiştir.

Merkezi Manyetik Alan	3445-3480 G	Kazanç	$6,32 \times 10^4$
Süpürme Alanı	100-150 G	Süpürme Zamanı	83,84 ms
Mikrodalga Frekansı	9,7-9,8 GHz	Zaman Sabiti	40,96 ms
Mikrodalga Gücü	1-5 mW	Dönüştürme Zamanı	81,92 ms
Modülasyon Frekansı	100 kHz	Sıcaklık	Oda
Modülasyon Genliği	1 G		

Kolemanit-1 örneğinin ESR spektrumu, Şekil 36'da görüldüğü gibi, 7 adet ESR rezonans pikinden oluşmaktadır ve bu spektrum yaklaşık 150 G manyetik alanına yayılmaktadır. Spektrumda bulunan bu 7 rezonans pikinin g değeri 2,0021'dir. ΔH_{pp} değeri ise 4,56 G'dir. Hesaplanan bu spektral parametreler ışınlama etkisi ile değişim göstermemektedir.

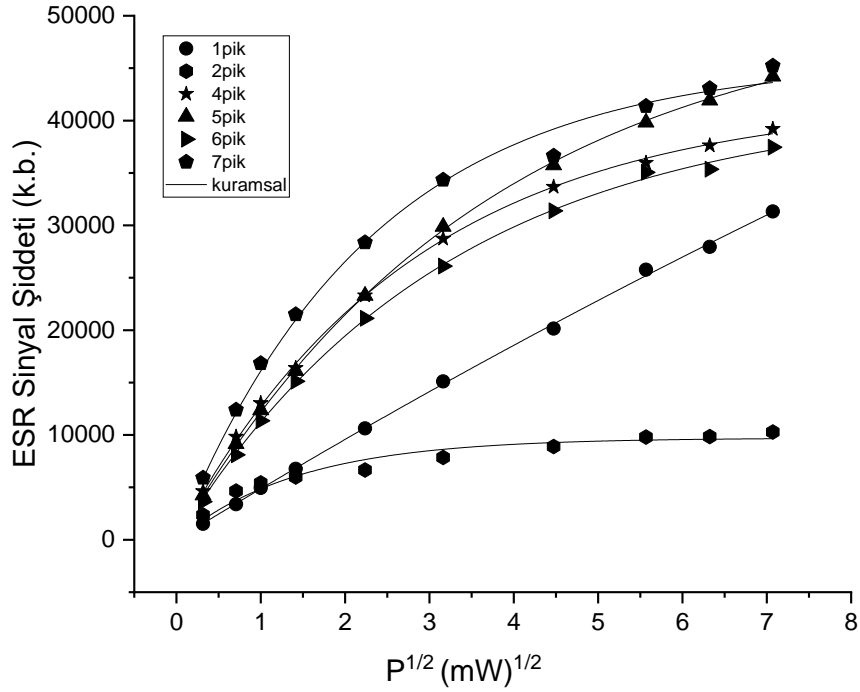


Şekil 36. Işınlanmamış ve Işınlanmış Kolemanit-1 Örneği için ESR Spektrumları

Örneklerin ESR spektrumlarının kaydedilmesinden önce deneyde kullanılması gereken optimum deney parametrelerinin belirlenebilmesi için mikrodalga gücü ve modülasyon genliği çalışmaları yürütülmüştür. Kolemanit-1 örneği için elde edilen Mikrodalga Gücü Doyum Çalışmaları ve Modülasyon genliği çalışmaları sırasıyla 4.1.3.1. ve 4.1.3.2. kesimlerinde verilmiştir.

4.1.3.1. Doğal Bor Minerali Kolemanit-1 için Mikrodalga Gücü Doyum Çalışmaları

Doğal bor minerali Kolemanit-1'in optimum mikrodalga güç değeri çalışması için 0,1 mW ile 49 mW aralığında mikrodalga gücü çalışması yürütülmüştür. Şekil 37'de mikrodalga güç çalışması verilmiştir.



Şekil 37. 8 kGy Işınlanmış Kolemanit-1 örneği için Mikrodalga Gücü Doyum Eğrileri

Doğal bor minerali Kolemanit-1 örneği için yürütülen mikrodalga doyum çalışması verileri uygun teorik matematik modellemelere grafik programı aracılığıyla doğrusal olmayan yaklaşımla uyarlanmıştır. Doğal bor minerali Kolemanit-1 örneği için elde edilen mikrodalga doyum çalışması verileri, uygun teorik matematiksel modelleme olan $I = I_0(1 - \exp(-b\sqrt{P}))$ bağıntısına grafik programı kullanılarak uyarlanmıştır ve elde edilen sonuçlar Tablo 8'de sunulmuştur.

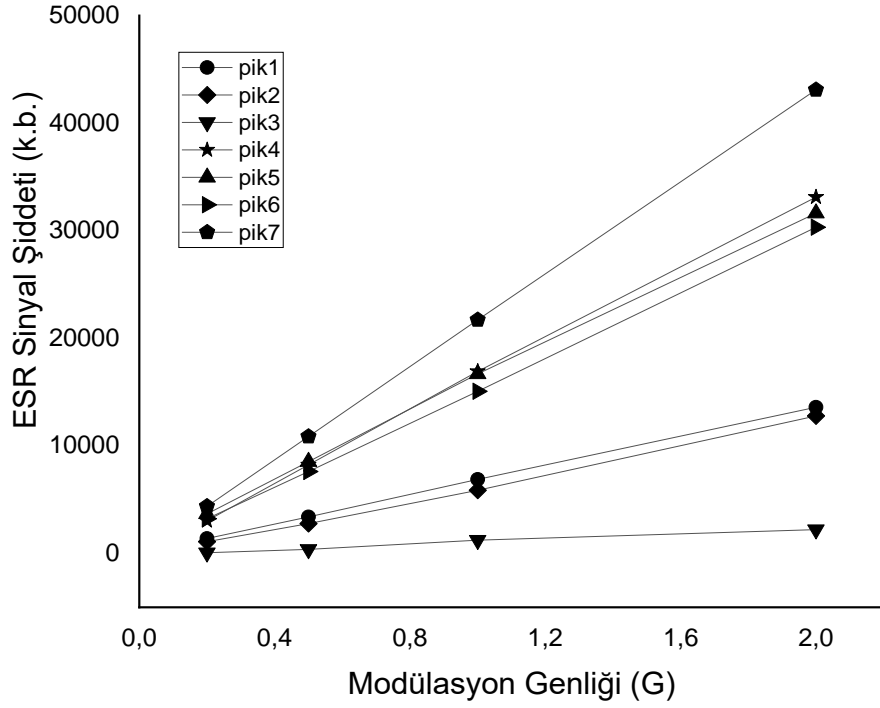
Tablo 8. Doğal Bor Minerali Kolemanit-1 Örneği için Mikrodalga Gücü Doyum Bulguları

	b (mW)^{-1/2}	R²
1.pik	0,0321	0,99
2.pik	0,6925	0,94
4.pik	0,3618	0,99
5.pik	0,2705	0,99
6.pik	0,3132	0,99
7.pik	0,4338	0,99

Kolemanit-1 için mikrodalga doyum çalışması bulguları incelendiğinde, Kolemanit-1 örneğinin ESR rezonans piklerinden bazılarının mikrodalga doyum parametrelerinin farklı olduğu görülmüştür. Bu sonuç, ışınlanma ile Kolemanit-1 örneğinde farklı radikal türlerinin oluşabileceğini göstermektedir. Mikrodalga doyum çalışma sonuçları dikkate alındığında, yürütülen bütün ESR çalışmaları için optimum mikrodalga güç değeri doyumdan uzakta bir değer olan **1 mW** seçilmiştir.

4.1.3.2. Doğal Bor Minerali Kolemanit-1 için Modülasyon Genliği Çalışmaları

Doğal bor minerali Kolemanit-1 için optimum modülasyon genliği çalışması 0,2 G ile 2 G aralığında yürütülmüştür. Modülasyon genliği verileri Şekil 38'de verilmiştir.



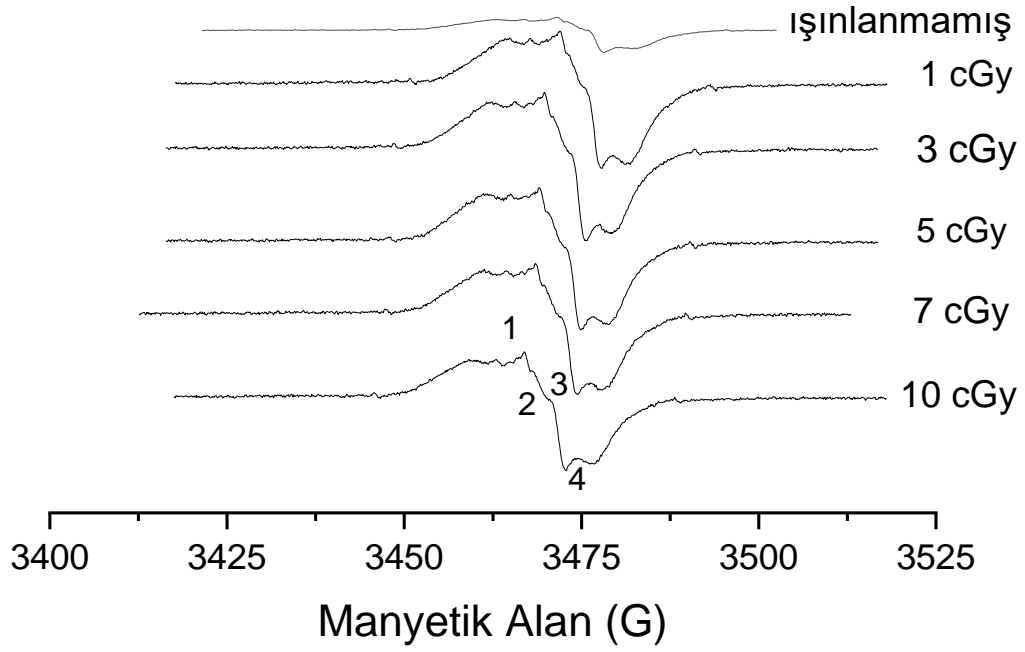
Şekil 38. 8 kGy Işınlanmış Kolemanit-1 örneği için Modülasyon Genliği Eğrileri

Kolemanit-1 örneğinin modülasyon genliği bulguları incelendiğinde, örneğin ESR rezonans piklerinden bazılarının farklı değişimlere sahip olduğu, bu sebeple örnek içinde farklı radikal türlerinin var olabileceği sonucuna varılmaktadır. Modülasyon genliği bulguları irdelenerek, yürütülen bütün ESR çalışmaları için optimum modülasyon genliği değeri **1 G** seçilmiştir.

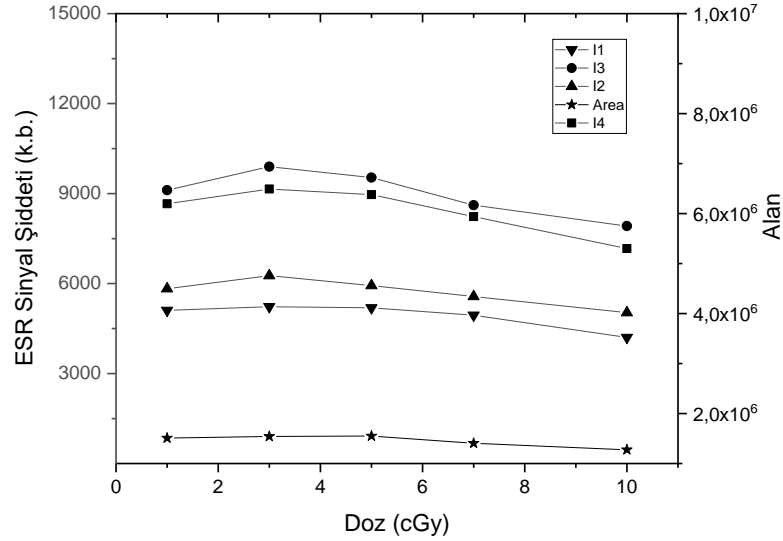
4.1.3.3. Doğal Bor Minerali Kolemanit-1 Örneği için Doz-Cevap Çalışmaları

4.1.3.3.1. Kolemanit-1 Örneği için cGy Mertebesinde Doz-Cevap Çalışmaları

Kolemanit-1 Örneği için, ışınlanmamış ve 1-10 cGy aralığında ışınlama sonucu elde edilmiş ESR spektrumları Şekil 39'da görülmektedir. Kolemanit-1 örneği 4 rezonans pikine sahiptir, 100 G tarama alanında g değeri 2,0039 ve ΔH_{pp} ise 5,86 G'dir. ESR spektrumları ışınlamadan sonra mümkün olduğunca kısa sürede kaydedilmiştir.



Şekil 39. Işınlanmamış ve cGy mertebesinde ışınlanmış Kolemanit- 1 Örneği için ESR Spektrumları

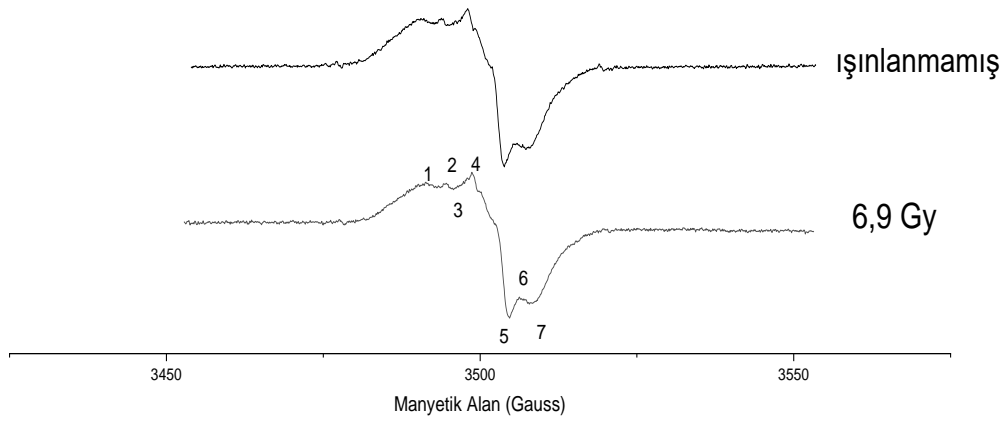


Şekil 40. Kolemanit-1 Örneği için Doz-Cevap Verileri

Kolemanit-1 Örneğinin cGy mertebesindeki ışınlamaları için elde edilen doz-cevap bulguları Şekil 40'da verilmiştir. Şekil 40'dan da görüldüğü gibi, 6 MeV enerji ile hızlandırıcı kullanılarak cGy mertebesinde ışınlanmış Kolemanit-1 örneğinin ESR sinyal şiddetlerinde anlamlı bir değişiklik gözlenmemiştir. Bu sebeple, Kolemanit-1 doğal Bor mineralinin cGy mertebesindeki ışınlamalar için uygun dozimetrik özellik göstermediği şeklinde yorumlanabilir.

4.1.3.3.2. Kolemanit-1 Örneği için Gy Mertebesinde Doz-Cevap Çalışmaları

Kolemanit-1 Örneği için, Gy mertebesinde ESR spektrumları Şekil 41'de gösterilmektedir. Tüm örnekler için 2,2 Gy, 4,4 Gy ve 6,9 Gy mertebelerinde ışınlama yapılmıştır ancak sadece 6.9 Gy çalışması verilmiştir. Spektrumlar yaklaşık 100 G manyetik alanına yayılmaktadır ve spektrum incelendiğinde 7 adet rezonans piki için g değeri 2,0013 ve ΔH_{pp} değeri ise 6 G olarak belirlenmiştir.

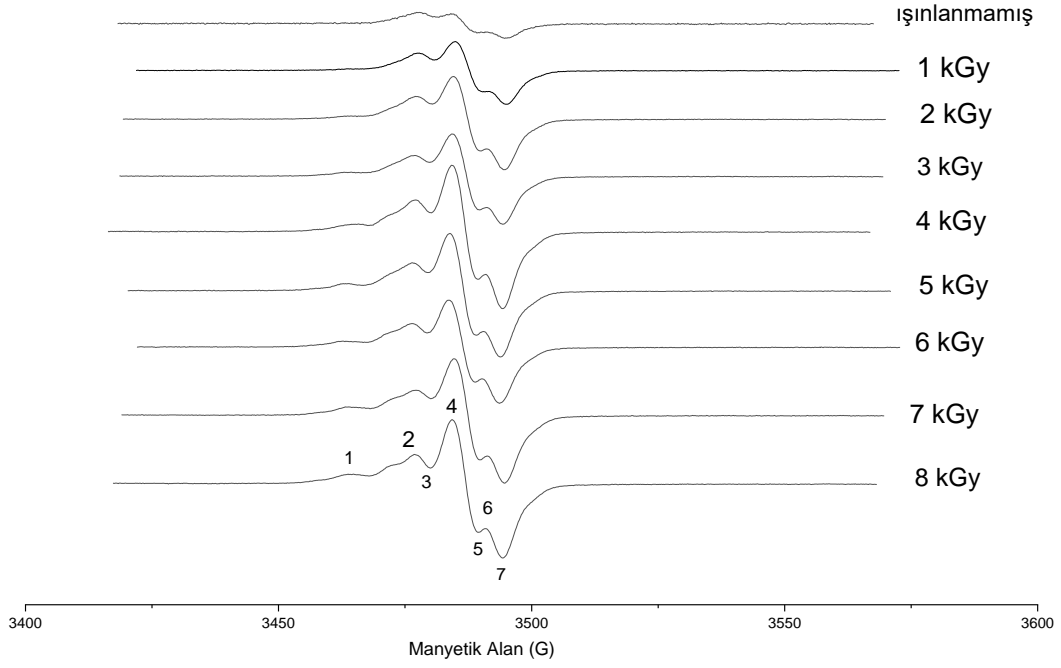


Şekil 41. Işınlanmamış ve 6.9 Gy mertebesinde ışınlanmış Kolemanit- 1 Örneği için ESR Spektrumları

Elde edilen bulgular; Gy mertebesindeki ışınlamaların örneğin ESR spektrumunda anlamlı bir şiddet artışına neden olmadığını gösterdiğinden, Kolemanit-1 örneğinin Gy mertebesi için uygun dozimetrik malzeme olmadığı yönündedir.

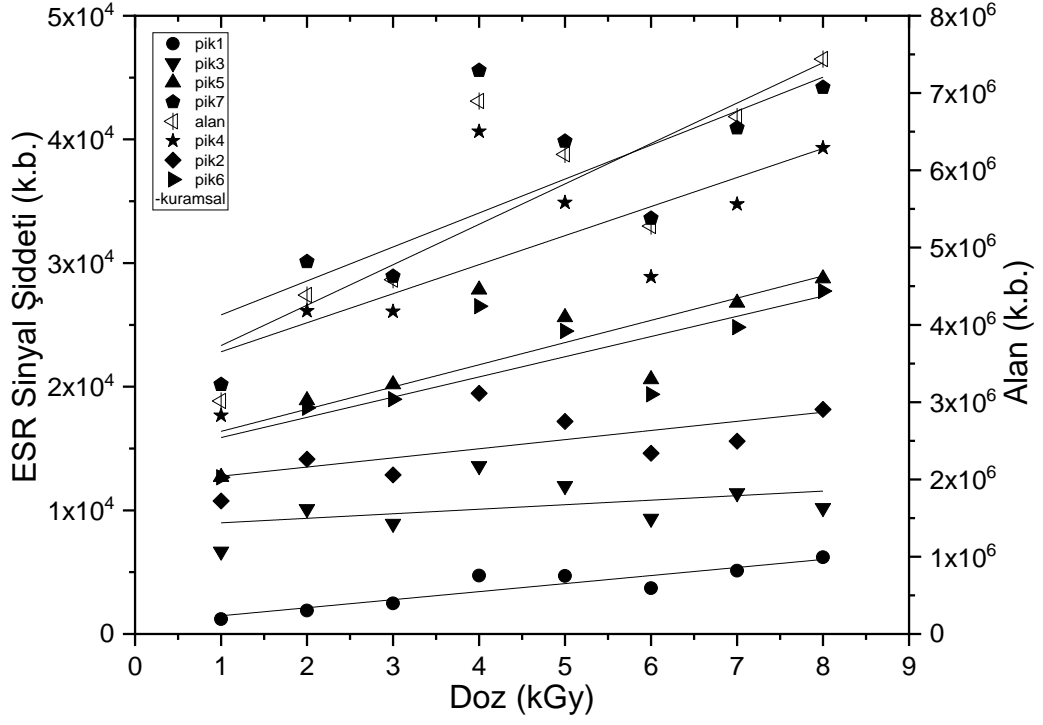
4.1.3.3.3. Kolemanit-1 Örneği için kGy Mertebesinde Doz-Cevap Çalışmaları

Kolemanit-1 Örneği için, ışınlanmamış ve 1-8 kGy aralığında gama ışınlanmış örnekler için kaydedilen ESR spektrumları Şekil 42'de verilmiştir. 7 rezonans pikinin g değerleri sırasıyla, $g_1=2,0157$, $g_2=2,0081$, $g_3=2,0061$, $g_4=2,0037$, $g_5=2,0007$, $g_6=1,9999$, $g_7=1,9979$ ve $g_{orta\ pik}$ değeri (4.ve 5. Pik) 2,0021'dir. ΔH_{pp} değeri 4,56 G'dir. Yapılan incelemelerde, spektral parametrelerin ışınlama dozu ile değişim göstermediği sonucuna ulaşılmıştır.

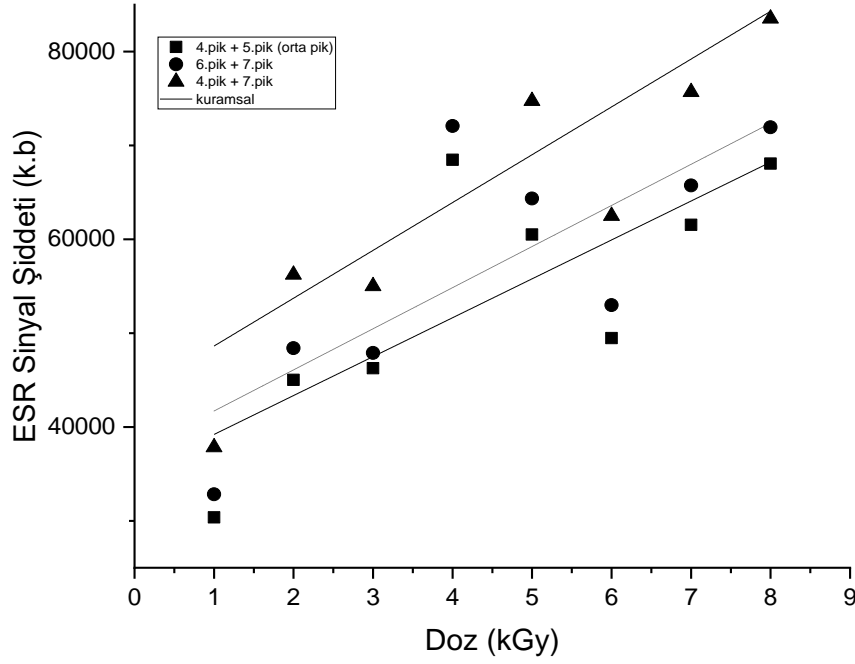


Şekil 42. Işınlanmamış ve kGy mertebesinde ışınlanmış Kolemanit- 1 Örneği için ESR Spektrumları

Işınlanmamış ve farklı kGy değerlerinde ışınlanmış Kolemanit-1 örneğinin doz-cevap eğrileri, örneğin farklı rezonans pikleri için Şekil 43'de verilmiştir. Şekilde gösterilen alan verileri, ışınlanan örneklerin spektrumlarının iki kez integrali alınarak oluşturulmuştur. Işınlanan örneğin bazı rezonans pik şiddetlerinin toplamının verildiği, bu şekilde sinyal-gürültü oranının artmasının amaçlandığı doz-cevap eğrileri ise Şekil 44'de gösterilmiştir.



Şekil 43. Işınlanmış (kGy mertebesinde) Kolemanit-1 Örneği için Doz-Cevap Eğrileri



Şekil 44. Işınlanmış (kGy mertebesinde) Kolemanit-1 Örneği için Doz-Cevap Eğrileri

Doğal bor minerali Kolemanit-1 örneği için yürütülen doz-cevap çalışması verileri; grafik programı yardımı ile farklı teorik matematik modellemelere uyarlanmış ve deneysel verilerin uyarlanan denklemler arasında lineer doz-cevap ilişkisi veren $I = a + b * D$ bağıntısına daha uygun olduğu sonucuna varılmıştır. Bu uyarlama sonucu örneğin farklı rezonans pikleri için elde edilen parametreler Tablo 9'da verilmiştir.

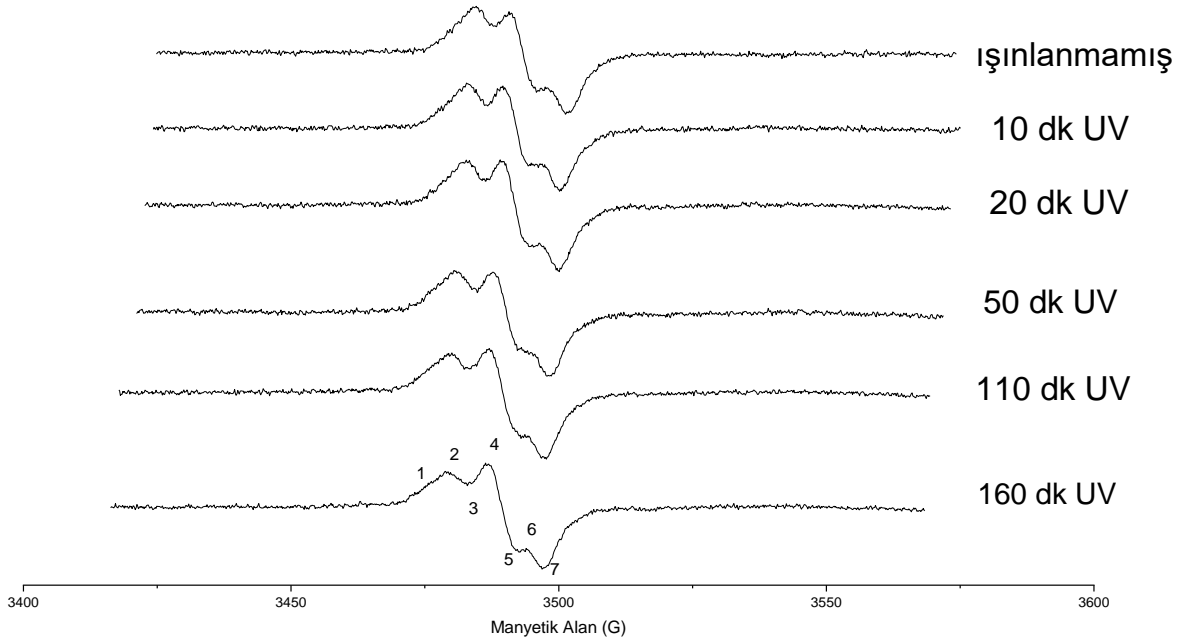
Tablo 9. Doğal Bor Minerali Kolemanit-1 Örneğinin kGy mertebesindeki ışınlamaları için edilen Doz-Cevap Bulguları ($I = a + b * D$)

	a (Gy)	b (1/Gy)	R²
1.pik	821,2	650,8	0,83
2.pik	12022,6	739,3	0,63
3.pik	8622,4	366,7	0,18
4.pik	20472,7	2349,3	0,55
5.pik	14588,9	1796,2	0,63
6.pik	14252,2	1634,3	0,61
7.pik	23058,8	2747,2	0,59
Alan	3209172,9	522993,8	0,72
4. pik+5.Pik	35061,7	4145,5	0,58
6.pik+7.pik	37311,1	4381,4	0,60
4.pik+7.pik	43531,6	5096,5	0,57

Kolemanit-1 örneğinin kGy mertebesindeki ışınlamaları sonucunda elde edilen doz-cevap bulguları incelendiğinde; örneğin ESR rezonans piklerinin, güvenilirlik değerleri düşük olmakla birlikte, genel olarak lineer doz cevap eğrisine uyumlu olduğu görülmüştür. Kolemanit-1 örneğinin rezonans piklerinden ışınlama dozuna bağlılığı yüksek olan, büyük eğimli (b değeri) rezonans piklerinin dozimetrik ölçümlerde kullanılabilmesi sonucuna varılmıştır. Kolemanit-1 örneği için Tablo 9'da yer alan veriler değerlendirildiğinde pik7 ve orta pik (pik4 + pik7)'nin dozimetrik ölçümlerde kullanılabilir.

4.1.3.4 Doğal Bor Minerali Kolemanit-1 Örneği için UV Işınlama Çalışmaları

Tez kapsamında; dozimetrik özellikleri irdelenen doğal Bor minerallerinden Kolemanit-1 örneği için gerçekleştirilen cGy, Gy ve kGy mertebelerindeki çalışmalara ek olarak, UV ışınlama çalışmaları da yürütülmüştür. Işınlanmamış ve UV ışınlanmış Kolemanit-1 örneği için ESR spektrumları Şekil 45'de verilmiştir.



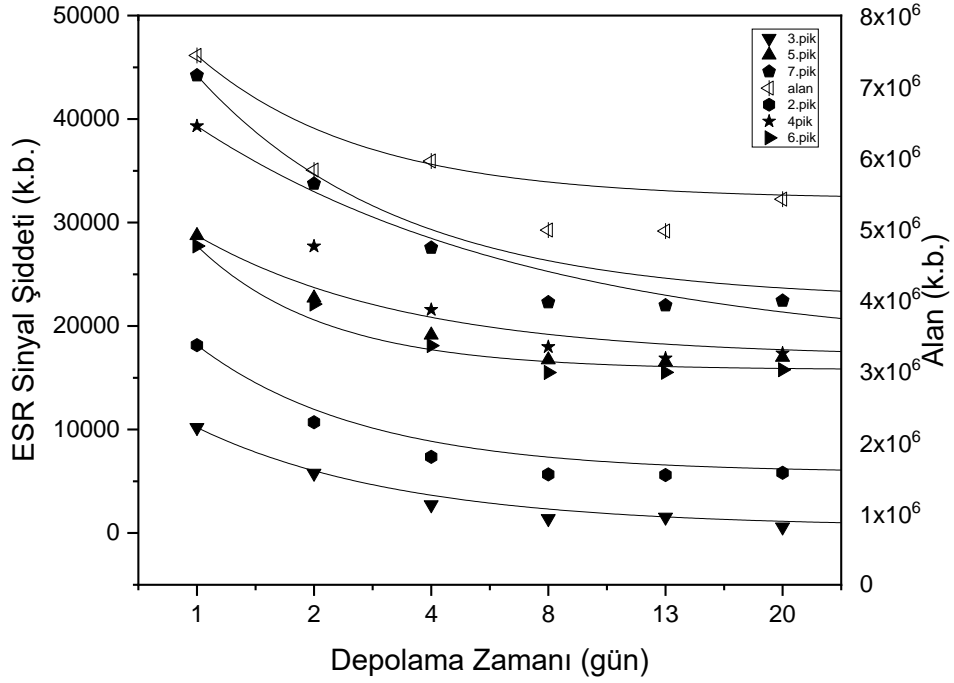
Şekil 45. Işınlanmamış ve UV Işınlanmış Kolemanit -1 Örneği için ESR Spektrumları

UV çalışmaları sonucunda 5 farklı UV ışınlama süresi (10 dk – 160 dk) için kaydedilen Kolemanit-1 örneklerinin ESR sinyal şiddetlerinde UV ışınlama etkisi ile yaklaşık %10 oranında artış gözlenmiş, numune üzerinde fizikokimyasal değişimler (UV ışınlama etkisi ile beyaz renkli örnekler çok açık mavi renge sahip olmuştur) gözlenmiş fakat oluşan yeni rezonans pik/piklerinin varlığına rastlanmamış, bu nedenle UV ışınlamasının Kolemanit-1 örneği için yeni hasar merkezlerinin oluşumuna veya farklı radikal türlerinin oluşumuna neden olmadığı sonucuna ulaşılmıştır.

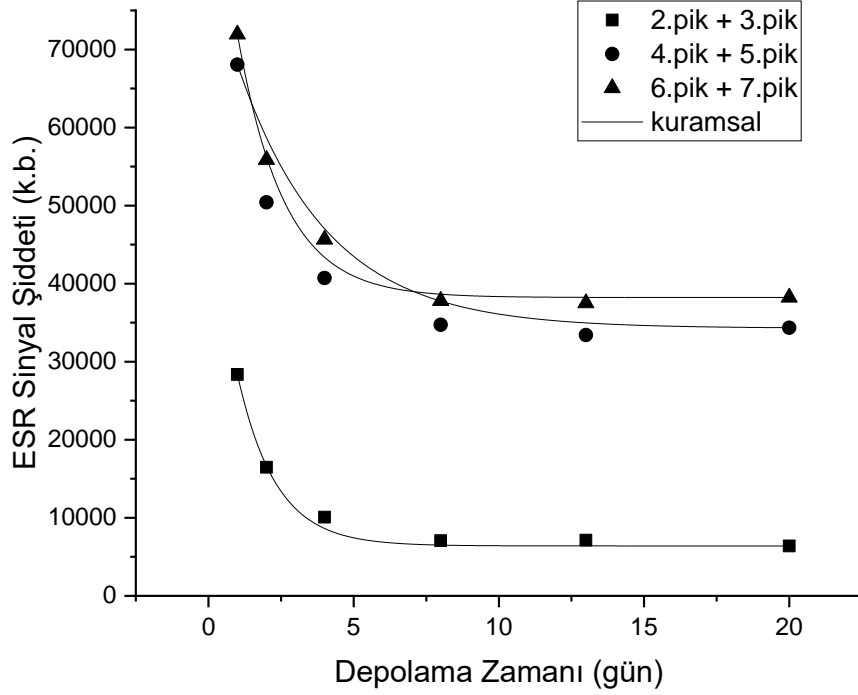
4.1.3.5. Doğal Bor Minerali Kolemanit-1 Örneği için Zaman İncelemesi Çalışmaları

Tez kapsamında; 8 kGy gama ışınlanmış Kolemanit-1 örneği için, örneğin oda sıcaklığındaki depolama zamanı ile rezonans pik şiddetlerinde (veya spektrum alanlarında) oluşabilecek değişimler (sönüm) irdelenmiş, bu şekilde ışınlanan Kolemanit-1 örneğinin kararlılığı (stabilitesi) hakkında bilgi alınmıştır. İyi dozimetrik özellik gösteren malzemelerin rezonans pik şiddetlerinin ışınlama dozu ile lineer ve yüksek eğime sahip olması gerektiği, benzer şekilde örneğin rezonans piklerinin de zaman içinde değişmemesi gerektiği bilinmektedir. Farklı

değerlerde gama ışınlanmış Kolemanit-1 örneğinin, yaklaşık bir aylık depolama zamanı içinde rezonans pik şiddetlerinin zamanla değişimleri Şekil 46'da verilmiştir. Benzer şekilde, yaklaşık bir aylık depolama zamanı içinde bazı rezonans pik şiddetlerinin toplamının zamanla değişimleri Şekil 47'de verilmiştir.



Şekil 46. Doğal Bor Minerali Kolemanit-1 Zaman İncelemesi Bulguları



Şekil 47. Doğal Bor Minerali Kolemanit-1 Zaman İncelemesi Bulguları

Doğal bor minerali Kolemanit-1 örneği için yürütülen zaman incelemesi çalışmalarından elde edilen deneysel bulgular, $I = I_0 (1 - e^{-kt})$ teorik modellemesine uyarlanmış ve bu şekilde Tablo 10'da verilen ışınlama ile örnekte oluşan radikallerin bozunma sabiti teorik değerlerine ulaşılmıştır.

Tablo 10. Doğal Bor Minerali Kolemanit-1 Örneği için Zaman İncelemesi Bulguları

	k (gün⁻¹)	I₀ (k.b)	A1(k.b)	R²
2.pik	0,69	5820,9	12338,1	0,98
3.pik	0,56	578,1	9619,1	0,97
4.pik	0,33	17333,7	21981,4	0,88
5.pik	0,55	16987,5	11760,4	0,98
6.pik	0,90	15774,7	11962,1	0,95
7.pik	0,57	22450,3	21758,5	0,99
Alan	0,70	5418685,1	2021504,9	0,80
2.pik+3.pik	0,76	21957,03	21957,1	0,99
4.pik+5.pik	0,64	34171,25	33777,4	0,99
6.pik+7.pik	0,55	33684,23	33720,5	0,99

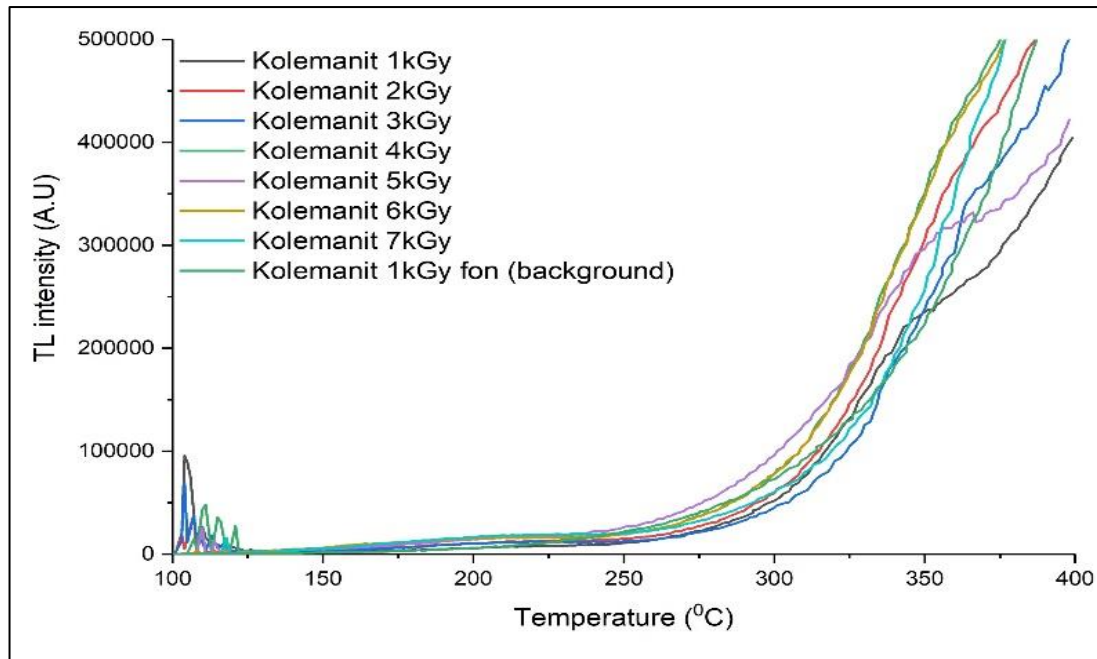
Kolemanit-1 için oda sıcaklığında gerçekleştirilen zaman incelemesi çalışma bulguları incelendiğinde, yaklaşık bir ay süresince %40 oranında sinyal

şiddetlerinde azalma/sönüm olmuştur ve örneğinin 6. rezonans pikinin sönüm oranının yüksek olduğunu, 4. rezonans pikinin sönüm oranının ise düşük olduğunu görülmüştür. Bu bağlamda, Kolemanit-1 örneğinin 4 numaralı rezonans pik şiddetinin dozimetrik çalışmalarda kullanılmasının uygun olduğunu söylemek mümkündür.

UV ışınlanmış Kolemanit -1 için oda sıcaklığında gerçekleşen zaman incelemesi çalışmasında ise anlamlı bir değişiklik olmamıştır.

4.1.4. Doğal Bor Minerali Kolemanit-1 Örneği için TL Bulguları

Dozimetrik özelliklerinin irdelenmesi tezin amacı olan Kolemanit-1 doğal bor minerali için yürütülen ESR çalışmalarının yanı sıra, 5°C/s ısıtma hızında 100 – 400°C sıcaklık aralığında çalışan **Termolüminesans** ölçümleri de gerçekleştirilmiştir. Kolemanit-1 için TL çalışmaları ışınlanmamış, cGy, Gy ve kGy mertebelerinde ışınlanmış örneklerin hepsi için gerçekleştirilse de, elde edilen veriler genel olarak ışınlanmamış ve ışınlanmış örnekler arasında anlamlı farklılıklar olmadığını göstermektedir. Şekil 48'de kGy mertebesindeki ışınlanmış Kolemanit-1 örneğinin TL bulguları verilmiştir.



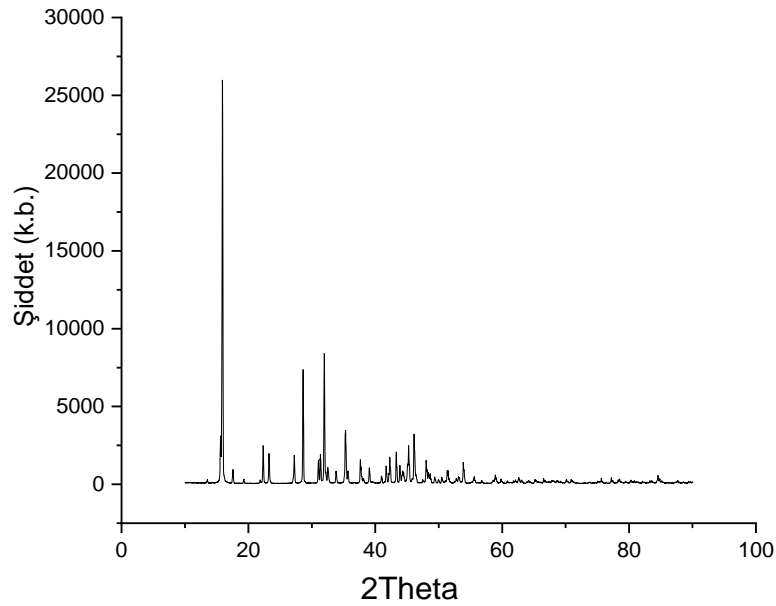
Şekil 48. Kolemanit -1 Örneği için TL Çalışması

kGy mertebesinde ışınlanmış Kolemanit-1 örneği için elde edilen TL bulguları incelendiğinde ve 100-400°C aralığında yürütülen TL analiz sonuçlarına göre, ışınlama etkisi örnekte anlamlı bir değişikliğe sebep olmamaktadır. Bu aralıkta ışınlanmış örnekler için elde edilen TL verileri, ışınlanmamış örnekler için elde edilen sonuçlar ile anlamlı bir farklılık göstermemişlerdir. Farklı ısıtma hızlarında da benzer bulgular elde edilmiş ve bu durumda da ışınlanmamış ve ışınlanmış verileri ayırt etmenin zorluğu gözlenmiş, ışınma eğrisi ise elde edilememiştir. Bu nedenlerle Kolemanit-1 örneği için yapılan dozimetrik çalışmalar için TL analizinin, beklenildiğinin aksine, tamamlayıcı bilgi vermediği sonucuna ulaşılmıştır.

4.2. Doğal Bor Minerali Kolemanit-2 Örneği için Elde Edilen Bulgular

4.2.1. Doğal Bor Minerali Kolemanit-2 Örneği için XRD Bulguları

X-ışınları difraksiyonu (XRD) kullanılarak analiz edilen Kolemanit-2 örneği için kaydedilen XRD spektrum Şekil 49'da verilmiştir. Kolemanit-2 doğal Bor minerali için elde edilen XRD spektrumu Dicvol04 programı ile analiz edilmiş ve örneğe ait a, b ve c birim hücre parametre bilgileri Tablo 11'de verilmiştir.



Şekil 49. Kolemanit-2 doğal Bor minerali için XRD Spektrumu

Tablo 11. Doğal Bor Minerali Kolemanit-2 Örneği için XRD Sonuçları

Kapalı İsmi	Yapı	Birim Hücre Parametreleri		
		a	b	c
Ca ₂ B ₆ O ₁₁ .5H ₂ O	Monoklinik	8,93	11,25	6,27

Kolemanit-2 yapısına ait bulgular, grafik programında çizdirildi. $2d\sin\theta = n\lambda$ bağıntısı ile gerekli değerler yerine konularak d (kristalde düzlemler arası) değerleri ve yarı yükseklikteki tam genişlik (FWHM) değerleri hesaplandı. Scherrer denklemi $d_{hkl} = \frac{K \cdot \lambda(\text{Cu})}{(FWHM) \cdot \cos\theta}$ ile K=0,9 ve $\lambda(\text{Cu}) = 0,15406$ nm kabul edilerek tanecik boyutu hesabı yapıldı. Numuneler için sonuçlar Tablo12 ve Tablo13' de verildi.

Tablo 12. Doğal Bor Minerali Kolemanit-2 Örneği için hesaplanan d değerleri

Pik Konumları (2 θ)	d (Å)
15,92	5,57
22,23	4,01
23,22	3,83
27,19	3,27
28,64	3,11
31,98	2,8
35,29	2,54
37,68	2,38
45,28	2,00
46,14	1,96

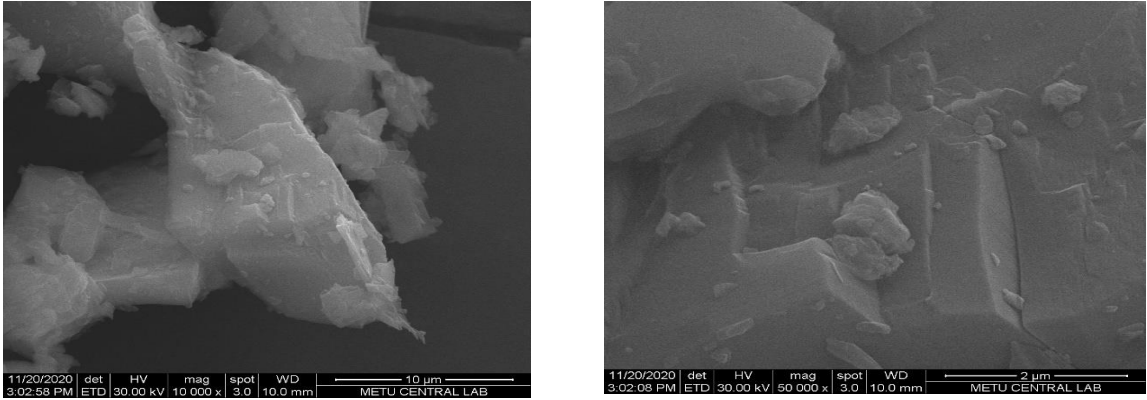
Tablo 13. Doğal Bor Minerali Kolemanit-2 Örneği için Hesaplanan Tanecik Boyut Değerleri

Pik Konumları (2 θ)	FWHM	Tanecik Boyutu (nm)
15,88	0,1706	47,0011
28,64	0,1982	42,3853
31,96	0,1827	46,2629
35,32	0,2569	32,1438
45,23	0,2736	31,2172
46,15	0,22242	37,1565

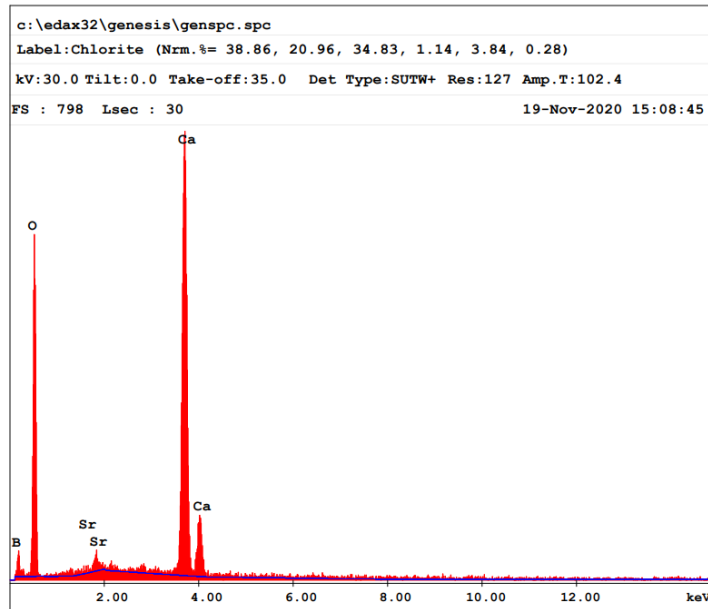
XRD sonuçlarında elde edilen pik açıları ve yarı şiddet genişlik (FWHM) değerleri grafik programı aracılığıyla belirlenmiş ve Scherrer eşitliği kullanılarak kristalit boyutları hesaplandı. Kristalit boyutlarının ortalaması 39,361 nm olarak bulundu.

4.2.2. Doğal Bor Minerali Kolemanit-2 Örneği için SEM Bulguları

Doğal Bor minerallerinden Kolemanit-2 için yapı morfolojisi hakkında bilgi veren SEM görüntüsü Şekil 50'de, elementel analiz bilgisi veren EDX bulguları Şekil 51'de verilmiştir.



Şekil 50. Kolemanit-2 Örneği için SEM Görüntüleri



Şekil 51. Doğal Bor Minerali Kolemanit-2 Örneği için EDX Spektrumu

Elde edilen SEM bulguları yüzey yapısı ve boyutları ile ilgili bilgiler vermesinin yanı sıra, EDX sonuçları incelendiğinde örnekte, %47,26 oranında Bor, %41,02 oranında Oksijen, %0,66 oranında Stronsiyum ve %11,06 oranında Kalsiyum bulunduğunu ifade edilebilir.

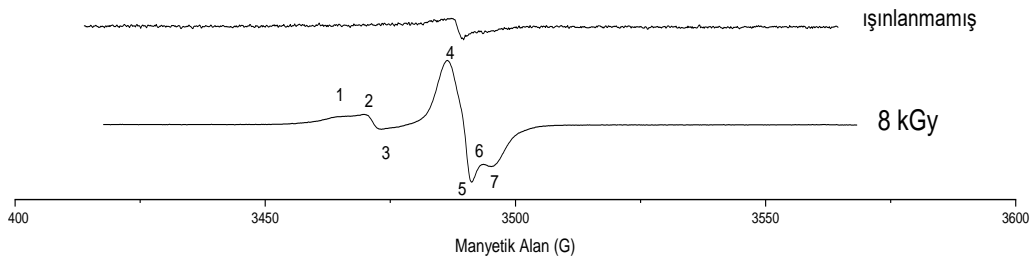
4.2.3. Doğal Bor Minerali Kolemanit-2 Örneği için ESR Bulguları

Tez çalışmasında odak noktası olan doğal Bor minerallerinin dozimetrik özelliklerinin detaylandırılmasında ağırlıklı olarak Elektron Spin Rezonans (ESR) spektroskopisi kullanılmıştır.

Kolemanit-2 örneğine ait optimum deney parametreleri aşağıdaki gibidir.

Merkezi Manyetik Alan	3470 G	Kazanç	$6,32 \times 10^4$
Süpürme Alanı	150 G	Süpürme Zamanı	83,84 ms
Mikrodalga Frekansı	9,77 GHz	Zaman Sabiti	40,96 ms
Mikrodalga Gücü	1 mW	Dönüştürme Zamanı	81,92 ms
Modülasyon Frekansı	100 kHz	Sıcaklık	Oda
Modülasyon Genliği	1 G		

Kolemanit-2 örneğinin ESR spektrumu, Şekil 52'de görüldüğü gibi, 7 adet ESR rezonans pikinden oluşmaktadır ve bu spektrum yaklaşık 150 G manyetik alanına yayılmaktadır. Spektrumda bulunan bu 7 rezonans pikinin g değeri 2,0011'dir. ΔH_{pp} değeri 7,10 G'dir. Hesaplanan bu spektral parametreler ışınlama etkisi ile değişim göstermemektedir.



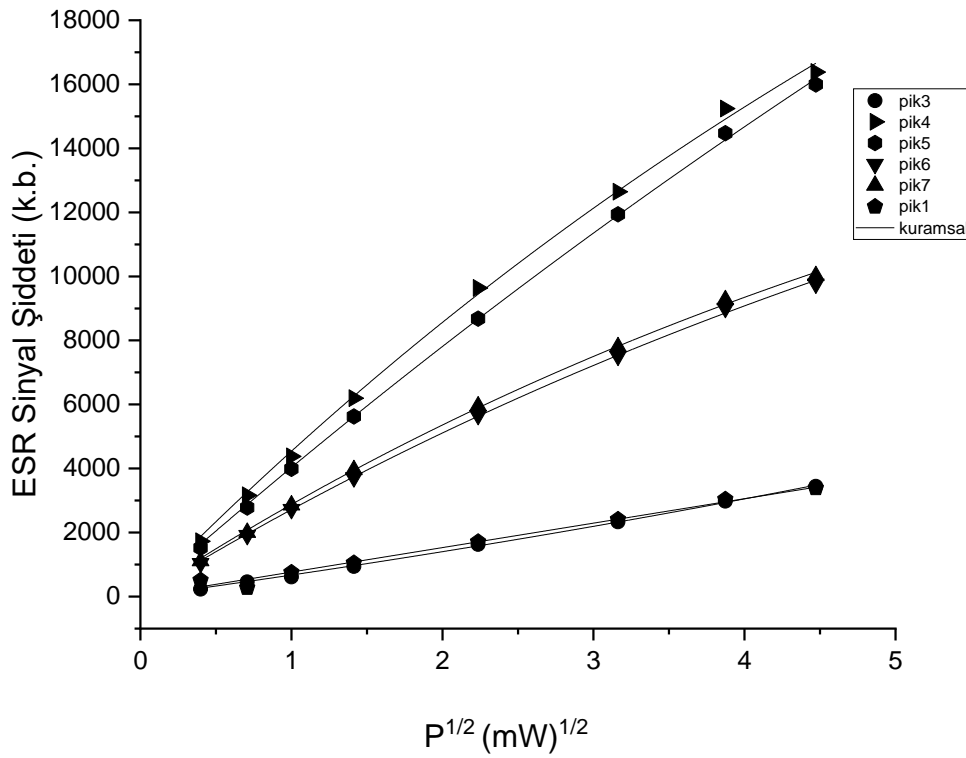
Şekil 52. Işınlanmamış ve Işınlanmış Kolemanit- 2 Örneğinin ESR Spektrumları

Örneklerin ESR spektrumlarının kaydedilmesinden önce deneyde kullanılması gereken optimum deney parametrelerinin belirlenebilmesi için mikrodalga gücü ve modülasyon genliği çalışmaları diğer örnekte olduğu gibi Kolemanit-2'de de yürütülmüştür. Kolemanit-2 örneği için elde edilen Mikrodalga Gücü Doyum

Çalışmaları ve Modülasyon genliği çalışmaları sırasıyla 4.2.3.1. ve 4.2.3.2. kesimlerinde verilmiştir.

4.2.3.1. Doğal Bor Minerali Kolemanit-2 Örneği için Mikrodalga Gücü Doyum Çalışmaları

Doğal Bor Minerali Kolemanit-2 örneği optimum mikrodalga gücü doyum değeri çalışması 0,1-49 mW arasında gerçekleştirilmiştir. Şekil 53'de mikrodalga gücü doyum eğrileri verilmiştir.



Şekil 53. 8 kGy Işınlanmış Kolemanit-2 örneği için Mikrodalga Gücü Doyum Eğrileri

Doğal bor minerali Kolemanit-2 örneği için yürütülen mikrodalga doyum çalışması verileri uygun teorik matematik modellemelere grafik programı aracılığıyla $I = I_0(1 - \exp(-b\sqrt{P}))$ bağıntısında uyarlanmıştır ve bulgular Tablo 14'de gösterilmiştir.

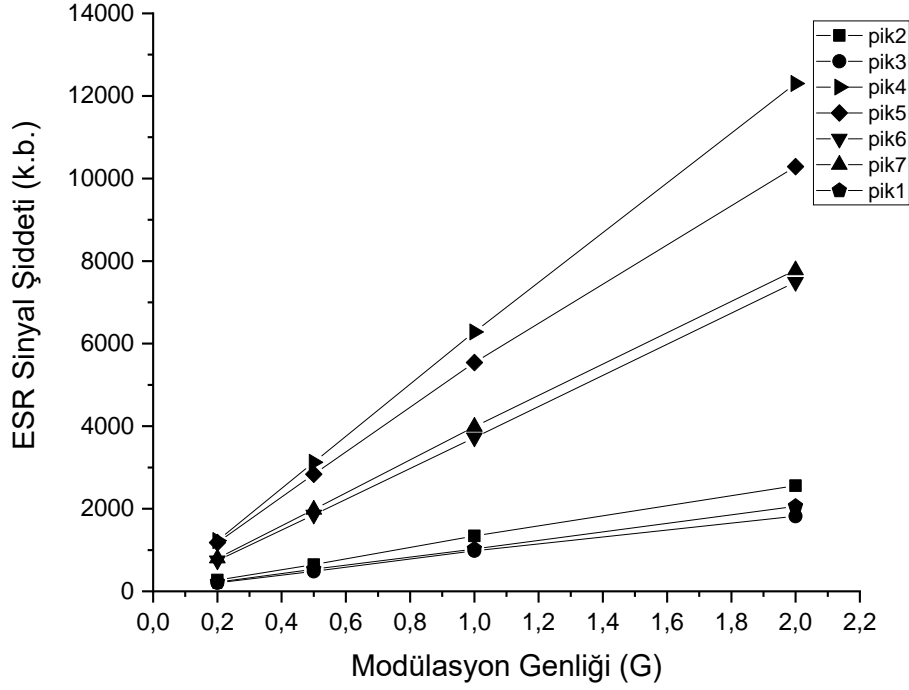
Tablo 14. Doğal Bor Minerali Kolemanit-2 Örneği için Mikrodalga Gücü Doyum Bulguları

	b (mW)^{-1/2}	R²
1.pik	0,0011	0,98
3.pik	0,0810	0,99
4.pik	0,1206	0,99
5.pik	0,0647	0,99
6.pik	0,1262	0,99
7.pik	0,1477	0,99

Kolemanit-2 için mikrodalga doyum çalışması bulguları incelendiğinde, Kolemanit-2 örneğinin ESR rezonans piklerinin birkaçının mikrodalga doyum parametrelerinin farklı olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Buna istinaden, ışınlanma ile Kolemanit-2 örneğinin farklı radikal türlerinin oluşturabildiğini söyleyebilmekteyiz. Mikrodalga doyum verileri değerlendirildiğinde, sürdürülen ESR çalışmaları için optimum mikrodalga güç değeri doyumdan uzakta bir değer olan **1 mW** seçilmiştir.

4.2.3.2. Doğal Bor Minerali Kolemanit-2 Örneği için Modülasyon Genliği Çalışmaları

Doğal Bor minerali Kolemanit-2 örneği için, optimum modülasyon genliği çalışması 0,2 G ile 2 G aralığında yapılmıştır. Modülasyon genliği çalışması Şekil 54'de verilmiştir.



Şekil 54. 8 kGy Işınlanmış Kolumanit-2 örneği için Modülasyon Genliği Eğrileri

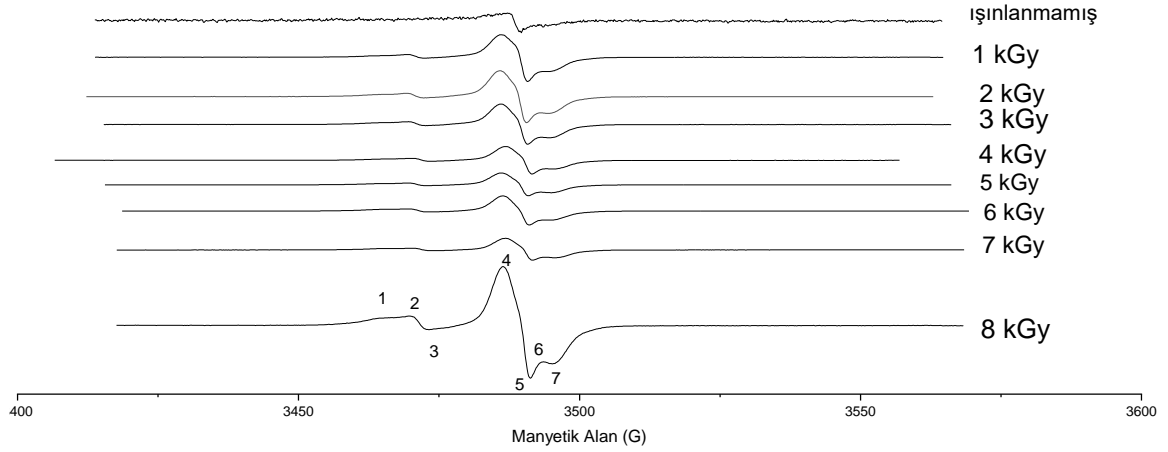
Kolumanit-2 için modülasyon genliği bulguları incelendiğinde, ESR rezonans piklerinde farklı sonuçlara ulaşılmıştır, bu nedenle ışınlanan Kolumanit-2 örneğinde farklı radikal türlerinin oluşabileceğini söylemek mümkündür. Modülasyon genliği bulguları detaylandırılarak, yürütülen bütün ESR çalışmaları için optimum modülasyon genliği değeri **1 G** seçilmiştir.

4.2.3.3. Doğal Bor Minerali Kolumanit-2 Örneği için kGy Mertebesinde Doz-Cevap Çalışmaları

Tez kapsamında dozimetrik özellikleri incelenmek istenen Kolumanit-2 örneğinin cGy ve Gy mertebelerinde ışınlama çalışmaları yapılmamıştır. Bu nedenle bu kesimde Kolumanit-2 örneğinin kGy mertebesindeki ışınlama bulgularına yer verilecektir.

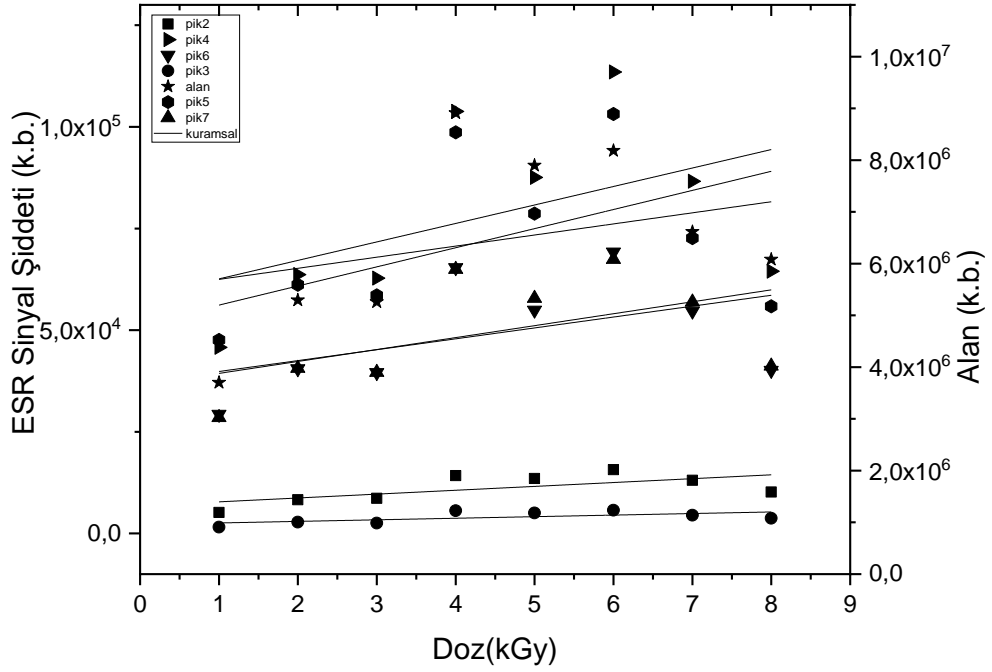
Kolumanit-2 Örneği için, ışınlanmamış ve 1-8 kGy aralığında gama ışınlanmış örnekler için kaydedilen ESR spektrumları Şekil 55'de verilmiştir. 7 rezonans piki için g değerleri sırasıyla, $g_1=2,0156$, $g_2=2,0124$, $g_3=2,0106$, $g_4=2,0031$, $g_5=2,0001$, $g_6=1,9991$, $g_7=1,9981$, $g_{ortapik}$ değeri (4.ve 5. pik) 2,0011'dir. ΔH_{pp}

değeri ise 7,10 G'dır. Yapılan incelemeler Kolemanit-2 örneği için de, spektral parametrelerin ışınlama dozu ile değişim göstermediği sonucuna ulaşılmıştır.

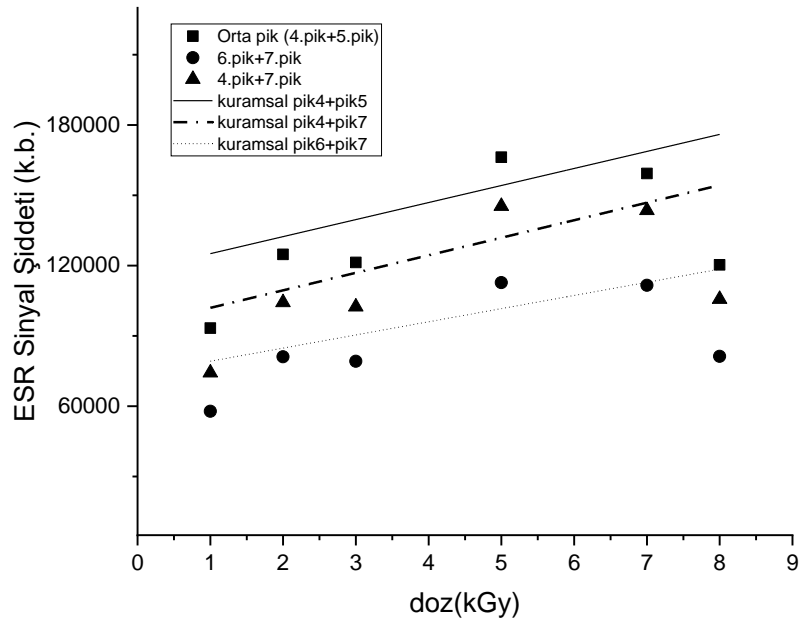


Şekil 55. Işınlanmamış ve kGy mertebesinde ışınlanmış Kolemanit- 2 Örneği için ESR Spektrumları

Işınlanmamış ve farklı kGy değerlerinde ışınlanmış Kolemanit-2 örneğinin doz-cevap eğrileri, örneğin farklı rezonans pikleri için Şekil 56'da verilmiştir. Şekilde gösterilen alan verileri, ışınlanan örneklerin spektrumlarının iki kez integrali alınarak oluşturulmuştur. Işınlanan örneğin bazı rezonans pik şiddetlerinin toplamının verildiği, bu şekilde sinyal-gürültü oranının artmasının amaçlandığı doz-cevap eğrileri ise Şekil 57'de gösterilmiştir.



Şekil 56. kGy mertebesinde ışınlanmış Kolemanit-2 için Doz-Cevap Eğrileri



Şekil 57. kGy mertebesinde ışınlanmış Kolemanit-2 için Doz-Cevap Eğrileri

Doğal Bor minerali Kolemanit-2 örneği için yürütülen doz-cevap çalışması verileri uygun birçok matematiksel modellemelere uyarlama yapılmış ancak deneysel bulgular, güvenilirlik oranı çok yüksek olmasa da, en çok lineer modellemeye

uyum sağlamıştır. Grafik programında $I = a + b * D$ bağıntısı ile uyarlanmıştır ve örneğe ait farklı rezonans pikleri için elde edilen parametre sonuçları Tablo 15'de sunulmuştur.

Tablo 15. Doğal Bor Minerali Kolemanit-2 Örneğinin kGy mertebesindeki ışınlamaları için edilen Doz-Cevap Bulguları ($I = a + b * D$)

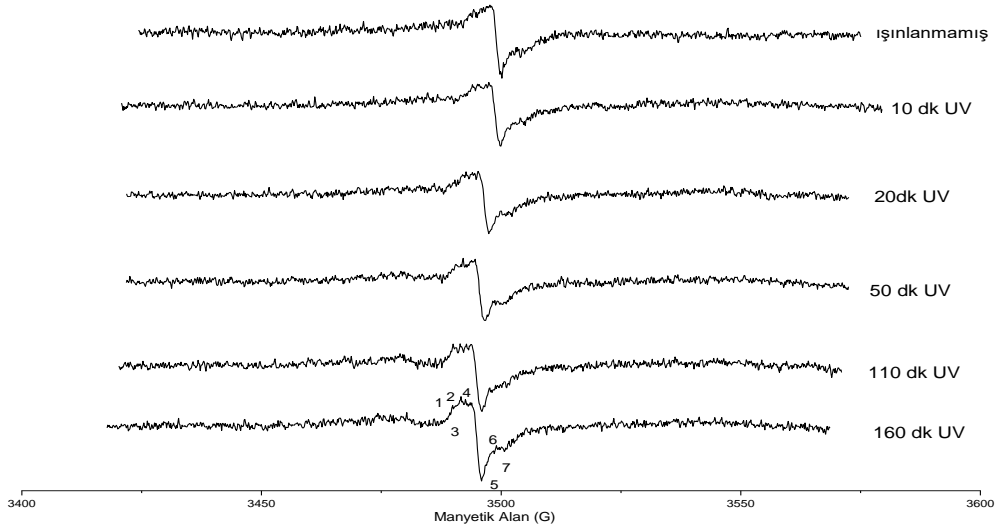
	a(Gy)	b(1/Gy)	R²
2.pik	6826,8	949,8	0,41
3.pik	2196, 7	386,5	0,38
4.pik	58069,8	4544,2	0,23
5.pik	59762,3	2727,9	0,10
6.pik	37157,7	2678,3	0,21
7.pik	36435,2	2934,7	0,26
Alan	4828875,4	369413,4	0,26
(4. pik+5. pik)	117832,1	7272,2	0,17
(6.pik+7.pik)	73592,9	5612,9	0,24
(4.pik+7.pik)	94505,1	7478,8	0,24

Kolemanit-2 için kGy ışınlama sonrasında doz-cevap çalışması bulguları incelendiğinde, örneğin ESR rezonans piklerinin Tablo 15'de belirtildiği gibi şiddet değerlerinin düşük olmakla birlikte genel olarak lineer doz cevap eğrisine uyumlu olduğu görülmüştür. Sinyal/gürültü oranının fazla olması nedeniyle pikler toplanarak doz-cevap eğrileri Şekil 57'de belirtildiği gibi oluşturulmuştur ve toplam pikler lineer doz cevap eğrisi sonucunu desteklemektedir.

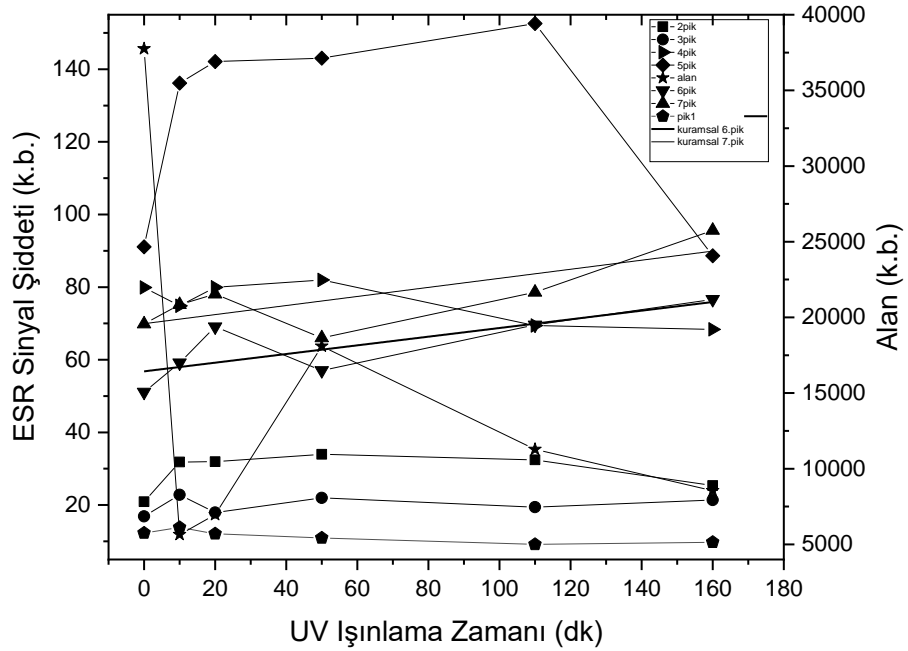
Kolemanit-2 örneğinin rezonans piklerinden ışınlama dozuna bağlılığı yüksek olan, lineer doz cevap bilgisi içeren rezonans piklerinin dozimetrik ölçümlerde kullanılabileceği sonucuna varılmıştır. Kolemanit-2 örneği için Tablo 15'de yer alan veriler değerlendirildiğinde pik4 ve orta pik (pik4 + pik7)'nin dozimetrik ölçümlerde kullanılabilir.

4.2.3.4. Doğal Bor Minerali Kolemanit-2 Örneği için UV Işınlama Çalışmaları

Tez kapsamında; dozimetrik özellikleri incelenen doğal Bor minerallerinden Kolemanit-2 örneği için de gerçekleştirilen kGy mertebelerindeki çalışmalara ek olarak, UV ışınlama çalışmaları da çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Şekil 58'de Işınlanmamış ve UV ışınlanmış Kolemanit-2 örneğine ait ESR spektrumları verilmiştir.



Şekil 58. Işınlanmamış ve UV Işınlanmış Kolemanit -2 Örneği için ESR Spektrumları

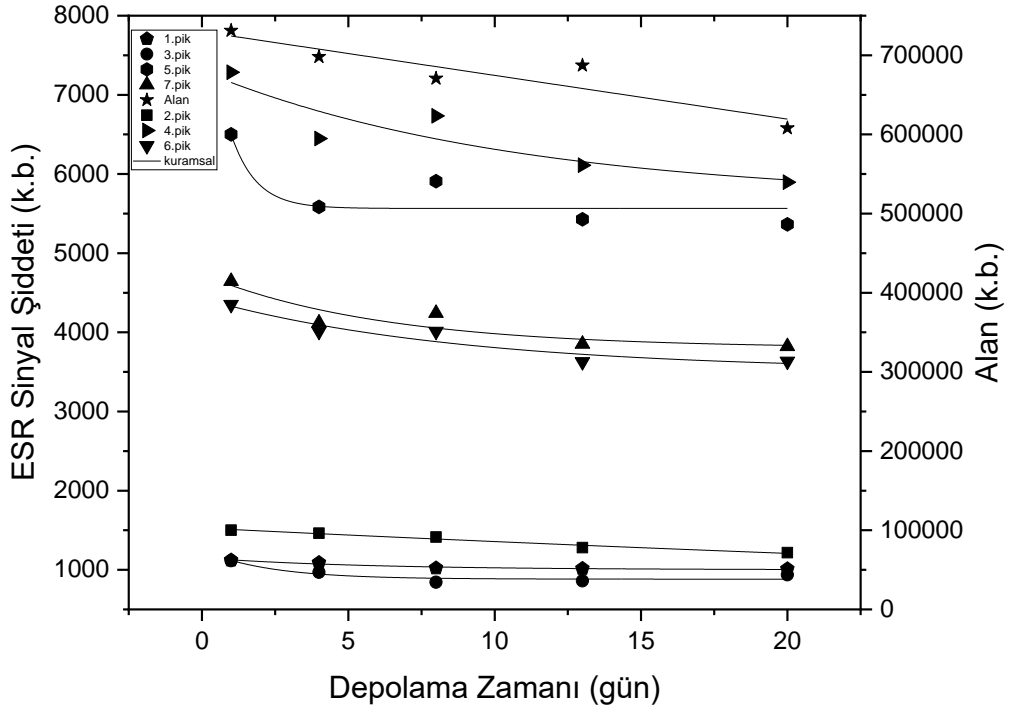


Şekil 59. UV ışınlanmış Kolemanit -2 Doz-Cevap Bulguları

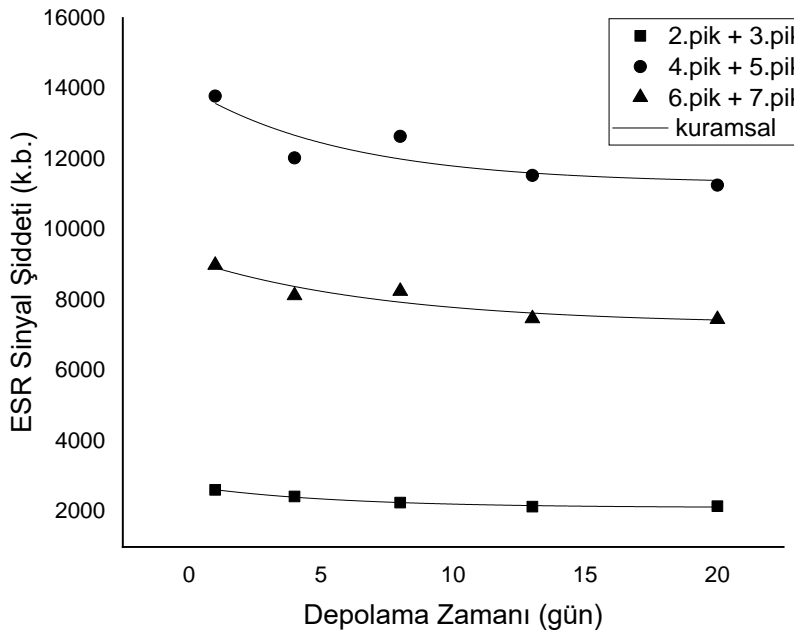
UV çalışmaları sonucunda ışınlanmamış ve 5 farklı UV ışınlama maruziyet süresi (10 dk – 160 dk) için kaydedilmiş Kolemanit-2 Örneklerinin ESR spektrumları karşılaştırıldığında spektrumlar arasında anlamlı farkların oluşmadığı görülmüştür. Şekil 59'da da belirtildiği gibi, doz-cevap bulgularında UV ışınlama etkisi ile Kolemanit-2 örneğinde anlamlı değişme olmamıştır. Bazı pikler için matematiksel modellemeye uyarlama yapılarak lineer ($I = a + b * D$) uyarlama çalışması gerçekleştirilmiş, 6 nolu ve 7 nolu rezonans pikleri için b değerinin 0,12 ($R^2 = 0,63$) olduğu hesaplanmıştır. UV ışınlamasının Kolemanit-2 örneği için yeni hasar merkezlerinin oluşumuna veya farklı radikal türlerinin oluşumuna neden olmadığı sonucuna ulaşılmıştır. Bu sebeple, Kolemanit-2 örneğinin UV ışınlamaları için uygun bir dozimetre malzemesi olmadığını söylemek mümkündür.

4.2.3.5. Doğal Bor Minerali Kolemanit-2 Örneği için Zaman İncelemesi Çalışmaları

Tez kapsamında; 8 kGy gama ışınlanmış Kolemanit-2 örneği için de, örneğin oda sıcaklığındaki depolama zamanı ile rezonans pik şiddetlerinde (veya spektrum alanlarında) oluşabilecek değişimler (sönüm) irdelenmiş, bu şekilde ışınlanan Kolemanit-2 örneğinin kararlılığı hakkında bilgi alınmıştır. İyi dozimetrik özellik gösteren malzemelerin rezonans pik şiddetlerinin ışınlama dozu ile lineer ve yüksek eğime sahip olması gerektiği, benzer şekilde örneğin rezonans piklerinin de zaman içinde değişmemesi gerektiği bilinmektedir. Farklı değerlerde gama ışınlanmış Kolemanit-2 örneğinin, yaklaşık bir aylık depolama zamanı içinde rezonans pik şiddetlerinin zamanla değişimleri Şekil 60'da verilmiştir. Sinyal/gürültü oranının etkisinin ayırt edilmesi için benzer şekilde, yaklaşık bir aylık depolama zamanı içinde bazı rezonans pik şiddetlerinin toplamının zamanla değişimleri Şekil 61'de verilmiştir.



Şekil 60. Doğal Bor Minerali Kolemanit-2 Örneği için Zaman İncelemesi Bulguları



Şekil 61. Doğal Bor Minerali Kolemanit-2 Örneği için Zaman İncelemesi Bulguları

Doğal bor minerali Kolemanit-2 örneği için yürütülen zaman incelemesi verileri uygun teorik matematik modellemelere grafik programı aracılığıyla uyarlanmıştır. Uyarlanan bağıntı ($I = I_0 (1 - e^{-kt})$) olup sonuçlar Tablo 16'da verilmiştir. Tablo 16'da örnekte oluşan radikallere ait sönüm sabiti, ışınlanmama öncesi şiddet değeri, ışlandıktan sonra azalmanın eğimi ve güvenilirlik değerleri verilmiştir.

Tablo 16. Doğal Bor Minerali Kolemanit-2 Örneği için Zaman İncelemesi Bulguları

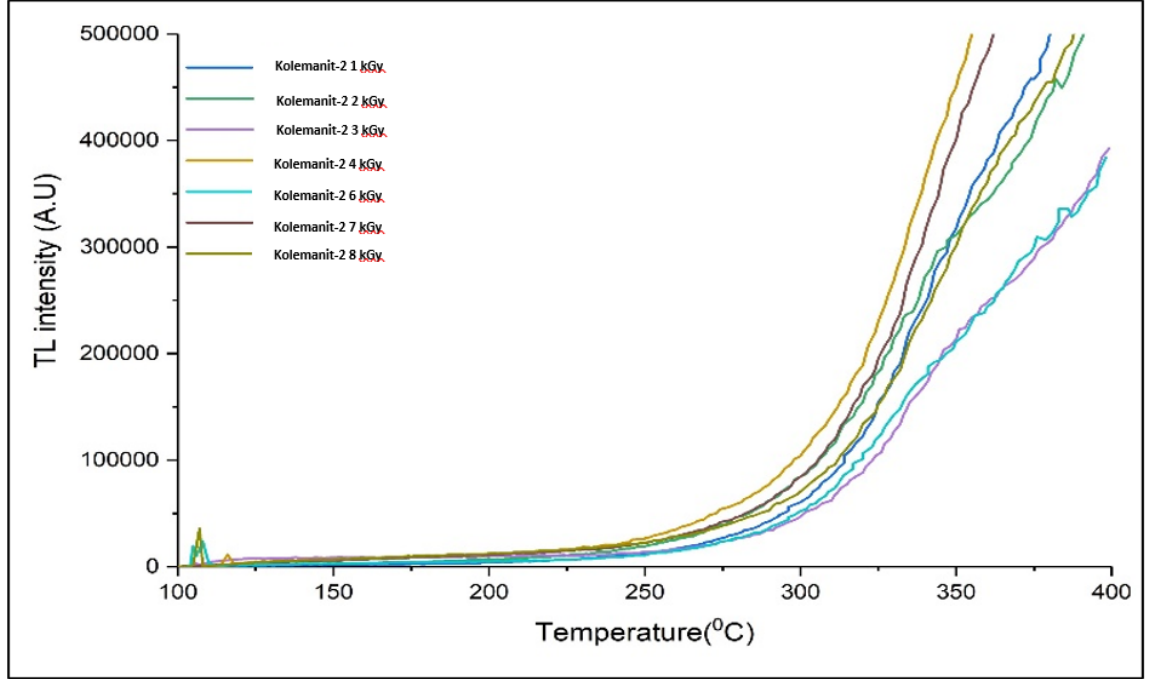
	k (gün⁻¹)	I₀ (k.b)	A1(k.b)	R²
1.pik	0,18	1001,1	118,9	0,94
2.pik	0,01	155,3	844,1	0,97
3.pik	0,43	882,3	205,3	0,85
4.pik	0,09	5677,9	1460,9	0,81
5.pik	1,17	5565,2	1140,8	0,79
6.pik	0,11	3511,9	734,7	0,90
7.pik	0,16	3799,1	803,3	0,84
Alan	0,01	4390	1652	0,83
2.pik+3.pik	0,18	2114,8	489,5	0,98
4.pik+5.pik	0,16	11303,9	2418,9	0,78
6.pik+7.pik	0,13	7309,9	1565,6	0,88

Kolemanit-2 için oda sıcaklığı şartlarında gerçekleştirilen zaman incelemesi çalışma bulguları incelendiğinde, bir ay süresince %20 oranında sinyal şiddetlerinde sönüm gerçekleşmiştir ve örneğin 5.rezonans pikinin sönüm oranının yüksek olduğu, 2.rezonans pikinin sönüm oranının ise düşük olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Bu sebeple, ışınlama etkisi ile oluşan radikallerin kararlılığının yüksek olması Kolemanit-2 örneği için 2 numaralı rezonans pikinin dozimetrik çalışmalarda kullanılmasının uygun olduğunu söylemek mümkündür.

UV ışınlanmış Kolemanit-2 için oda sıcaklığında gerçekleşen zaman incelemesi çalışmasında ise anlamlı bir değişiklik olmadığı sonucuna ulaşılmıştır.

4.2.4. Doğal Bor Minerali Kolemanit-2 Örneği için TL Bulguları

Doğal Bor Minerali Kolemanit-2 Örneği için, 5°C/s ısıtma hızında 100-400°C sıcaklık aralığında **termolüminesans** analiz çalışması Şekil 62'de gösterilmiştir.



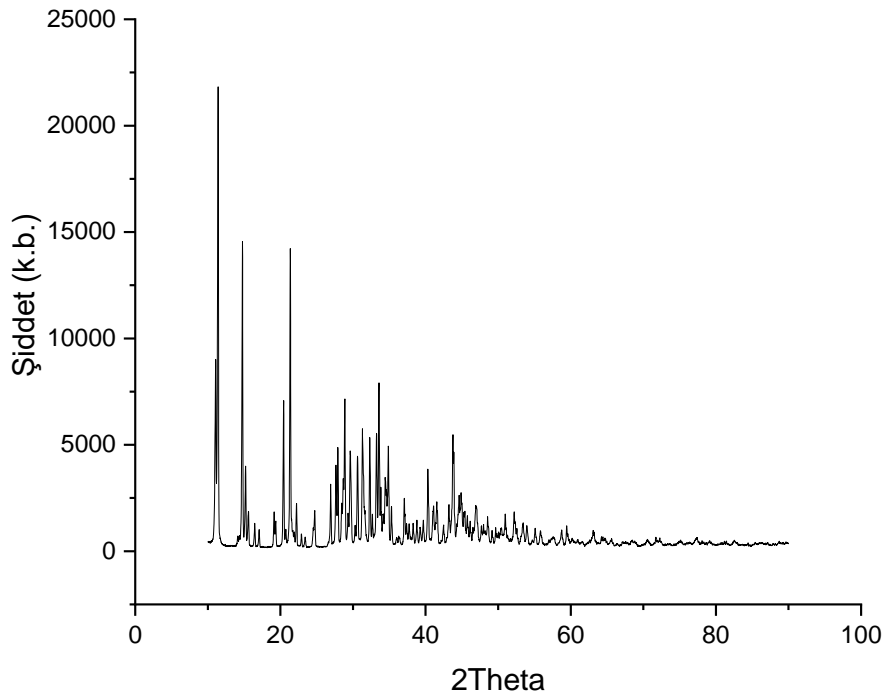
Şekil 62. Kolemanit -2 Örneği için TL Çalışması

Kolemanit-2 örneği, 100-400°C sıcaklık aralığında TL tekniği kullanılarak incelendiğinde, kGy mertebesinde ışınlanmış Kolemanit-2 örneği için elde edilen TL bulguları incelendiğinde, ışınlama etkisinin örneğin TL sonuçlarında anlamlı bir değişikliğe sebep olmadığı görülmüştür. İncelemeler esnasında TL deneyleri farklı ısıtma hızları için de yürütülmüş ve benzer bulgulara ulaşılmıştır, ısıtma eğrisi ise elde edilememiştir. Bu nedenlerle Kolemanit-2 örneği için yapılan dozimetrik çalışmalarda TL analizinin, beklenildiği gibi, tamamlayıcı bilgi vermediği görülmüştür.

4.3. Doğal Bor Minerali Üleksit Örneği İçin Elde Edilen Bulgular

4.3.1. Doğal Bor Minerali Üleksit Örneği İçin XRD Bulguları

Doğal Bor minerali Üleksit örneği için, X-ışını kristalografisi (XRD) kullanılarak kaydedilmiş XRD spektrumları Şekil 63'de verilmiştir. Spektrum Dicvol04 programı ile analiz edilerek, mineralin yapısına ait Tablo 17'de gösterilen a, b ve c parametrelerine ulaşılmıştır.



Şekil 63. Üleksit doğal Bor minerali İçin XRD Spektrumu

Tablo 17. Üleksit Örneği İçin XRD Sonuçları

Kapalı İsmi	Yapı	Birim Hücre Parametreleri		
		a	b	c
NaCaB ₅ O ₉ .8H ₂ O	Triklinik	8,81	12,88	6,68

Elde edilen bulgular grafik programı kullanılarak çizdirildi. Bragg bağıntısı olan $2d\sin\theta = n\lambda$ ifadesi kullanılarak d (kristalde düzlemler arası) değerleri ve yarı yükseklikteki tam genişlik (FWHM) değerleri hesaplandı. K=0,9 ve

$\lambda(\text{Cu}) = 0,15406$ nm kabul edilerek, Scherrer eşitliği $d_{hkl} = \frac{K \cdot \lambda(\text{Cu})}{(FWHM) \cdot \cos\theta}$ ile tanecik boyutu hesabı yapıldı ve ulaşılan sonuçlar Tablo 18 ve Tablo 19'da verildi.

Tablo 18. Doğal Bor minerali Üleksit Örneği için hesaplanan d değerleri

Pik Konumları (2 θ)	d (Å)
7,18	12,30
11,10	7,97
11,44	7,73
14,78	5,99
15,24	5,81
15,64	5,66
16,46	5,38
17,06	5,19
19,18	4,62
20,46	4,34
21,38	4,15
22,26	3,99
22,92	3,87
23,44	3,79
24,80	3,59
26,98	3,30
27,94	3,19
28,92	3,09
29,70	3,01
30,66	2,91
31,38	2,85
32,36	2,76
33,30	2,69
33,64	2,66
34,56	2,59
34,94	2,57
37,14	2,42
37,46	2,40
38,36	2,35

38,90	2,31
39,76	2,27
40,38	2,23
41,10	2,19
41,60	2,17
42,52	2,12
43,28	2,09
43,84	2,06
44,68	2,03
47,06	1,93

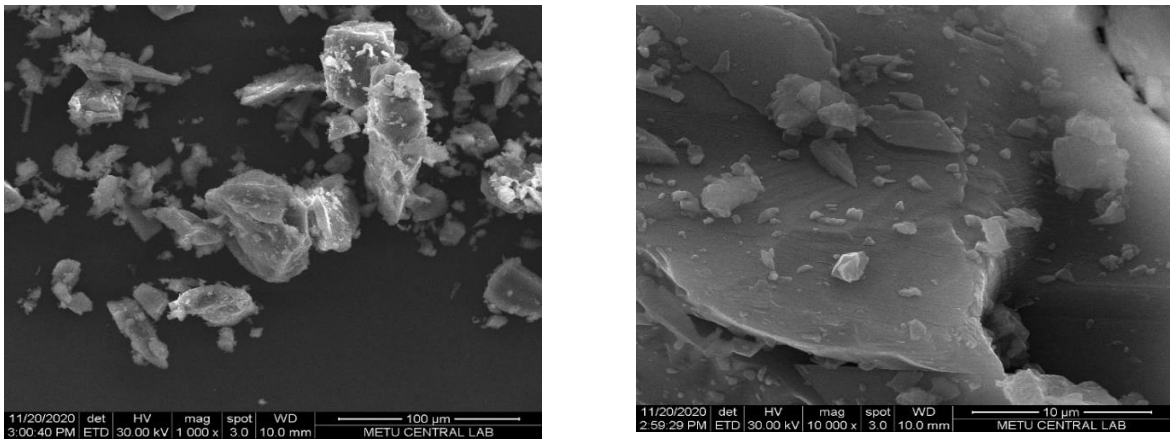
Tablo 19. Doğal Bor Minerali Üleksit Örneği İçin Hesaplanan Tanecik Boyut Değerleri

Pik Konumları (2θ)	FWHM	Tanecik Boyutu (nm)
7,186	0,152	52,316
11,103	0,226	35,243
11,426	0,155	51,746
14,779	0,156	51,529
15,214	0,152	52,767
20,459	0,166	48,662
21,388	0,176	45,865
22,257	0,132	61,435
26,964	0,147	55,649
27,724	0,172	47,684
27,962	0,151	54,271
27,728	0,155	52,849
28,891	0,266	30,845
29,698	0,243	33,859
30,675	0,185	44,549
31,404	0,286	28,937
32,372	0,174	47,777
33,298	0,187	44,532
33,643	0,194	42,931
34,557	0,984	8,458
34,939	0,139	60,198
37,151	0,179	46,633
40,385	0,187	45,262
41,404	0,688	12,335
43,273	0,233	36,650
43,863	0,262	32,638
44,927	1,438	5,978
47,033	0,366	23,615

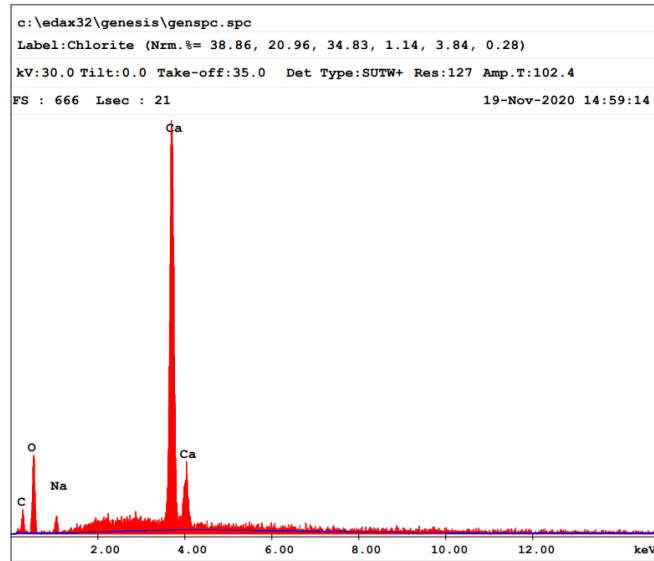
XRD sonuçlarında elde edilen pik açıları ve yarı şiddet genişlik (FWHM) değerleri grafik programı ile belirlenerek ve Scherrer eşitliği kullanılarak kristalit boyutları hesaplanmıştır. Kristalit boyutlarının ortalaması **41,262 nm** olarak bulunmuştur.

4.3.2. Doğal Bor Minerali Üleksit Örneği İçin SEM Elde Edilen Bulgular

Doğal Bor minerallerinden Üleksit örneğinin yapı tayini hakkında bilgi veren SEM görüntüsü Şekil 64'de, elementel analiz bilgisi veren EDX bulguları ise Şekil 65'de verilmiştir.



Şekil 64. Üleksit Örneği İçin SEM Görüntüleri



Şekil 65. Üleksit Örneği İçin EDX Spektrumu

Elde edilen SEM bulguları örneğin yüzey tayini ve boyutları ile ilgili bilgiler vermiştir, EDX analiz sonuçları irdelendiğinde örnek yapısında %13,96 oranında Karbon, %46,79 oranında Oksijen, %3,79 oranında Sodyum ve %35,46 oranında Kalsiyum elementi sonucuna ulaşılmıştır.

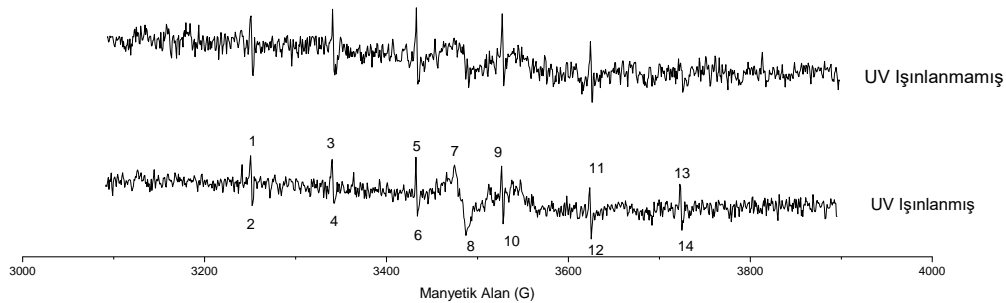
4.3.3. Doğal Bor Minerali Üleksit Örneği İçin ESR Bulguları

Tezin amacı olan doğal Bor minerallerinin dozimetrik özelliklerinin araştırılmasında ağırlıklı olarak Elektron Spin Rezonans (ESR) spektroskopisi kullanılmıştır.

Üleksit örneği için optimum deney parametreleri aşağıda verilmiştir.

Merkezi Manyetik Alan	3400-3500 G	Kazanç	$6,32 \times 10^4$
Süpürme Alanı	800-1200 G	Süpürme Zamanı	83,84 ms
Mikrodalga Frekansı	9,7-9,8 GHz	Zaman Sabiti	40,96 ms
Mikrodalga Gücü	1-5 mW	Dönüştürme Zamanı	81,92 ms
Modülasyon Frekansı	100 kHz	Sıcaklık	Oda
Modülasyon Genliği	1 G		

Üleksit örneğinin ESR spektrumu, Şekil 66'da görüldüğü gibi, 14 adet ESR rezonans pikinden oluşmaktadır ve bu spektrum yaklaşık 500 G manyetik alanına yayılmaktadır. Spektrumda bulunan bu 14 rezonans pikinin g değeri 2,0016'dır. ΔH_{pp} 6,55 G'dir. Hesaplanan bu spektral parametreler ışınlama etkisi ile değişim göstermemektedir. Rezonans pikleri sinyal/gürültü sebebiyle zor ayırt edilmiştir.



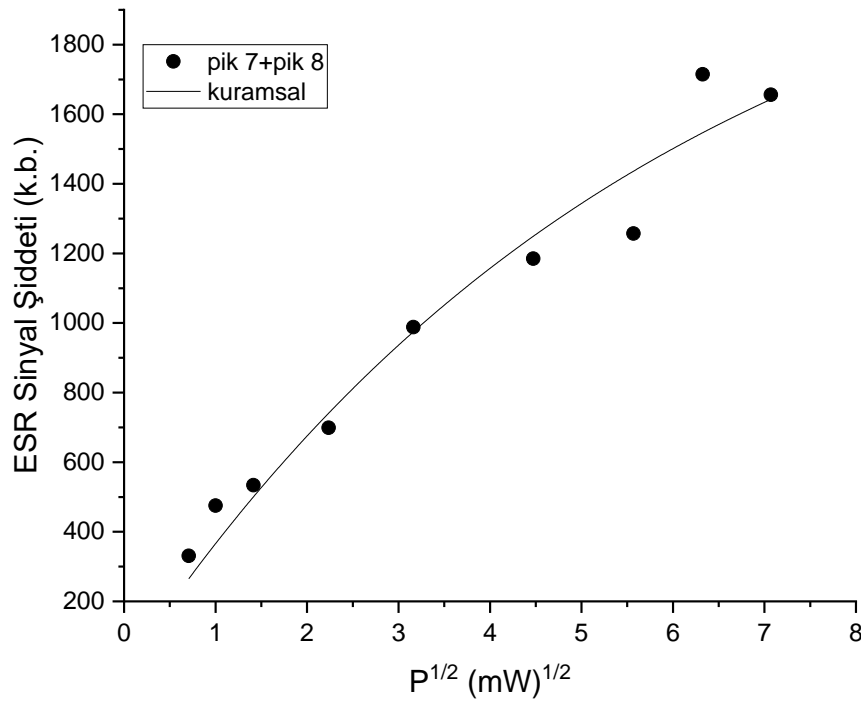
Şekil 66. Işınlanmamış ve UV – Işınlanmış Üleksit Örneği için ESR Spektrumları

Örneklerin ESR spektrumlarının kaydedilmesinden önce deneyde kullanılması gereken optimum deney parametrelerinin belirlenebilmesi için diğer numunelerde

olduğu gibi mikrodalga g¼c¼ ve mod¼lasyon genliği çalışmaları y¼r¼t¼lm¼řt¼r. Üleksit ¼rneđi için de elde edilen Mikrodalga G¼c¼ Doyum alışmaları ve Mod¼lasyon genliği çalışmaları sırasıyla 4.3.3.1. ve 4.3.3.2. kesimlerinde verilmiştir.

4.3.3.1. Doğal Bor Minerali Üleksit ¼rneđi için Mikrodalga G¼c¼ Doyum alışmaları

Doğal Bor minerali Üleksit için, optimum mikrodalga g¼c¼ doyum çalışmaları 0,1 mW ile 49 mW aralığında y¼r¼t¼lm¼řt¼r ve şekil 67'de g¼sterilmiřtir. G¼ çalışması sinyal/g¼r¼lt¼ oranı sebebiyle pik7+pik8 için yapılmıştır.



şekil 67. 8 kGy Işınlanmış Üleksit ¼rneđi için Mikrodalga G¼c¼ Doyum Eğrileri

Doğal Bor minerali Üleksit ¼rneđi için y¼r¼t¼len mikrodalga doyum çalışması lineer olmayan modellere grafik programı ile uyarlanmıştır, $I = I_0(1 - \exp(-b\sqrt{P}))$ bağıntısı ile uyarlanma sonuçları Tablo 20'de sunulmuştur.

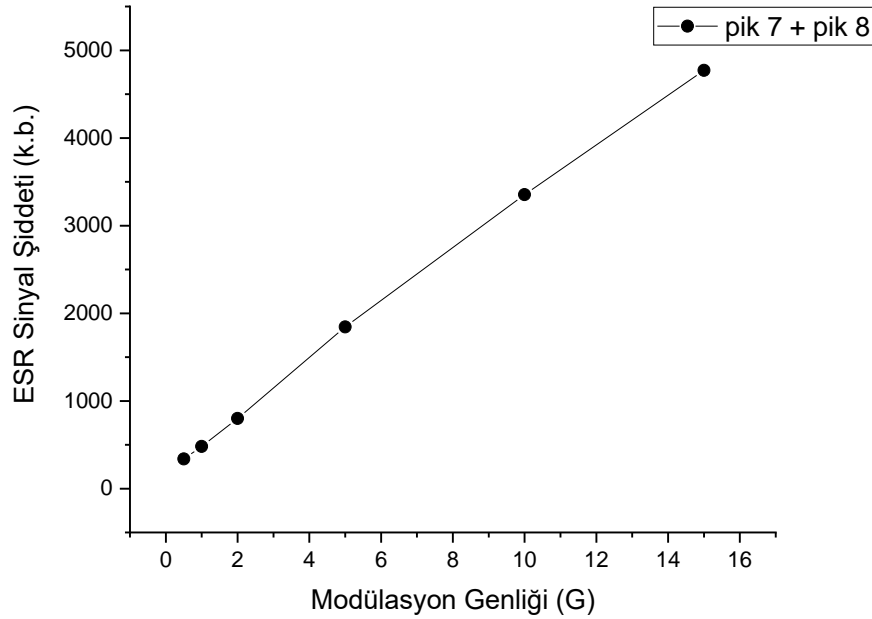
Tablo 20. Doğal Bor Minerali Üleksit Örneği İçin Mikrodalga Gücü Doyum Bulguları

	b (mW)^{-1/2}	R²
7.pik +8.pik	0,17	0,95

Üleksit için mikrodalga doyum çalışması bulguları incelendiğinde, örneğin ESR rezonans piki için farklı mikrodalga doyum parametreleri elde edilmiştir. Bu sonuç ile ışınlanan Üleksit’de farklı radikal türlerinin oluşabileceğini göstermektedir. Sinyal/ gürültü oranını artırmak amacıyla sebebiyle pik7+pik8 değeri referans alınmıştır. Mikrodalga gücü doyum bulguları ile, yürütülen bütün ESR çalışmaları için optimum mikrodalga güç değeri doyumdan uzakta bir değer olan **1 mW** seçilmiştir.

4.3.3.2. Doğal Bor Minerali Üleksit Örneği İçin Modülasyon Genliği Çalışmaları

Doğal Bor minerali Üleksit örneği için; 0,2 G – 2 G aralığında optimum modülasyon genliği çalışması yürütülmüştür ve pik7+pik8 için modülasyon genliği çalışma verileri Şekil 68’de görülmektedir.



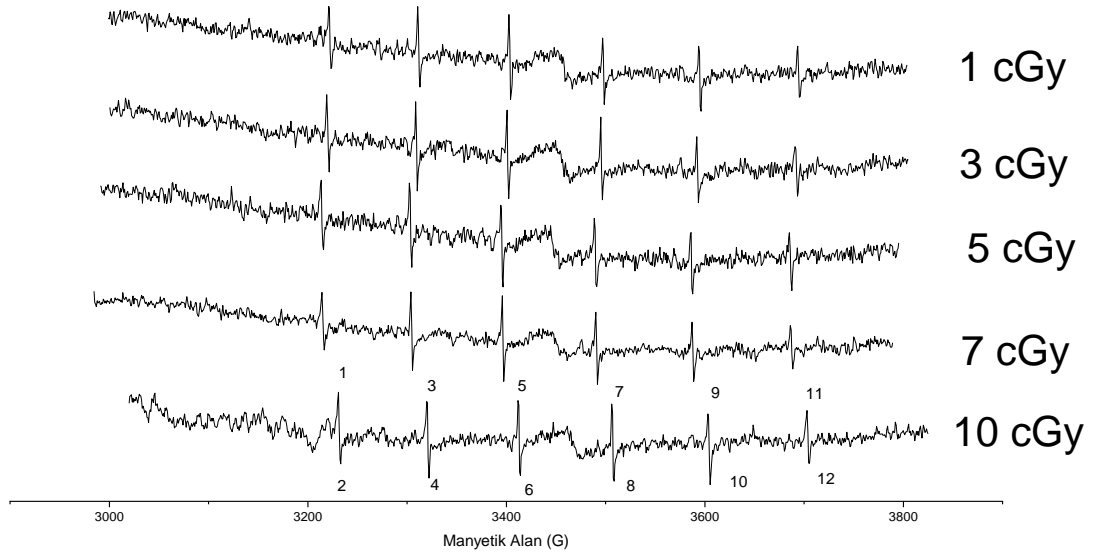
Şekil 68. 8 kGy Işınlanmış Üleksit Örneği için Modülasyon Genliği Eğrisi

Üleksit için modülasyon genliği bulguları incelendiğinde, örneğin ESR rezonans piki için farklı modülasyon genliği verileri elde edilmiştir. Sinyal/gürültü oranını artırmak sebebiyle pik7+pik8 referans değer olarak alınmıştır. Bu sonuç, ışınlanan Üleksit’de farklı radikal türlerinin oluşabileceğini doğrulamaktadır. Modülasyon genliği bulguları incelendiğinde, yürütülen bütün ESR çalışmaları için optimum modülasyon genliği değeri **1 G** seçilmiştir.

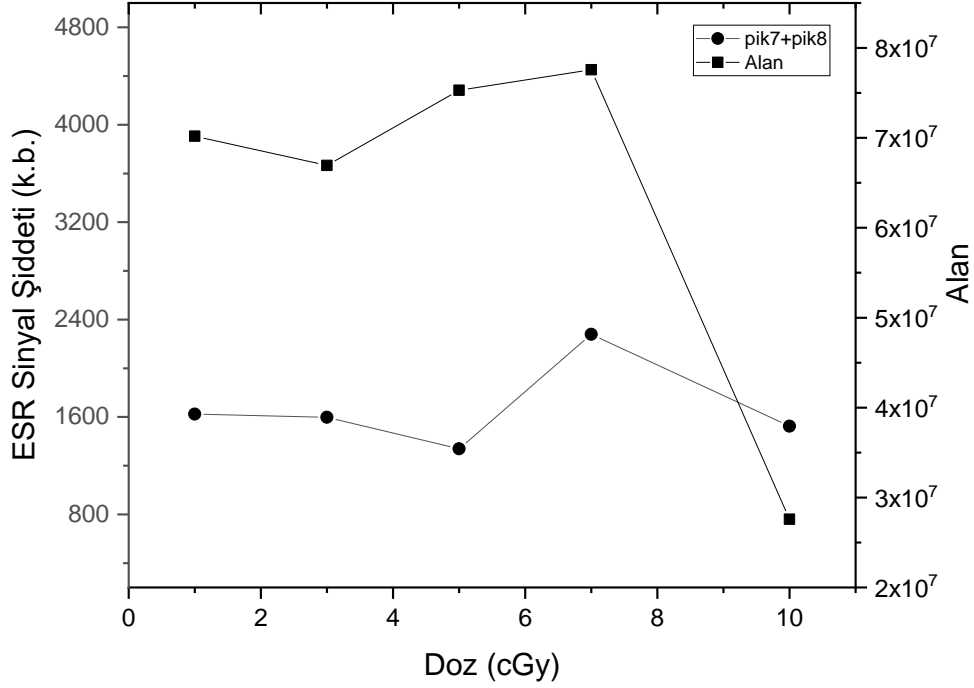
4.3.3.3. Doğal Bor Minerali Üleksit Örneği İçin Doz-Cevap Çalışmaları

4.3.3.3.1. Doğal Bor Minerali Üleksit Örneği İçin cGy Mertebesinde Doz-Cevap Çalışmaları

Üleksit Örneği için, 1-10 cGy aralığında ışınlama sonucu elde edilmiş ESR spektrumları Şekil 69’da gösterilmiştir. Üleksit örneği 12 adet rezonans pikine sahiptir, 800 G tarama alanında g değeri 2,0087 ve ortalama ΔH_{pp} değeri 11,78 G’dir. ESR spektrumları ışınlamadan sonra mümkün olduğunca kısa sürede kaydedilmiştir.



Şekil 69. cGy mertebesinde ışınlanmış Üleksit Örneği için ESR Spektrumları

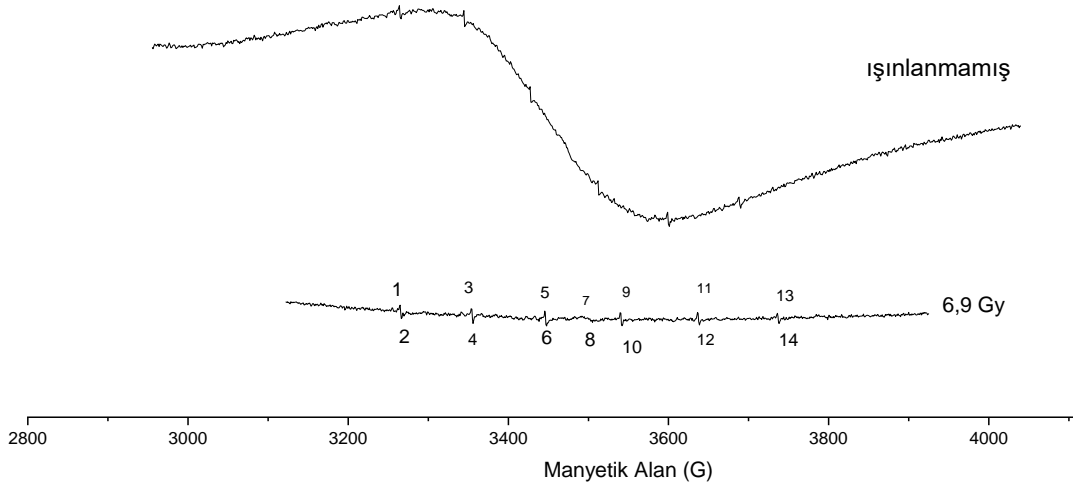


Şekil 70. Üleksit Örneği İçin Doz-Cevap Verileri

Üleksit Örneğinin cGy mertebesindeki ışınlamaları için elde edilen doz-cevap bulguları Şekil 70'de verilmiştir. Bulgular incelendiğinde, 6 MeV enerji ile hızlandırıcı kullanılarak cGy mertebesinde ışınlanmış Üleksit örneğinin ESR sinyal şiddetlerinde anlamlı bir değişiklik gözlenmemiştir. Bu sebeple, Üleksit doğal Bor mineralinin cGy mertebesindeki ışınlamalar için uygun dozimetrik özellik göstermediği şeklinde yorumlanabilir.

4.3.3.3.2. Doğal Bor Minerali Üleksit Örneği İçin Gy Mertebesinde Doz-Cevap Çalışmaları

Üleksit Örneği için, Gy mertebesinde doz-cevap çalışması Şekil 71'de gösterilmektedir. Tüm örnekler için 2,2 Gy, 4,4 Gy ve 6,9 Gy mertebesinde ışınlama yapılmıştır ancak sadece 6.9 Gy çalışması verilmiştir. Spektrumlar yaklaşık 1200 G manyetik alanına yayılmaktadır ve spektrum incelendiğinde 12 adet rezonans piki için g değeri 2,0096 ve $\Delta H_{pp} = 5$ G, $A_{ort} = 88$ G olarak belirlenmiştir.

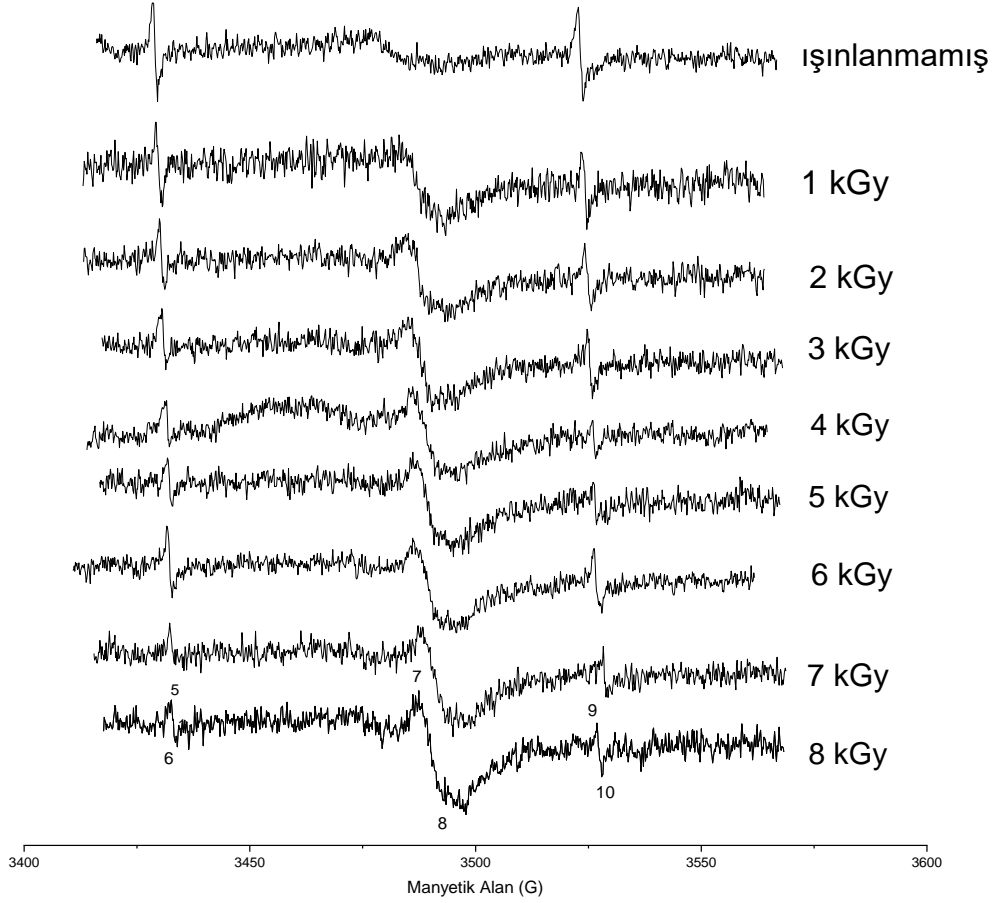


Şekil 71. Işınlanmamış ve 6.9 Gy mertebesinde ışınlanmış Üleksit Örneği için ESR Spektrumları

Elde edilen bulgular ile, Gy mertebesindeki ışınlamaların örneğin ESR spektrumunda anlamlı bir şiddet değişimine neden olmadığını gösterdiğinden, Üleksit örneğinin Gy mertebesi için uygun dozimetrik malzeme olmadığı olarak değerlendirilebilir.

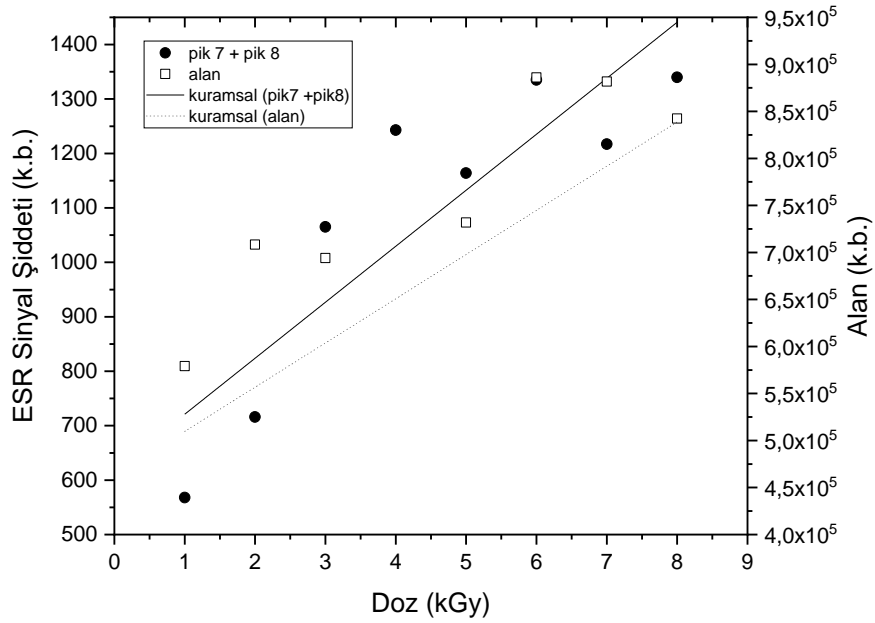
4.3.3.3. Doğal Bor Minerali Üleksit Örneği İçin kGy Mertebesinde Doz-Cevap Çalışmaları

Üleksit örneği için, ışınlanmamış ve 1-8 kGy aralığında gama ışınlanmış örnekler için kaydedilen ESR spektrumları Şekil 72'de verilmiştir. 14 rezonans piki için g değerleri sırasıyla, $g_1=2,0353$, $g_2=2,0347$, $g_3=2,0201$, $g_4=2,0199$, $g_5=2,0149$, $g_6=2,0147$, $g_7=2,0032$, $g_8= 2,0006$, $g_9=1,9910$, $g_{10}=1,9906$, $g_{11}=1,9808$, $g_{12}=1,9801$, $g_{13}=1,9738$ ve $g_{14}= 1,9721$ 'dir. $g_{ortapik}$ değeri (7. ve 8. pik) 2,0016'dir. ΔH_{pp} değeri ise 6,55 G'dır. A_{ort} = 47 G Yapılan incelemeler Üleksit örneği için de, spektral parametrelerin ışınlama dozu ile değişim göstermediği sonucuna ulaşılmıştır.



Şekil 72. Işınlanmamış ve kGy mertebesinde ışınlanmış Üleksit Örneği için ESR Spektrumları

Farklı kGy değerlerinde ışınlanmış Üleksit örneğinin doz-cevap eğrileri, örneğin farklı rezonans pikleri için Şekil 73'de verilmiştir. Şekilde gösterilen alan verileri, ışınlanan örneklerin spektrumlarının iki kez integrali alınarak oluşturulmuştur. Üleksit örneğinde, sinyal/gürültü oranının artırılması amacıyla pik7+pik8 toplam pik incelenmiştir.



Şekil 73. Işınlanmış (kGy mertebesinde) Üleksit Örneği için Doz-Cevap Eğrisi

Doğal bor minerali Üleksit örneği için yürütülen doz-cevap çalışması verileri; grafik programı yardımı ile farklı teorik matematik modellemelere uyarlanmış ve deneysel verilerin uyarlanan denklemler arasında lineer doz-cevap ilişkisi veren $I = a + b * D$ bağıntısına daha uygun olduğu sonucuna varılmıştır. Bu uyarlama sonucu örneğin farklı rezonans pikleri için elde edilen parametreler Tablo 21’de verilmiştir.

Tablo 21. Doğal Bor Minerali Üleksit Örneğinin kGy mertebesindeki ışınlamaları için edilen Doz-Cevap Bulguları ($I = a + b * D$)

	a(Gy)	b(1/Gy)	R ²
7.Pik +8.Pik	618,1	102,85	0,76
Alan	462607,3	47002,38	0,58

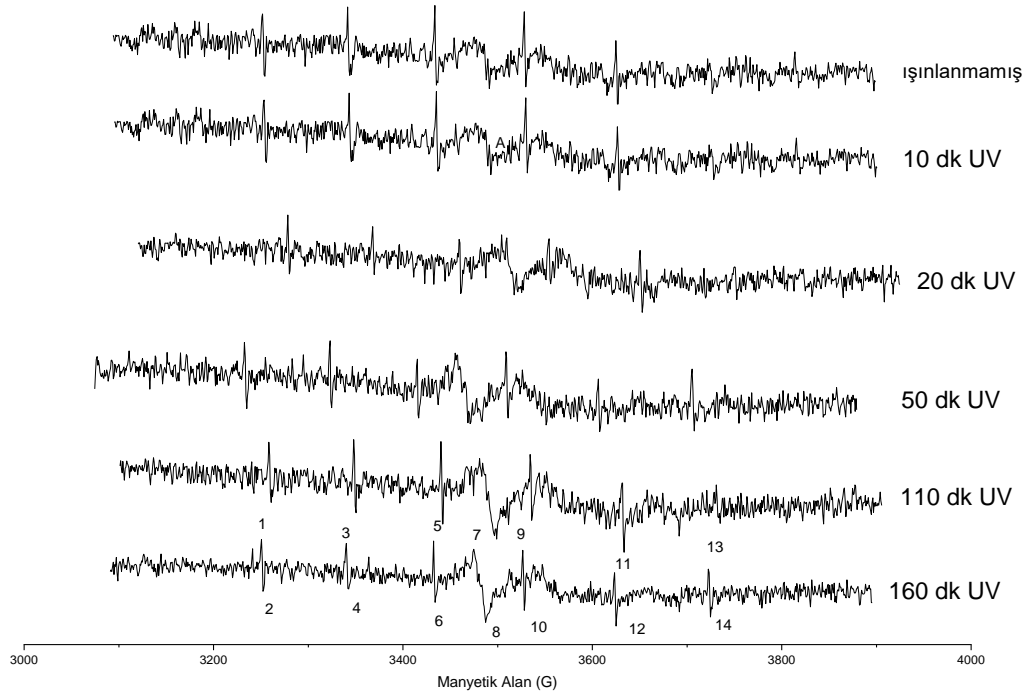
Üleksit için doz-cevap bulguları incelendiğinde, sinyal/gürültü oranı etkisiyle pik7+pik8’de lineer doz cevabı sonucuna ulaşılmıştır.

Üleksit örneğinin kGy mertebesindeki ışınlamaları sonucunda elde edilen doz-cevap bulguları incelendiğinde; sinyal/gürültü oranının artırılması sebebiyle pik7+pik8’nin lineer doz-cevap eğrisine uyumluluğu irdelenmiştir. Üleksit örneğinin rezonans piklerinden ışınlama dozuna bağlılığı yüksek olan, büyük

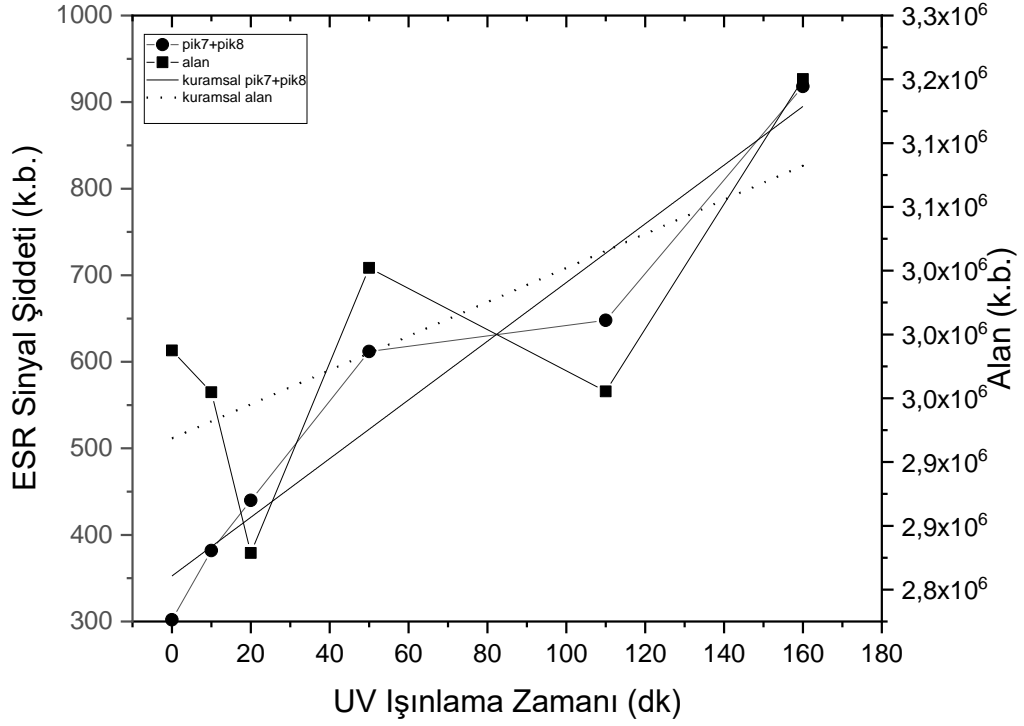
eğimli (b değeri) rezonans piklerinin dozimetrik ölçümlerde kullanılabileceği sonucuna varılmıştır. Üleksit örneği için Tablo 21’de yer alan veriler değerlendirildiğinde pik7+pik8’nin dozimetrik ölçümlerde kullanılabilirliği mümkündür.

4.3.3.4. Doğal Bor Minerali Üleksit Örneği İçin UV Işınlama Çalışmaları

Tez kapsamında; dozimetrik özellikleri irdelenen doğal Bor minerallerinden Üleksit örneği için gerçekleştirilen cGy, Gy ve kGy mertebelerindeki çalışmalara ek olarak, UV ışınlama çalışmaları da çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Yürütülen UV çalışmaları ile amaçlanan, UV ışınlaması sonucunda Üleksit örneğinde yeni rezonans pikinin/piklerinin oluşup oluşmadığını gözlemek, bu şekilde UV ışınlamasının örnekte yeni hasar merkezlerine neden olup olmayacağını irdelenmektedir. Işınlanmış ve ışınlanmamış Üleksit örneğinin ESR spektrumlarında gözlenen orta pikin sağında ve solundaki toplam 6 adet tepeden tepeye rezonans piki, saflaştırma işlemi olmadan doğal mineral olarak incelenen Üleksit örneğindeki safsızlıklar sonucu oluşan Mangan (Mn^{+2}) piklerinin varlığını göstermektedir (Murzakhanov, ve ark., 2017).



Şekil 74. UV Işınlanmış Üleksit Örneği için ESR spektrumları



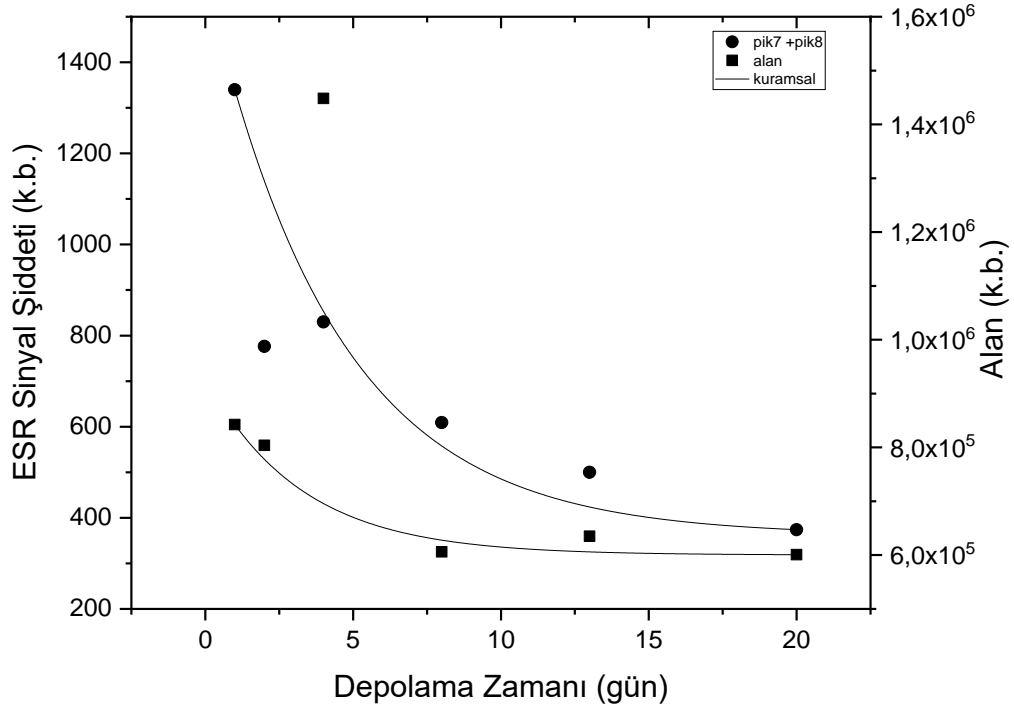
Şekil 75. UV ışınlanmış Üleksit Doz-Cevap Bulguları

UV çalışmaları sonucunda 5 farklı UV ışınlama süresi (10 dk – 160 dk) için kaydedilen Üleksit örneklerinin ESR spektrumları karşılaştırıldığında, UV ışınlama etkisi ile Üleksit örneğinde sinyal şiddetlerinde ise yaklaşık %10 oranında artış gözlenmiştir. Doza verilen cevap bulguları matematiksel modellemeye uyarlanarak lineer ($y=a+bx$) uyarlama çalışması gerçekleştirilmiştir. 7 nolu ve 8 nolu piklerin toplamı için için b değerinin 3,39 ($R^2=0,92$) olduğu hesaplanmıştır. Uyarlama sonucunda UV ışınlanan Üleksit örneğinin doza karşı lineer cevap verdiğini söyleyebilmekteyiz, fakat oluşan yeni rezonans pik/piklerinin varlığına rastlanmamış, bu nedenle UV ışınlamasının Üleksit örneği için yeni hasar merkezlerinin oluşumuna veya farklı radikal türlerinin oluşumuna neden olmadığı sonucuna ulaşılmıştır.

4.3.3.5. Doğal Bor Minerali Üleksit Örneği İçin Zaman İncelemesi Çalışmaları

Tez kapsamında; 8 kGy gama ışınlanmış Üleksit örneği için örneğin oda sıcaklığındaki depolama zamanı ile rezonans pik şiddetlerinde (veya spektrum alanlarında) oluşabilecek değişimler (sönüm) irdelenmiş, bu şekilde ışınlanan Üleksit örneğinin kararlılığı hakkında bilgi alınmıştır. İyi dozimetrik özellik

gösteren malzemelerin rezonans pik şiddetlerinin ışınlama dozu ile lineer ve yüksek eğime sahip olması gerektiği, benzer şekilde örneğin rezonans piklerinin de zaman içinde değişmemesi gerektiği bilinmektedir. Farklı değerlerde gama ışınlanmış Üleksit örneğinin, yaklaşık bir aylık depolama zamanı içinde rezonans pik şiddetlerinin zamanla değişimleri Şekil 76'da verilmiştir.



Şekil 76.Doğal Bor Minerali Üleksit Örneği için Zaman İncelemesi Bulguları

Doğal bor minerali Üleksit örneği için yürütülen zaman incelemesi çalışmalarından elde edilen deneysel bulgular, $I = I_0 (1 - e^{-kt})$ teorik modellemesine uyarlanmış ve bu şekilde Tablo 22'de verilen ışınlama ile örnekte oluşan radikallerin bozunma sabiti teorik değerlerine ulaşılmıştır.

Tablo 22. Doğal Bor Minerali Üleksit Örneği İçin Zaman İncelemesi Bulguları

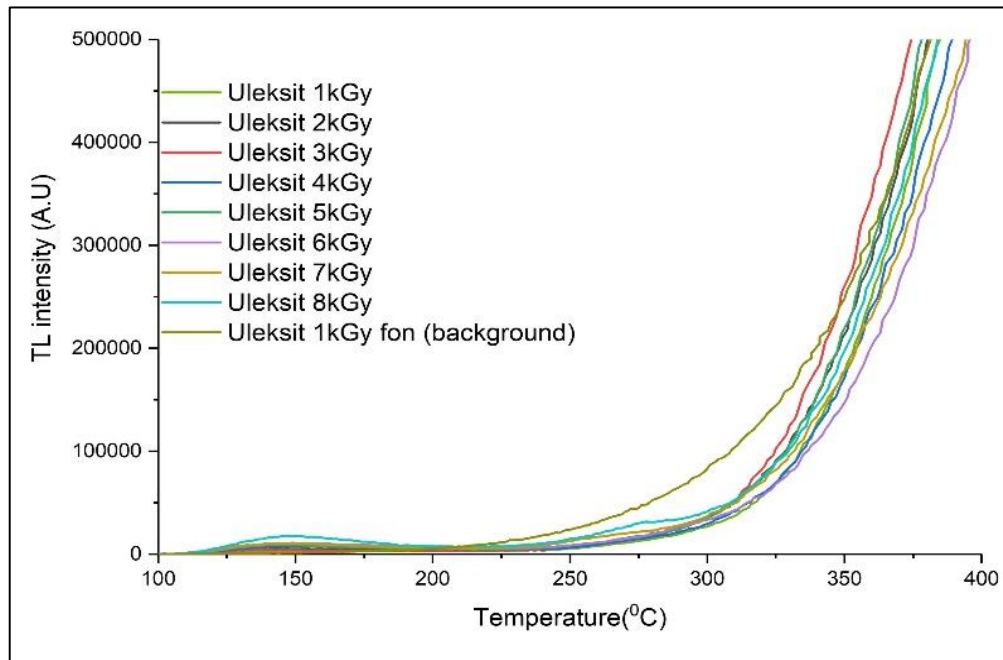
	k (gün⁻¹)	Io (k.b.)	A1 (k.b)	R²
7.pik+8.pik	0,22	361,53	978,35	0,75
Alan	0,30	600062,66	242356,34	0,28

Üleksit için oda sıcaklığında gerçekleştirilen zaman incelemesi çalışma bulguları incelendiğinde, yaklaşık bir ay süresince sinyal şiddetlerinde %65 oranında sönüm gerçekleşmiştir ve pik7+pik8 toplam pikin sönüm hızının düşük olduğunu görmekteyiz. Piklerin gürültüden zorlukla ayırt edilmesi sebebiyle diğer piklerle kıyaslama da zorlanılmıştır.

UV ışınlanmış Üleksit için oda sıcaklığında gerçekleşen zaman incelemesi çalışmasında ise anlamlı bir değişiklik olmamıştır.

4.3.4. Doğal Bor Minerali Üleksit Örneği İçin TL Bulguları

Dozimetrik özelliklerinin irdelenmesi tezin amacı olan Üleksit doğal bor minerali için yürütülen ESR çalışmalarının yanı sıra, 5°C/s ısıtma hızında 100 – 400°C sıcaklık aralığında çalışan **Termoluminesans** ölçümleri de gerçekleştirilmiştir. Üleksit için TL çalışmaları ışınlanmamış, cGy, Gy ve kGy mertebelerinde ışınlanmış örneklerin hepsi için gerçekleştirilse de, elde edilen veriler genel olarak ışınlanmamış ve ışınlanmış örnekler arasında anlamlı farklılıklar olmadığını göstermektedir. Şekil 77’de kGy mertebesindeki ışınlanmış Üleksit örneğinin TL bulguları verilmiştir.



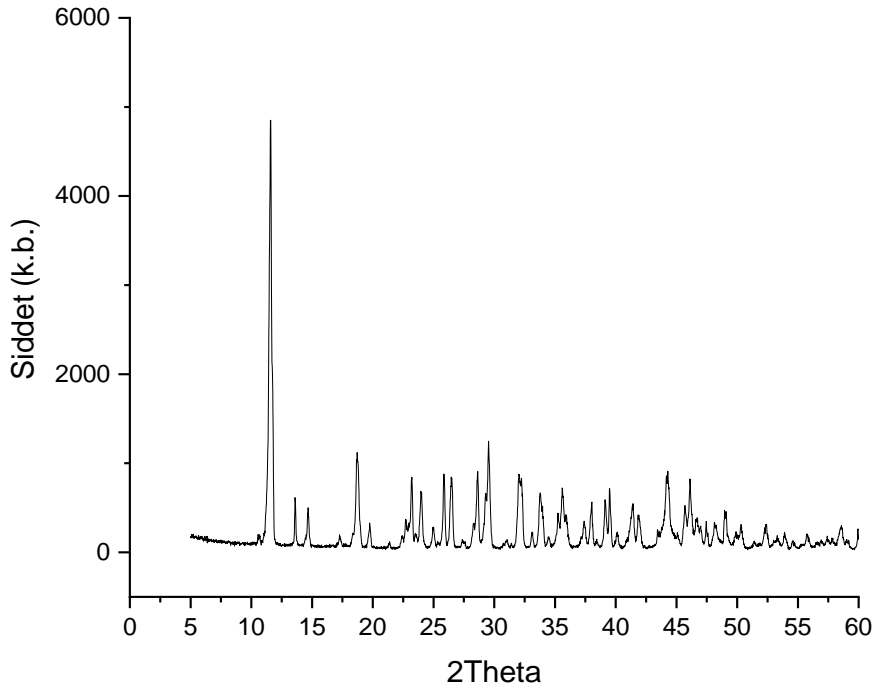
Şekil 77. Üleksit Örneği için TL Çalışması

kGy mertebesinde ışınlanmış Üleksit örneği için elde edilen TL bulguları incelendiğinde ve 100-400°C aralığında yürütülen TL analiz sonuçlarına göre, ışınlama etkisi örnekte anlamlı bir değişikliğe sebep olmamaktadır. Bu aralıkta ışınlanmış örnekler için elde edilen TL verileri, ışınlanmamış örnekler için elde edilen sonuçlar ile anlamlı bir farklılık göstermezler. Farklı ısıtma hızlarında da benzer bulgular elde edilmiş ve bu durumda da ışınlanmamış ve ışınlanmış verileri ayırt etmenin zorluğu gözlenmiş, ışıma eğrisi ise elde edilememiştir. Bu nedenlerle Üleksit örneği için yapılan dozimetrik çalışmalar için TL analizinin, beklenildiği gibi, tamamlayıcı bilgi vermediği sonucuna ulaşılmıştır.

4.4. Doğal Bor Minerali İnyoit Örneği için Elde Edilen Bulgular

4.4.1. Doğal Bor Minerali İnyoit Örneği için XRD Bulguları

Doğal Bor minerali İnyoit için X-Işını Kırınımı (XRD) spektrumu Şekil 78'de verilmiştir. Spektrum Dicvol04 programı ile analiz edilmiştir ve örneğe ait birim hücre a, b ve c parametre bilgileri Tablo 23'de verilmiştir.



Şekil 78. Doğal Bor Minerali İnyoit Örneği için XRD Spektrumu

Tablo 23. Doğal Bor minerali İnyoit Örneği için XRD Analiz Sonuçları

Kapalı İsmi	Yapı	Birim Hücre Parametreleri		
		a	b	c
CaB ₃ O ₃ (OH) ₅ .4H ₂ O	Monoklinik	10,65	12,10	8,42

Elde edilen bulgular grafik programı kullanılarak çizdirildi. Bragg bağıntısı olan $2d\sin\theta = n\lambda$ ifadesi kullanılarak d (kristalde düzlemler arası) değerleri ve yarı yükseklikteki tam genişlik (FWHM) değerleri hesaplandı. K=0,9 ve $\lambda(\text{Cu})=0,15406$ nm kabul edilerek, Scherrer denklemi $d_{hkl} = \frac{K \cdot \lambda(\text{Cu})}{(FWHM) \cdot \cos\theta}$ ile tanecik boyutu hesabı yapıldı ve ulaşılan sonuçlar Tablo 24 ve Tablo 25'de verildi.

Tablo 24. Doğal Bor Minerali İnyoit Örneği için X-ışınları hesaplanan d değerleri

2 θ	d(Å)
11,58	7,64
13,6	6,51
14,68	6,03
17,3	5,12
18,74	4,73
19,74	4,49
22,72	3,91
23,2	3,83
23,98	3,71
24,98	3,56
25,86	3,44
26,48	3,36
27,48	3,24
28,3	3,15
28,64	3,11
29,28	3,05
29,52	3,02
32,04	2,79
32,24	2,77
33,12	2,7
33,8	2,65
34,5	2,6
35,24	2,55
35,6	2,52
35,94	2,5
37,4	2,4
38,02	2,37
39,12	2,3
39,5	2,28

40,12	2,25
41,38	2,18
41,92	2,15
44,18	2,04
44,3	2,05
45,7	1,98
46,12	1,97
46,66	1,95
47,46	1,91
48,22	1,89
49,02	1,86
49,92	1,83
50,32	1,81
52,36	1,75
53,3	1,72
53,88	1,7
54,58	1,68
55,74	1,65
56,58	1,63
56,92	1,62
57,42	1,6
57,88	1,59
58,58	1,58

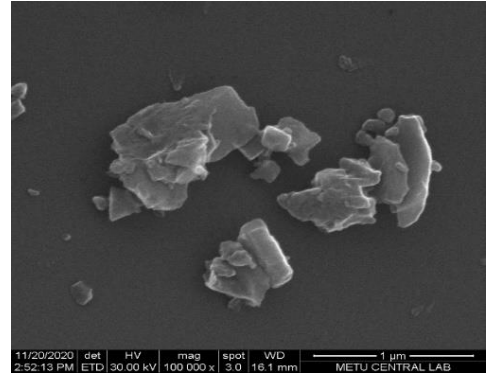
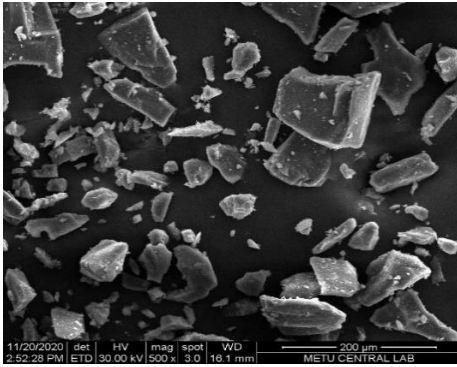
Tablo 25. Doğal Bor Minerali İnyoit Örneği için Hesaplanan Tanecik Boyut Değerleri

Pik Konumu (2θ)	FWHM	Tanecik boyutu, d (nm)
11,57337	0,29522	27,04755483
13,61418	0,10619	75,34313086
14,6727	0,16607	48,23183415
18,73239	0,28778	27,97842277
19,74518	0,1589	50,74701459
23,19463	0,20369	39,81469072
23,98029	0,21811	37,23567169
25,86278	0,17128	47,58879543
26,47393	0,2272	35,9204168
28,61299	0,23105	35,48385425
33,83174	0,32742	25,36057316
37,99664	0,20856	40,28557505
49,03192	0,25094	34,79504358
52,35603	0,25258	35,04746408
58,54008	0,30695	29,66941975

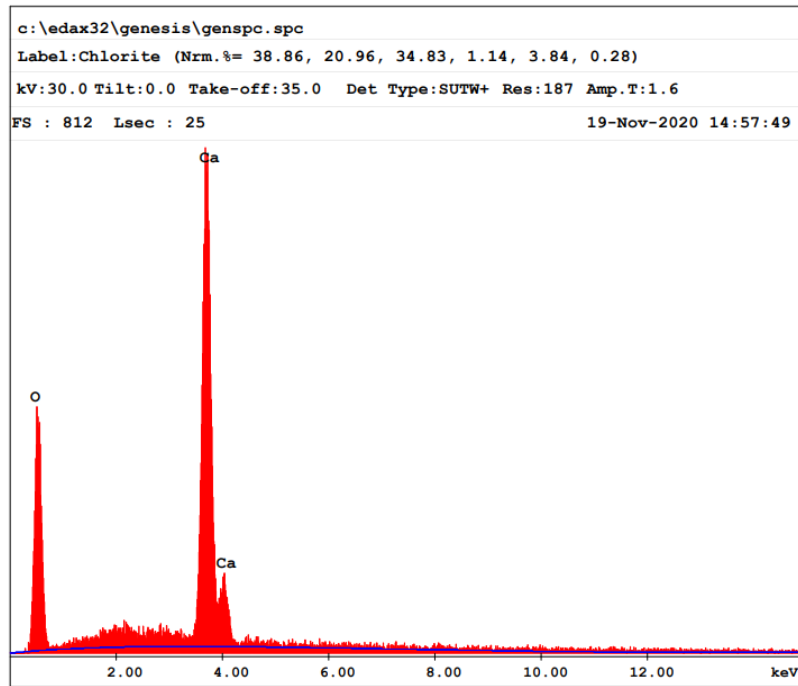
XRD sonuçlarında elde edilen pik açıları ve yarı şiddet genişlik (FWHM) değerleri grafik programı ile belirlenmiş ve Scherrer denklemi kullanılarak kristalit boyutları hesaplanmıştır. Kristalit boyutlarının ortalaması 39,369 nm olarak bulunmuştur.

4.4.2. Doğal Bor Minerali İnyoit Örneği için SEM Bulguları

Doğal Bor minerallerinden İnyoit örneğinin morfolojik özellikleri hakkında bilgi veren SEM görüntüsü Şekil 79'da, elementel analiz bilgisi veren EDX bulguları ise Şekil 80'de verilmiştir.



Şekil 79. Doğal Bor Minerali İnyoit Örneği için SEM Görüntüleri



Şekil 80. İnyoit Örneği için EDX Spektrumu

Elde edilen SEM bulguları örneğin yüzey morfolojisi ve boyutları ile ilgili önemli bilgiler verirken, EDX sonuçları gereğince örnek yapısında %75,95 oranında Oksijen ve %24,05 oranında Kalsiyum elementi sonucuna ulaşılmıştır.

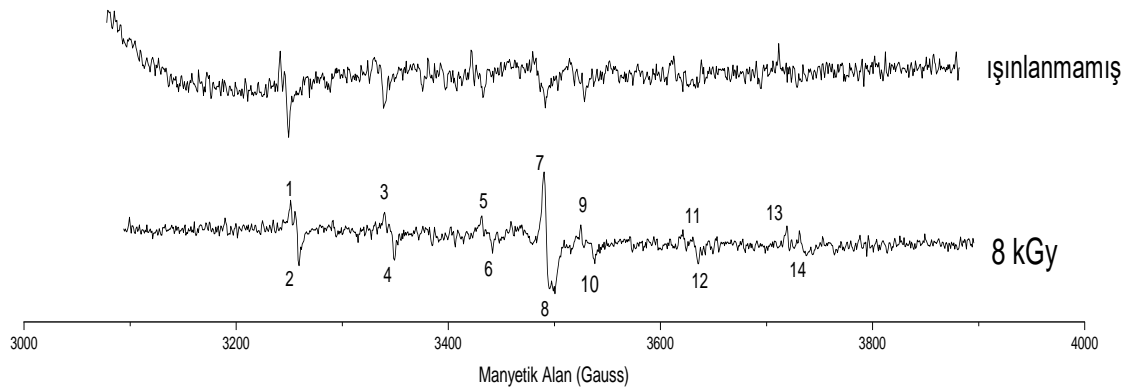
4.4.3. Doğal Bor Minerali İnyoit Örneği için ESR Bulguları

Tezin amacı olan doğal Bor minerallerinin dozimetrik özelliklerinin irdelenmesinde ağırlıklı olarak Elektron Spin Rezonans (ESR) spektroskopisi kullanılmıştır.

İnyoit örneği için optimum deney parametreleri aşağıda verilmiştir.

Merkezi Manyetik Alan	3400 - 3500 G	Kazanç	$6,32 \times 10^4$
Süpürme Alanı	100-800 G	Süpürme Zamanı	83,84 ms
Mikrodalga Frekansı	9,7-9,8 GHz	Zaman Sabiti	40,96 ms
Mikrodalga Gücü	1-5 mW	Dönüştürme Zamanı	81,92 ms
Modülasyon Frekansı	100 kHz	Sıcaklık	Oda
Modülasyon Genliği	1 G		

İnyoit örneği için, ESR spektrumları Şekil 81’de verilmiştir. Spektrum yaklaşık 800 G alanına yayılmıştır. İnyoit örneği 14 adet rezonans pikine sahip olup, g değeri 2,0009, ΔH_{pp} 6,31’dir. Rezonans pikleri gürültüden zor ayırt edilmiştir.



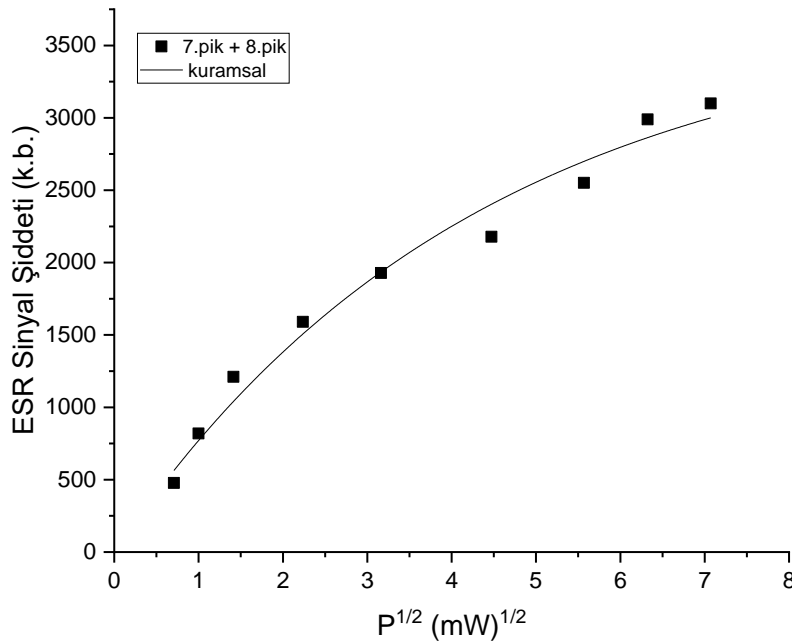
Şekil 81. Işınlanmamış ve Işınlanmış İnyoit Örneği için ESR Spektrumları

Örneklerin ESR spektrumlarının kaydedilmesinden önce deneyde kullanılması gereken optimum deney parametrelerinin belirlenebilmesi için mikrodalga gücü ve modülasyon genliği çalışmaları yürütülmüştür. İnyoit örneği için elde edilen

Mikrodalga Gücü Doyum Çalışmaları ve Modülasyon genliği çalışmaları sırasıyla 4.4.3.1. ve 4.4.3.2. kesimlerinde verilmiştir.

4.4.3.1. Doğal Bor Minerali İnyoit Örneği için Mikrodalga Gücü Doyum Çalışmaları

Doğal bor minerali örneği İnyoit için; optimum mikrodalga gücü doyum çalışması 0,1 mW ile 49 mW aralığında yürütülmüştür. Şekil 82'de mikrodalga güç doyum çalışması verilmiştir. Sinyal/gürültü oranının artması sebebiyle pik7+pik8 için çalışma yürütülmüştür.



Şekil 82. 8 kGy Işınlanmış İnyoit örneği için Mikrodalga Gücü Doyum Eğrisi

Doğal bor minerali İnyoit örneği için yürütülen mikrodalga doyum çalışması verileri lineer olmayan modellemelere grafik programı aracılığıyla uyarlanmıştır. Doğal bor minerali İnyoit örneği için elde edilen mikrodalga doyum çalışması verileri, uygun teorik matematiksel modelleme olan $I = I_0(1 - \exp(-b\sqrt{P}))$ bağıntısına grafik programı kullanılarak uyarlanmıştır ve elde edilen sonuçlar Tablo 26'da sunulmuştur.

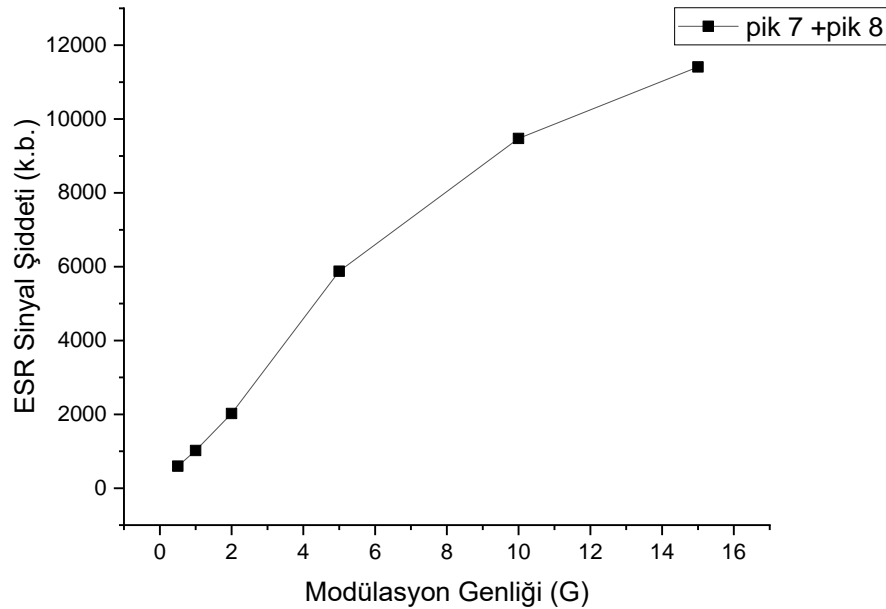
Tablo 26. Doğal Bor minerali İnyoit Örneği için Mikrodalga Gücü Doyum Bulguları

	b (mW)^{-1/2}	R²
7.pik+8.pik	0,2320	0,9791

İnyoit için mikrodalga doyum çalışması bulguları incelendiğinde, örneğe ait rezonans piklerinin sinyal/gürültü oranının artırılması sebebiyle pik7+pik8 toplam piki için mikrodalga doyum çalışması irdelenmiştir. İnyoit örneği için sonuç değerlendirildiğinde, bütün ESR çalışmaları için optimum mikrodalga güç değeri doyumdan uzakta bir değer olan **1 mW** seçilmiştir.

4.4.3.2. Doğal Bor Minerali İnyoit Örneği için Modülasyon Genliği Çalışmaları

Doğal bor minerali İnyoit örneği için; optimum modülasyon genliği 0,2 G – 2 G aralığında yürütülmüştür. Modülasyon genliği çalışma verileri Şekil 83'de görülmektedir.



Şekil 83. 8 kGy Işınlanmış Üleksit örneği için Modülasyon Genliği Eğrisi

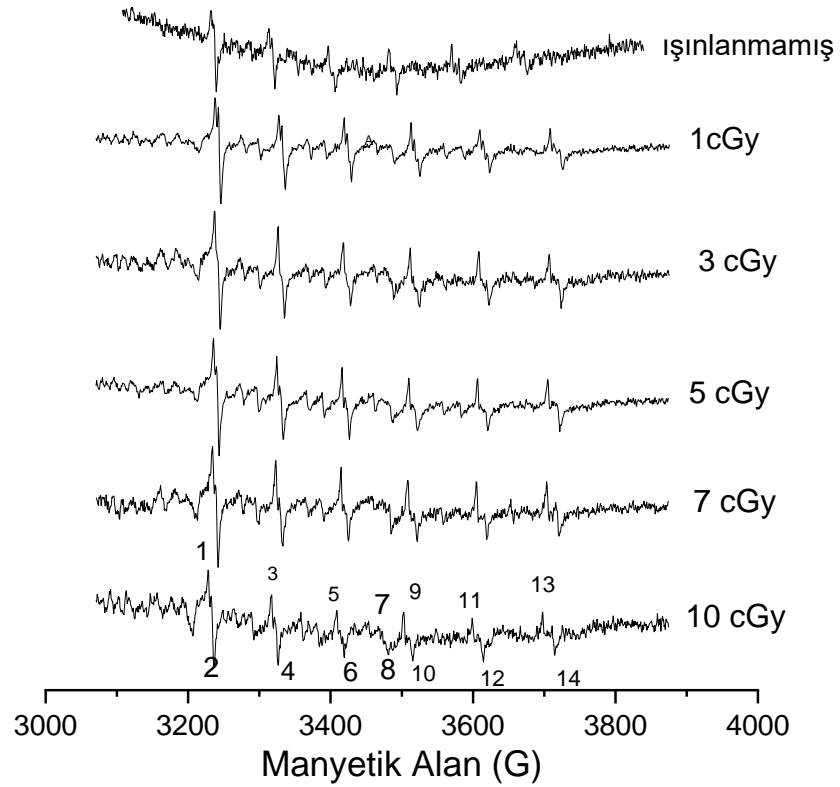
İnyoit için modülasyon genliği bulguları incelendiğinde, 14 rezonans piki için farklı modülasyon genliği verileri elde edilmiştir. Bu sonuç ile ışınlanan İnyoit'de farklı radikal türlerinin oluşabileceğini göstermektedir. Sinyal gürültü oranını artırmak

sebebiyle pik7+pik8 toplam pik irdelenmiştir. İnyoit örneği için sonuç değerlendirildiğinde, bütün ESR çalışmaları için optimum modülasyon genliği değeri **1 G** seçilmiştir.

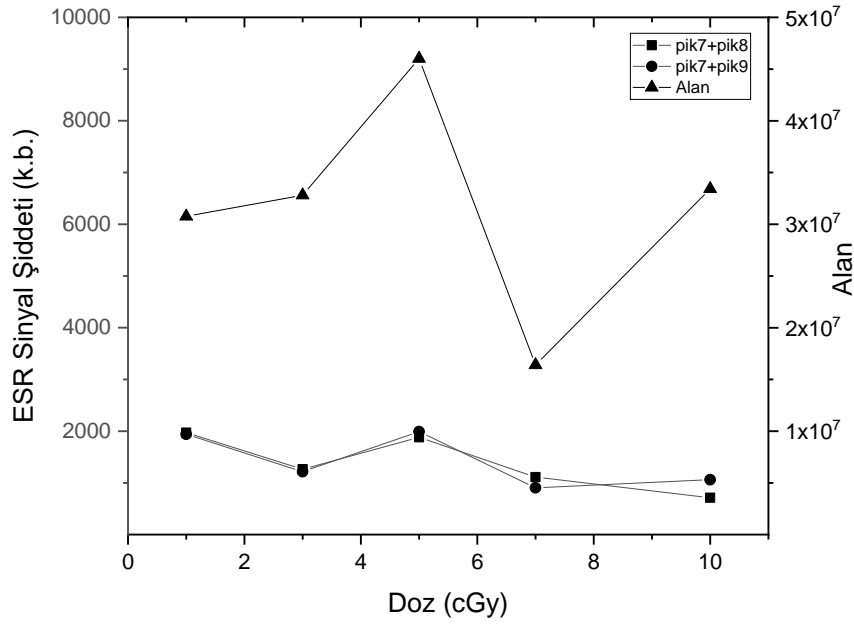
4.4.3.3. Doğal Bor Minerali İnyoit Örneği için Doz-Cevap Çalışmaları

4.4.3.3.1 Doğal Bor Minerali İnyoit Örneği için cGy Mertebesinde Doz-Cevap Bulguları

İnyoit Örneği için, ışınlanmamış ve 1-10 cGy aralığında ışınlama sonucu elde edilmiş ESR spektrumları Şekil 84'de görülmektedir. İnyoit örneği, 100 G tarama alanında 14 adet rezonans pikinden oluşmuştur, g değeri 2,0002 ve ΔH_{pp} 4,68 G'dir. ESR spektrumları ışınlamadan sonra mümkün olduğunca kısa sürede kaydedilmiştir.



Şekil 84. Işınlanmamış ve cGy mertebesinde ışınlanmış İnyoit Örneği için ESR Spektrumları

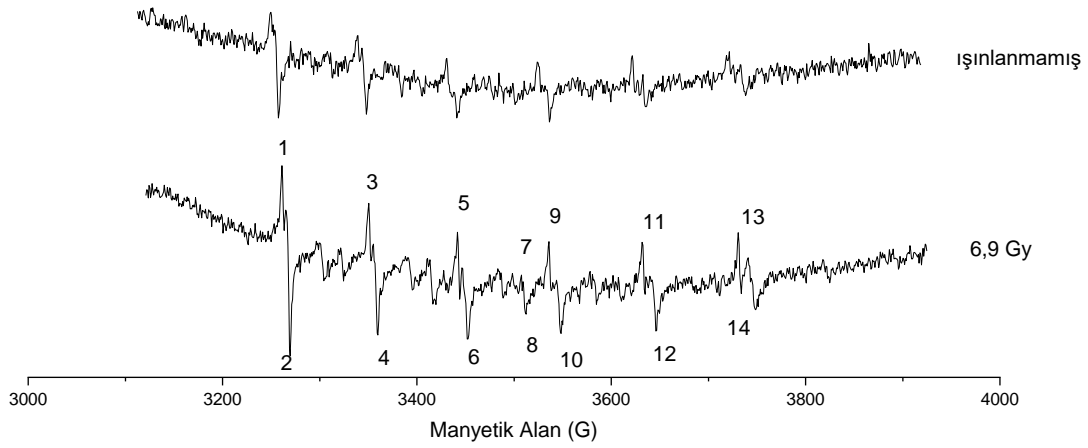


Şekil 85. İnyoit Örneği için Doz-Cevap Çalışması

İnyoit Örneğinin cGy mertebesindeki ışınlamaları için elde edilen doz-cevap bulguları Şekil 85'de verilmiştir. Şekil 85 'den de görüldüğü gibi, 6 MeV enerji ile hızlandırıcı kullanılarak cGy mertebesinde ışınlanmış İnyoit örneğinin ESR sinyal şiddetlerinde anlamlı bir değişiklik gözlenmemiştir. Bu sonuç, İnyoit doğal Bor mineralinin cGy mertebesindeki ışınlamalar için uygun dozimetrik özellik göstermediği şeklinde yorumlanabilir.

4.4.3.3.2. Doğal Bor Minerali İnyoit Örneği için Gy Mertebesinde Doz-Cevap Bulguları

İnyoit Örneği için, Gy mertebesinde doz-cevap çalışması Şekil 86'de gösterilmektedir. Tüm örnekler için 2,2 Gy, 4,4 Gy ve 6,9 Gy mertebesinde ışınlama yapılmıştır ancak sadece 6.9 Gy çalışması verilmiştir. Spektrumlar yaklaşık 800 G manyetik alanına yayılmaktadır, spektrum incelendiğinde 14 adet rezonans piki için g değeri 2,0086 ve $\Delta H_{pp} = 8,5$ G, $A_{ort} = 89,1$ G olarak belirlenmiştir.

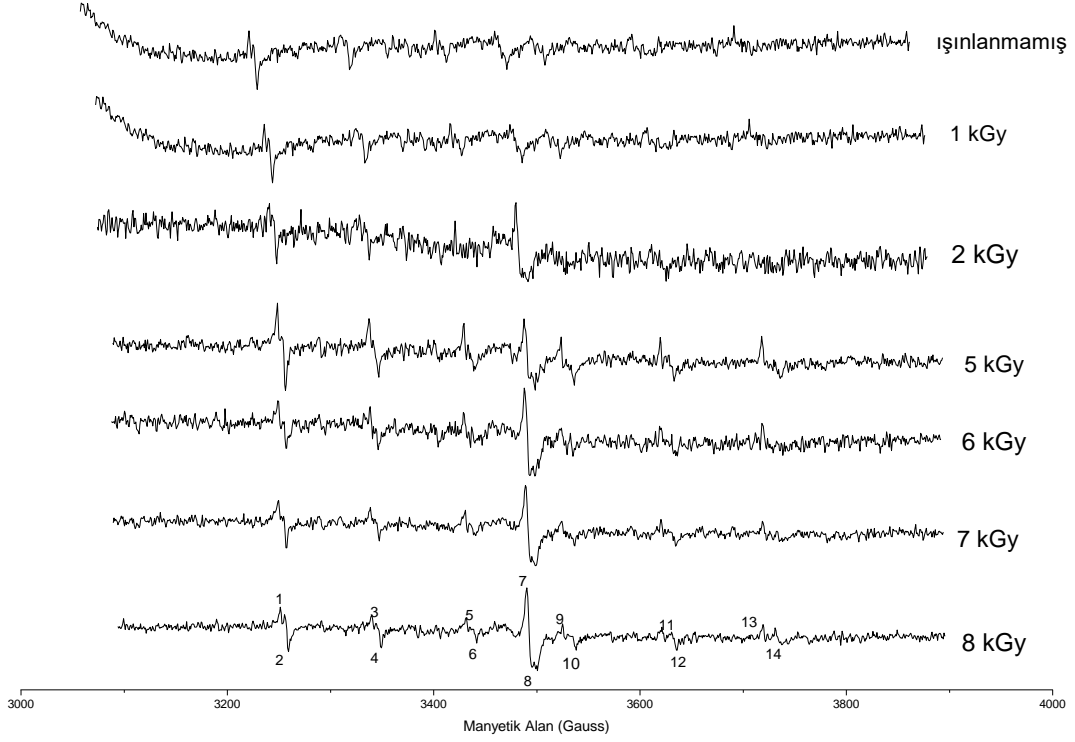


Şekil 86. İşinlanmamış ve 6.9 Gy mertebesinde işinlanmış İnyoit Örneği için ESR Spektrumları

Elde edilen bulgular; Gy mertebesindeki işinlamaların örneğin ESR spektrumunda anlamlı bir şiddet artışına neden olmadığını gösterdiğinden, İnyoit örneğinin Gy mertebesi için uygun dozimetrik malzeme olmadığı yönündedir.

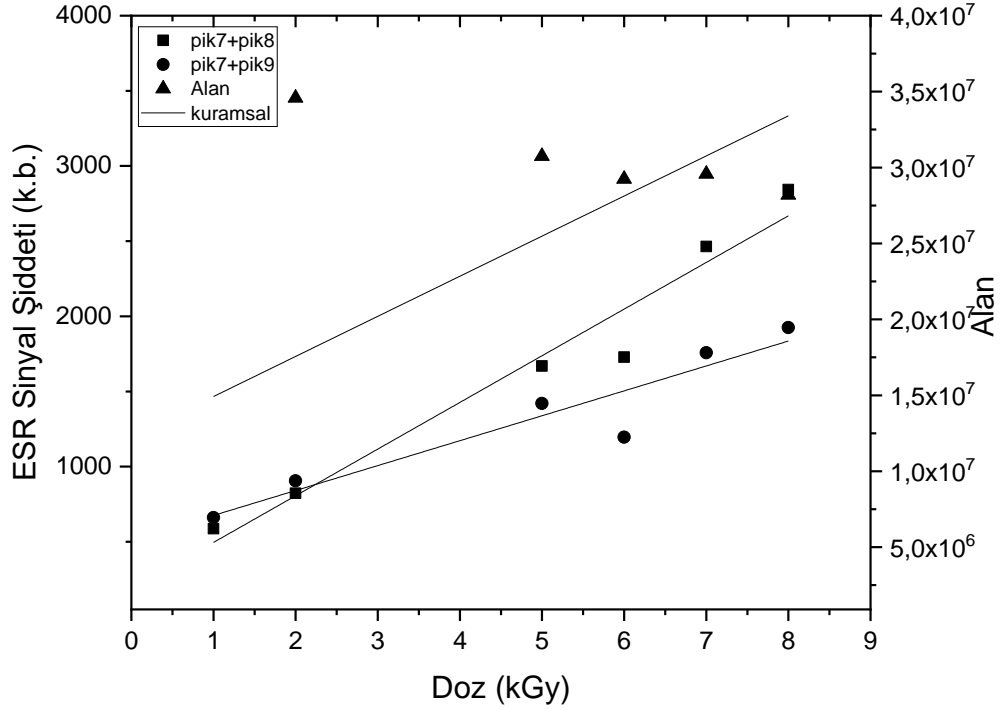
4.4.3.3. Doğal Bor Minerali İnyoit Örneği için kGy Mertebesinde Doz-Cevap Bulguları

İnyoit Örneği için, işinlanmamış ve 1-8 kGy aralığında gama işinlanmış örnekler için kaydedilen ESR spektrumları Şekil 87’de verilmiştir. 14 rezonans piki için g değerleri sırasıyla, $g_1=2,1484$, $g_2=2,1432$, $g_3=2,0919$, $g_4=2,0861$, $g_5=2,0360$, $g_6=2,0300$, $g_7=2,0018$, $g_8=1,9973$, $g_9=1,9817$, $g_{10}=1,9751$, $g_{11}=1,9285$, $g_{12}=1,9219$, $g_{13}=1,8786$ ve $g_{14}=1,8766$ ’dir. g_{ortapik} değeri (7. ve 8. pik) 2,0009’dir. ΔH_{pp} değeri 6,31 G’dir. A_{ort} değeri ise 78,25 G’dir.



Şekil 87. Işınlanmamış ve kGy mertebesinde ışınlanmış İnyoit Örneği için ESR Spektrumları

Farklı kGy değerlerinde ışınlanmış İnyoit örneğinin doz-cevap eğrileri, örneğin farklı rezonans pikleri için Şekil 88’de verilmiştir. Şekilde gösterilen alan verileri, ışınlanan örneklerin spektrumlarının iki kez integrali alınarak oluşturulmuştur. Işınlanan örneğin sinyal-gürültü oranının artması sebebiyle pik7+pik8 ve pik7+pik9 toplam piklere ait doz-cevap eğrileri ile çalışma yürütülmüştür.



Şekil 88. Işınlanmış (kGy mertebesinde) İnyoit Örneği için Doz-Cevap Eğrileri

Doğal bor minerali İnyoit örneği için yürütülen doz-cevap çalışması verileri uygun teorik matematik modellemelere bağıntı, $I = a + b * D$ ile uyarlanmıştır ve farklı rezonans pikleri için uyarlanma sonuçları Tablo 27'de verilmiştir.

Tablo 27. Doğal Bor Minerali İnyoit Örneğinin kGy mertebesindeki ışınlamaları için edilen Doz-Cevap Bulguları ($I = a + b * D$)

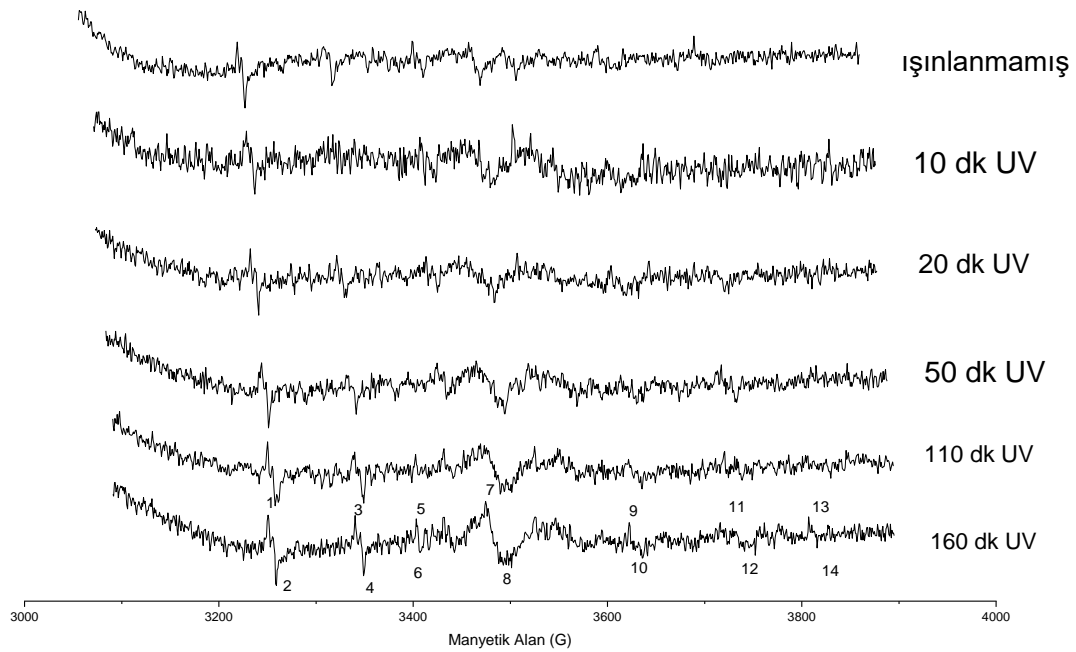
	a(Gy)	b(1/Gy)	R²
7.pik+8.pik	185,3	310,45	0,95
7.pik+9.pik	509,53	165,75	0,89
Alan	1,23e7	2640901,65	0,29

İnyoit örneğinin kGy mertebesindeki ışınlamaları sonucunda elde edilen doz-cevap bulguları incelendiğinde; örneğin ESR rezonans piklerinin, şiddet değerleri düşük olmakla birlikte, genel olarak lineer doz cevap eğrisine uyumlu olduğu görülmüştür. İnyoit örneğinin rezonans piklerinden ışınlama dozuna bağlılığı yüksek olan, büyük eğimli (b değeri) rezonans piklerinin dozimetrik ölçümlerde kullanılabileceği sonucuna varılmıştır. İnyoit örneği için Tablo 27'de yer alan

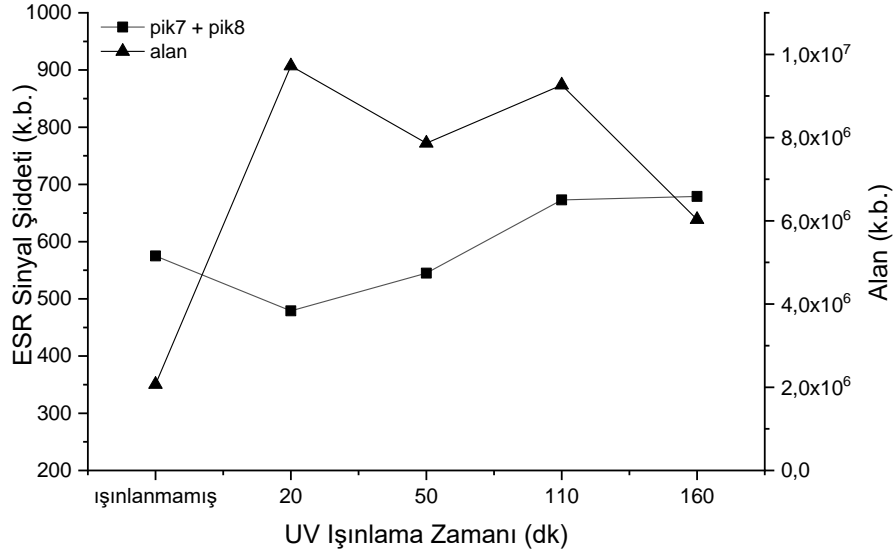
veriler değerlendirildiğinde pik7 + pik8'nin dozimetrik ölçümlerde kullanılması mümkündür.

4.4.3.4. Doğal Bor Minerali İnyoit Örneği için UV Işınlama Çalışmaları

Tez kapsamında; dozimetrik özellikleri irdelenen doğal Bor minerallerinden İnyoit örneği için gerçekleştirilen cGy, Gy ve kGy mertebelerindeki çalışmalara ek olarak, UV ışınlama çalışmaları da yürütülmüştür. Gerçekleştirilen UV çalışmaları ile amaçlanan, UV ışınlaması sonucunda İnyoit örneğinde yeni rezonans pikinin/piklerinin oluşup oluşmadığını gözlemek, bu şekilde UV ışınlamasının örnekte yeni hasar merkezlerine neden olup olmayacağını araştırmaktır.



Şekil 89. UV Işınlanmamış ve Işınlanmış İnyoit örneği için ESR Spektrumları

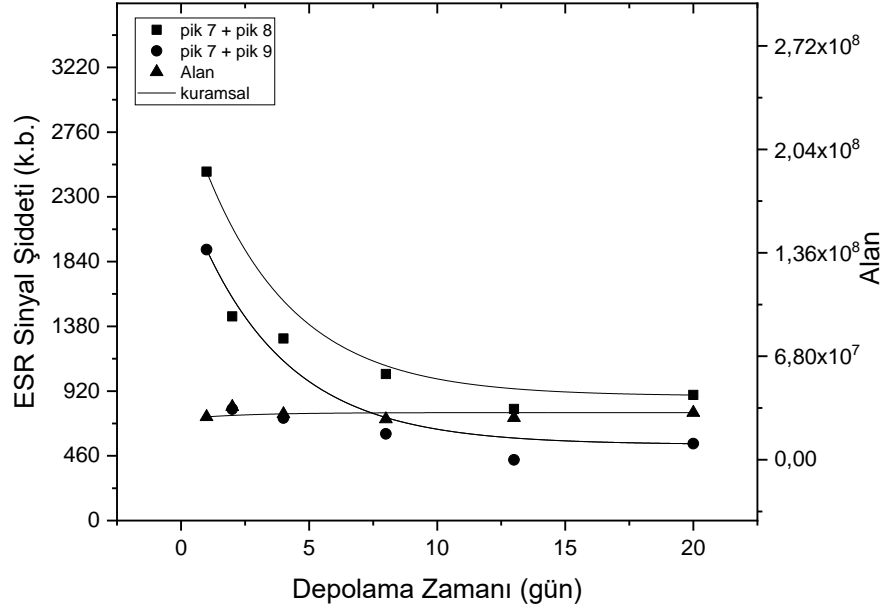


Şekil 90. UV ışınlanmış İnyoit Doz-Cevap Bulguları

UV çalışmaları sonucunda 5 farklı UV ışınlama süresi (10 dk – 160 dk) için kaydedilen İnyoit örneklerinin ESR spektrumları karşılaştırıldığında, UV ışınlama etkisi ile İnyoit örneğinde yeni bir pik oluşumu gözlenmemiştir. İnyoit örneğinin ESR spektrumlarında gözlenen orta pikin sağında ve solundaki toplam 6 adet tepeden tepeye rezonans piki, saflaştırma işlemi olmadan doğal mineral olarak incelenen İnyoit örneğindeki safsızlıklar sonucu oluşan Mangan (Mn⁺²) piklerinin varlığını göstermektedir. Işınlamanın örnekte oluşturduğu etki orta pikten ziyade, daha çok bu mangan piklerinde artışa sebep olmaktadır (Murzakhanov, ve ark., 2017).

4.4.3.5. Doğal Bor Minerali İnyoit Örneği için Zaman İncelemesi Çalışmaları

Tez kapsamında; 8 kGy gama ışınlanmış İnyoit örneği için, örneğin oda sıcaklığındaki depolama zamanı ile rezonans pik şiddetlerinde (veya spektrum alanlarında) oluşabilecek değişimler (sönüm) irdelenmiş, bu şekilde ışınlanan İnyoit örneğinin kararlılığı hakkında bilgi alınmıştır. Farklı değerlerde gama ışınlanmış İnyoit örneğinin, yaklaşık bir aylık depolama zamanı içinde rezonans pik şiddetlerinin zamanla değişimleri Şekil 91’de verilmiştir.



Şekil 91.Doğal Bor minerali İnyoit Zaman İncelemesi Bulguları

Doğal bor minerali İnyoit örneği için yürütülen zaman incelemesi verileri uygun teorik matematik modellemelere grafik programı aracılığıyla ($I = I_0 (1 - e^{-kt})$) bağıntısı ile uyarlanmıştır ve sonuçlar Tablo 28 'de sunulmuştur.

Tablo 28. Doğal Bor Minerali İnyoit Örneği için Zaman İncelemesi Bulguları

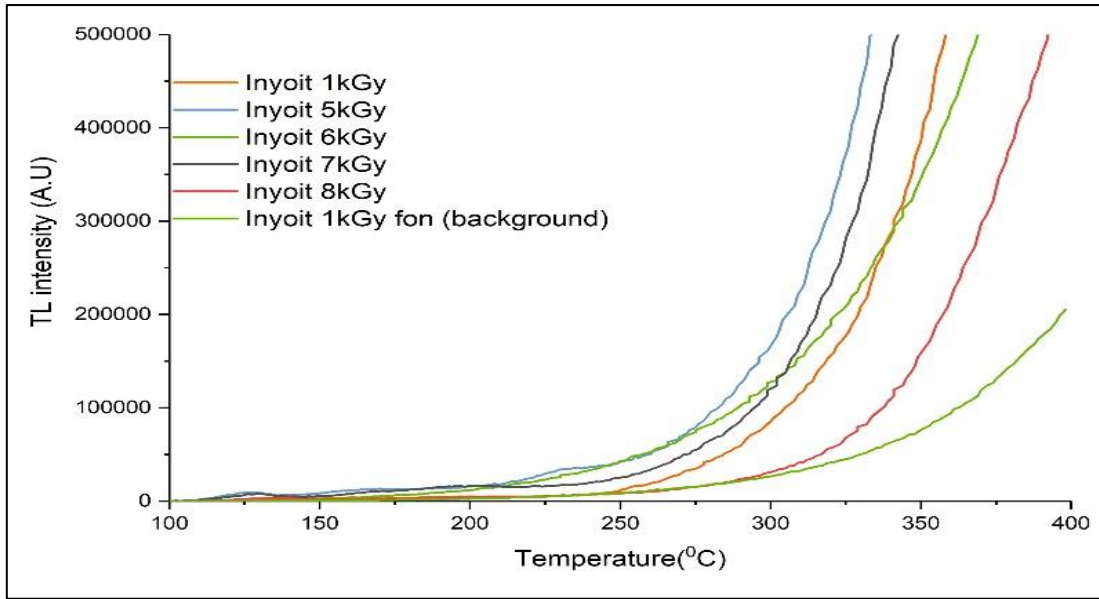
	k(gün⁻¹)	Io(k.b.)	A1(k.b)	R²
7.pik+8.pik	0,29	885,01	1594,09	0,74
7.pik+9.pik	0,28	539,68	1385,3	0,44
Alan	0,40	3,098 10 ⁷	2790000	0,39

İnyoit için zaman incelemesi çalışması bulguları incelendiğinde, yaklaşık bir ay süresince sinyal şiddetlerinde %65 oranında oda sıcaklığında sönüm gerçekleşmiştir ve pik 7+pik8 ile pik 7 + pik 9'nun sönüm oranınıyakın olup her iki pik şiddetinin dozimetrik çalışmalarda kullanılmasının uygun olduğu söylemek mümkündür.

UV ışınlanmış İnyoit için oda sıcaklığında gerçekleşen zaman incelemesi çalışmasında ise anlamlı bir değişiklik olmamıştır.

4.4.4. Doğal Bor Minerali İnyoit Örneği için TL Bulguları

Dozimetrik özelliklerinin irdelenmesi tezin amacı olan İnyoit doğal Bor minerali için yürütülen ESR çalışmalarının yanı sıra, 5°C/s ısıtma hızında 100 – 400°C sıcaklık aralığında çalışan **Termoluminesans** ölçümleri de gerçekleştirilmiştir. İnyoit için TL çalışmaları ışınlanmamış, cGy, Gy ve kGy mertebelerinde ışınlanmış örneklerin hepsi için gerçekleştirilse de, elde edilen veriler genel olarak ışınlanmamış ve ışınlanmış örnekler arasında anlamlı farklılıklar olmadığını göstermektedir. Şekil 92’de kGy mertebesindeki ışınlanmış İnyoit örneğinin TL bulguları verilmiştir.



Şekil 92. İnyoit Örneği için TL Çalışması

kGy mertebesinde ışınlanmış İnyoit örneği için elde edilen TL bulguları incelendiğinde ve 100-400°C aralığında yürütülen TL analiz sonuçlarına göre, ışınlama etkisi örnekte anlamlı bir değişikliğe sebep olmamaktadır. Bu aralıkta ışınlanmış örnekler için elde edilen TL verileri, ışınlanmamış örnekler için elde edilen sonuçlar ile anlamlı bir farklılık göstermemiştir. Farklı ısıtma hızlarında da benzer bulgular elde edilmiş ve bu durumda da ışınlanmamış ve ışınlanmış verileri ayırt etmenin zorluğu gözlenmiş, ışıma eğrisi ise elde edilememiştir. Bu nedenlerle, İnyoit örneği için yapılan dozimetrik çalışmalar için TL analizinin, beklenildiği gibi, tamamlayıcı bilgi vermediği sonucuna ulaşılmıştır.

5.SONUÇ VE TARTIŞMA

Bu Yüksek Lisans tez çalışmasında; Türkiye olarak dünya genelinde rezerv miktarı bakımından birinci sırada olduğumuz ve Tübitak'ın da öncelikli alanlarından birisi olan doğal Bor Mineralleri kullanılarak dozimetrik çalışmaların araştırılması ve bu bağlamda kişisel ve/veya geriye dönük radyasyon dozimetresi geliştirilmesi amaçlanmış ve bu bağlamda ESR spektroskopisinin ağırlıklı olarak kullanıldığı detaylı deneysel çalışmalar yapılmış ve önemli bulgulara ulaşılmıştır.

Tez çalışmasının başlangıç aşamasında doğal Bor minerali ve doğal Bor minerali katkılı Polianilin vb. polimer malzemeler kullanılarak radyasyon dozimetresi geliştirilmesi hedeflenmiş olsa da, doğal Bor mineralleri için elde edilen cGy, Gy, kGy, UV ışınlaması dozimetrik bulguları doğal Bor minerallerinin yüksek radyasyon hassasiyetine sahip olmadığını göstermiş, literatür bulgularına göre genelde radyasyona dirençli olduğu kabul edilen katkısız polimerlere doğal Bor minerali katkılmasının da radyasyona hassas yapılar oluşturamayabileceği düşünülmüştür. Aynı zamanda tez süresince yaşanan pandemi (Covid-19) koşulları da tezin deneysel kesimin yürütümünde zorluklara neden olduğundan tez çalışmaları, 4 farklı doğal Bor mineralinin kullanıldığı dozimetrik araştırmalar olarak devam ettirilmiştir.

Bu çalışma ile hali hazırda ülkemizde kullanılan radyasyon dozimetre türlerine Bor minerali malzemesini kazandırabilme amacının benimsenmesinin temel sebepleri; iyonlaştırıcı ve iyonlaştırıcı olmayan radyasyonun gündelik hayatımızın parçası olması, halkın ve sağlık çalışanları başta olmak üzere endüstri ve diğer farklı sektörlerde çalışan radyasyon çalışanlarının sayılarının her geçen gün artması ve yasal olarak iyonlaştırıcı radyasyona maruz kalan çalışanların kişisel dozimetre kullanımlarının zorunlu olmasıdır. Bu bağlamda ülkemizde kullanılan radyasyon dozimetrelerinin çok büyük kesimi çok yüksek fiyatlarla yurtdışından ithal edilen, farklı doğal/yapay malzemelerin kullanıldığı TLD (LiF, CaF), film vb. dozimetrik sistemlerdir. Bu amaçlarla fizibilite çalışmaları da yapılan ve dozimetrik malzeme olarak kullanılabilmesinin uygun olması durumunda yerli olması ve çok düşük fiyatla tüketiciye ulaştırılabilmesi üstünlükleri içerebilecek

doğal Bor malzemesi üzerinde araştırmalar yapılması tercih edilmiştir. Ayrıca bildiğimiz kadarıyla ÷lkemizdeki rezervi çok fazla olan Bor malzemesinin TL yöntemi ile irdelendiği oldukça az sayıda çalışma (Yüksel, 2013; Topaksu ve ark., 2015; Kalita ve ark., 2021) bulunmaktadır, konu ile ilgili olarak ESR çalışması ise yoktur. Bu bağlamda literatüre yeni bilgiler kazandırılması da hedeflenmektedir. Bu tez çalışmasının başlangıcında Ulusal Bor Araştırma Enstitüsü (BOREN) yetkililerinin de görüşleri alınarak çalışmalara başlanmıştır.

Hacettepe Üniversitesi Yer Bilimleri Bölümü'nün desteği ile elde edilen Bor kayaçları toz haline getirildikten sonra deneylerde kullanılmıştır. Doğal Bor kayaçlarından temin edilen numuneler için araştırılması gerekli gör÷len özelliklerden birisi numunelerin topografik görüntüleri olduğundan, numunelerin yapısal görüntülerinin analizinde **SEM** ve elementel analizleri için de **EDX** teknikleri kullanılmıştır. Tez süresince incelenen örneklerin geriye dönük radyasyon doz ölçümünde de kullanılabilmesi tezin amaçlarından birisidir, bu nedenle incelenen örneklerde saflaştırılma işlemi yapılmamış, örnekler olası bir radyasyon kazası esnasında çevrede kolay, bol ve işlenmemiş şekilde bulunabilecek doğal Bor kayaçlarından temin edilmiştir. Farklı kayaçlardan elde edilmiş iki farklı Kolemanit (Kolemanit-1, Kolemanit-2), Üleksit ve İnyonit doğal Bor minerallerinin yapısal özellikleri XRD ve SEM teknikleri ile tayin edilmiştir. XRD analizleri ile Kolemanit-1, Kolemanit-2, Üleksit ve İnyoit doğal bor minerallerinin birim hücre özellikleri ve kristal parçacık boyutları analiz edilmiştir. İncelenen örnekler monoklinik yapıda olup sadece Üleksit triklinik yapıya sahiptir. Kristal parçacık boyutları Kolemanit-1 için **39,445 nm**, Kolemanit-2 için **39,361 nm**, Üleksit için 41,262 nm ve İnyoit için **39,369 nm** olarak belirlenmiştir.

İncelenen örneklerin dozimetrik özelliklerini belirlemek için ise, öncelikle **cGy** (1, 3, 5, 7, 10 cGy), **Gy** (2,2, 4,3, 6,9 Gy) ve **kGy** (1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 kGy) mertebelerinde ışınlamalar gerçekteşirilmiş, daha sonra ise **TL** ve ağırlıklı olarak dozimetrik özelliklerin araştırılması konusunda önemli bir teknik olarak kabul edilen **ESR** spektroskopisi kullanılarak örneklerin dozimetrik özellikleri belirlenmiştir. Aynı zamanda ESR spektroskopisi çalışmaları süresince **UV ışınlama** çalışmalarına da yer verilmiştir.

Bu çalışma kapsamında cGy – kGy geniş doz aralığında ışınlanan doğal Bor minerallerinin dozimetrik özellikleri, ESR spektroskopisi ağırlıklı olacak şekilde irdelenmiştir. Çalışma esnasında farklı mertebelerde ışınlanan Kolemanit, Üleksit ve İnyonit doğal Bor minerallerinin ESR spektrumları, belirlenen optimum deney koşullarında değişiklik yapılmadan, tüm ışınlama değerleri için kaydedilmiş ve ışınlanan örneklerin rezonans piklerinin radyasyona duyarlılıkları grafik çizim programı yardımıyla oluşturulan doz- cevap eğrileri çizdirilerek belirlenmiştir. İyi bir dozimetre malzemesinin, ışınlamaya yüksek duyarlılık gösteren lineer doz- cevap eğrisine sahip olması gerektiği ve ışınlama ile malzemede oluşan etkilerin (radikal sayısı, tuzak sayısı vb.) kararlı olması gerektiği bilinmektedir ve bulgular bu kıstaslara bağlı olarak yorumlanmıştır.

ESR analizi öncesinde optimum deney koşulları belirlenmesinde her numune için modülasyon genliği ve mikrodalga gücü çalışması yapılmıştır. Mikrodalga gücü çalışmasında, radyasyona maruz bırakılan kayaçların her birinde oluşan rezonans piklerinin aynı mikrodalga güç aralığında farklı şiddet bilgisi verdiği ve farklı güçlerde doyuma gittiği sonucuna ulaşılmıştır. Bu sonuç örneklerin farklı radikal türlerini içerdiğini göstermektedir. Yapılan analizler sonucunda, optimum çalışma koşulları olarak **1 mW** ve **1 G** belirlenmiştir.

Elde edilen dozimetrik bulgulara göre; **cGy** ve **Gy** düşük ışınlama değerlerinde ışınlanan örneklerin radyasyon duyarlılıkları yüksek olmasa da bütün örneklerin radyasyona görece duyarlı olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Örneklerin **kGy** mertebesindeki ışınlamaları sonucunda elde edilen doz-cevap eğrileri incelendiğinde ise; Kolemanit-1 örneğinin 2 nolu ve 4 nolu rezonans piklerinin radyasyon duyarlılıklarının yüksek olduğu sonucuna varılmıştır. Bununla beraber Kolemanit-1 için elde edilen zaman incelemesi verileri incelendiğinde, ilgili rezonans piklerinin kararlılıklarının düşük (sönüm hızları yüksek) olduğu görülmektedir. Kolemanit-1 ve Kolemanit-2 örnekleri farklı kayaçlardan elde edildiği için, her iki numunenin içerdiği element ve Bor miktarlarının farklı olması olasıdır. Kolemanit-2 örneği için elde edilen doz-cevap eğrilerinin radyasyona karşı daha az duyarlı olması bu şekilde açıklanabilir. Doz-cevap eğrileri ve zaman incelemesi çalışmaları birlikte ele alındığında, Kolemanit-1 örneği ve Kolemanit-

2 örneği için 2 nolu ve 4 nolu rezonans piklerinin dozimetrik ölçümlerde kullanılabileceği söylenebilir.

Üleksit ve İnyoit örnekleri için elde edilen doz-cevap eğrileri incelendiğinde ise; Üleksit ve İnyoit örnekleri için elde edilen rezonans sinyal şiddetlerinin düşük olması sebebi ile, her iki örnek için de doz-cevap eğrileri oluşturulurken spektrumlarının orta rezonans piklerinin toplamı (7 nolu rezonans piki + 8 nolu rezonans piki) dikkate alınmıştır ve elde edilen doz-cevap eğrilerinden yola çıkılarak sinyal/gürültü oranının düşük olsa da Üleksit ve İnyoit doğal minerallerinin radyasyon doz ölçümlerinde kullanılabileceği sonucuna varılmıştır. Üleksit ve İnyonit örneklerinin ESR spektrumlarında gözlenen orta pikin sağında ve solundaki toplam 6 adet tepeden tepeye rezonans piki, saflaştırma işlemi olmadan doğal mineral olarak incelenen örneklerde safsızlıklar sonucu oluşan Mangan (Mn^{+2}) piklerinin varlığını göstermektedir.

Tüm örnekler için gerçekteştirilen UV işnınlama etkisinin incelendiği ESR çalışmaları; UV işnınlamasının Kolemanit-1, Kolemanit-2, Üleksit ve İnyoit doğal Bor minerallerinde yeni ESR rezonans piklerinin oluşumuna veya kaybına neden olmadığı, UV-işnınlama etkisi ile örneklerde yapısal değişiklik olmadığını göstermiştir. Doz-cevap bulguları incelendiğinde Üleksit ve İnyoit örneklerinin UV işnınlamaya lineer cevap verdiği sonucuna da ulaşılmıştır. UV-işnınlamasının Üleksit ve İnyoit örneklerinde oluşturduğu etki, daha çok spektrumdaki mangan pik şiddetlerinde artış şeklinde kendini göstermiştir.

Yaklaşık bir ay süresince oda sıcaklığında yürütölen zaman incelemesi çalışmalarında; Kolemanit-1 örneğinde yaklaşık **%40**, Kolemanit-2 örneğinde yaklaşık **%20** sinyal şiddetlerinde azalma/sönüm olurken, Üleksit ve İnyoit örneklerinde yaklaşık **%65** oranında sinyal şiddetlerinde azalma/sönüm gerçekteşmiştir. Bu sebeple, Kolemanit-1 ve Kolemanit-2'nin radyasyon kararlılıklarının da Üleksit ve İnyoit'e göre daha fazla olduğu sonucuna varılmıştır.

Doğal Bor Minerallerinden Kolemanit, Üleksit ve İnyonit örneklerinin 100 - 400°C aralığında yürütölen TL analiz sonuçlarına göre, işnınlama etkisi örnekte anlamlı bir değişiklik olmadığı sonucuna ulaşılmıştır. Farklı ısıtma hızlarında da benzer

bulgular elde edilmiş ve bu durumda da ışınlanmamış ve ışınlanmış verileri ayırt etmenin zorluğu gözlenmiş, ışıma eğrisi ise elde edilememiştir. Beklenenin aksine TL çalışmaları, ESR çalışmalarına tamamlayıcı sonuç vermemiştir.

Sonuç olarak; bu yüksek lisans tezi kapsamında doğal Bor minerallerinden Kolemanit, Üleksit ve İnyoit örneklerinin yapısal ve dozimetrik özellikleri geniş bir doz aralığında (cGy - kGy) ayrıntılı olarak irdelenmiştir. Ulaşılan bulguların, başka çalışmalara temel oluşturacağı öngörülmektedir.

6.KAYNAKÇA

Apaydın, F., Magnetik Rezonans, H.Ü. Mühendislik Fakültesi, Ders Kitapları, No:3, Ankara, 1991.

Alashrah, S., El-Ghoul, Y., Omer, M.A.A., Synthesis and Characterization of a New Nanocomposite Film Based on Polyvinyl Alcohol Polymer and Nitro Blue Tetrazolium Dye as a Low Radiation Dosimeter in Medical Diagnostics Application, Polymers, 2021.

Azorin, J., Rivera, T., Solís, J., A New ESR Dosimeter Based on Polytetrafluoroethylene, Applied Radiation and Isotopes, 52 (5), 1243–1245, 2000.

Cullity, B.D., X-Işınları Difraksiyonu, İTÜ Yayınları, 1996.

Çolak, Ş., Özbey, T., An ESR Study on Biological Dosimeters; Human Hair Radiation Measurements, 46 (5), 465–472, 2011.

Demir F., Un A., Radiation Transmission of Colemanite, Tincalconite and Ulexite for 6 and 18 MV X-Rays by Using Linear Accelerator, Applied Radiation and Isotopes 72 (2013) 1-5.

Drobny, J., Ionizing Radiation and Polymers, Principles, Technology, and Applications, 2012.

Ekineken, D., Bor Minerallerinden İnyoit'in X-Işını Toz Kırınımı ve Elektron Spin Rezonans (ESR) Analizleri ile Kişisel Dozimetreye Uygunluğunun Araştırılması, Bitirme Projesi, Hacettepe Üniversitesi, 2020.

Escudero, R., Segura, J., Velasco, R., Valhondo, M., Romero de Ávila, M. D., Garcia-Garcia, A. B., Cambero, M. I. Electron Spin Resonance (ESR) Spectroscopy Study of Cheese Treated with Accelerated Electrons. Food Chemistry, 315–321, 2019.

Galante, A. M. S., Campos, L. L., Characterization of Polycarbonate Dosimeter for Gamma-Radiation Dosimetry, Institute of Energetic and Nuclear Research, IPEN – CNEN/SP, Brazil, 2010.

Gallo, S., Iacoviello, G., Bartolotta, A., Dondi, D., Panzeca, S., Marrale, M. ESR Dosimeter Material Properties of Phenols Compound Exposed to Radiotherapeutic Electron Beams, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, 407, 110–117, 1999.

Gruppen., C. Introduction to Radiation Protection, Practical Knowledge for Handling Radioactive Sources (Graduate Texts in Physics), 2010.

Gündoğmuş, M., Farklı Bor Bileşiklerinin Dozimetrik Özelliklerinin Belirlenmesi ve Retrospektif Dozimetri Alanında Kullanımının İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Ankara Üniversitesi, 2015.

Harshman, A., Toyoda, S., & Johnson, T., Suitability of Japanese Wild Boar Tooth Enamel for Use as An Electron Spin Resonance Dosimeter, Radiation Measurements, 116 (April), 46–50, 2018.

Hassan, G. M., Ikeya, M., Takaki, S. Radiation-Induced Defects in Magnesium Lactate as ESR Dosimeter, Radiation Measurements, 30 (2), 189–196, 1999.

İpek, Y., Influence of Particle Size, Additive Ratio and Chemical Structure of Zinc Borate on Mechanical Properties of Poly(vinyl chloride), BORON 6(4), 387 - 394, 2021.

İzdar, E., Köktürk, U., Türkiye'de Borat Yataklarının Jeolojisi ve Yeni Saha Potansiyelleri ile İlgili Bazı Görüşler, Türkiye Madencilik Bilimsel ve Teknik IV. Kongresi, 411 - 434, Ankara, 1975.

Kalita J.M., Keleş Ş.K., Çakal G.Ö., Meriç N., Polymeris G.S., Thermoluminescence and Optically Stimulated Luminescence Properties of Ulexite Mineral, Journal of Luminescence 230, 2021.

Kalita J.M., Keleş Ş.K., Çakal G.Ö., Meriç N., Polymeris G.S., Thermoluminescence and optically stimulated luminescence of colemanite-rich borate mineral, Journal of Luminescence 242, 2022.

Khan, F. M., The Physics of Radiation Therapy, Lippincott Williams, Wilkins, USA, 4th Ed., 2010.

Knoll, G., Radiation Detection and Measurement, 3rd Ed., 2010.

Kolbükten, A., Bir Bor Minerali olan Kolemanitin Kişisel Dozimetre Yapımında Kullanılabilmesinin Elektron Spin Rezonans Yöntemi ile İncelenmesi, Bitirme Projesi, Hacettepe Üniversitesi, 2020.

Korkmaz, G., Potasyum Titrat ve Potasyum Sitrat Örneklerinin Elektron Spin Rezonans (ESR) Tekniği Kullanılarak Dozimetrik Özelliklerinin İncelenmesi, Hacettepe Üniversitesi, 2010.

Kumaş, A., Radyasyon Sağlığı ve Güvenliği, Palme Yayıncılık, 2000.

Köklü, N., Radyasyonun İnsan Sağlığı Üzerindeki Etkileri ve Tıpta Uygulama Alanları, Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi, 2006.

Krane, K. S., Nükleer Fizik I, Çeviri Editörü: Başar Şarar, Palme Yayıncılık, Ankara, 2001.

Kumaş, A., Radyasyon Fiziği ve Tıbbi Uygulamaları, Palme Yayıncılık, 2007.

Marchioni, E., Pabst, J. Y., Kuntz, F., Characterization and Application of Two Kinds of ESR Dosimeters, Radiation Physics and Chemistry, 65 (2), 187–191, 2002.

Martin, J. E., Radyasyon ve Radyasyondan Korunma Fiziği, Çeviri Editörleri: A. G. Tanır, M. H. Bölükdemir, K. Koç, Palme Yayıncılık, Ankara, 2013.

More, C., Alsayed, Z., Badawi, M., Thabet, A., Polymeric Composite Materials for Radiation Shielding: a Review, Environmental Chemistry Letters 19: 2057-2090, 2021

Mraz., G., Health Effects of Ionising Radiation and their Consideration in Radiation Protection, Vienna, 2017.

Murzakhanov, F., Mamin, G., Voloshin, A., Klimashina E., Putlyaev V., Bakhteev, R., Yusupov, R., Gafurov, M., Orlinskii, S., Conventional Electron Paramagnetic Resonance of Mn⁺² in Synthetic Hydroxyapatite at Different Concentrations of The Doped Manganese, Earth and Environmental Science 155, 2018.

Nur, N., Ametistlerin Termoluminesans Yöntemiyle Dozimetrik Karakteristiğinin Analiz Edilmesi, Doktora Tezi, Çukurova Üniversitesi, 2010.

Özdemir, D., Bir Bor Minerali olan Üleksitin Kişisel Dozimetre Yapımında Kullanılabilmesinin İncelenmesi, Bitirme Projesi, Hacettepe Üniversitesi, 2020.

Özdemir, İ., Tıbbi Radyolojik Görünteleme Tekniği, Hiperlink Yayınları, 2015.

Oztürk, M., Bor Minerali Atığı Katkılı Polipropilen Kompozit Malzemelerin Mekanik ve Tribolojik Özelliklerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, 2018

Poole, C.P., Farach, H.A., The Theory of Magnetic Resonance, John Wiley, New York, 1972.

Podgorsak, E. B., Radiation Physics for Medical Physicists (Series: Biological and Medical Physics, Biomedical Engineering), Second Edition, 2010.

Rossi, B. T., Chen, F., & Baffa, O., A New 2 Methylalanine-PVC ESR dosimeter, Applied Radiation and Isotopes, 62 (2 SPEC. ISS.), 287–291, 2005.

Tanrikulu, Y., Yaşar, A., Investigation of Mechanical and Thermal Properties of Boron Minerals Doped Plastic Materials, Çukurova Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 32(1), ss. 1-8, Mart 2017

Taganov, S., Çelik, G., Çelik, G., Termoluminesans Tekniği Kullanılarak Bor İçeren Doğal Kayaçların Kullanıldığı Kişisel Dozimetre Tasarımı, Proje Raporu, 2017

TAEK, “İletken Kompozit Malzemelerin Sentezlenmesi ve Yüksek Enerjili Radyasyonla Etkileşiminin İncelenmesi”, Teknik Rapor, 2011

TAEK, Radyasyon İnsan ve Çevre, Radiation People and the Environment (IEAE) Kitabından Çeviri, 2009.

Topaksu M., Correcher V., Guinea J.G., Thermoluminescence Sensitivity of Ulexite After UV Irradiation, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B 349 (2015) 17-23

Tsoufanidis, N., Measurement and Detection of Radiation, USA, 1995.

Unep, Radiation Effects and Sources, United Nations Environment Programme, 2016.

Weil, J., Bolton, J., Electron Paramagnetic Resonance: Elementary Theory and Practical Applications, 2nd Ed., 2007.

Yüksel, A., Radyasyon ve Sağlığımız, Nobel Yayıncılık, 2014.

Yüksel, M., Doğal ve Katkılanmış Bor Minerallerinin Dozimetre Geliştirmek Amacıyla Termoluminesans (TL) Yöntemi Kullanılarak Çalışılması, Doktora Tezi, Çukurova Üniversitesi, 2013.

Zamorano, M.R., Sanders, N.H., Lindvold, L., Andersen, C.E., Radiochromic and Radiofluorogenic Solid State Polymer Dosimeter; a third signal: Electron Paramagnetic Resonance (EPR), Radiation Physics and Chemistry 161 (72-76), 2019.

BOREN <https://www.boren.gov.tr/Sayfa/bor-elementi/23> (Erişim Tarihi: 10.11.20)

BOREN <https://www.boren.gov.tr/Sayfa/bor-mineralleri/24> (Erişim Tarihi: 10.11.20)

BOREN <https://www.boren.gov.tr/Sayfa/rezervler/26> (Erişim Tarihi: 10.11.20)

BOREN <https://www.boren.gov.tr/Sayfa/cam-ve-seramik-sanayi/29> (Erişim Tarihi: 10.11.20)

Eti Maden <http://www.etimaden.gov.tr/turkiyede-bor> (Erişim Tarihi: 10.11.20)

Eti Maden <http://www.etimaden.gov.tr/dunyada-bor> (Erişim Tarihi: 10.11.20)

TAEK <https://www.taek.gov.tr/ogrenci/> (Erişim Tarihi: 10.11.20)

ICRP <https://www.icrp.org/> (Erişim Tarihi: 10.11.20)

EKLER

EK 1 – Radyasyon Dozu ve Radyasyon Doz Birimleri

Maruz kalınan radyasyon miktarının ölçülmesi ve olası etkilerinin araştırılması sağlık fiziği alanında önem arz eden durumdur. Birim kütleyle radyasyon enerjisinin ulaşması “radyasyon dozu” olarak tanımlanır. Radyasyonun etki ettiği ortamda meydana getireceği etki; radyasyonun türüne, doz hızına ve maruz kalma süresine bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Bu sebeple doz birimleri tanımlanmıştır. Birim karışıklığını önlemek için ise radyasyon doz birimleri uluslararası standartlarla (SI) belirlenmiştir.

Aktivite Birimi: Bir radyoaktif maddenin birim zamandaki bozunma sayısına *aktivite* denilmektedir. Geleneksel Birimi Curie (Ci) olarak bilinirken, SI standartında Becquerel (Bq)'dir.

Işınlanma Birimi: Elektromanyetik radyasyonların (X ışını vb.) havayı iyonize etmesinin ölçüsü olarak tanımlanmıştır. Maruz kalma olarak nitelendirilen bu kavramın geleneksel birimi röntgen olarak adlandırılmaktadır. SI biriminde, 1 kg havada $2,58 \times 10^{-4}$ C yük birimi oluşturan X-ışını veya gama ışını dozu 1 C/kg olarak adlandırılır.

Soğurulan Doz Birimi: Hastanın ya da bir nesnenin maruz kaldığı doz miktarını belirlemede kullanılır. Birim zamanda soğurulan doz miktarına *doz hızı* denir. Soğurulan dozun SI sistemindeki birimi gray (Gy)'dir. 1 Gy, 1kilogramlık maddenin 1 joule cinsinden soğurduğu enerji miktarıdır. Soğurulan dozun geleneksel birimi rad ile verilir ve gray biriminin yüzde biridir (1 Gy = 100 rad).

Eşdeğer Doz Birimi: Radyasyon türüne göre canlı dokuda meydana gelebilecek hasarlar farklı olacaktır. Örneğin 1 Gy'lik alfa radyasyonu, 1 Gy'lik beta radyasyonundan daha az zararlıdır. Bu kapsamda da eşdeğer doz birimi tanımlanmıştır. Eşdeğer doz, soğurulan dozun radyasyon kalite faktörü ile çarpımına eşittir. Eşdeğer dozun SI sistemindeki birimi sievert (Sv), geleneksel

sistemde ise rem birimi ile verilir. Sv birimi, rem biriminin 100 katıdır (1 Sv = 100 rem). Aşağıda verilen tabloda doz birimleri ve dönüşüm katsayıları özetlenmiştir.

Terim	Birim		
	Geleneksel	SI	
Aktivite	curie (Ci)	becquerel (Bq)	1Ci = 3,7x10 ¹⁰ Bq
Işınlanma	röntgen (R)	coulomb/kg (C/kg)	1 C/kg = 3876 R
Soğurulan Doz	rad	gray (Gy)	1 Gy = 100 rad
Eş Değer Doz	rem	sievert (Sv)	1 Sv = 100 rem

Bununla birlikte etkin doz ve kollektif doz tanımları da mevcuttur. **Etkin doz**, doku ve organların aldığı dozun tüm vücut için yüklediği riski ifade etmek için kullanılan bir kavramdır. Birimi sievert'tir. ICRP verilerine göre halkın yıllık ortalama etkin doz sınır değeri **1 mSv**, radyasyon çalışanları için ise bir yılda 50 mSv'i geçmemek kaydıyla 5 yıl için toplamda **100 mSv** (ortalama **20 mSv**) değerindedir. Kollektif doz ise, toplumun tamamının maruz kaldığı radyasyon dozunu ifade etmektedir.

EK 2 - Tezden Türetilmiş Yayınlar

Poster Sunumu: “Doğal Bor Mineralleri Kullanarak Radyasyon Dozimetresi Geliştirilmesi” UBAK, 2021.

Presentation ID/Sunum No= 79

Poster Presentation / Poster Sunum

Doğal Bor Mineralleri Kullanarak Radyasyon Dozimetresi Geliştirilmesi

Prof.Dr. Şeyda Çolak¹ , Elif Baştuğ¹

¹Hacettepe Üniversitesi

**Corresponding author: Elif Baştuğ*

Özet

Radyasyon, uzayda yayılan enerji olarak tanımlanmaktadır. Doğada ise radyasyon kaynağı doğal radyasyon ve yapay radyasyon olarak iki türde sınıflandırılmaktadır. Doğal radyasyon kaynaklarına örnek olarak kozmik ışınlar (güneş, yıldız vb.) verilmektedir. Yapay radyasyon kaynakları ise, tıpta tanı ve tedavide kullanılan radyoterapi, manyetik rezonans görüntüleme (MR) vb. cihazlarından yayılan radyasyon olarak bilinmektedir. Yaşamımız sürecinde maruz kaldığımız radyasyonun insan sağlığı üzerinde etkilerini ise göz ardı etmek mümkün değildir. ICRP (Uluslararası Radyolojik Koruma Komisyonu) ve ülkemizde TAEK (Türkiye Atom Enerjisi Kurumu) radyasyona maruz kalan insanları maruz kaldıkları doz limitlerini asgari düzeyde tutulması için radyasyon çalışanlarının kişisel radyasyon dozimetrelerini takma zorunluğuna yönelik çalışmalar başlatmıştır. Dozimetre sistemleri pahalı sistemler olup, malzeme tedariki açısından yurt dışı bağımlığımız söz konusudur. Bu kapsamda, ülkemizde rezerv kapasitesi yüksek olan bor minerali kullanarak radyasyon dozimetre malzemesi geliştirilmesi araştırılmıştır. Yapılan çalışmada, doğal kayaç olarak temin edilen bor minerallerinden üleksit, inyoit ve farklı iki tür kolemanit örneğinin radyasyon dozimetresi olarak kullanılabilirliği incelenmiştir. Çalışmanın ana hedefine odaklanmadan önce X-Işını Difraktometresi (XRD) ile minerallerin yapı analizi gerçekleştirilmiştir. Çalışma sürecinde Elektron Spin Rezonans (ESR) yöntemi ile sonuca ulaşmak hedeflenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Dozimetre,esr,kişisel Dozimetre,üleksit,inyoit,kolemanit