

**T.C.**  
**BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**  
**FİZİK ANABİLİM DALI**



**GERİYE DÖNÜK EPR DOZİMETRİK ÇALIŞMALARDA İNSAN DİŞ  
MİNESİNİN KULLANIMI**

**MESUT AYDOĞMUŞ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Jüri Üyeleri :** **Prof. Dr. Hasan TUNER** (Tez Danışmanı)  
**Prof. Dr. Asuman AYDIN**  
**Doç. Dr. Mustafa AKIN**

**BALIKESİR, ŞUBAT - 2024**

## ETİK BEYAN

Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak tarafımda hazırlanan “**Geriye Dönük EPR Dozimetrik Çalışmalarda İnsan Dış Minesinin Kullanımı**” başlıklı tezde;

- Tüm bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Kullanılan veriler ve sonuçlarda herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Tüm bilgi ve sonuçları bilimsel araştırma ve etik ilkelere uygun şekilde sunduğumu,
- Yararlandığım eserlere atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,

beyan eder, aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ederim.

**Mesut AYDOĞMUŞ**

## ÖZET

**GERİYE DÖNÜK EPR DOZİMETRİK ÇALIŞMALARDA İNSAN DIŞ  
MİNESİNİN KULLANIMI  
YÜKSEK LİSANS TEZİ  
MESUT AYDOĞMUŞ  
BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
FİZİK ANABİLİM DALI**

**DANIŞMAN: PROF. DR. HASAN TUNER  
BALIKESİR, ŞUBAT – 2024**

Bu tezde, olası bir radyoaktif veya radyolojik kaza sonrasında bireylerin maruz kaldığı radyasyon dozunu belirlemek amacıyla 100-1000 mGy doz aralığında insan dış minesini kullanarak EPR deneyleri yapılmıştır. Tıbbi nedenlerle diş hekimi tarafından çekilen yirmi yaş dişleri kullanılmıştır. Bu dişlere ait diş minesini dentilden, sterilizasyon işleminden sonra yüksek hızlı elmas uçlu matkap kullanılarak elde edildi. Uygun numune hazırlama prosedürleri uygulandıktan sonra mine parçaları, Elekta'nın ürettiği 6 MeV X-ışınlarına sahip tıbbi lineer hızlandırıcı (LINAC) kullanılarak 100, 250, 500 ve 1000 mGy'de ışınladı. Bilinmeyen dozda ışınlanmış bir numune, farklı analiz yöntemleri kullanılarak elde edilen doz-cevap eğrilerini kontrol etmek için de kullanıldı.

Doz-cevap eğrilerini oluşturmak için üç farklı yöntem tekniği uygulandı; burada radyasyona bağlı diş minesini EPR sinyali, Bruker SimFonia yazılımı kullanılarak ışınlanmamış spektrumların ışınlanmış spektrumlarından çıkarılmasıyla elde edildi. Doz-cevap eğrilerinin oluşturulmasında kullanılan yöntemler; (i) EPR spektrumundan sinyal şiddetinin doğrudan okunması, (ii) Origin v7.5 veri analizi yazılımı kullanılarak özel bir model kullanılarak simülasyon ve (iii) MATLAB altında çalışan ev yapımı programla gerçekleştirilen simülasyon. Bu üç yöntemle elde edilen veriler, doz-cevap eğrilerini ayrı ayrı oluşturmak için kullanıldı. Doz-cevap verileri doğrusal bir fonksiyon olan  $I(D) = a + b * D$ 'a fit edildi. Bilinmeyen bir dozla ışınlanan numunenin EPR spektrumu için radyasyon sinyalini elde etmek için aynı prosedürler uygulandı. Bilinmeyen numune dozu, bu üç yöntemle elde edilen her fonksiyon kullanılarak hesaplandı. Elde edilen sonuçlar literatürle oldukça uyumludur ve EPR'nin tesadüfi ve/veya geriye dönük dozimetrik materyal olarak diş minesinin kullanımını bir kez daha onaylandı.

**ANAHTAR KELİMELELER:** EPR, diş minesini, radyasyon dozu, kaza dozimetrisi, geriye dönük dozimetri

Bilim Kod / Kodları: 20216, 20223

Sayfa Sayısı: 43

## ABSTRACT

**USE OF HUMAN TOOTH ENAMEL AT RETROSPECTIVE EPR  
DOSIMETRICAL STUDIES  
MS'C THESIS  
MESUT AYDOĞMUŞ  
BALIKESİR UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE  
DEPARTMENT OF PHYSICS**

**(SUPERVISOR: PROF. DR. HASAN TUNER)  
BALIKESİR, FEBRUARY – 2024**

In this thesis, EPR experiments were carried out to determine the radiation dose to which individuals were exposed after a possible radioactive or radiological accident using human tooth enamel in the dose range of 100-1000 mGy. The wisdom teeth were removed for medical reasons by a dentist were used. The enamel of these teeth was obtained after sterilization and extraction of the dentils by high-speed diamond drill. After applying appropriate sample preparation procedures, the enamel fragments were irradiated to 100, 250, 500 and 1000 mGy using a medical linear accelerator (LINAC) produced by Elekta with 6 MeV X-rays. A sample that irradiated with unknown dose was also used to control the dose-response curves that obtained using different analysis techniques.

Three different analysis techniques were applied to construct the dose-response curves, in which the radiation-induced EPR signal of enamel was obtained by subtraction of the unirradiated spectra from the irradiated spectra using Bruker SimFonia software. The methods used for the construction of dose-response curves are; (i) direct reading of the signal intensity from the EPR spectra, (ii) simulation using a special model using Origin v7.5 data analysis software, and (iii) simulation performed by home-made program running under MATLAB. The data obtained by these three methods were used to construct the dose-response curves individually. The dose-response data were fitted to a linear function  $I_{(D)} = a + b * D$ . The same procedures were applied to obtain the radiation signal for the EPR spectra of the sample irradiated by an unknown dose. The unknown sample dose was calculated using each function obtained by these three methods. The obtained results were in good agreement with the literature, and once again tooth enamel usage as EPR accidental and/or retrospective dosimetric material is approved.

**KEYWORDS:** EPR, tooth enamel, radiation dose, accident dosimetry, retrospective dosimetry

# İÇİNDEKİLER

## Sayfa

ÖZET .....	i
ABSTRACT .....	ii
İÇİNDEKİLER.....	iii
ŞEKİL LİSTESİ .....	iv
TABLO LİSTESİ.....	v
SEMBOL LİSTESİ .....	vi
ÖNSÖZ .....	vii
1. GİRİŞ.....	1
1.1 İnsan Dişleri ve Özellikleri.....	2
1.1.1 Süt Dişleri .....	2
1.1.2 Kalıcı Dişler.....	3
1.1.3 Yirmi Yaş Dişleri (20'lik dişler) .....	3
1.1.4 Dişlerin İsimlendirilmesi ve Görevleri.....	4
1.1.5 Dişin Yapısı .....	4
1.1.5.1. Diş Minesinin Yapısı.....	6
1.1.5.2. Dentinin Yapısı .....	6
1.2. Radyasyon ve Etkileri .....	7
1.3 Radyasyon Kazaları ve Dozimetri .....	10
1.3.1 Radyasyon Kazaları .....	10
1.3.2 Dozimetri .....	12
1.4 Elektron Spin Rezonans Spektroskopisi .....	13
1.4.1 Spektroskopik Yarılma Çarpanı.....	17
1.4.2 Aşırı İnce Yapı Etkileşmesi.....	19
1.4.3 Spin Hamiltoniyeni .....	21
1.5 Diş Minesinin EPR Spektrumu .....	22
2. DENEYSEL YÖNTEM.....	25
2.1 EPR Spektrometresi.....	25
2.2 Diş Minesinin Hazırlanması .....	27
2.3 Deneysel Işınlama .....	28
3. BULGULAR .....	29
3.1 Mikrodalga Doyum Çalışması.....	30
3.2 Modülasyon Genliği Değişimi.....	31
3.3 Dozimetrik Bulgular .....	32
3.3.1 Fark alma yöntemi .....	32
3.3.2 Origin Simülasyonu Yöntemi .....	34
3.3.3 Matlab Simülasyon Yöntemi .....	36
4. SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME .....	38
5. KAYNAKLAR.....	40
ÖZGEÇMİŞ .....	43

# ŞEKİL LİSTESİ

## Sayfa

Şekil 1.1: Bir çocuğun çene yapısında gelişmekte olan kalıcı dişer ve gelişimini tamamlamış süt dişleri .....	3
Şekil 1.2: Panoramik görüntüsü çekilen açılı çıkan yirmi yaş dişi .....	4
Şekil 1.3: Dişlerin isimlendirilmesi ve yapısal bölümleri .....	5
Şekil 1.4: Dişin genel yapısı.....	5
Şekil 1.5: Elektromanyetik spektrum.....	7
Şekil 1.6: Radyasyon kaynaklarının sınıflandırılması .....	8
Şekil 1.7: Nükleer olay hiyerarşisi .....	10
Şekil 1.8: Elektronların bir manyetik alan içinde yönelmesi .....	13
Şekil 1.9: Elektron spinleri $S=\pm \frac{1}{2}$ elektron üzerine bir dış manyetik alan uygulandığında Zeeman yarılması sonucu oluşan enerji geçişi.....	16
Şekil 1.10: Çiftlenimsiz bir elektronun EPR spektrumu a) Soğurma eğrisi b) Soğurma eğrisinin birinci türevi.....	17
Şekil 1.11: Koordinat düzleminde herhangi bir doğrultuda yönelmiş manyetik alan .....	19
Şekil 1.12: Simetriye bağlı olarak EPR spektrum şekilleri.....	19
Şekil 1.13: Aşırı ince yapı etkileşimi .....	20
Şekil 1.14: Elektron spini $S=1/2$ , ve çekirdek spini $I=1/2$ olan bir sistemin enerji diyagramı .....	22
Şekil 1.15: Arka plan sinyali.....	23
Şekil 1.16: 10 Gy radyasyona maruz kalmış örnek spektrumu.....	24
Şekil 2.1: EPR spektrometrelerin isimlendirilmesi.....	25
Şekil 2.2: X-Band BURKER EMX-131 model EPR Spektrometresi.....	26
Şekil 2.3: X-band EPR spektrometresinin blok diyagramı .....	26
Şekil 3.1: Işınlanmamış diş minesini ait arka plan sinyali .....	29
Şekil 3.2: 1 Gy radyasyon dozunda ışınlanmış diş minesinin spektrumu.....	30
Şekil 3.3: Diş minesini EPR sinyalinde gözlenen arka plan sinyali (■), ve radyasyon sinyalinin (●) mikrodalga gücüne bağlı değişimi .....	31
Şekil 3.4: Diş minesinin EPR sinyalinin modülasyon genliği ile değişimi .....	32
Şekil 3.5: BRUKER WINEPR SimFonia programı arayüzü. Kırmızı sinyal; 1000 mGy dozunda ışınlanmış deneysel spektrumunu, Sarı sinyal; arka plan spektrumunu, ve Yeşil sinyal; radyasyon sonucu oluşmuş olan radyasyon sinyalini göstermektedir.....	33
Şekil 3.6: 0-1000 mGy aralığında fark yönteminin doz-cevap eğrisi .....	34
Şekil 3.7: Fark spektrum eşitliği (3.2) Origin 7.5 programında kullanılarak elde edilen radyasyon sinyali (siyah) ve elde edilen teorik spektrum(kırmızı).....	35
Şekil 3.8: 0-1000 mGy aralığında Origin simülasyon yönteminin doz-cevap eğrisi.....	36
Şekil 3.9: 0-1000 mGy aralığında MATLAB simülasyon yönteminin doz cevap eğrisi .....	37

## TABLO LİSTESİ

### Sayfa

<b>Tablo 2.1:</b> Deneysel spektrometre şartları .....	27
<b>Tablo 4.1:</b> Bilinmeyen dozda ışınlanan diş minesi örneği için hesaplanan doz değerleri ....	39



## SEMBOL LİSTESİ

<b>A</b>	: Aşırı ince yapı sabiti
<b>ABD</b>	: Amerika Birleşik Devletleri
<b>A<sub>p</sub></b>	: Anizotropik aşırı ince yapı yarılması
<b>ARS</b>	: Akut Radyasyon Sendromu
<b>A<sub>s</sub></b>	: İzotropik aşırı ince yapı yarılması
<b>D</b>	: Radyasyon dozu
<b>dI</b>	: Spektrum alanı
<b>EM</b>	: Elektromanyetik
<b>EPR</b>	: Elektron Paramanyetik Rezonans
<b>ESR</b>	: Elektron Spin Rezonans
<b>g</b>	: Spektroskopik yarılma çarpanı
<b><math>\mathcal{H}</math></b>	Enerji hamiltoniyeni
<b>h</b>	: Planck sabiti ( $6.62 \times 10^{-34}$ J.s)
<b>H<sub>0</sub></b>	: Rezonans Alanı
<b>H<sub>pp</sub></b>	: Tepeden tepeye çizgi genişliği
<b>IAEA</b>	: Uluslararası Atom Enerjisi Kurumu
<b>INES</b>	: International Nuclear and Radiological Event Scale
<b>I<sub>pp</sub></b>	: EPR sinyal şiddeti
<b>J</b>	: Toplam açısal momentumu
<b>k</b>	: Sönüm sabiti
<b>k.b.</b>	: Keyfi birim
<b>k<sub>b</sub></b>	: Boltzmann sabiti ( $1.38 \times 10^{-23}$ J/K)
<b>L</b>	: Yörünge açısal momentum
<b>MD</b>	: Mikrodalga
<b>NMR</b>	: Nükleer Manyetik Rezonans
<b>OLS</b>	: Optik Uyarmalı Lüninesans
<b>S</b>	: Spin açısal momentumu
<b>TL</b>	: Termolüninesans
<b>UNSCEAR</b>	: Birleşmiş Milletler Atomik Radyasyonun Etkileri Bilimsel Komitesi
<b>UV-A</b>	: Ultraviyole A
<b><math>\Delta H_{1/2}</math></b>	: EPR spektrumunun yarı yüksekliğindeki yarı genişliği
<b><math>\beta</math></b>	: Bohr manyetonu ( $9.27 \times 10^{-24}$ J/T)
<b><math>\gamma</math></b>	: Jiromanyetik oran
<b><math>\bar{\mu}</math></b>	: Manyetik moment
<b><math>\nu</math></b>	: Frekans
<b><math>\Delta E</math></b>	: Enerji farkı



## ÖNSÖZ

Bu çalışmanın gerçekleştirilmesinde, değerli bilgilerini benimle paylaşan, kendisine ne zaman danışsam bana kıymetli zamanını ayırıp, her sorun yaşadığımda yanına çekinmeden gidebildiğim, güler yüzünü ve samimiyetini benden esirgemeyen hayatımda önemli bir yeri olan değerli hocam ve danışman hocam Sayın Prof.Dr. Hasan TUNER'e,

Tez çalışmama başladığımda hayatta olan ve dualarını benden esirgemeyen rahmetli annem Hatice AYDOĞMUŞ'a, manevi desteklerinden dolayı babam Cuma AYDOĞMUŞ'a ve aileme,

Tez çalışma sürecimde her zaman desteğini esirgemeyen, teşvik ve fedakârlıklarından dolayı biricik eşim Nazan AYDOĞMUŞ'a son olarak canımdan bir parça olan kızım Naz Vera AYDOĞMUŞ'a tüm içtenliğimle şükranlarımı sunarım.

**Bahkesir, 2024**

**Mesut AYDOĞMUŞ**

# 1. GİRİŞ

Radyasyon ilk olarak ünlü Fransız fizikçi Henry Becquerel tarafından 1896 yılında Uranyum tuzlarının ışınlar yaydığını fark etmesiyle keşfedilmiş ve bu tarihten itibaren radyasyonla ilgili çok sayıda çalışma yapılmıştır.

Radyasyon, bir ortamda enerjinin parçacık veya dalga şeklinde yayılmasıdır ve iyonize radyasyon ve iyonize olmayan radyasyon olmak üzere ikiye ayrılır. İyonize radyasyon; maddeyle etkileştiğinde elektron koparabilen veya moleküler bağları kırabilen elektromanyetik dalga veya yüksek enerjili alfa ( $\alpha$ ), beta ( $\beta^+$  ve  $\beta^-$ ), proton ve nötron gibi radyasyon türüdür. İyonize olmayan radyasyon ise elektron veya moleküler bağları koparacak yeterli enerjisi olmayan radyasyon türüdür.

Yeryüzünde yaşayan canlılar, radyasyon kazaları sonucu yayılan radyasyona, kozmik ışınlara, dünyanın oluşumu ile birlikte yer kabuğunda bulunan radyoaktif elementlerin yaydığı radyasyona maruz kalırlar. Bu radyasyon miktarı canlıların yaşadığı yer, mevsimler, toprak yapısı, hava şartları, bulunduğu konumun deniz seviyesine yüksekliği, radyasyon kazasının gerçekleştiği yere olan uzaklığı gibi birçok faktöre bağlı olarak değişmektedir. Radyasyon kazaları sonucunda soğurulan dozun belirlenmesi; meydana gelen olay veya kazanın derecesinin, ne kadarlık bir alanı etkilediğinin, insanlar ve çevre üzerindeki biyolojik etkilerinin belirlenmesi açısından önem taşımaktadır. Bu doz değerlerinin belirlenmesinde;

- Elektron Spin/Paramanyetik Rezonans (ESR/EPR) Spektroskopisi
- Termo Limünesans (TL) ve Optik Uyarmalı Lüminesans (OSL)
- NMR Spektroskopisi
- Kolorimetri
- Atomik Absorbsiyon Spektroskopisi
- Spektrofotometri (UV-GB, IR, X ışını)
- Kütle Spektrometrisi
- Emisyon Spektroskopisi
- Atomik Emisyon Spektroskopisi
- Fluoresan Spektroskopisi
- Radyokimyasal Spektroskopisi yöntemleri kullanılmaktadır.

Radyasyonla veya radyolojik görüntüleme ve tedavisinde çalışan kişilerin soğrulan radyasyon dozunu belirlemede kullandıkları cihaz dozimetre olsa da bir kazada radyasyona maruz kalan bireylerin kaza anında kullanabilecekleri dozimetreleri yoktur. Bu sebeple, radyasyon dozunu belirlemede kullanılacak uygun malzemelerin önceden belirlenmesi önemlidir. EPR tekniğiyle maddelerin ya da canlıların soğurduğu doz miktarı güvenilir ve tekrarlanarak hassas bir şekilde belirlenebilir. Literatürde; cep telefonu kılıfı, düğme, saç, diş minesi, kemik ve bazı kimyasal maddelerin bu amaçla kullanıldığı görülmüştür (Fattibene ve Callens, 2010; Kamenopoulou et al. 1986; Nakajima, 1982, 1987; Delgano ve McClymond, 1989; Brady et al. 1968; IAEA, 2002; Ikeya, 1993, Trivedi ve Greenstock, 1993; Wieser et al., 2000, 2005, 2006 ). Bu malzemelerden diş minesi büyük potansiyel taşımaktadır. Radyasyon kazalarında insanların maruz kaldığı radyasyon doz miktarının belirlenmesinde diş minesi kolay saklanabilmesi, birden fazla ölçüm alınabilmesi ve olay veya kazadan çok sonra bile tam ölçüm yapılabilmesine olanak verdiği için geriye dönük EPR doz belirlemelerinde kullanılabilir (Fattibene ve Callens, 2010).

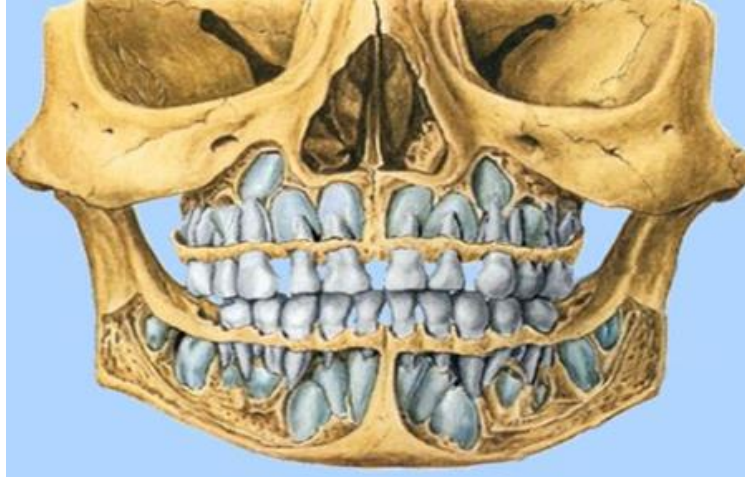
Bu tez çalışmasında fiziksel bir yöntem olan EPR spektroskopisi ile insan diş minesinin dozimetrik amaçla kullanılabilirliğini ve ışınlama sonucu diş minesinde oluşan radikal/radikallerin spektroskopik özellikleri araştırılmıştır.

## **1.1 İnsan Dişleri ve Özellikleri**

Dişler ısırma, çiğneme, öğütme, konuşma gibi farklı işlevsel göreve sahiptir. Anne karnında embriyolojik gelişim sürecinde ilk oluşum belirtileri 6. haftada başlar ve 7. haftada tomurcukların oluşumu başlayarak 20'li yaşlarına kadar devam eder. İnsanların dişlenmeleri iki aşamalı olarak gerçekleşir. Birinci aşamada süt (geçici) dişlerinin oluşumu, ikinci aşama ise kalıcı (daimi) dişlerin oluşumudur.

### **1.1.1 Süt Dişleri**

Anne karnında gelişmeye başlayan süt dişleri bebek doğduktan yaklaşık 6 ay sonra görünmeye başlar ve 2-3 yaşlarında tamamlanır. Çocuk 6-7 yaşına gelinceye kadar ağızda sadece süt dişleri bulunur. Bir çocuğun süt dişleri üst ve alt çenede toplam 20 adettir (Şekil 1.1). Bunlar, 8 kesici diş, 4 köpek diş, 8 azı dişidir. Süt dişleri % 92-93 inorganik madde, % 4 organik madde ve % 3 sudan oluşmaktadır (Yavuzyılmaz, 2015).



**Şekil 1.1:** Bir çocuğun çene yapısında gelişmekte olan kalıcı dişler ve gelişimini tamamlamış süt dişleri (İğneli, 2023a).

### **1.1.2 Kalıcı Dişler**

Çocuklarda 6-7 yaşından itibaren süt dişleri dökülmeye başlayarak yerini kalıcı dişlere bırakır ve 20'li yaşlarında kalıcı dişler tamamlanır. Sağlıklı yetişkin bir insanın ağızında üst ve alt çenede toplam 32 tane diş vardır. Bunlar, 8 adet kesici, 4 adet köpek, 8 adet küçük azı, 12 adet büyük azı dişidir. Genellikle bu dişlerin 28 tanesi işlevsel olarak kullanılırken en son çıkan 4 tanesinin işlevselliği yoktur. Kalıcı dişler; % 95-96 inorganik madde, % 2 organik madde ve % 2 sudan oluşmaktadır (Yavuzylmaz, 2015).

### **1.1.3 Yirmi Yaş Dişleri (20'lik dişler)**

İnsan ağızındaki dişlerden diş gelişimini en son tamamlayan ve en son çıkan, ağız içinde en arkada; 2 tane, alt çenede 2 tane, üst çenede yer alan büyük azı dişlerine, yirmi yaş dişleri (20'lik diş veya akıl dişi) denir. İnsanlarda yirmilik dişler 17- 25 yaş arasında kendini gösterir. Bazen genetik faktörlere bağlı olarak hiç oluşmamış veya oluşsa bile çenede çıkabileceği yer bulamayıp çenede gömülü halde kalabilir hatta diğer dişlerin ya da çenenin yapısını bozabilir. Yirmi yaş dişleri çoğunlukla sorun teşkil eden dişlerdendir bu sebeple diş hekimleri tarafından çekilmeleri önerilir. Şekil 1.2'de çene röntgeninde kırmızı daire içinde alt ve üst çenede açılı olarak çıkan ve diğer dişleri sıkıştıran yirmilik diş gösterilmiştir.



**Şekil 1.2:** Panoramik görüntüsü çekilen açılı çıkan yirmi yaş dişi (İğneli, 2023a).

#### **1.1.4 Dişlerin İsimlendirilmesi ve Görevleri**

İnsanların ağız içinde çene içine gömülü olarak bulunan dişler farklı işlevsellik özelliklerine göre kesici dişler, köpek dişleri ve azı dişleri olarak isimlendirilir.

Kesici dişler; alt ve üst çenelerin ortasında bulunan dişlerdir bu dişler besinlerin kesilmesine yardımcı olur. Alt çenede 4 üst çenede 4 tane olmak üzere 8 tanedir.

Köpek dişleri (kaninler); besinlerin koparılmasına yardımcı olan uçları sivri dişlerdir. Alt çenede 2 üst çenede 2 tane olmak üzere 4 tanedir.

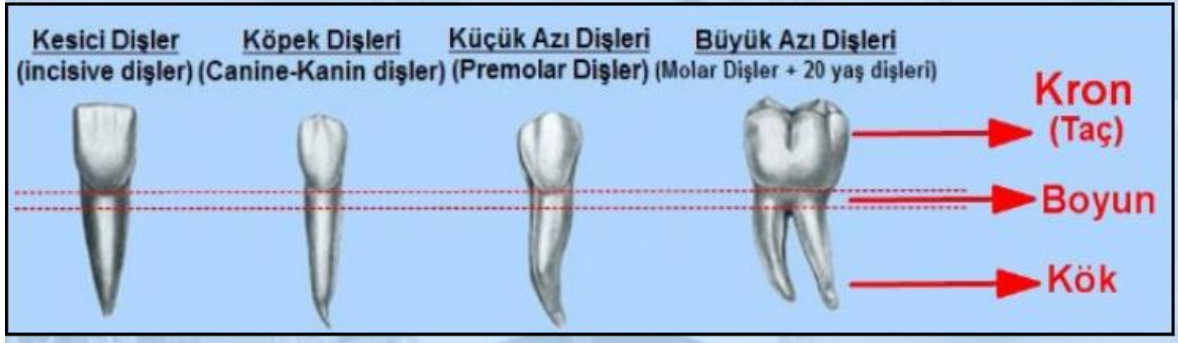
Azı Dişleri, besinlerin ezilerek öğütülmesine yardımcı olan dişlerdir. Alt çenede 4 üst çenede 4 tane olmak üzere 8 tane küçük azı dişi ve alt çenede 6 tane üst çenede 6 tane olmak üzere 12 tane büyük azı dişi bulunur.

#### **1.1.5 Dişin Yapısı**

İnsan dişleri cansız birer kemik gibi görünse de aslında canlı, farklı işlevsel özelliklere sahip organlardır. Bir dişin anatomisine bakıldığında Taç (Crown-Kron), Boyun (Collum), Kök (Radix, Root) olmak üzere 3 bölümden oluşmaktadır (Şekil 1.3).

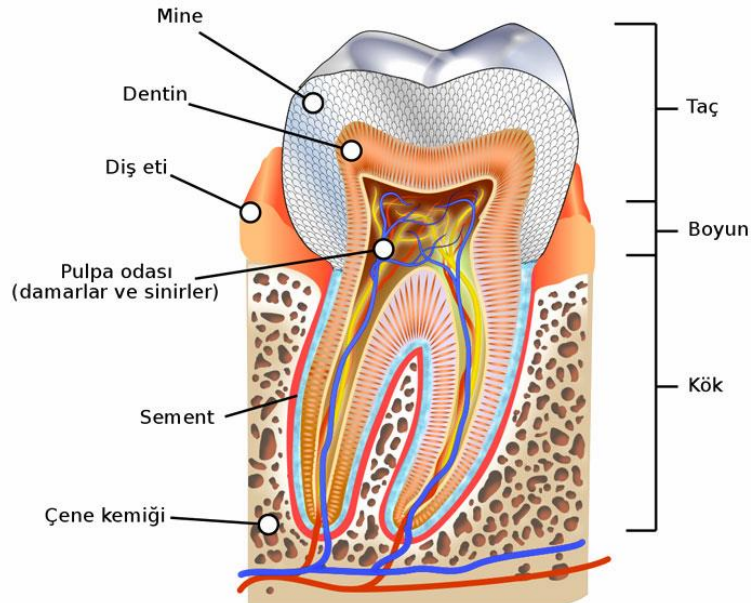
Ağız içinde dişlere bakıldığında beyaz renkli görünen diş etine kadar olan kısmı Taç (Crown-Kron) olarak adlandırılır. Dişin üçte-birini taç oluşturur. Dışarıdan bakıldığında beyaz renkli görünen çiğneme işlevini gerçekleştiren bu kısım mine olarak adlandırılır. Diş minesini çok sert ve dayanıklı bir yapıya sahiptir. Boyun kısmı (kole, collum dentis); taç

kısmın alt tarafında diş ve diş etlerinin birleştiği noktadır. Diş eti çizgisi olarak da adlandırılır. Ağız içinde görünmeyen diş etinden çene kemiğine kadar olan kısım Kök kısmı (root, radix) olarak adlandırılır. Kök dişin üçte-ikilik kısmını oluşturur ve dişin çene kemiğine tutunmasını sağlayarak çiğneme işlevini destekler. Canlı yapıya sahip olan diş için gerekli olan besinleri sağlayan damarlar ve hissiyatı sağlayan sinirler bulunur. Kökün merkezinde yukarıya doğru uzanan hissiyatı sağlayan sinirler bulunur.



**Şekil 1.3:** Dişlerin isimlendirilmesi ve yapısal bölümleri (İğneli, 2023b).

Bir dişin dikey kesiti alındığında içinde farklı organik ve inorganik maddelerden oluşan tabakalar vardır. (Şekil 1.4) Bu tabakalar dıştan içe doğru diş minesi (mine), dentin, sement ve pulpa'dan oluşmaktadır. Diş minesi, dentin ve sement dişin sert kısımlarını, pulpa ise yumuşak kısmını oluşturur.



**Şekil 1.4:** Dişin genel yapısı (Vikipedi, 2023).

Diş minesini; dişin taç kısmı olarak adlandırılan ağız içinde görünen kısmıdır. Diş üzerindeki bölgeye bağlı olarak diş minesinin kalınlığı 1-2.5 mm ve yoğunluğu  $2.9 \text{ g/cm}^3$  'tür.

Dentin yetişkin insanlarda dişin % 75'lik gibi büyük bir çoğunluğunu oluşturur. Vücut kemikleriyle aynı yoğunluğa ( $2.5 \text{ g/cm}^3$ ) sahip olmasına rağmen kemiklerden daha sert bir yapıya sahiptir. İçinde bulunan tamir hücreleri nedeniyle sıcaklığa ve hissiyata duyarlıdır (Manisalı ve Koray, 1982). Sement dişin kemiğe tutunmasını sağlayan dentine göre daha yumuşak yapıya sahiptir. Yapısında % 65 inorganik madde, % 23 organik madde ve % 12 su bulundurur. Dişin merkezinde bulunan, içinden diş besleyen kan damarları ve hissiyatı sağlayan sinirlerin geçtiği yumuşak dokuya da Pulpa adı verilir.

#### **1.1.5.1. Diş Minesinin Yapısı**

Diş minesini dişin ağız içinde görünen çigneme işlemini gerçekleştiren ve ağız içini ve dişin alt tabakalarını koruma işlevini gerçekleştiren kısımdır. Diş minesini çok fazla mineral tuz içerdiğinden vücudumuzdaki en sert dokulardan biridir ve diş minesinde sinir hücreleri olmadığından duyarlı değildir. Diş minesini ne kadar sert bir yapıya sahip olsa da dış etkilere maruz kaldığında deforme olabilmektedir ve bu deformasyon sonrası kendini yenileyememektedir. Rengi süt dişlerinde mavimsi beyaz iken kalıcı (daimi) dişlerde grimsi beyaz ya da sarımsı beyaz renklerinde görünür. Diş minesinin kalınlığı dişin çeşidine göre farklılık göstermektedir. Diş minesinin kalınlığı kesici ve köpek dişlerinde 2 mm, küçük azı dişlerinde 2.3 mm ile 2.5 mm arasında, büyük azı dişlerinde ve 20'lik dişlerinde bu kalınlık 2.5 mm ile 3 mm arasında değerler almaktadır (Koray, 1981).

Mine hacimsel olarak % 90 ile 92 inorganik % 4-6 organik ve yaklaşık % 4 sudan oluşmaktadır. Diş minesini kütlece %95-98 inorganik madde, % 1 organik madde ve % 4 su bulundurur. Diş minesinin konsantrasyon olarak büyük çoğunluğunu hidroksiapatit kristalleri, kalsiyum fosfat, fosfor, karbonat, magnezyum, sodyum, su gibi inorganik maddelerden oluşturduğu belirtilmiştir (Charbenau, 1988).

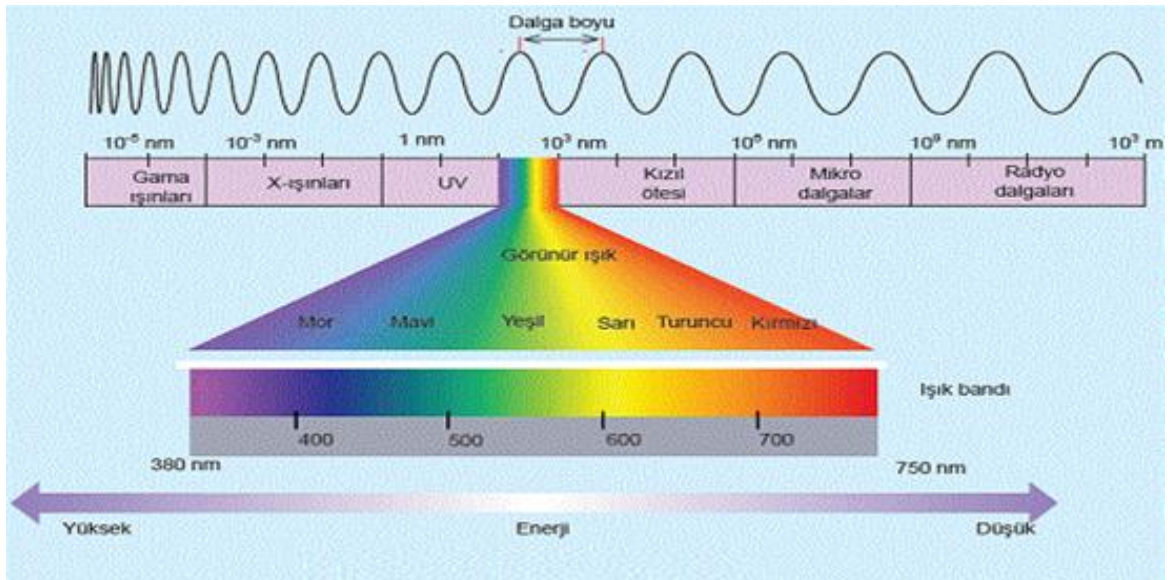
#### **1.1.5.2. Dentinin Yapısı**

Dişin taç kısmında mine ile pulpa arasında, dişin kök kısmında sement ile pulpa arasında kalan kısımdır. Dentin üzerine düşürülen ışığı yarı geçirgen özelliğe sahiptir ve sarımsı beyaz renktedir. Dentinin sertliği mineden daha azdır ancak kemik ve sement dokusundan daha fazladır (Manisalı ve Koray, 1982).

Dentin dokusu hidroksi apatit kristallerinden oluşmuştur. Dentin hacimsel olarak % 45-50 inorganik madde, % 30 organik madde ve % 20-25 sudan oluşan canlı bir dokudur. Dentin kütleye % 70'i inorganik madde, % 20'si organik madde, % 10'u su bulundurur (Marshall et al. 2010)

## 1.2. Radyasyon ve Etkileri

Radyasyon görülmez, duyulmaz, kokusu ve tadı alınmaz, dokunarak algılanamaz yani duyu organlarımız tarafından algılanması mümkün değildir. Radyasyon, maddeler üzerindeki etkilere göre “iyonize radyasyon” ve “iyonize olmayan radyasyon” olarak ikiye ayrılır. İyonize radyasyonlar; yüksek enerjiye sahip madde ile etkileştiğinde elektrik yüklü parçacıklar veya iyonlar oluşturan x-ışınları ve radyoaktif elementlerden yayımlanan alfa ( $\alpha$ ), beta ( $\beta$ ), gama ( $\gamma$ ) ışınlarıdır. İyonizasyon doğadaki tüm canlılarla, insanlarda ve tüm maddelerde de oluşabilir. Bu radyasyon türü önlem alınmadığı takdirde tüm canlılar için zararlı olabilecek radyasyondur. İyonize olmayan radyasyonlar ise iyon oluşturacak kadar enerjiye sahip olmayan radyo dalgaları, mikrodalgalar, kızılötesi ışınlar, görünür ışık, ultraviyole A (UV-A) ışınlarıdır. Şekil 1.5'de iyonize ve iyonize olmayan radyasyon elektromanyetik (EM) spektrum üzerinde verilmiştir.

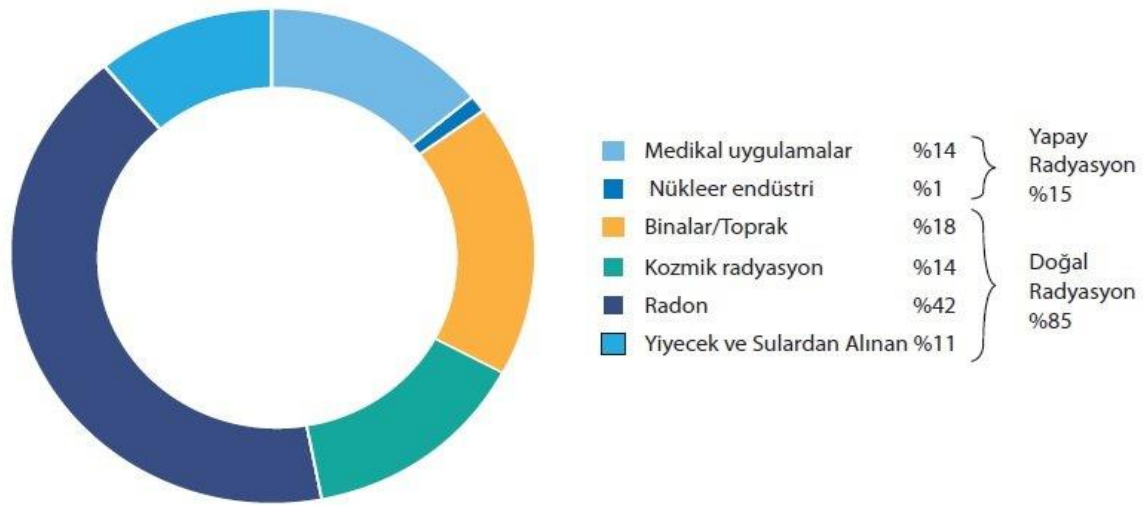


Şekil 1.5: Elektromanyetik spektrum (Aksoy, 2016).

Dünyada var olan canlılar yaşamları boyunca doğal radyasyon kaynaklarının etkisi altında bir yaşam sürmektedirler. Bitkiler ve hayvanlar dünyanın var oluşundan günümüze kadar uzaydan gelen yüksek enerjili kozmik ışınlarla, yer kabuğunun toprak yapısına bağlı olarak



yer kabuğunda bulunan doğal radyoaktif izotoplar nedeniyle radyasyona maruz kalmışlardır. Radyasyon, insan hayatı için bir tehlike oluştursa da bilim insanları bazı kullanım alanlarında yarar sağladığını keşfetmişler ve radyasyon artık hayatımızın bir parçası haline gelmiştir. İyonize edici (iyonlaştırıcı) radyasyon kaynaklarını doğal radyasyon ve yapay radyasyon olarak iki grupta sınıflandırabiliriz. Şekil 1.6'de canlıların dünya genelinde doğal ve yapay kaynaklı radyasyon kaynaklarından alınan dozun yüzdelik dilimleri verilmiştir.



Şekil 1.6: Radyasyon kaynaklarının sınıflandırılması (AFAD, 2023).

Birleşmiş Milletler Atomik Radyasyonun Etkileri Bilimsel Komitesi (UNSCEAR), insanların doğal radyasyona maruz kalmasının dört ana kaynağı olduğunu belirtmiştir

- Kozmik radyasyon
- Yiyecek ve içeceklerle alınan radyasyon (ingestion)
- Solunan radyasyon (inhalasyon)
- Karasal radyasyon (terrestrial)

Güneş, yıldızlar ve galaksilerden kaynaklanan yüksek enerjiye sahip kozmik ışınların büyük bir çoğunluğu atmosfer tarafından filtrelenir. Deniz seviyesinden yükseklere çıktıkça yüksek irtifalarda kozmik ışınların yoğunluğu artar.

İnsanlar yemek, içme alışkanlıklarına bağlı olarak yiyeceklerden de radyasyon almaktadır. İnsanların vücutlarında bulunan özellikle potasyum-40 ( $^{40}\text{K}$ ) ve karbon-14 ( $^{14}\text{C}$ ) radyoaktif

element izotoplarının yoğunluğu bitkisel ve hayvansal gıda tüketimlerine ve buldukları bölgeye bağlı olarak değişkenlik gösterebilmektedir.

İnsanoğlu, teknolojinin hızla ilerlemesiyle ve teknolojik gelişmeler nedeniyle bazı radyasyon kaynaklarını yapay yollarla üretmiştir. Yapay radyasyon kaynaklarını besin endüstrisi, kimya endüstrisi, ziraat, tıp ve nükleer bomba denemeleri sonucu oluşan serpintiler, x ışınları vs. olarak sıralamak mümkündür. Günlük hayatta yapay radyasyona maruz kalan kişilerin aldıkları doz miktarı insanların geçirdiği hastalıklara, yaşadığı yerin yükseltisine, yemek yeme alışkanlıklarına ve hatta mesleğine göre değişkenlik gösterebilmektedir. Yapay radyasyonlardan alınan doz miktarı doğal radyasyondan alınan doz miktarına göre daha düşük ve kontrol altında tutulabilmektedir. Maruz kalınan radyasyonun % 15'lik kısmını yapay radyasyon oluşturmaktadır. Şekil 1.6'da görüldüğü gibi yapay radyasyonun en fazla medikal (tıbbi) uygulamalar oluşturmaktadır. Üretilen yapay radyasyonlar kullanım alanlarını şu şekilde sıralamak mümkündür:

**Tıbbi uygulamalar:** Hastalıkların teşhis, tedavisinde (hücre tümörlerin yok edilmesinde) kullanılır.

**Tanısal radyoloji:** X ışınlarının hastadan geçirilerek hastalıklı bölgenin görüntüsünün (röntgen filmi) çekiminde kullanılır.

**Nükleer tıp:** Vücuda verilen radyoaktif maddelerin doku ve organlarda toplanmasıyla salınan Gama ( $\gamma$ ) ışınlarını algılayan cihazlar ile görüntü elde edilmesinde kullanılır.

**Radyoterapi:** Kanser hastalarının tedavisinde etkin olarak kullanılır. Genellikle kobalt-60 ( $^{60}\text{Co}$ ) ve yüksek enerjili hızlandırıcı kaynaklı cihazlar kullanılır.

**Endüstriyel uygulamalar:** Endüstri ürünlerinin röntgen filmlerinin çekilerek herhangi bir hata içerip içermediği, gıdaların sterilizasyonu, tek kullanımlık tıbbi malzemelerin sterilizasyonunda kullanılır.

**Nükleer serpinti:** Yer altında ve yer üstünde gerçekleştirilen nükleer bomba tatbikatları sonucu meydana gelen radyoaktif serpintiler.

**Nükleer güç santralleri:** Uranyum gibi ağır radyoaktif atomların bir nötronla çarpması ile daha küçük atomlara bölünmesiyle (filyon) ya da hafif radyoaktif atomların birleşerek daha ağır atomları oluşturması (füzyon) sonucu açığa çıkan enerjiden elektrik enerjisi üretilmesinde kullanılır.

**Tüketici ürünler:** Fosil yakıtları, gübreler ve günlük hayatta kullanılan teknoloji aletlerinde (duman dedektörleri, fosforlu saatler, paratonerler vs) kullanılır.

## 1.3 Radyasyon Kazaları ve Dozimetri

### 1.3.1 Radyasyon Kazaları

Radyasyonun keşfedilmesiyle birlikte radyasyon alanında yapılan çalışmalar doğrultusunda radyoaktif elementler endüstride, nükleer santrallerde ve tıp alanında kullanılmaya başlanmasıyla kazaları da birlikte getirmiştir. Bu kazaların nükleer tesisin donanımına bağlı olarak ya da doğal afetlerden kaynaklandığı bilinmektedir. Dünya üzerinde meydana gelen bu kazaların büyüklüğü Uluslararası Nükleer ve Radyolojik Olay Ölçeği'ne (International Nuclear and Radiological Event Scale, INES) göre derecelendirilir (Şekil 1.7).



Şekil 1.7: Nükleer olay hiyerarşisi (Ülgen vd., 2011).

INES'ye göre 1. , 2. ve 3. seviyeler küçük nükleer olay olarak adlandırılırken 4. ve üstü seviyeler nükleer kaza olarak adlandırılır. Bu derecelendirilme sonucunda kaza veya olay ile ilgili alınması gereken önlemler, risk alanının belirlenmesi, ilk yardım çalışmalarının belirlenmesi ve gerekiyorsa insanların tahliye işlemlerinin yapılması gibi tedbirler gözden geçirilir. Dünya üzerinde ve ülkemizde de bazı kazaları örnekler verecek olursak (IAEA. 1998);

**Three Mile Adası Kazası:** Amerika Birleşik Devletleri'nin doğu eyaletlerinden olan Pensilvanya'da 28 Mart 1979'da nükleer enerji santralının 2 no'lu reaktöründe INES verilerine göre seviye 5 düzeyinde kaza meydana gelmiştir (Wing, 2011). Kazada soğutma

sistemlerindeki mekanik arıza ile başlamış ve operatörlerin soğutma sistemdeki vananın açık kaldığını fark etmemeleri üzerine soğutma sistemindeki ısı yükselerek çekirdeğin kısmen erimesine neden olmuştur. Kaza sonrası Amerikan Nükleer Düzenleme Komisyonu çevreye yayılan radyasyonun düşük miktarda olduğu ve kanser yapıcı etkisinin bulunmadığını rapor etmiştir (Wing, 2011) . Kaza sonrası yapılan bilimsel çalışmalar komisyonun raporu ile paralellik göstermektedir (Günel, 2017).

**Çernobil Kazası:** Ukrayna'nın (Eski Sovyetler Birliği) Pripjat şehri yakınlarında kurulan nükleer santralde 26 Nisan 1986, nükleer enerji santralinin 4. ünitesinde INES verilerine göre seviye 7 düzeyinde kaza meydana gelmiştir (Günel, 2017). Santralde bulunan 4. ünitenin bakımlar için kapatıldığında sistem denemesi sırasında beklenmedik güç dalgalanmasına sebep oldu bu dalgalanma sonrasında çekirdeğin erime meydana gelmiş ve reaktörün patlamasına sebep olmuştur. Bu kaza sonrası oluşan patlama ve yangın nedeniyle atmosfere yüksek derecede radyasyon salınımı gerçekleşmiştir. Meydana gelen kaza sonrasında bölgede yaşayan 200-250 bin civarı insan tahliye edilmiştir. Meydana gelen bu kaza sonrasında serpinti bulutlar nedeniyle başta Ukrayna olmak üzere sınır ülkeler ve Türkiye'nin Doğu Karadeniz bölümü ciddi şekilde etkilenmiştir (Günel, 2017).

**Fukushima Daiichi Kazası:** Japonya'nın doğusunda Fukushima bölgesinde kurulan Fukushima Daiichi Nükleer Enerji Santrali'nde 11 Mart 2011 tarihinde meydana gelen 9.0 büyüklüğündeki deprem ve sonrasında meydana gelen tsunami sonrası INES verilerine göre seviye 7 düzeyinde kaza meydana gelmiştir. Deprem olduğunda 4, 5 ve 6 numaralı reaktörler bakım için katılmış, 1, 2 ve 3 numaralı reaktörler enerji üretimine devam ettikleri esnada oluşan tsunami sonrası, sular altında kalarak 1 ve 3 numaralı reaktörlerin bulunduğu binada hasar meydana gelmiştir. 2 ve 4 numaralı reaktörde patlama ve çıkan yangın nedeniyle yüksek derecede radyasyon salınımı gerçekleşmiştir. Meydana gelen kaza sonrasında bölgede yaşayan 250-300 bin civarı insan tahliye edilmiştir (Doğruluk et al. 2018).

**Atom bombası:** Dünya tarihinde atom bombasının kullanıldığı ilk ve tek askeri saldırı II. Dünya savaşında Amerika Birleşik Devletleri (ABD) 6 Ağustos 1945'de Japonya'nın Hiroşima kentine Uranyum-235 tipi, 9 Ağustos 1945'de Japonya'nın Nagasaki kentine Plütonyum-239 tipi atom bombası attığı saldırılarda patlama sonucunda 1 km yarıçapındaki alanda 3000°C sıcaklıkta ısı etkisi oluşmuş ve oluşan alev fırtınası 1800 km/saat hızla her şeyin yanmasına, yerle bir olmasına sebep olmuştur (Young, 2005 ). İlk belirlemelere göre Hiroşima'da 140 bin Nagasaki'de 80 bin insan hayatını kaybetmiştir. Bunun yanı sıra atom bombaları atıldıktan sonra başlayan yağmurla radyoaktif

serpentinin yeryüzüne inmesiyle bilanço giderek artarak yayılan radyasyon nedeniyle ilerleyen yıllarda doğan çocuklarda da ciddi genetik bozukluklar meydana gelmiştir (Young, 2005 ).

**İstanbul İkitelli Kazası:** Türkiye 8 Ocak 1999'da INES verilerine göre seviye 3 ciddi olay meydana gelmiştir (IAEA, 2000). Bir depoda muhafaza edilen Medikal uygulamada kullanılan kobalt-60 ( $^{60}\text{Co}$ ) içeren radyoterapi kaynakları hurdacılara satılmış ve hurdacıların koruyucuyu kıraması sonucu kendileri, aileleri ve çevredeki insanlar bilmeyerek yüksek dozda radyasyona maruz kalmışlardır. Bu kaza sonrası 1 kişi yaşamını yitirmiş 18 kişi kısa süreli radyasyona maruz kaldığından Akut Radyasyon Sendromu (ARS) gözlenerek tedavi edilmiştir ( IAEA, 2000 ).

### **1.3.2 Dozimetri**

Çevremizde gördüğümüz canlı ve cansız varlıkların bilerek veya bilmeyerek herhangi bir iyonlaştırıcı radyasyona maruz kaldıklarında absorbe ettikleri radyasyon dozunun hesaplanması ve analiz edilmesine dozimetri denir.

Dozimetrik yöntemler biyolojik ve fiziksel yöntem olmak üzere ikiye ayrılır;

#### **Fiziksel Dozimetri**

- Cep Dozimetresi
- Film Dozimetri
- Termoluminesan Dozimetri
- Elektron Spin Rezonans

#### **Biyolojik Dozimetri**

- Kromozom Aberasyonları
- Mikronukleus
- Biyokimyasal İndikatörler
- Spermatogenesis
- Haemapoiesis

Radyasyon ihtiva edene yerlerde çalışan insanlar fiziksel dozimetrelere birini bulundurmaları zorundadır. Radyasyon kazalarında dozimetrenin bulunamama olasılığı düşünüldüğünde ve nükleer kazalarda radyasyona maruz kalan insanlarda dozimetre bulunmadığından uygun yöntemler kullanılarak radyasyon dozunun belirlenmesi

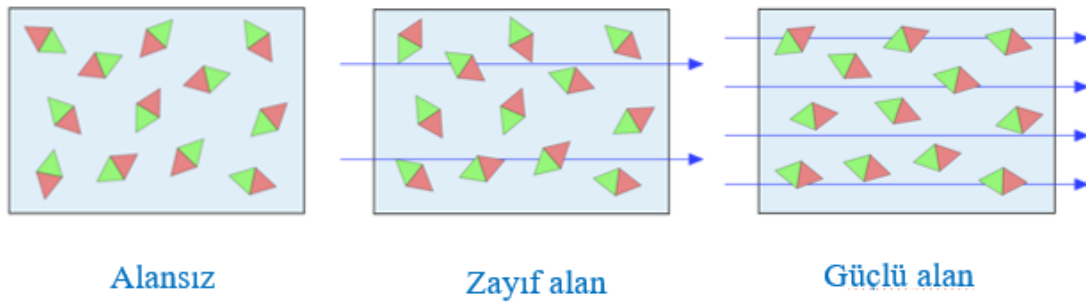
gerekmektedir. Bunlardan ilki biyoloji dozimetrik yöntemlerdir. Ancak biyolojik yöntemlerle belirlenen dozun fiziksel yöntemlerle teyit edilmesi gerekmektedir. İşte burada TL ve EPR dozimetrik yöntemleri devreye girmektedir. Bu çalışmada EPR dozimetrik yöntemi kullanıldığından bu spektroskopik yöntem hakkında daha ayrıntılı bilgi verilecektir.

#### 1.4 Elektron Spin Rezonans Spektroskopisi

Spektroskopi bir maddenin moleküllerini, atomlarını ve çekirdeklerinin kuantumlanmış enerji düzeylerini inceler. Spektroskopik yöntemlerde maddenin elektromanyetik radyasyonu yayması, soğurması, saptırması genel olarak maddenin elektromanyetik radyasyonla etkileşimi ve bu etkileşimin sonuçları analitik amaçlara dönük olarak incelenir.

Manyetik momentleri sıfırdan farklı ve aralarındaki etkileşimin zayıf olduğu yapı taşlarının meydana getirdiği maddelere paramanyetik madde denir.

Paramanyetik malzemeler çiftlenmemiş elektronlar içeren maddelerdir. Manyetik alan olmadığında manyetik momentler rastgele yönelirken, manyetik alan uygulandığında manyetik alanın yönüne uygun olarak dizilirler (Şekil 1.8).



Şekil 1.8: Elektronların bir manyetik alan içerisinde yönelmesi.

Sistem üzerine bir manyetik alan uygulandığında manyetik alanla etkileşen atomun çekirdeği ise Nükleer Magnetik Rezonans (NMR), manyetik alanla etkileşen atomun elektronu ise Elektron Spin Rezonans (ESR) veya diğer adıyla Elektron Paramanyetik Rezonans (EPR) tekniği olarak adlandırılır. EPR spektrometresi elektron spinini konu olarak elektromanyetik spektrumda mikro dalga bölgesinde rezonans frekansı GHz mertebesinde değerler alır.

EPR spektroskopisi tekniğinin temelleri 1922 yılında Otto Stern ve Walther Gerlach tarafından gerçekleştirilen kendi isimlerinin verildiği Stern-Gerlach deneyi ile atılmıştır. 1922 yılında yaptıkları deneyde düzgün olmayan manyetik alana gönderilen gümüş-47 ( $^{47}\text{Ag}$ ) atomlarının manyetik alanda saptığını gözlemlediler. EPR ilk kez deneysel olarak 1944 yılında Kazan Üniversitesi'nde Evgeny K. Zavoisky tarafından paramanyetik  $\text{CuCl}_2$  örneğine ait bir soğurma spektrumu olarak gözlenmiştir.

EPR spektroskopik yöntemi fizik, tıp, kimya, arkeoloji, jeoloji, ziraat, biyoteknoloji, materyal araştırmaları ve ileri teknolojik malzeme araştırmaları gibi hemen hemen bütün bilimlerde kullanılmaktadır.

Manyetik momenti  $\mu^{\rightarrow}$  olan serbest elektronun spin açılal momentumu vektörü  $S^{\rightarrow}$  olarak verildiğinde aralarındaki ilişki;

$$\mu^{\rightarrow} = \gamma S^{\rightarrow} = -g\beta S^{\rightarrow} \quad (1.1)$$

eşitliğiyle ifade edilir.

Denklemdede bulunan  $\gamma$ ; jromanyetik oran,  $\beta$ ; Bohr magnetonu ( $9.27 \times 10^{-24}$  J/T ),  $g$ ; spektroskopik yarıılma çarpanıdır (Lande g- faktörü). Lande g- faktörü serbest elektron için 2.0023'dir.

Manyetik momenti yukarıda verilen serbest elektron üzerine H dış manyetik alanının uygulanması durumunda, manyetik alan ile manyetik moment vektörü arasındaki etkileşim sonucunda enerji oluşumu gerçekleşir. Bu enerji,

$$E = -\mu^{\rightarrow} \cdot H^{\rightarrow} = -|\mu| |H| \cos \theta \quad (1.2)$$

eşitliğiyle ifade edilir.

z eksenini doğrultusunda spin kuantum sayısı  $s = 1/2$  olan serbest elektron üzerine bir dış manyetik alan uygulandığında verilen enerji;

$$E = -\mu^{\rightarrow} \cdot H^{\rightarrow} = -\mu_z H_z \quad (1.3)$$

eşitliğiyle ifade edilir. Daha önce (1.1) eşitliğinde verilen manyetik momentin z eksenindeki bileşeni,

$$\mu_z = -g\beta S_z \quad (1.4)$$

eşitliğiyle ifade edilir.

Manyetik momentin z eksenindeki bileşenini (1.4), enerjide eşitliğinde (1.3) yerine koyarsak;

$$E = g\beta H_z S_z \quad (1.5)$$

olarak ifade edilir.

Spin kuantum sayıları serbest elektron için  $S_z = \pm 1/2$  değeri alacağından öz enerji değerleri;

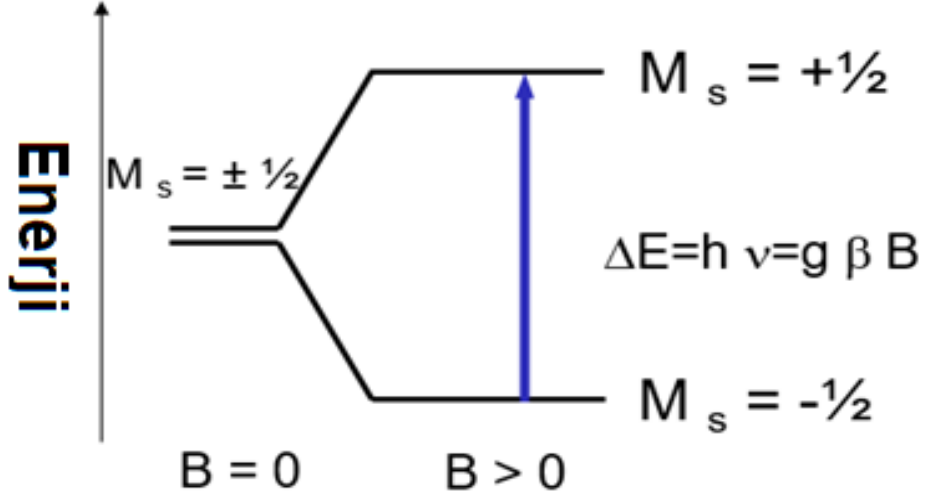
$$E_a = + 1/2 g\beta H \quad (1.6a)$$

$$E_b = -1/2 g\beta H \quad (1.6b)$$

eşitlikleri ile ifade edilir.

Yani, elektron spinleri üzerine bir dış manyetik alan uygulandığında enerji seviyeleri arasında Zeeman yarılması sonucunda  $\Delta E$  kadar enerji farkı oluşur.





**Şekil 1.9:** Elektron spinleri  $S = \pm 1/2$  elektron üzerine bir dış manyetik alan uygulandığında Zeeman yarılmaları sonucu oluşan enerji geçişi.

Sistem üzerine  $\Delta E$  kadarlık bir mikrodalga (MD) enerjisi verilirse, sistem uygulanan mikrodalgadan enerji soğurur. Bu enerjinin soğurulmasını,

$$h\nu = \Delta E \quad (1.7)$$

eşitliğini sağlayan koşula rezonans koşulu denir. Eşitlikte  $h$ ; Planck sabiti ( $6.62 \times 10^{-34}$  J.s) ve  $\nu$ ; fotonun frekansı (GHz ya da MHz) olarak ifade edilmiştir. Manyetik alan  $H_0$  değerini sahip olduğunda enerji düzeyleri arasındaki fark,

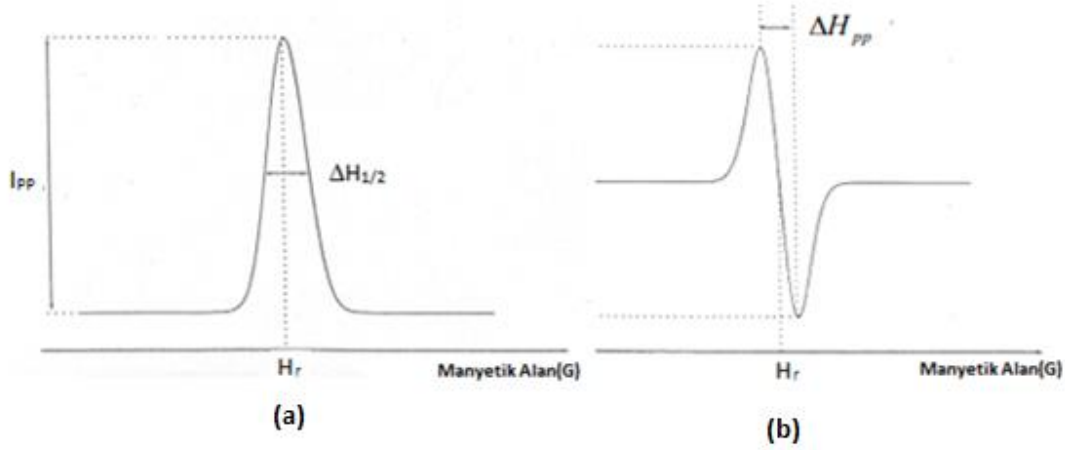
$$\Delta E = E_\alpha - E_\beta = g\beta H_0 \quad (1.8)$$

eşitliğiyle ifade edilir. Bu durumda (1.8) eşitliğindeki rezonans şartı;

$$h\nu_0 = \Delta E = g\beta H_0 \quad (1.9)$$

eşitliğiyle ifade edilir. Eşitlikte  $H_0$ ; rezonans alanı ve  $\nu_0$ ; rezonans frekansıdır.

Eşitlik (1.9)'da rezonans koşulunun görülebilmesi için  $\nu$  frekansı sabit tutulup  $H$  manyetik alanı değiştirilmeli ya da manyetik alan sabit tutulup  $\nu$  frekansı değiştirilmelidir. EPR spektrumu ile deney yapıldığında kolaylık olması açısından frekans sabit tutulup manyetik alan değiştirilerek soğurma eğrisi yada bu eğrinin birinci türevi çizdirilir (Şekil 1.10).



**Şekil 1.10:** Çiftlenimsiz bir elektronun EPR spektrumu a) Soğurma eğrisi b) Soğurma eğrisinin birinci türevi.

Şekilde belirtilen  $H_r$ ; rezonans alan,  $\Delta H_{1/2}$  yarı yükseklikteki yarı genişlik  $\Delta H_{PP}$  tepeden–tepeye çizgi genişliğini,  $I_{PP}$  ise EPR sinyal şiddetini değerlerini göstermektedir. Spektroskopik yarıлма çarpanı  $g$ , rezonans alan değerlerinden yararlanılarak hesaplanabilmektedir.

#### 1.4.1 Spektroskopik Yarıлма Çarpanı

Bir EPR spektrumunda kaynak olarak kullanılan katı, sıvı numunelerin rezonans alanı ve spektroskopik yarıлма çarpanı  $g$  değerinin belirlenmesi karakteristik özelliklerinin belirlenmesinde önemlidir.

Homojen bir manyetik alan içerisinde aynı manyetik momentlere sahip çiftlenmemiş elektronların rezonanslarının tümünün (1.10) bağıntısı ile verilen rezonans alanında olması beklenir.

$$H_r = h\nu/g\beta \quad (1.10)$$

Fakat paramanyetik iyon veya çiftlenmemiş elektronların EPR spektrumlarının bunu desteklemediği görülmüştür. Rezonans alanlarının örneklerde değişkenlik göstermesinin nedeni paramanyetik iyon veya çiftlenmemiş elektronların manyetik momentlerinin serbest elektronun manyetik momentine eşit olmamasından kaynaklandığı düşünülebilir.

Çiftlenimsiz halde bulunan elektronların yörünge açısai momentum ( L ) ile Spin açısai momentum ( S ) bağlaşım oluşturarak toplam açısai momentumu ( J ) oluştururlar. Bu durumda elektronun toplam açısai momentum;

$$J = L + S \quad (1.11)$$

eşitliğiyle ifade edilir. Yörünge açısai momentum L, Spin açısai momentum S'dan yola çıkarak spektroskopik yarılma çarpanı,

$$g = 1 + \frac{J(J+1)+S(S+1)-L(L+1)}{2J(J+1)} \quad (1.12)$$

eşitliğiyle ifade edilir (Apaydın, 1996).

Molekül ya da kristal örneklerine uygulanan dış manyetik alan yönelmesine bağlı olarak manyetik moment vektörü değişimi g spektroskopik yarılma çarpanları ile değişir bu değişim tensörlerle gösterilir. Spektroskopik yarılma çarpanı g eksenel simetri olduğunda;

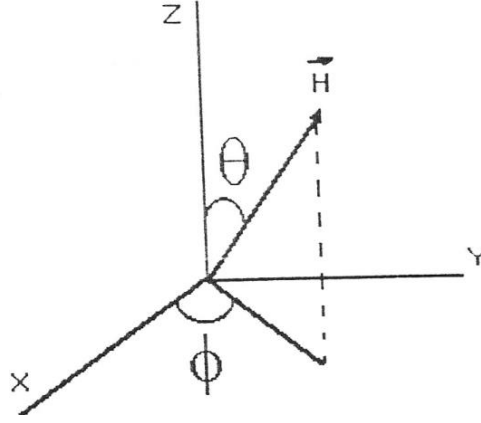
$$g = [g_{\parallel}^2 \cos^2(\theta) + g_{\perp}^2 \sin^2(\theta)]^{1/2} \quad (1.13)$$

eşitliğiyle ifade edilir.

Rombik simetri durumunda yarılma çarpanı g faktörü  $g_{xx}$ ,  $g_{yy}$  ve  $g_{zz}$  tensörleri belirlenir. Spektroskopik yarılma çarpanı g rombik simetri olduğunda ise;

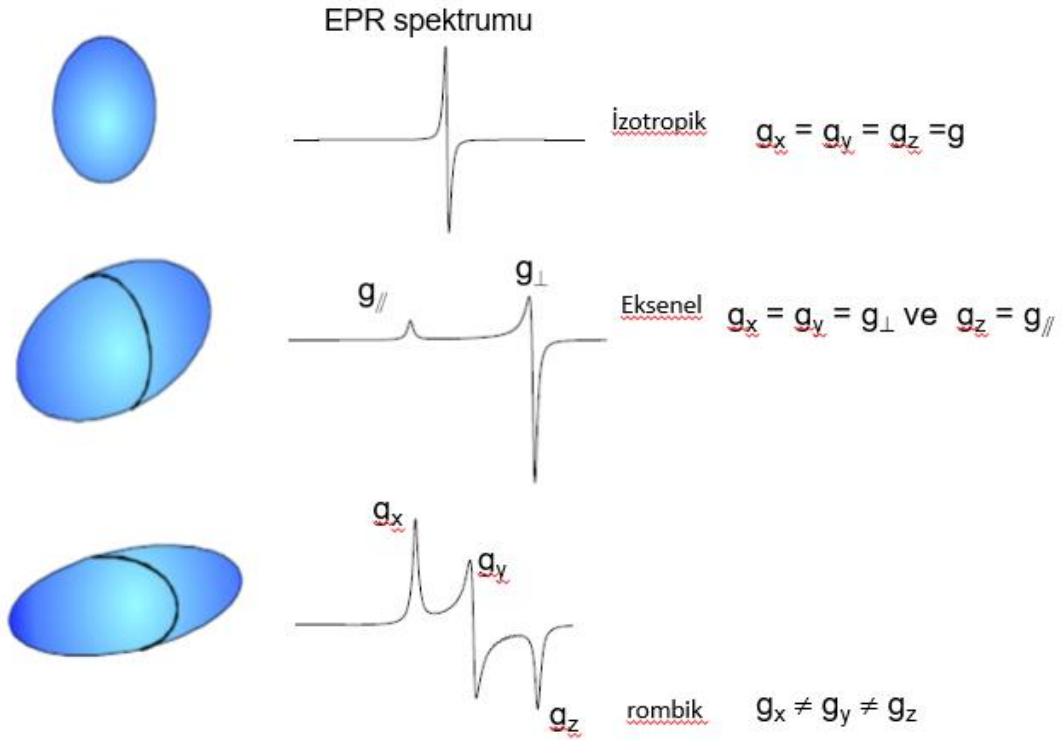
$$g(\theta, \varphi) = [g_{zz}^2 \cos^2 \theta + g_{xx}^2 \sin^2 \theta \cos^2 \varphi + g_{yy}^2 \sin^2 \theta \sin^2 \varphi]^{1/2} \quad (1.14)$$

eşitliğiyle ifade edilir.



**Şekil 1.11:** Koordinat düzleminde herhangi bir doğrultuda yönelmiş manyetik alan.

Burada  $\theta$  manyetik alanın z eksenine yaptığı açı,  $\phi$  manyetik alanın iz düşümünün x eksenine yaptığı açıdır (Şekil 1.11).



**Şekil 1.12:** Simetriye bağlı olarak EPR spektrum şekilleri.

#### 1.4.2 Aşırı İnce Yapı Etkileşmesi

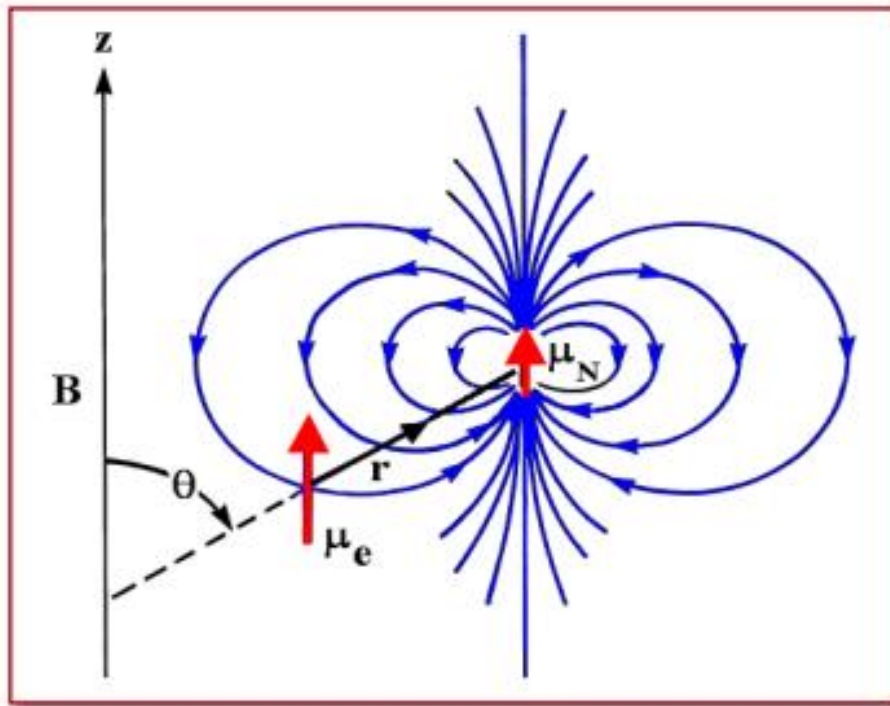
Molekül veya Kristal örgü içinde var olan çiftlenimsiz elektronlar, sıfırdan farklı spin kuantum sayısına sahip çekirdek veya komşu çekirdeklerle etkileşimde bulunur. Bu etkileşim sonucunda çiftlenimsiz elektronlar çekirdek veya çekirdeklerin meydana getirdiği

manyetik alanların etkisinde enerji düzeyleri arasında meydana gelen yarılmalar aşırı ince yapı yarılmaları olarak adlandırılır.

Aşırı ince yapı etkileşimini manyetik sistemlerde iki nedenle gerçekleşir. Fermi etkileşmesi ile yönelmeden bağımsız olduğunda izotropik (yönser) aşırı ince yarılmaları, dipol-dipol etkileşmesi ile yönelmeye bağlı olduğunda anizotropik (yönsemez) aşırı ince yarılmaları olarak adlandırılır (Apaydın, 1996). Aşırı ince yapı açısına bağlı olarak;

$$A = A_S + A_P[3\cos^2(\theta)-1] \quad (1.15)$$

eşitliğiyle ifade edilir. Eşitlik (1.15) de görüldüğü gibi aşırı ince yapı etkileşimi izotropik ve anizotropik kısımları bulundurmaktadır. Burada izotropik ve anizotropik aşırı ince yapı sabitleri sırasıyla  $A_S$  ve  $A_P$  olarak verilmiştir.



Şekil 1.13: Aşırı ince yapı etkileşimi.

Manyetik alana yönelen çiftlenimsiz elektronun bulunduğu p orbitalinin arasındaki açı  $\theta$  olarak verilmiştir. Burdaki açı değeri  $\theta=0^\circ$  ile  $\theta=90^\circ$  arasında değerler alabilir. Yukarıdaki (1.15) eşitliğinde açı değerlerini yerine koyduğumuzda aşırı ince yapı sabiti sırasıyla;

$$\theta=0^0 \text{ ise } A_{\parallel} = A_S+2A_P \quad (1.16)$$

$$\theta=90^0 \text{ ise } A_{\perp} = A_S -A_P \quad (1.17)$$

arasında değişen değerler alır.

Elektron bulutunun çekirdek üzerinde bulunma olasılığı  $A_S$ , elektron ve çekirdek spinleri arasındaki dipol-dipol etkileşmesi  $A_P$  olarak ifade edildiğinde bu aşırı ince yapı sabitlerinin matematiksel ifadeleri aşağıdaki gibidir (Ikeya, 1993).

$$A_S = \left(\frac{2\pi}{3}\right) g_n \beta_n |\Psi(O)|^2 \quad (1.18)$$

$$A_P = \left(\frac{2}{5}\right) g_n \beta_n (r^{-3})(3 \cos^2 \theta - 1) \quad (1.19)$$

Eşitliklerde  $\Psi(O)$  çekirdek üzerinde elektronun dalga fonksiyonu,  $g_n$  spektroskopik yarımla çarpanı,  $\beta_n$  çekirdeğin Bohr manyetonu,  $r$  çekirdeğe göre elektronun konumunu belirten ifadelerdir.

### 1.4.3 Spin Hamiltoniyeni

Molekül veya kristal örgü içinde çiftlenimsiz elektron bulunduran yapılar manyetik alan etkisinde kaldığında çakışık halde bulunan enerji düzeyleri arasında yarılmalar meydana gelir. Temel halde bulunan kristal örgü içindeki tek bir çiftlenimsiz elektronun manyetik alan içindeki toplam enerjisinin Dirac gösterimi;

$$\hat{H}_{eff} = g_e \beta_e B S - g_N \beta_N B I + S A I + S D S + I P I \quad (1.20)$$

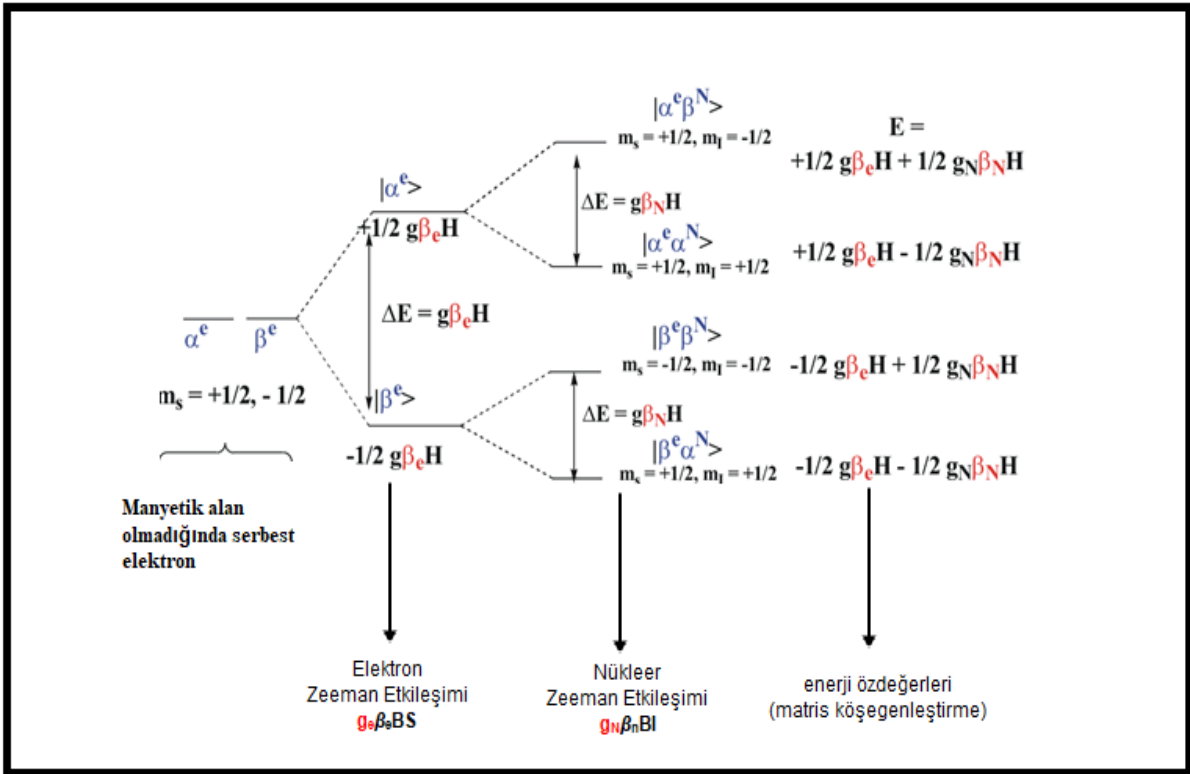
eşitliğiyle ifade edilir ( Aydın, 2006).

Toplam enerjinin terimlerine bakacak olursak sırasıyla;

Denklem (1.20)'deki birinci terim elektron spin ile dış manyetik alan arasındaki etkileşim (Elektron Zeeman), ikinci terim çekirdek spini ile dış manyetik alan arasındaki etkileşim (Çekirdek Zeeman), üçüncü terim çekirdek spini ile elektron spini arasındaki etkileşim

(Aşırı İnce Yapı), dördüncü terim iki veya daha fazla electron spinleri arasındaki etkileşim (İnce Yapı), beşinci terim çekirdek spinleri arasındaki etkileşim (Çekirdek Dört Kutup(Kuadrupole)) terimi olarak adlandırılır (Aydın, 2006).

Enerji düzeyleri arasında  $\Delta m_s = \pm 1$  ve  $\Delta m_I = 0$  şartları sağlandığında izinli geçişler oluşur. I çekirdek spin kuantum sayısına sahip bir çiftlenimsiz elektron n tane çekirdekle etkileşim gerçekleştirdiğinde spektrumda  $(2nI+1)$  tane rezonans çizgisi gözlemlenir.



**Şekil 1.14:** Elektron spini  $S=1/2$ , ve çekirdek spini  $I=1/2$  olan bir sistemin enerji diyagramı.

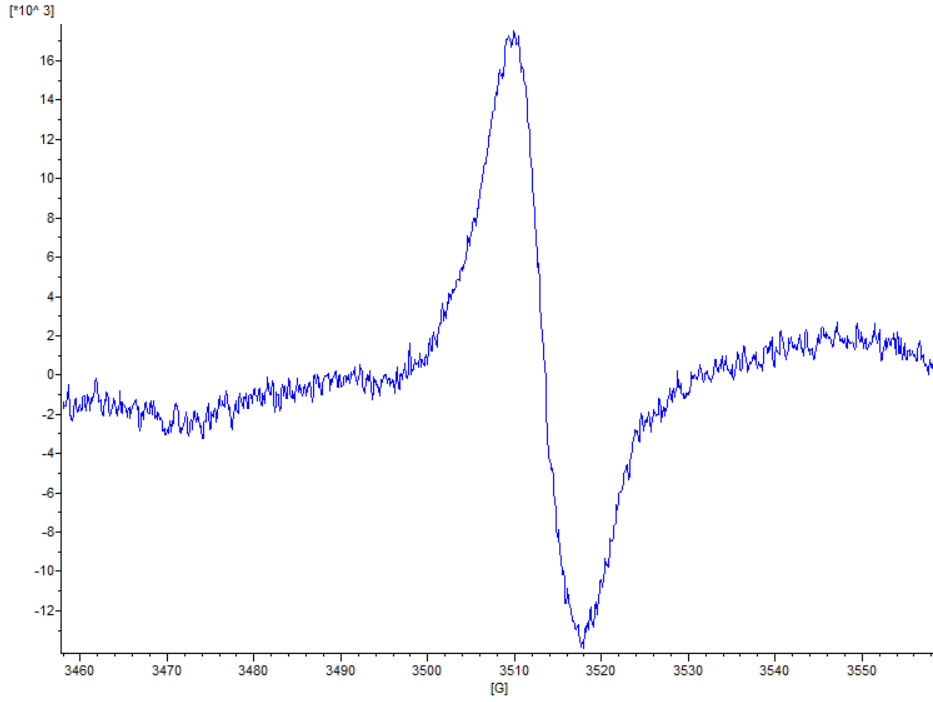
### 1.5 Dış Minesinin EPR Spektrumu

Radyasyona maruz kalmış bir dış minesinin EPR spektrumu incelendiğinde radyasyon kaynaklı ve radyasyona duyarsız sinyaller olmak üzere iki tür sinyal bulundurulur. Dış minesinin EPR spektrumunun radyasyona duyarsız bileşeni doğal sinyal veya arka plan sinyali olarak adlandırılmıştır.(Şekil 1.14)

Dış minesinin organik yapısına bakıldığında radyasyona bağlı radikallerin ( $\text{CO}_2^-$ ,  $\text{CO}_3^-$ ,  $\text{CO}^-$ ,  $\text{CO}_3^{3-}$ ) hemen hemen hepsi karbon türevlerinden oluşmuştur (Fattibene ve Callens, 2010). Dış minesini herhangi bir şekilde gama, beta, alfa, X-ışınları ve ultraviyole gibi

iyonlaştırıcı radyasyon türlerine maruz kaldığında aynı tip radyasyon sinyali türetirler bu radyasyon sinyallerine bakarak EPR spektrumunu ayırt etmek mümkün değildir (Fattibene ve Callens, 2010).

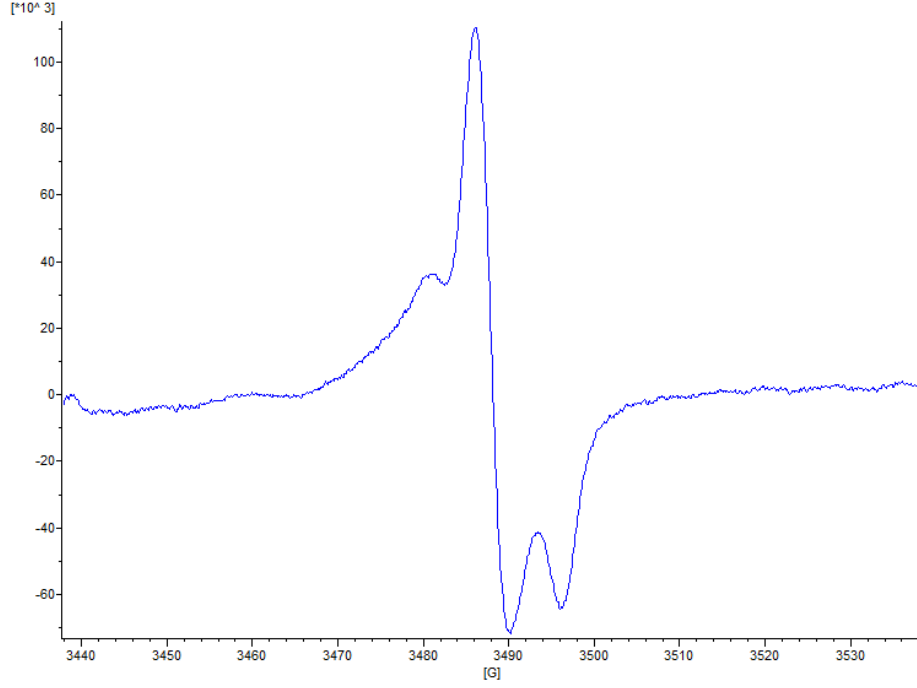
Herhangi bir şekilde radyasyona maruz kalmış diş minesinin EPR spektrumu şekil 1.16 'da verilmiştir.



**Şekil 1.15:** Arka plan sinyali.

Işınlanmamış insan diş minesi EPR sinyalinin spektroskopik yarıma çarpanı  $g = 2.0045$  değerinde izotropiktir, yani  $g_x = g_y = g_z = 2.0045$  dir ( Fattibene ve Callens, 2010).





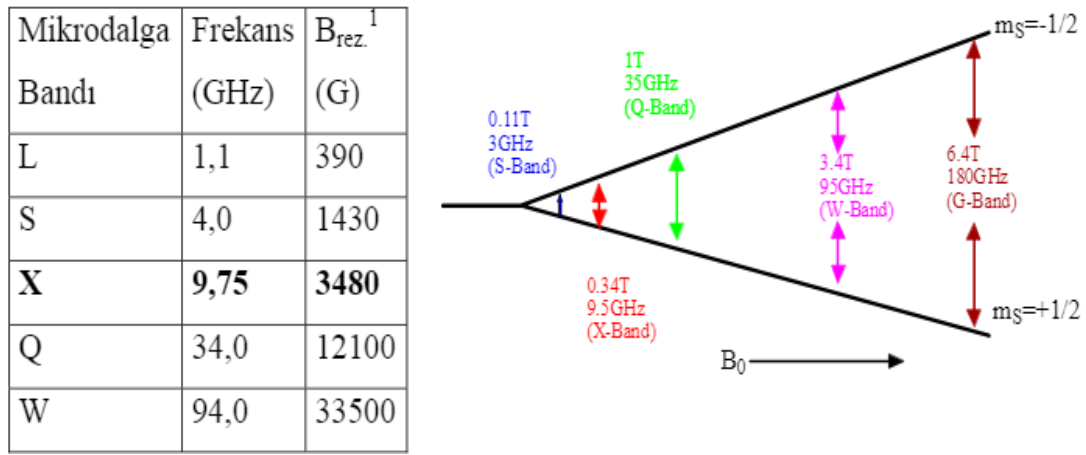
**Şekil 1.16:** 10 Gy radyasyona maruz kalmış örnek spektrumu.

Radyasyona maruz kalmış diş minesinin yapısında bulunan radikaller tarafından üretilen radyasyon sinyalinin spektroskopik yarımla çarpanı aralığı maksimum  $g_{\perp}=2.0023$  ile minimum  $g_{\parallel}=1.9975$  değerinde EPR spektrumu aksinel görünümlüdür (Fattibene ve Callens, 2010).

## 2. DENEYSEL YÖNTEM

### 2.1 EPR Spektrometresi

EPR spektrometreleri çalışma ortamının şartlarına, çalışılan numuneye ve çalışma amacına göre frekans değerleri ve çeşitli parametreler göz önünde bulundurularak isimlendirilir. Bu isimlendirme düşük frekans değerinden yüksek frekans değerine doğru L-, S-, X-, K-, Q- ve W-band şeklindedir (Şekil 2.1). En yaygın olarak kullanılan EPR spektrometreleri X-band spektrometreleridir.

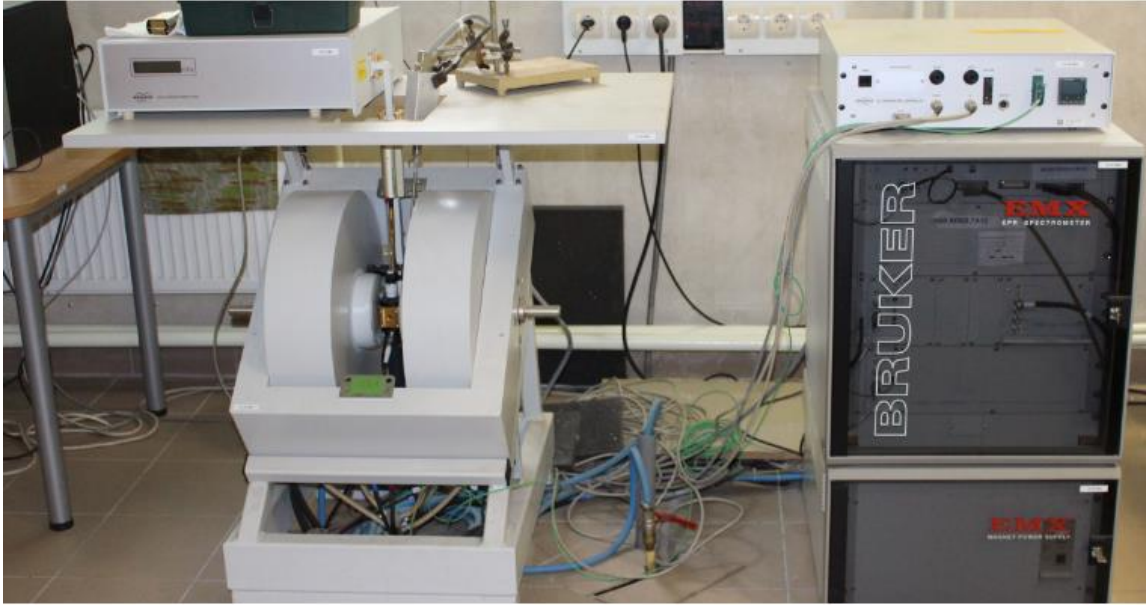


Şekil 2.1: EPR spektrometrelerin isimlendirilmesi.

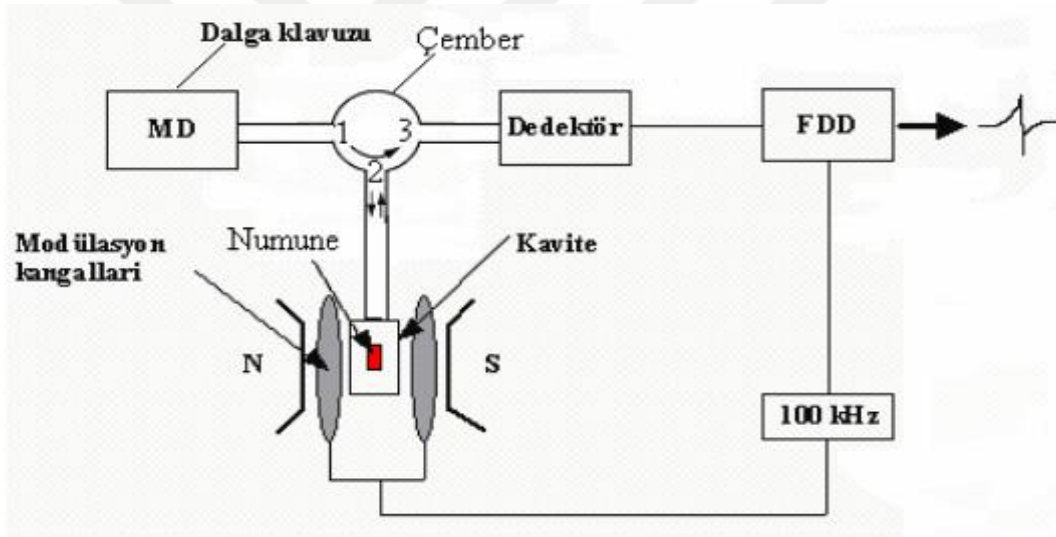
Bir EPR spektrometresi mikrodalga, magnetler ve spektrometre olmak üzere üç temel parçadan oluşur. Deneylerde kullandığımız BURKER marka EMX-131 model EPR spektrometresinin dış görünüşü Şekil 2.2’de gösterilmiştir.

EPR spektrometreleri X-bandında frekansı 9-10 GHz aralığında çalışır. EPR spektrometresi esas olarak mikrodalga üretim ve iletim sistemi, rezonans boşluk sistemi, elektromıknatis sistemi ve modülasyon ve algılama sistemi olmak üzere dört bölümden oluşur (Şekil 2.3).

Bir EPR dozimetresi genel olarak spektrometre kısmı, güç kaynağı, kavite, magnetler, sıcaklık kontrol ünitesi ve bilgisayar ve soğutma ünitesinden oluşur.



Şekil 2.2: X-Band BURKER EMX-131 model EPR Spektrometresi.



Şekil 2.3: X-band EPR spektrometresinin blok diyagramı.

EPR deneyleri yürütülürken uygulanan spektrometre şartları Tablo 2.1’de verilmiştir. Mikrodalga güç doyum çalışmaları ve Modülasyon genliği bağımlılığı çalışmaları dışında yapılan bütün deneylerde Tablo 2.1’de verilen spektrometre şartları kullanılmıştır. EPR deneyleri yapılırken her bir örneğin ayrı-ayrı 3 defa spektrumları alınmıştır. Her bir ölçümden sonra EPR deney tüpü kaviteden çıkarılıp nazikçe sallandıktan sonra tekrar kaviteye yerleştirilip spektrumları alınmıştır. Böylece farklı boyutlara sahip dış minesini parçalarından kaynaklanabilecek anizotropik etkilerden kurtulmuş olunacaktır.

**Tablo 2.1:** Deneysel spektrometre şartları.

	ILC	Işınlanmamış
Merkezi alan (G)	3470	3485
Tarama genişliği (G)	100	100
Mikrodalga gücü (mW)	2.0	10.0
Mikrodalga frekansı (GHz)	~9.81	~9.81
Kazanç	$1.0 \times 10^5$	$1.0 \times 10^5$
Modulasyon frekansı (kHz)	100	100
Modulasyon genliği (G)	3.0	3.0
Zaman sabiti (ms)	40.96	40.96
Tarama zamanı (s)	41.94	41.94
Üst-üste tarama sayısı	30	30

## 2.2 Diş Minesinin Hazırlanması

Diş çekiminden sonra dişler cam tüpler içinde güneş ışığıyla etkileşimin olmadığı karanlık ortamda bekletilmiştir. Diş minesinin hazırlanma aşamaları aşağıda ayrıntılı bir şekilde açıklanmıştır (Fattibene and Callens, 2010).

Dişler laboratuvara getirildiğinde yirmilik dişler Sodyum hipoklorid ( $\text{NaClO}$ ) çözeltisinde 2 gün boyunca gün içinde (gündüz) belirli aralıklarla saf su ve aseton ile 5'er dakika aralıklarla dişlerin üzerinde var olan biyolojik ve diğer artıklar fırça yardımıyla temizlenip tekrar Sodyum hipoklorid çözeltisine koyulmuş ve akşam saf su içinde bekletilmiştir.

Daha sonra dişlerin taç kısımları kök kısımlarından dairesel testere yardımı ile ayrılmıştır. Kesilen taç kısmı içerisinde kalan dentin, tartar ve var ise çürükler elmas uçlu mikromotor yardımı ile temizlenmiştir. Temizleme işlemi sırasında elmas ucun ısınmasını önlemek için belirli aralıklarla soğuk suya batırılmıştır. Bu temizleme işlemi sırasında mine ve dentinin renk uyumundan ve dentinin ultraviyole (UV) ışık altında (340 nm) farklı renkte ışık yaymasından (Fattibene ve Callens, 2010) faydalanarak saf halde mine elde edebilmek için ara-sıra UV ışık altında bakılarak temizlenmiştir. Mine temizleme işlemi sonrasında üzerinde yapışmış olabilecek kalıntılardan ayırmak için birkaç defa su içinde bekletilip su ile banyo yaptırılarak yıkama işlemi yapıldı.

Diş minesinin hazırlanması aşamasında mine üzerinde kalabilecek dentin parçalarının ayrılması çok önemlidir çünkü dentin yapısında bulunan organik ve inorganik maddeler EPR sinyalini etkileyebilir veya radikaller üretebilir. Aynı şekilde diş minesinin mekanik temizleme işlemi sırasında fazla ısıya maruz kaldığında minenin yapısında bulunan organik ve inorganik bileşenlerin etkilenebilir veya yeni radikallerin oluşumuna sebep olabilir buda bizim çalışmamızda önemli olan doğal dozun EPR sinyalini etkilenmesine sebep olabilir. Bu nedenle minenin ayrılma işlemleri bizim için çok önem arz etmektedir.

Temizlenen diş minesini yan keski yardımıyla küçük parçalar halinde kesildi. Elde edilen diş minesini parçaları iki eşit parçaya ayrıldı. Bu parçalardan biri ışınlama için diğeri doğal doz veya arka plan sinyalini belirlemek amacıyla kullanıldı.

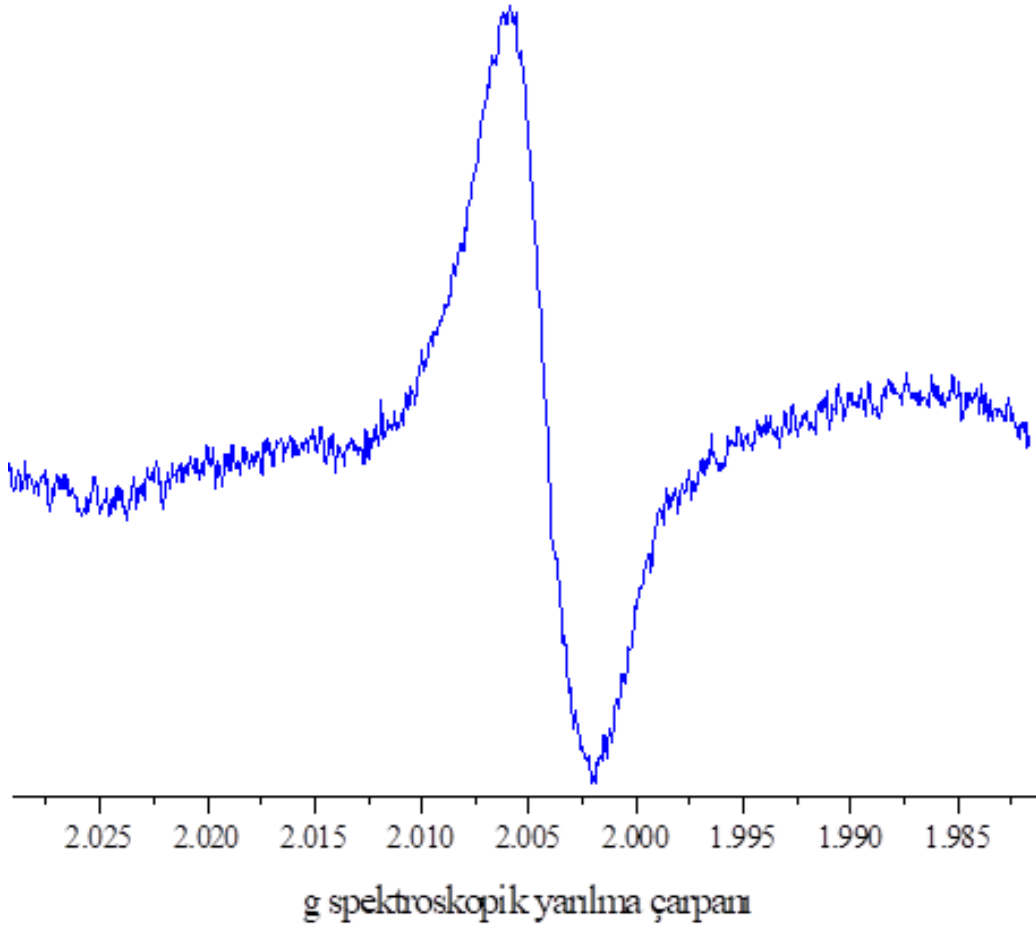
### **2.3 Deneysel Işınlama**

Deneylerde kullanılan diş minesini örneklerinden herbiri biri ışınlamak biride referans olarak kullanılmak üzere iki ayrı gruba ayrıldı. Işınlamalar havaya açık şekilde 6 MeV enerjili Elekta marka x-ışınları üreten lineer hızlandırıcı (LINAK) kullanılarak 100, 250, 500 ve 1000 mGy'lik dozlarında ışınlandı. Referans dozimetre olarak 0.125 cm<sup>3</sup> PTW 31010 model Semiflex iyon odası kullanıldı. Işınlamalar Fransa, Paris'de bulunan Radyolojik Koruma ve Nükleer Güvenlik Enstitüsü'nde (L'Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire, IRSN) Dr. François TROMPIER tarafından yürütüldü ve posta yoluyla EPR deneyleri yapılmak üzere gönderildi. Bilinen dozlar dışında bilinmeyen dozda bir diş minesini örneği kullanılmıştır. Bilinmeyen doz değeri yürütülen deneyler sonucunda elde edilen kalibrasyon eğrisi kullanılarak belirlenecektir.

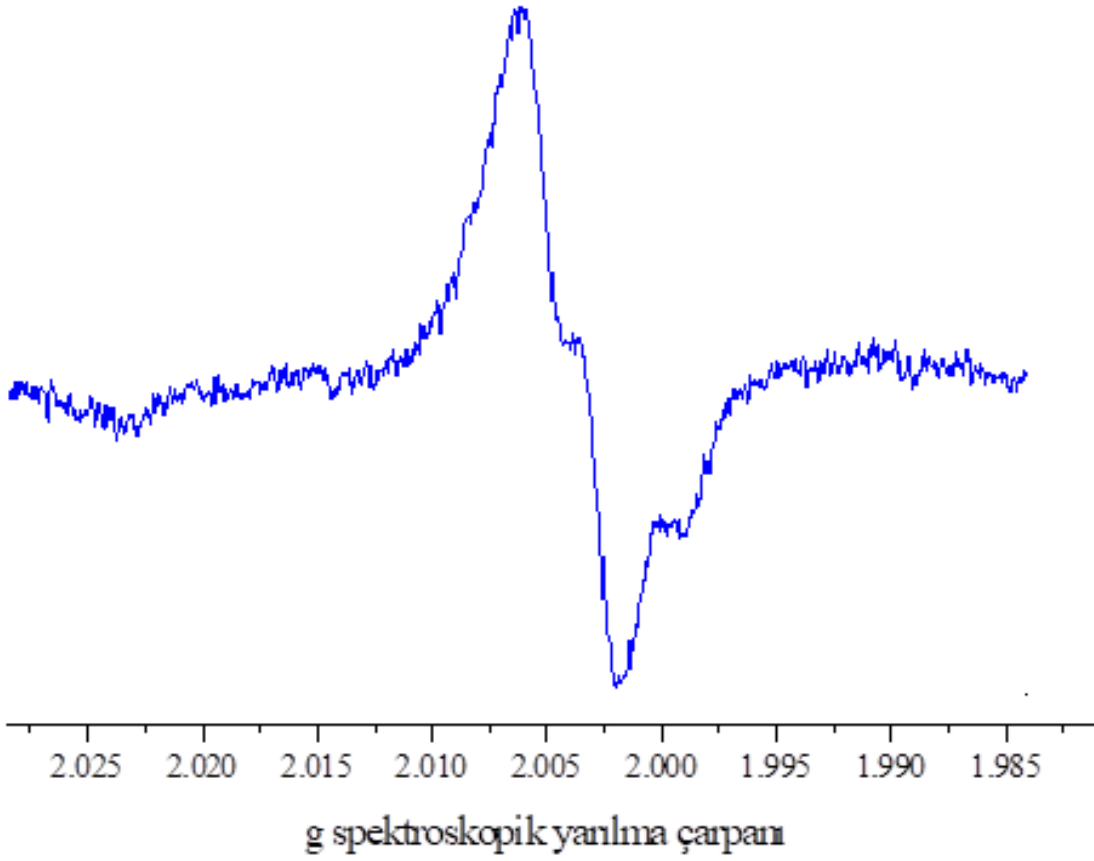
### 3. BULGULAR

Spektrometri şartlarına (Tablo 2.1) göre diş minesi örneklerinden EPR spektrumları alınmıştır. Herhangi bir şekilde işınlanmamış diş minesi örneğinin arka plan sinyali şekil 3.1’de görüldüğü gibi tek çizgili bir spektrumdan oluşmaktadır.

1Gy’lik radyasyon dozunda işınlanmış diş minesinin spektrumuna baktığımızda arka plan sinyalinin nisbeten üzerine binmiş EPR spektrumu şeklinde görülmektedir. Işınlanan diş minesinin spektrumuna bakıldığında radyasyon dozundan kaynaklanan bozulmalar meydana geldiğı görülmektedir (şekil 3.2).



**şekil 3.1:** Işınlanmamış diş minesi ait arka plan sinyali.



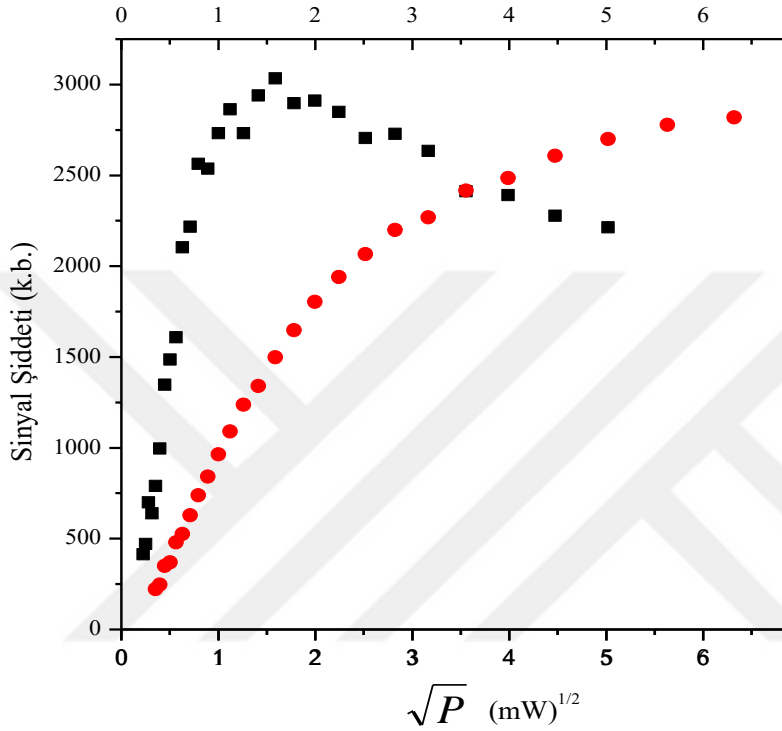
**Şekil 3.2:** 1 Gy radyasyon dozunda ışınlanmış diş minesinin spektrumu.

### 3.1 Mikrodalga Doyum Çalışması

Literatüre bakıldığında çok farklı değerlerde diş minesi spektrumlarının modülasyon genliği ve mikrodalga gücü değerleri kayıt edilmiştir. Bu nedenle diş minesi EPR spektrumunun modülasyon genliği ve mikrodalga gücü değerlerine göre nasıl değişim sergilediği incelenmiştir.

10 Gy radyasyon dozunda ışınlanmış örnek kullanılarak mikrodalga güç değerleri 0.05 mW-63.30 mW aralığında 1 dB'lik adımlarla spektrumlar kaydedilerek takip edilen sinyallerin değişimi incelenmiştir. Aynı şekilde herhangi bir radyasyona maruz bırakılmayan diş minesi örnekleri de incelenerek arka plan veya doğal sinyalin mikrodalga gücü doyumu incelenmiştir. Bulunan sinyal şiddeti değerleri mikrodalga gücünün kareköküne göre değişim grafiği Şekil 3.3 de verilmiştir. 2.5 mW güç değerinden sonra arka plan sinyalinin doyuma ulaştığı güç değeri arttıkça görülmektedir (Şekil 3.3). Literatürde verilen arka plan sinyali ve radyasyon sinyalinin mikrodalga gücüne bağlı

değişimi uyum içindedir (Fattibene ve Callens, 2010). Bununla birlikte yüksek mikrodalga güçlerine değerlerine doğru gidildikçe radyasyon sinyalinin artış hızında azalmalar olduğu görülmekte fakat tam olarak doyuma ulaşmadığı görülmektedir. (Şekil 3.3) Radyasyon sinyalinin yaklaşık 100 mW'lık güç değerlerinde doyuma ulaştığı Fattibene ve Callens (2010) tarafından rapor edilmiştir.

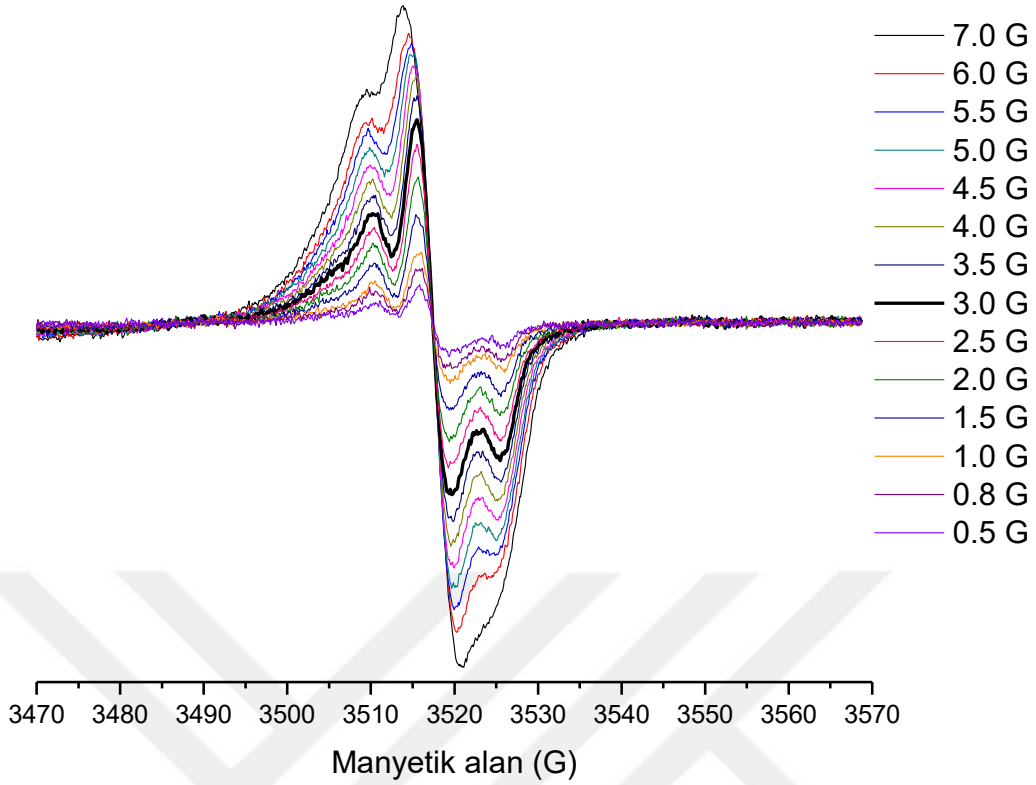


**Şekil 3.3:** Diş minesi EPR sinyalinde gözlenen arka plan sinyali (■), ve radyasyon sinyalinin (●) mikrodalga gücüne bağlı değişimi.

### 3.2 Modülasyon Genliği Değişimi

Diş minesi EPR spektrumlarının sinyal şiddeti değişiminin Modülasyon genliğine (MG) bağlı olarak nasıl değiştiği de araştırılmış ve EPR spektrumlarının {0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 3.5, 4.0, 4.5, 5.0, 5.5, 6.0 ve 7.0 G} değerleri için çizilen grafik Şekil 3.4'de verilmiştir. MG'nin sinyal şiddetiyle doğru orantılı arttığı görülmektedir. Fakat 5.0 G değerinden itibaren spektrumun şeklinde bozulmalar başladığı görülmüştür. Bu nedenle spektrumların Modülasyon genliği değerinin 2.0 – 5.0 G arasında bir değer alma durumunda spektrum şeklide herhangi bir sorun görülmemektedir. Bu çalışmada ölçümler için önerilen 3 G değeri alınarak uygulanmıştır.





**Şekil 3.4:** Diş minesinin EPR sinyalinin modülasyon genliği ile değişimi.

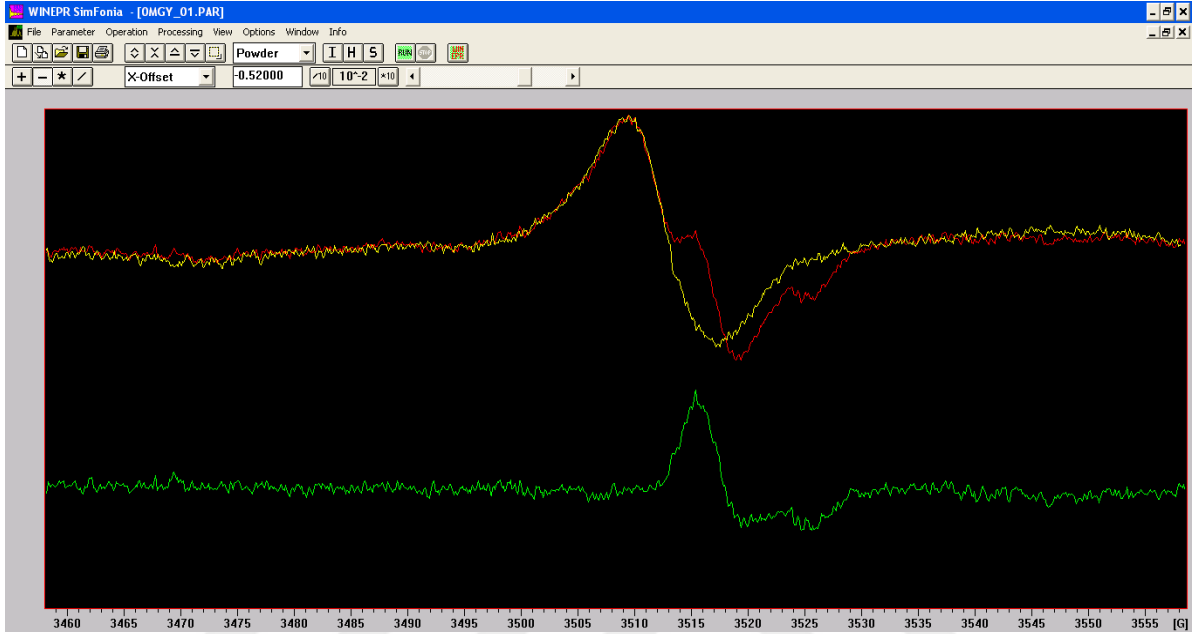
### 3.3 Dozimetrik Bulgular

Geriye dönük EPR dozimetrik çalışmalarda insan diş minesinin kullanılması amacıyla yapılan çalışmada diş minesi örnekleri 100,250,500 ve 1000 mGy'lik doz değerlerinde 10 MW'lık X-ışınına maruz bırakılmıştır. Daha sonra herhangi bir kimyasal işleme maruz kalmadan sadece fiziksel yöntemlerle küçük parçalara ayrılarak EPR spektrumları ölçülerek kayıt altına alınmıştır. Bu çalışmada elde edilen sinyal şiddeti değerlerinin 3 farklı yöntemle doz cevap eğrileri elde edilmiştir. Eğriler en uygun olarak  $y=a*x+b$  lineer fonksiyonuna göre fit işlemleri yapılarak 3 farklı yöntem ile bilinmeyen doz değerleri belirlenmeye çalışılmıştır.

#### 3.3.1 Fark alma yöntemi

Bu yöntem, herhangi bir şekilde radyasyona maruz kalmamış diş minesi örneğinden alınan arka plan sinyal şiddeti ile radyasyona maruz kalmış diş minesi örneğinden elde edilen spektrumlar birbirinden çıkarılarak radyasyon sinyalinin elde edilmesi şeklinde yürütülmüştür. Bu amaçla deneysel spektrumlar BRUKER WINEPR SimFonia programı kullanılarak Şekil 3.5'de görüldüğü gibi uygun şekilde hizalayarak farklarının alınması suretiyle yapılmıştır. Her bir dozda ışınlanmış örnek için kaydedilen 3 adet spektrumdan

ayrı-ayrı 3 defa kaydedilmiş radyasyona maruz kalmamış diş minesinin diğer yarısına ait EPR spektrumları çıkarılmak suretiyle 6 adet radyasyon sinyali spektrumu elde edilmiştir. Bu fark spektrumları kullanılarak kalibrasyon eğrileri veya doz-cevap eğrileri oluşturulmuştur. Burada elde edilen sinyal şiddeti değerleri kütleye normalize edilmiştir.



**şekil 3.5:** BRUKER WINEPR SimFonia programı arayüzü. Kırmızı sinyal; 1000 mGy dozunda ışınlanmış deneysel spektrumu, Sarı sinyal; arka plan spektrumunu, ve Yeşil sinyal; radyasyon sonucu oluşmuş olan radyasyon sinyalini göstermektedir.

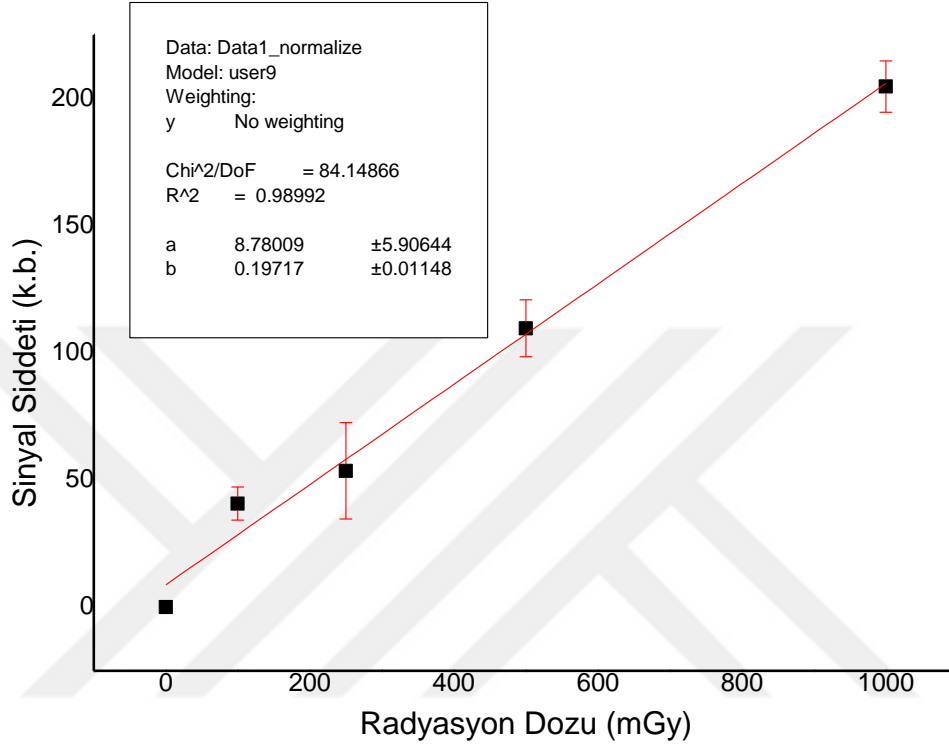
Fark yöntemiyle elde edilen spektrumlar da iki farklı yolla analiz edilmiştir. Bunlardan ilki elde edilen spektrum üzerinden direk olarak EPR sinyal şiddetlerinin okunması yoluyla yürütülmüştür. Bu yolla elde edilen veriler Origin 7.5 grafik programı kullanılarak oluşturulan doz-cevap grafiği şekil 3.6'da verilmiştir. Elde edilen deneysel veriler lineer bir fonksiyon olan  $I = a + b * D$  şeklinde bir fonksiyon kullanılarak fit edilmiştir. Fit işlemi sonucunda deneysel verileri en iyi,

$$I_{(D)} = 8.7801 + 0.1792 * D \quad (3.1)$$

eşitliğinin tanımladığı belirlenmiştir.

Burada  $D$ , soğrulan radyasyon dozunu,  $I$  ise normalize EPR sinyal şiddetini,  $a$  ve  $b$  ise fit sonucu elde edilen parametreleri temsil etmektedir.

Bilinmeyen dozlarda ışınlanmış örneklerin soğurduğu radyasyon dozunu bulmak amacıyla kütleye normalize edilen sinyal şiddeti eşitlik (3.1)'te yerine koyulup D, soğrulan doz değeri hesaplanabilir.



Şekil 3.617: 0-1000 mGy aralığında fark yönteminin doz-cevap eğrisi.

### 3.3.2 Origin Simülasyonu Yöntemi

Literatürde radyasyon sinyali için verilen şartlar dikkate alınarak Origin 7.5 programı kullanılarak fark spektrumlarının simülasyon işlemi yapıldı. Burada Weiser (2020) tarafından önerilen bir model kullanıldı. Bu modele göre gaussiyen bir eğrinin birinci türevi olan fonksiyon kullanıldı. Bu amaçla tek çizgili bir spektrum (EPR spektrumu) ile bu spektrum spektroskopik yarıлма çarpanı  $g$ 'den  $D$  kadar uzakta sinyal şiddeti ana sinyalin yarısı kadar olan başka bir sinyalin toplamı alınarak yapıldı. Origin kullanılarak yapılan simülasyon için kullanılan eşitlik (3.2)'de verilmiştir.

$$y = Ah * (((X - H_{0h}) / (dH_h))^2 * \exp(-((X - H_{0h}) / dH_h)^2) + 0.5 * ((X - H_{0h} + D) / (dH_h))^2 * \exp(-((X - H_{0h} + D) / dH_h)^2)) \quad (3.2)$$

Burada;

X; Bağımsız değişken olan g spektroskopik yarıma çarpını,

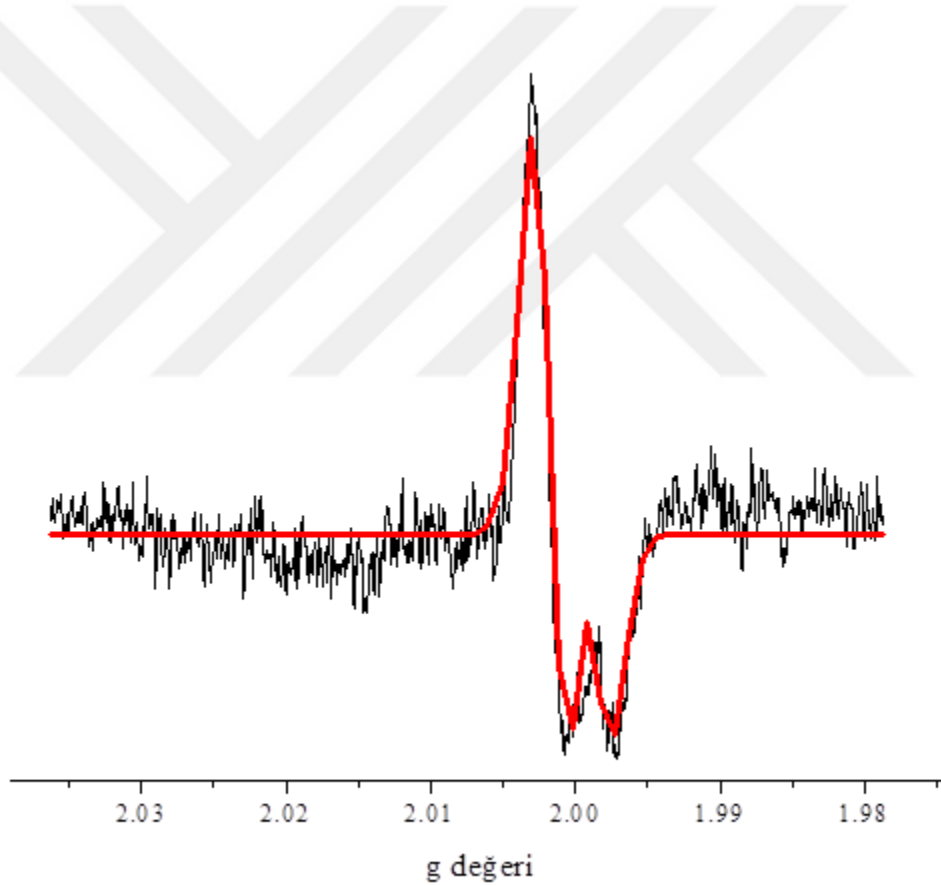
A<sub>h</sub>; Radyasyon sinyal şiddeti

H<sub>0h</sub>; g spektroskopik çarpanı

dH<sub>h</sub>; Çizgi genişliği

temsil etmektedir.

Burada EPR spektrumu manyetik alan yerine g'ye göre çizdirilmiştir. Çünkü manyetik alana bağlı olarak bazı kaymalar oluşmaktadır. Fakat g değeri tüm spektrumlar için aynı değerdedir. Origin 7.5 programı ve fark spektrum eşitliği (3.2) kullanılarak 1 Gy için simülasyon spektrumu aşağıdaki gibi Şekil 3.7'de verilmiştir.



**Şekil 3.7:** Fark spektrum eşitliği (3.2) Origin 7.5 programında kullanılarak elde edilen radyasyon sinyali (siyah) ve elde edilen teorik spektrum (kırmızı).

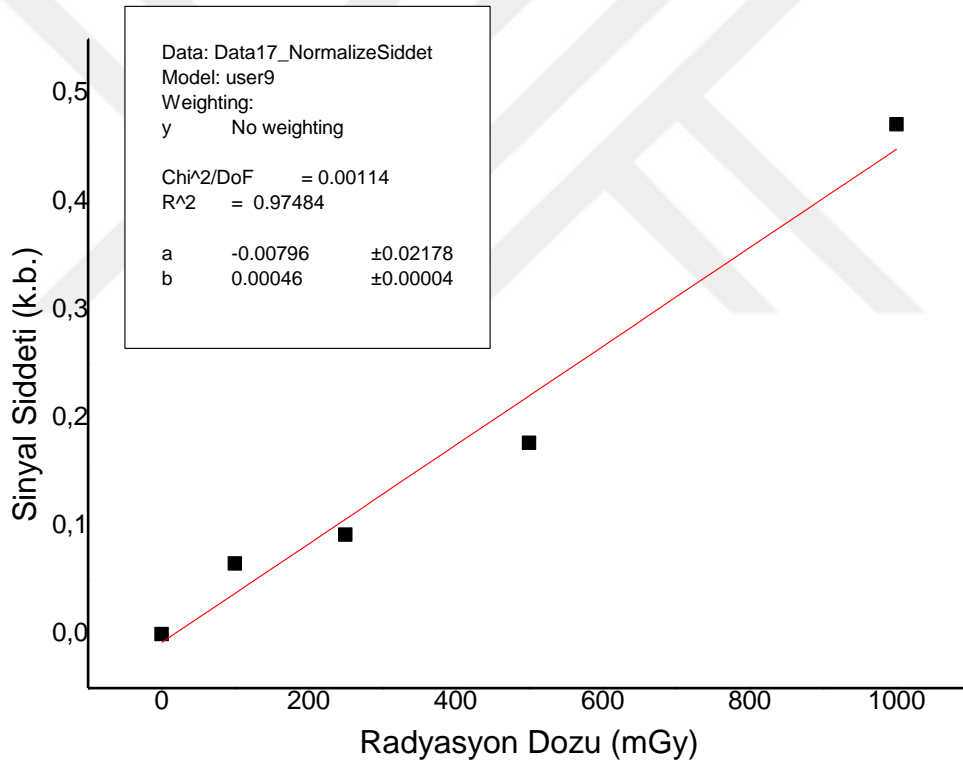
Elde edilen sinyal şiddeti (A<sub>h</sub>) verileri lineer bir fonksiyon olan  $I = a + b * D$  şeklinde bir fonksiyon kullanılarak fit edilmiştir. Burada D, soğrulan radyasyon dozunu, I ise normalize

EPR sinyal şiddetini, a ve b ise fit sonucu elde edilen parametreleri temsil etmektedir. Fit işlemi sonucunda deneysel verileri en iyi,

$$I = -0,00796 + 0,00046 * D \quad (3.3)$$

eşitliğinin tanımladığı belirlenmiştir.

Bu yöntemle elde edilen doz-cevap eğrisi Şekil 3.8’de verilmiştir. Bilinmeyen dozlarda ışınlanmış örneklerin soğurduğu radyasyon dozunu bulmak amacıyla kütleyle normalize edilen sinyal şiddeti eşitlik (3.3)’te yerine koyulup D, soğrulan doz değeri hesaplanabilir.



Şekil 3.8: 0-1000 mGy aralığında Origin simülasyon yönteminin doz-cevap eğrisi.

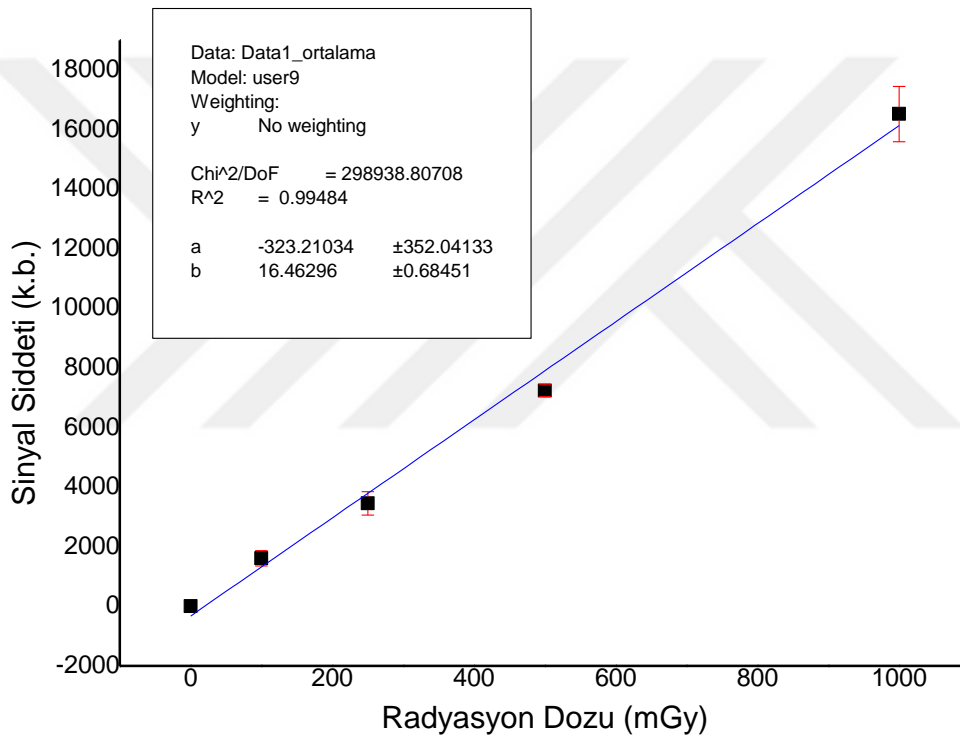
### 3.3.3 Matlap Simülasyon Yöntemi

Prof. Dr. Mustafa POLAT'ın yazmış olduğu ve MATLAB altında çalışan program kullanılarak yapılan simülasyon sonucu sinyal şiddeti değeri elde edilmiştir. Burada literatürde verilen aksenal simetrik ( $g_{//}$  ve  $g_{\perp}$ ) EPR sinyali modellenerek simülasyon işlemi yapılmış, elde edilen sinyal şiddeti değerleri kütleyle normalize edilerek doz-cevap

eğrilerini oluşturmak amacıyla kullanılmıştır. Yine burada  $I = a + b * D$  şeklinde bir fonksiyon kullanılarak fit edilmiştir. Burada  $D$ , soğrulan radyasyon dozunu,  $I$  ise normalize EPR sinyal şiddetini,  $a$  ve  $b$  ise fit sonucu elde edilen parametreleri temsil etmektedir. Fit işlemi sonucunda deneysel verileri en iyi,

$$I_{(D)} = -323,21034 + 16,46296 * D \quad (3.4)$$

eşitliğinin tanımladığı belirlenmiştir.



**Şekil 3.9:** 0-1000 mGy aralığında MATLAB simülasyon yönteminin doz cevap eğrisi.

Bu yöntemle elde edilen doz-cevap eğrisi Şekil 3.9'da verilmiştir. Bilinmeyen dozlarda ışınlanmış örneklerin soğurduğu radyasyon dozunu bulmak amacıyla kütleyle normalize edilen sinyal şiddeti eşitlik (3.4)'te yerine koyulup  $D$ , soğrulan doz değeri hesaplanabilir.

#### 4. SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME

Diş minesini kullanılarak radyolojik bir kaza sonucu maruz kalan kişinin soğurduğu radyasyon dozunu belirlemek amacıyla kullanılabilirliğinin araştırıldığı bu çalışmada uygun şekilde radyasyon sinyali elde edilerek işlem yapılmıştır. Elde edilen bu radyasyon sinyali aksel simetrik bir yapıya sahip literatürde rapor edilen sinyal ile uyumludur. Bu radyasyon sinyali kullanılarak farklı radyasyon dozlarında ışınlanmış örnekler kullanılarak doz-cevap eğrileri oluşturuldu. Bu amaçla elde edilen radyasyon sinyali üç farklı yöntem kullanılarak sinyal şiddeti verileri elde edildi ve kütleyle normalize edilerek doz-cevap eğrileri oluşturmak üzere kullanıma hazır hale getirildi.

Kullanılan bu yöntemlerden ilki olan direk spektrum üzerinden sinyal şiddeti değeri okuma yöntemi ile oluşturulan doz-cevap eğrisi kullanılarak bilinmeyen bir dozda ışınlanan diş minesinin radyasyon dozu belirlenmeye çalışıldı. Direk spektrum üzerinden sinyal şiddeti verileri okunarak (3.1) denkleminde yerine koyulmak suretiyle maruz kalınan doz değeri belirlendi.

İkinci olarak Origin Simülasyon spektrumu üzerinden sinyal şiddeti değeri okuma yöntemi ile oluşturulan doz-cevap eğrisi kullanılarak bilinmeyen bir dozda ışınlanan diş minesinin radyasyon dozu belirlenmeye çalışıldı. Origin Simülasyon spektrumu üzerinden sinyal şiddeti verileri okunarak (3.3) denkleminde yerine koyulmak suretiyle maruz kalınan doz değeri belirlendi.

Üçüncü olarak MATLAB Simülasyon spektrumu üzerinden sinyal şiddeti değeri okuma yöntemi ile oluşturulan doz-cevap eğrisi kullanılarak bilinmeyen bir dozda ışınlanan diş minesinin radyasyon dozu belirlenmeye çalışıldı. MATLAB Simülasyon spektrumu üzerinden sinyal şiddeti verileri okunarak (3.4) denkleminde yerine koyulmak suretiyle maruz kalınan doz değeri belirlendi.

Bu doz değeri uygulanan üç yöntemi kıyaslama olanağı vermesi amacıyla Tablo 4.1'de verilmiştir.

**Tablo 4.1:** Bilinmeyen dozda ışınlanan diş minesi örneği için hesaplanan doz değerleri.

Işınlanan doz (mGy)	Direk ölçüm (mGy)	Origin Simülasyonu (mGy)	MATLAB Simülasyonu (mGy)
680	825,88	876,10	974,83

Oluşturulan doz-cevap eğrileri literatürde diş minesi için belirlenen lineer fonksiyona uygun şekilde bir değişim gösterdiği, ancak uygulanan yöntemle ilgili olarak farklı parametrelerle tanımlandığı belirlenmiştir. Yapılan bilinmeyen dozda ışınlanan örnek testinde maruz kalınan radyasyon dozu gerçek değerinden  $\pm 200$  mGy farklı bulunmuştur. Her ne kadar literatürde diş minesi için verilen minimum deteksiyon limitinin üstünde bir mutlak hata olsa da diş minesi kullanılarak bir kaza sonucu maruz kalınan doz değerinin belirlenmesinde diğer biyolojik yöntemlere yardımcı olması açısından kullanılabilir bir yöntem olduğu belirlenmiştir.



## 5. KAYNAKLAR

- Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, AFAD (2023) Radyasyon Kaynakları, <https://www.afad.gov.tr/kbrn/radyasyon-kaynaklari>, Erişim tarihi: 11.11.2023.
- Aksoy E. Elektromanyetik Spektrum, <https://prosafety.com.tr/elektromanyetik-spektrum-radyoaktivite/> Erişim tarihi: 11.11.2023.
- Apaydın, F. (1996). *Magnetik Rezonans*, H.Ü. Mühendislik Fakültesi Ders Kitapları, Beytepe/Ankara.
- Aydın, M. (2006). *İmino ve Amino Asit Bileşiklerinde Gama Işınları ile Oluşturulan Serbest Radikallerin ESR ile İncelenmesi*. (Doktora Tezi), 120, Dicle Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Diyarbakır.
- Berry, R. J.( 1987). Early radiation casualties-what Chernobyl has taught us. *Journal of the Society of Radiological Protection*, 7, 55-59.
- Brady, J. M., Aarestad, N. O. and Swartz, H. M. (1968). In vivo dosimetry by electron spin resonance spectroscopy, *Medical Physics*, 15, 43–47.
- Charbenau, G. T. (1988). Principles and Practise of Operative Dentistry. 3 th Ed. Lea & Febiger, Philadelphia
- Delgano, G. and McClymond, J. D., (1989). Evaluation of ESR as a radiation accident dosimetry technique, *Applied Radiation and Isotopes*, 40, 1013–1020.
- Doğruluk, M., Doğan, A., Kalkan, N. ve Korkmaz, M. (2018). Nükleer Tehlikeler ve Afet Yönetimi: Türkiye’de Durum Değerlendirmesi, *Afet ve Risk Dergisi* 1 (2), 137-153.
- Fattibene, P. and Callens, F., (2010). EPR dosimetry with tooth enamel: a review, *Applied Radiation and Isotopes*, 68 (11), 2033-2116.
- Fattibene, P. (2018). Personal Communication.
- Günel, B. (2017). History of Nuclear and Radiological Accidents in the World and Turkey. *Nuclear Medicine Seminars*, 3(3), 184-188.
- IAEA, (2002) International Atomic Energy Agency, Use of Electron Paramagnetic Resonance Dosimetry with Tooth Enamel for Retrospective Dose Assessment, IAEA-TECDOC-1331, IAEA, Vienna.
- IAEA. (1998). Accidental overexposure of radiotherapy patients in San Jose, Costa Rica. International Atomic Energy Agency
- IAEA, (2000). The radiological accident in Istanbul. IAEA.

- İğneli, A. (2023a). Diş isim numara çeşitleri,  
[https://www.aysunigneli.com/agiz\\_dis\\_eti\\_dil\\_cene\\_anatomisi1.html](https://www.aysunigneli.com/agiz_dis_eti_dil_cene_anatomisi1.html) Erişim tarihi:  
18.10.2023.
- İğneli, A. (2023b). Süt dişleri yapı ve gelişmesi,  
[https://www.aysunigneli.com/sut\\_disleri\\_yapisi\\_bebek\\_cocuk.html](https://www.aysunigneli.com/sut_disleri_yapisi_bebek_cocuk.html) Erişim tarihi:  
18.10.2023.
- Ikeya, M. (1993). New applications of electron paramagnetic resonance, dating, dosimetry and microscopy. World Scientific, Singapore.
- Kamenopoulou, V., Barthe, J., Hickman, C. and Portal, G., (1986) Accidental gamma irradiation dosimetry using clothing, *Radiation Protection Dosimetry*, 17, 185–188.
- Koray, F. (1981) Diş çürükleri 1.baskı, Dünya Tıp Kitapevi
- Manisalı, Y. ve Koray, F. (1982). Ağız Diş Embriyolojisi ve Histolojisi. 1. Baskı, İstanbul Yenilik Basımevi
- Marshall, S. J., Bayne, S. C., Baier, R., Tomsia, A. P. and Marshall, G. W. (2010). A review of adhesion science. *Dental Materials*, 26(2), e11-e16.
- Nakajima T., (1982). The use of organic substances as emergency dosimeters, *International Journal of Applied Radiation and Isotopes*, 33, 1077-1084.
- Nakajima T., (1987) External dose to a Japanese tourist from the Chernobyl reactor accident. *Health Physics*, 53, 405–407.
- Trivedi, A. and Greenstock, C.L., (1993). Use of sugars and hair for ESR emergency dosimetry, *Applied Radiation and Isotopes*, 44, 85-90.
- Ülgen, S., Saygın, H., Or, İ., Kumbaroğlu, G. ve Atiyas, İ. (2011). Nükleer Enerjiye Geçişte Türkiye Modeli. İstanbul, EDAM Yayınları.
- Wikipedi (2003). İnsan dişi, [https://tr.wikipedia.org/wiki/insan\\_dişi](https://tr.wikipedia.org/wiki/insan_dişi). Erişim tarihi:  
27.10.2023.
- Weiser, A. (2020). Personel cominication.
- Wieser, A., Debuyst, R., et al (2005). The 3rd international intercomparison on EPR tooth dosimetry: Part 1, general analysis. *Applied Radiation and Isotopes*. 62 (2), 163-171.
- Wieser, A., Debuyst, R., et al (2006). The 3rd international intercomparison on EPR tooth dosimetry: part 2, final analysis. *Radiation Protection Dosimetry*, 120, 176-183
- Wieser, A., Mehta, K., et al (2000). The 2nd international intercomparison on EPR tooth dosimetry. *Radiation Measurement*, 32, 549-557.
- Yavuzyılmaz, H. (2019)Diş Morfolojisi ve Anatomisi, Gazi Kitapevi

Young, R. W. and Kerr, G. D., eds. (2002). Reassessment of the atomic bomb radiation dosimetry for Hiroshima and Nagasaki—Dosimetry system volume 1



## ÖZGEÇMİŞ

### Kişisel Bilgiler

Adı Soyadı : Mesut AYDOĞMUŞ

Doğum tarihi ve yeri :

e-posta :

### Öğrenim Bilgileri

Derece	Okul/Program	Yıl
Y. Lisans	Balıkesir Üniversitesi / Fen Bilimleri Enstitüsü / Fizik Anabilim Dalı	2024
Lisans	Uludağ Üniversitesi / Fen Edebiyat Fakültesi / Fizik Bölümü	2012
Lise	Belen Lisesi	1999

### Yayın Listesi