

**GLUKOZ, FRAKTOZ VE GALAKTOZUN  
RADYASYON DOZ ÖLÇÜMÜNDE  
KULLANILABİLİRLİKLERİNİN ELEKTRON SPİN  
REZONANS (ESR) İLE İNCELENMESİ**

**INVESTIGATION OF THE USABILITY OF  
GLUCOSE, FRUCTOSE AND GALACTOSE  
IN RADIATION DOSE MEASUREMENTS  
BY ELECTRON SPIN RESONANCE (ESR)**

**FULYA ÖZSAYIN**

Hacettepe Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim – Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin

FİZİK Mühendisliği Anabilim Dalı İçin Öngördüğü

YÜKSEK LİSANS TEZİ

olarak hazırlanmıştır.

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürlüğü'ne,

Bu çalışma jürimiz tarafından **FİZİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI** 'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Başkan :.....  
Prof. Dr. Turan ÖZBEY

Üye (Danışman) :.....  
Prof. Dr. Mustafa POLAT

Üye :.....  
Prof. Dr. H. Yılmaz KAPTAN

Üye :.....  
Doç. Dr. Şeyda ÇOLAK

Üye :.....  
Yrd. Doç. Dr. Kadir DEMİR

ONAY

Bu tez Hacettepe Üniversitesi Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliği'nin ilgili maddeleri uyarınca yukarıdaki jüri üyeleri tarafından ...../...../..... tarihinde uygun görülmüş ve Enstitü Yönetim Kurulunca ...../...../..... tarihinde kabul edilmiştir.

Prof.Dr.Fatma SEVİN DÜZ  
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

# GLUKOZ, FRAKTOZ VE GALAKTOZUN RADYASYON DOZ ÖLÇÜMÜNDE KULLANILABİLİRLİKLERİNİN ELEKTRON SPİN REZONANS (ESR) İLE İNCELENMESİ

Fulya Özsayın

## ÖZ

Bu tez çalışması kapsamında glukoz (GL), fraktoz (FR) ve galaktozun (GA) dozimetrik özellikleri, Elektron Spin Rezonans (ESR) tekniği kullanılarak ayrıntılı bir şekilde incelenmiştir. Işınlama işleminden önce her üç örneğin de ESR spektrumunda herhangi bir sinyal gözlenmez iken, ışınlanmış örneklerin ESR spektrumlarının çok sayıda rezonans sinyalinden oluştuğu görülmüştür. Işınlanmış örnek spektrumlarındaki belirgin bazı rezonans sinyalleri isimlendirilmiş ve mikrodalga gücünün, modülasyon genliğinin, ışınlama dozunun, sıcaklığın ve depolama süresinin bu sinyallerin şiddetlerinde ne gibi değişimlere sebep oldukları araştırılmıştır.

Örnekler düşük doz (5-100 Gy) ve orta doz (0.1-5 kGy) bölgeleri olmak üzere iki farklı doz değerinde ışınlanmıştır. Değişik modülasyon genliklerinde oluşturulan mikrodalga-doyum eğrilerinden, her üç örnek için de, mikrodalga gücünün ve modülasyon genliğinin sırasıyla 4 mW ve 10 G seçilmesi durumunda, sinyal şiddetlerinin yapay olarak artırılabilceği ve böylece algılanabilir minimum doz değerinin 5 Gy' in de aşağılarına çekilebileceği görülmüştür.

Düşük ve orta doz bölgelerinde farklı modülasyon genliklerinde oluşturulan doz-cevap eğrilerinin benzetişimleri yapılmış ve en iyi ikinci dereceden polinom şeklindeki bir fonksiyonla betimlenebileceği sonucuna varılmıştır. Rezonans sinyallerinin yeterince şiddetli olmaması nedeniyle, GA örneğinin düşük doz bölgesinde dozimetrik amaçlı kullanıma uygun olmadığına karar verilmiştir.

Sıcaklığın sinyal şiddeti üzerine etkisi 130-380 K gibi geniş bir aralıkta incelenmiş ve GL örneğinde gözlenen rezonans sinyalleri  $I_1$  ve  $I_2$  ile FR örneğinde gözlenen  $I_3$  rezonans sinyalinin sıcaklığa karşı oldukça dirençli oldukları görülmüştür. GA örneğinde gözlenen tüm rezonans sinyallerinin yüksek sıcaklıklarda önemli ölçüde zayıfladığı görülmüş ve dozimetrik amaçlı kullanım durumunda yüksek sıcaklıklardan korunması gerektiği sonucuna varılmıştır.

Oda sıcaklığında yaklaşık 90 gün boyunca belirli zaman aralıklarında kaydedilmiş ESR spektrumlarından rezonans sinyallerinin şiddetleri ölçülmüş ve zamanla nasıl değiştiklerine bakılmıştır. Işınlanmış GL örneğinde gözlenen rezonans sinyallerinin, GA ve FR örneklerinde gözlenen rezonans sinyallerine kıyasla oldukça kararlı oldukları görülmüştür. Yüksek sıcaklıklarda yapılan tavlama deneylerinde ise, beklendiği gibi sıcaklığın artırılması ile rezonans sinyal şiddetlerindeki azalmaların da hızlandığı görülmüştür. Yapılan spektrum benzetişim çalışmaları sonucunda, ışınlanmış GL, FR ve GA örneklerinin ESR spektrumlarına dört farklı kökçenin kaynaklık ettiği görülmüş ve bu kökçelerin bağlı miktarları ve spektroskopik parametre değerleri belirlenmiştir.

Bu tez çalışması kapsamında elde edilen deneysel sonuçlardan, GL örneğinin hem düşük hem de orta doz bölgesinde dozimetrik amaçlı kullanıma uygun olduğu sonucuna varılmıştır. FR örneğinin de aynı bölgelerde doz ölçümünde kullanılabileceği ancak, ölçümün ışınlamayı takip eden ilk birkaç gün içerisinde tamamlanması gerektiği düşünülmektedir. GA örneğinin ise, yalnızca orta bölgede dozimetrik malzeme olarak kullanılabileceği ancak, ışınlama işleminden sonra oda sıcaklığının üzerindeki sıcaklıklardan korunması gerektiği sonucuna varılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** ESR, Glukoz, Fraktoz, Galaktoz, Dozimetri.

Danışman: Prof.Dr. Mustafa POLAT, Hacettepe Üniversitesi, Fizik Mühendisliği Bölümü, Genel Fizik Anabilim Dalı.

# INVESTIGATION OF THE USABILITY OF GLUCOSE, FRUCTOSE AND GALACTOSE IN RADIATION DOSE MEASUREMENTS BY ELECTRON SPIN RESONANCE (ESR)

Fulya Özsayın

## ABSTRACT

In this thesis, the dosimetric properties of glucose (GL), fructose (FR) and galactose (GA) have been investigated in detail by using Electron Spin Resonance (ESR) technique. While any resonance signal is not observed in three samples before irradiation process, it is observed that there are many resonance signals in ESR spectra of the irradiated samples. Some of the significant resonance signals have been marked and the effects of microwave power, modulation amplitude, irradiation dose, temperature and storage time on the intensity variations of these signals have been investigated.

The samples were irradiated at low (5-100 Gy) and intermediate dose (0.1-5 kGy) regions as two groups. It was observed from the microwave-saturation curves constructed at different modulation amplitudes that the signal intensities can be increased artificially by adjusting the microwave power and modulation amplitude as 4 mW and 10 G, respectively, for all three samples and thus, the minimum detectable dose can be lowered below 5 Gy. It was found from simulation calculation that the dose-response curves constructed at different modulation amplitudes at low and intermediate dose regions have described well by a second order polynomial function. It was decided that the GA sample is not suitable for dosimetric purposes at low dose range due to the insufficient resonance signal intensities. The effects of temperature on signal intensity have been investigated in a range of 130-380 K and the resonance signals  $I_1$  and  $I_2$  observed in GL and  $I_2$  in FR have found to be highly resistant to the temperature. It was observed that all the resonance signals in GA sample were decayed significantly at high temperatures and concluded that it should be protected from high temperatures as in the case of dosimetric uses.

The signal intensities of the resonance signals have been measured from the ESR spectra recorded at different times during the storage of 90 days and the signal intensity variations with time are examined. It was observed that the resonance

signals in GL sample are more stable than the resonance signals observed in FR and GA samples. It was observed from the annealing studies at high temperatures that, as it is expected, the decreases in signal intensities are accelerated as the temperature raised. From the spectrum simulation calculations it was observed that four different radical species are responsible from the ESR spectra of irradiated GL, FR and GA and the relative amounts and spectroscopic parameters of these radicals were also determined.

From the experimental results obtained from this thesis, it was concluded that GL sample is suitable for dosimetric purposes both for low and intermediate dose regions. It has been considered that FR sample can also be used for dosimetric purposes at the same dose regions, but the measurements should be done in a few days after the irradiation. In the case of GA sample, it was concluded that it can be used as a dosimeter material at intermediate dose region, but the sample should be protected from the temperatures higher than the room temperature.

**Keywords:** ESR, Glucose, Fructose, Galactose, Dosimetry.

Adviser: Prof.Dr. Mustafa POLAT, Hacettepe University, Department of Physics Engineering, Division of General Physics.

## TEŞEKKÜR

Tez çalıőmam süresince beni destekleyen, bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım, hoşgörü ve sabrı ile bana destek olan çok değerli hocam ve tez danıőmanım Sayın Prof. Dr. Mustafa POLAT' a,

Örneklerin temin edilmesinde yardımlarını esirgemeyen Hacettepe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Gıda Mühendisliği Bölümü öğretim üyesi Sayın Prof. Dr. Dilek SİVRİ ÖZAY' a

Örneklerin ışınlama işleminin yapıldığı Türkiye Atom Enerjisi Kurumu alıőanlarından Talat AYDIN, Birol ENGİN ve Canan AYDAŐ' a,

İlgi ve desteklerinden dolayı tüm Manyetik Rezonans Laboratuvarı alıőanlarına,

Desteklerini esirgemeyen aileme ve arkadaşlarıma,

Sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

# İÇİNDEKİLER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
ÖZ.....	i
ABSTRACT.....	iii
TEŞEKKÜR.....	v
İÇİNDEKİLER DİZİNİ.....	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xiii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xiv
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Radyasyonun Madde ile Etkileşmesi.....	2
1.2. Yaygın Olarak Kullanılan Doz Ölçüm Teknikler.....	5
1.3. ESR' nin Doz Ölçümünde Kullanılması .....	6
2. KURAMSAL BİLGİLER.....	11
2.1. Elektronun Spini ve Manyetik Momenti .....	11
2.2. Zeeman Yarılması ve Rezonans Şartı.....	16
2.3. Spektroskopik Yarılma Çarpanı (g-Faktörü).....	20
2.4. Aşırı İnce Yapı Etkileşmesi.....	23
2.5. Elektron Spin Rezonans (ESR) Spektroskopisi.....	29
2.6. ESR Spektrometresinin Temel Özellikleri.....	31
3. DENEYSEL BULGULAR .....	34
3.1. Glukoz.....	34
3.1.1. Işınlanmış ve ışınlanmamış glukoz ESR spektrumları .....	34
3.1.2. ESR sinyal şiddetinin modülasyon genliği ve mikrodalga gücü ile değişimi .....	35
3.1.3. Doz-cevap eğrileri .....	38
3.1.4. ESR sinyal şiddetinin sıcaklıkla değişimi.....	42
3.1.5. ESR sinyal şiddetinin zamanla değişimi .....	44
3.1.6. ESR Sinyal şiddetinin değişik sıcaklıklardaki sönümü.....	45
3.1.7. ESR spektrum benzetişim çalışmaları.....	48
3.2. Fraktoz .....	52
3.2.1. Işınlanmış ve ışınlanmamış fraktoz ESR spektrumları .....	52
3.2.2. ESR sinyal şiddetinin modülasyon genliği ve mikrodalga gücü ile değişimi .....	53
3.2.3. Doz-cevap eğrileri .....	56
3.2.4. ESR sinyal şiddetinin sıcaklıkla değişimi.....	62
3.2.5. ESR sinyal şiddetinin zamanla değişimi .....	66

3.2.6. ESR Sinyal şiddetinin değişik sıcaklıklardaki sönümü.....	67
3.2.7. ESR spektrum benzetişim çalışmaları.....	71
3.3. Galaktoz .....	74
3.3.1. Işınlanmış ve ışınlanmamış galaktoz ESR spektrumları .....	74
3.3.2. ESR sinyal şiddetinin modülasyon genliği ve mikrodalga gücü ile değişimi .....	75
3.3.3. Doz-cevap eğrileri .....	77
3.3.4. ESR sinyal şiddetinin sıcaklıkla değişimi.....	81
3.3.5. ESR sinyal şiddetinin zamanla değişimi .....	84
3.3.6. ESR Sinyal şiddetinin değişik sıcaklıklardaki sönümü.....	86
3.3.7. ESR spektrum benzetişim çalışmaları.....	89
3. SONUÇ VE TARTIŞMA.....	92
KAYNAKLAR .....	96
ÖZ GEÇMİŞ .....	99

## ŞEKİLLER DİZİNİ

### Sayfa

Şekil 1.1. Glukoz, fraktoz ve galaktozun moleküler yapıları.....	8
Şekil 2.1 (a) Yörünge ve spin açışal momentum vektörleri <b>L</b> ve <b>S</b> , <b>J</b> etrafında dönü hareketi yaparlar. (b) Bir <b>B</b> dış manyetik alanı varken, toplam açışal momentum vektörü <b>J</b> , <b>B</b> etrafında dönü hareketi yapar. ....	15
Şekil 2.2. Çiftlenimsiz elektronun manyetik alanla etkileşmesi sonucu oluşun (a) enerji düzeyleri; (b) soğurma eğrisi; (c) türev eğrisi.....	18
Şekil 2.3. Çiftlenimsiz bir elektronun spini <b>I</b> olan bir çekirdekle etkileşmesi durumunda enerji düzeylerinde gözlenen yarılmalr ve beklenen rezonans sinyalleri. (a) $I = 1/2$ , (b) $I = 1$ .....	24
Şekil 2.4. Uygulanan dış manyetik alanla aynı yönde yönelmiş, aralarında <b>r</b> mesafesi olan elektron manyetik momenti ile çekirdek manyetik momenti arasındaki etkileşme .....	26
Şekil 2.5. 1s, 2p ve 3d dalga fonksiyonlarının radyal bağımlılığı ( $r_b$ , Bohr yarıçapı) (a) 1s, (b) 2p, (c) 3d.....	28
Şekil 2.6. ESR spektrometresinin blok diyagramı.....	32
Şekil 2.7. Mikrodalga üreten bir klystronun şematik çizimi.....	32
Şekil 2.8. İncelenecek örneğin içine konduğu kavite .....	32
Şekil 2.9. Bruker EMX 131 X-Band ESR spektrometresi.....	33
Şekil 3.1. Işınlanmamış ve ışınlanmış glukoz örneği ESR spektrumları. (a) Işınlanmamış; (b) $^{137}\text{Cs}$ gama kaynağında 50 Gy; (c) $^{60}\text{Co}$ gama kaynağında 3 kGy doz değerinde ışınlanmış .....	35
Şekil 3.2. 3 kGy doz değerinde ışınlanmış glukoz örneğinde gözlenen $I_1$ rezonans sinyal şiddetlerinin uygulanan mikrodalga gücü ve modülasyon genliği ile değişimleri. [(■), 1 G; (●), 2 G; (▲), 3 G; (▼), 5 G; (◆) 7 G; (●) 10 G].....	37
Şekil 3.3. 3 kGy doz değerinde ışınlanmış glukoz örneğinde gözlenen $I_2$ rezonans sinyal şiddetlerinin uygulanan mikrodalga gücü ve modülasyon genliği ile değişimleri. [(■), 1 G; (●), 2 G; (▲), 3 G; (▼), 5 G; (◆) 7 G; (●) 10 G].....	37
Şekil 3.4. 3 kGy doz değerinde ışınlanmış glukoz örneğinde 1 mW mikrodalga gücü ve değişik modülasyon genliklerinde kaydedilmiş ESR spektrumları. [a, 1 G; b, 2 G; b, 3 G; c, 5 G; d, 7 G; d, 10 G] .....	38
Şekil 3.5. Düşük doz bölgesinde ışınlanmış glukoz örneği ESR spektrumunda gözlenen $I_1$ sinyali için 1 mW mikrodalga gücünde ve farklı modülasyon genliklerindeki doz-cevap eğrileri (Sembol, Deneysel; -----, Kuramsal). [(▲), 3 G; (▼), 5 G; (◆) 7 G; (●) 10 G].....	39
Şekil 3.6. Orta doz bölgesinde e ışınlanmış glukoz örneği ESR spektrumunda gözlenen $I_1$ sinyali için 1 mW mikrodalga gücünde ve farklı modülasyon genliklerindeki doz-cevap eğrileri (Sembol, Deneysel; -----, Kuramsal). [(■), 1 G; (●), 2 G; (▲), 3 G; (▼), 5 G; (◆) 7 G; (●) 10 G].....	40

- Şekil 3.7. Düşük doz bölgesinde ışınlanmış glukoz örneği ESR spektrumunda gözlenen  $I_2$  sinyali için 1 mW mikrodalga gücünde ve farklı modülasyon genliklerindeki doz-cevap eğrileri (Sembol, Deneysel; -----, Kuramsal). [(▲), 3 G; (▼), 5 G; (◆) 7 G; (●) 10 G].....40
- Şekil 3.8. Orta doz bölgesinde ışınlanmış glukoz örneği ESR spektrumunda gözlenen  $I_2$  sinyali için 1 mW mikrodalga gücünde ve farklı modülasyon genliklerindeki doz-cevap eğrileri (Sembol, Deneysel; -----, Kuramsal). [(■), 1 G; (●), 2 G; (▲), 3 G; (▼), 5 G; (◆) 7 G; (●) 10 G].....41
- Şekil 3.9. 3 kGy doz değerinde ışınlanmış glukoz örneği ESR spektrumunda gözlenen  $I_1$  rezonans sinyal şiddetinin sıcaklıkla değişimi. (■) 290 K → 130 K; (●) 130 K → 340 K; (▲) 340 K → 290 K .....43
- Şekil 3.10. 3 kGy doz değerinde ışınlanmış glukoz örneği ESR spektrumunda gözlenen  $I_2$  rezonans sinyal şiddetinin sıcaklıkla değişimi. (■) 290 K → 130 K; (●) 130 K → 340 K; (▲) 340 K → 290 K .....44
- Şekil 3.11. 3 kGy doz değerinde ışınlanmış glukoz örneğinde gözlenen  $I_1$  ve  $I_2$  rezonans sinyal şiddetlerinin zamanla değişimi. [(■)  $I_1$ ; (●)  $I_2$ ] .....45
- Şekil 3.12. 3 kGy doz değerinde ışınlanmış glukozun oda sıcaklığında farklı zamanlarda kaydedilmiş ESR spektrumları .....46
- Şekil 3.13. 3 kGy doz değerinde ışınlanmış glukoz örneği ESR spektrumunda gözlenen  $I_1$  rezonans sinyal şiddetinin farklı tavlama sıcaklıklarında zamanla değişimi. (■) 310 K; (●) 320 K; (▲) 330 K; (▼) 340 K.....47
- Şekil 3.14. 3 kGy doz değerinde ışınlanmış glukoz örneği ESR spektrumunda gözlenen  $I_2$  rezonans sinyal şiddetinin farklı tavlama sıcaklıklarında zamanla değişimi. (■) 310 K; (●) 320 K; (▲) 330 K; (▼) 340 K.....48
- Şekil 3.15. 3 kGy doz değerinde ışınlanmış glukoz örneği ESR spektrumunun benzetişimi için önerilen kökçeler .....49
- Şekil 3.16. 3 kGy doz değerinde ışınlanmış glukoz örneği ESR spektrumu ve benzetişimi sonucu bulunan parametre değerleri kullanılarak hesaplanan kuramsal spektrum. [(—) Deneysel; (-----) Kuramsal].....51
- Şekil 3.17. Işınlanmamış ve ışınlanmış fraktoz örneği ESR spektrumları. (a) Işınlanmamış; (b)  $^{137}\text{Cs}$  gama kaynağında 50 Gy; (c)  $^{60}\text{Co}$  gama kaynağında 3 kGy doz değerinde ışınlanmış .....52
- Şekil 3.18. 3 kGy doz değerinde ışınlanmış fraktoz örneğinde gözlenen rezonans sinyal şiddetlerinin ( $I_1$ ,  $I_2$ ,  $I_3$  ve  $I_4$ ) uygulanan mikrodalga gücü ve modülasyon genliği ile değişimleri. (a)  $I_1$ ; (b)  $I_2$ ; (c)  $I_3$  ve (d)  $I_4$ . [(■), 1 G; (●), 2 G; (▲), 3 G; (▼), 5 G; (◆) 7 G; (●) 10 G].....54
- Şekil 3.19. 3 kGy doz değerinde ışınlanmış fraktoz örneğinde 1 mW mikrodalga gücü ve değişik modülasyon genliklerinde kaydedilmiş ESR spektrumları. [a, 1 G; b, 2 G; b, 3 G; c, 5 G; d, 7 G; f, 10 G] .....55
- Şekil 3.20. Düşük doz bölgesinde ışınlanmış fraktoz örneği ESR spektrumunda gözlenen  $I_1$  sinyali için 1 mW mikrodalga gücünde ve farklı modülasyon genliklerindeki doz-cevap eğrileri (Sembol, Deneysel; -----, Kuramsal). [(▲), 3 G; (▼), 5 G; (◆) 7 G; (●) 10 G].....57

- Şekil 3.21. Düşük doz bölgesinde ışınlanmış fraktoz örneği ESR spektrumunda gözlenen  $I_2$  sinyali için 1 mW mikrodalga gücünde ve farklı modülasyon genliklerindeki doz-cevap eğrileri (Sembol, Deneysel; -----, Kuramsal). [(▲), 3 G; (▼), 5 G; (◆) 7 G; (●) 10 G].....57
- Şekil 3.22. Düşük doz bölgesinde ışınlanmış fraktoz örneği ESR spektrumunda gözlenen  $I_3$  sinyali için 1 mW mikrodalga gücünde ve farklı modülasyon genliklerindeki doz-cevap eğrileri (Sembol, Deneysel; -----, Kuramsal). [(▲), 3 G; (▼), 5 G; (◆) 7 G; (●) 10 G].....58
- Şekil 3.23. Düşük doz bölgesinde ışınlanmış fraktoz örneği ESR spektrumunda gözlenen  $I_4$  sinyali için 1 mW mikrodalga gücünde ve farklı modülasyon genliklerindeki doz-cevap eğrileri (Sembol, Deneysel; -----, Kuramsal). [(▲), 3 G; (▼), 5 G; (◆) 7 G; (●) 10 G].....58
- Şekil 3.24. Orta doz bölgesinde ışınlanmış fraktoz örneği ESR spektrumunda gözlenen  $I_1$  sinyali için 1 mW mikrodalga gücünde ve farklı modülasyon genliklerindeki doz-cevap eğrileri (Sembol, Deneysel; -----, Kuramsal). [(■), 1 G; (●), 2 G; (▲), 3 G; (▼), 5 G; (◆) 7 G; (●) 10 G].....59
- Şekil 3.25. Orta doz bölgesinde ışınlanmış fraktoz örneği ESR spektrumunda gözlenen  $I_2$  sinyali için 1 mW mikrodalga gücünde ve farklı modülasyon genliklerindeki doz-cevap eğrileri (Sembol, Deneysel; -----, Kuramsal). [(■), 1 G; (●), 2 G; (▲), 3 G; (▼), 5 G; (◆) 7 G; (●) 10 G].....59
- Şekil 3.26. Orta doz bölgesinde ışınlanmış fraktoz örneği ESR spektrumunda gözlenen  $I_3$  sinyali için 1 mW mikrodalga gücünde ve farklı modülasyon genliklerindeki doz-cevap eğrileri (Sembol, Deneysel; -----, Kuramsal). [(■), 1 G; (●), 2 G; (▲), 3 G; (▼), 5 G; (◆) 7 G; (●) 10 G].....60
- Şekil 3.27. Orta doz bölgesinde ışınlanmış fraktoz örneği ESR spektrumunda gözlenen  $I_4$  sinyali için 1 mW mikrodalga gücünde ve farklı modülasyon genliklerindeki doz-cevap eğrileri (Sembol, Deneysel; -----, Kuramsal). [(■), 1 G; (●), 2 G; (▲), 3 G; (▼), 5 G; (◆) 7 G; (●) 10 G].....60
- Şekil 3.28. 3 kGy doz değerinde ışınlanmış fraktoz örneği ESR spektrumunda gözlenen  $I_1$  rezonans sinyal şiddetinin sıcaklıkla değişimi. (■) 290 K → 130 K; (●) 130 K → 380 K; (▲) 380 K → 290 K .....62
- Şekil 3.29. 3 kGy doz değerinde ışınlanmış fraktoz örneği ESR spektrumunda gözlenen  $I_2$  rezonans sinyal şiddetinin sıcaklıkla değişimi. (■) 290 K → 130 K; (●) 130 K → 380 K; (▲) 380 K → 290 K .....63
- Şekil 3.30. 3 kGy doz değerinde ışınlanmış fraktoz örneği ESR spektrumunda gözlenen  $I_3$  rezonans sinyal şiddetinin sıcaklıkla değişimi. (■) 290 K → 130 K; (●) 130 K → 380 K; (▲) 380 K → 290 K .....63
- Şekil 3.31. 3 kGy doz değerinde ışınlanmış fraktoz örneği ESR spektrumunda gözlenen  $I_4$  rezonans sinyal şiddetinin sıcaklıkla değişimi. (■) 290 K → 130 K; (●) 130 K → 380 K; (▲) 380 K → 290 K .....64
- Şekil 3.32. 3 kGy doz değerinde ışınlanmış fraktoz örneğinde gözlenen  $I_1$ ,  $I_2$ ,  $I_3$  ve  $I_4$  rezonans sinyal şiddetlerinin zamanla değişimi. [(■)  $I_1$ ; (●)  $I_2$ ; (◆)  $I_3$ ; (▼)  $I_4$ ] .....67
- Şekil 3.33. 3 kGy doz değerinde ışınlanmış fraktozun oda sıcaklığında farklı zamanlarda kaydedilmiş ESR spektrumları .....68

- Şekil 3.34. 3 kGy doz değerinde ışınlanmış fraktoz örneği ESR spektrumunda gözlenen  $I_1$  rezonans sinyal şiddetinin farklı tavlama sıcaklıklarında zamanla değişimi. (■) 330 K; (●) 340 K; (▲) 350 K; (▼) 360 K.....69
- Şekil 3.35. 3 kGy doz değerinde ışınlanmış fraktoz örneği ESR spektrumunda gözlenen  $I_2$  rezonans sinyal şiddetinin farklı tavlama sıcaklıklarında zamanla değişimi. (■) 330 K; (●) 340 K; (▲) 350 K; (▼) 360 K.....70
- Şekil 3.36. 3 kGy doz değerinde ışınlanmış fraktoz örneği ESR spektrumunda gözlenen  $I_3$  rezonans sinyal şiddetinin farklı tavlama sıcaklıklarında zamanla değişimi. (■) 330 K; (●) 340 K; (▲) 350 K; (▼) 360 K.....70
- Şekil 3.37. 3 kGy doz değerinde ışınlanmış fraktoz örneği ESR spektrumunda gözlenen  $I_4$  rezonans sinyal şiddetinin farklı tavlama sıcaklıklarında zamanla değişimi. (■) 330 K; (●) 340 K; (▲) 350 K; (▼) 360 K.....71
- Şekil 3.38. 3 kGy doz değerinde ışınlanmış fraktoz örneği ESR spektrumunun benzetişimi için önerilen kökçeler .....72
- Şekil 3.39. 3 kGy doz değerinde ışınlanmış fraktoz örneği ESR spektrumu ve benzetişimi sonucu bulunan parametre değerleri kullanılarak hesaplanan kuramsal spektrum. [(—) Deneysel; (-----) Kuramsal].....73
- Şekil 3.40. Işınlanmamış ve ışınlanmış galaktoz örneği ESR spektrumları. (a) Işınlanmamış; (b)  $^{137}\text{Cs}$  gama kaynağında 50 Gy; (c)  $^{60}\text{Co}$  gama kaynağında 3 kGy doz değerinde ışınlanmış .....74
- Şekil 3.41. 3 kGy doz değerinde ışınlanmış galaktoz örneğinde gözlenen rezonans sinyal şiddetlerinin ( $I_1, I_2, I_3$  ve  $I_4$ ) uygulanan mikrodalga gücü ve modülasyon genliği ile değişimleri. (a)  $I_1$ ; (b)  $I_2$ ; (c)  $I_3$  ve (d)  $I_4$ . [(■), 1 G; (●), 2 G; (▲), 3 G; (▼), 5 G; (◆) 7 G; (●) 10 G].....76
- Şekil 3.42. 3 kGy doz değerinde ışınlanmış galaktoz örneğinde 1 mW mikrodalga gücü ve değişik modülasyon genliklerinde kaydedilmiş ESR spektrumları. [a, 1 G; b, 2 G; b, 3 G; c, 5 G; d, 7 G; f, 10 G] .....77
- Şekil 3.43. Galaktoz örneği ESR spektrumunda gözlenen  $I_1$  sinyali için 1 mW mikrodalga gücünde ve farklı modülasyon genliklerindeki doz-cevap eğrileri (Sembol, Deneysel; -----, Kuramsal). [(■), 1 G; (●), 2 G; (▲), 3 G; (▼), 5 G; (◆) 7 G; (●) 10 G].....78
- Şekil 3.44. Galaktoz örneği ESR spektrumunda gözlenen  $I_2$  sinyali için 1 mW mikrodalga gücünde ve farklı modülasyon genliklerindeki doz-cevap eğrileri (Sembol, Deneysel; -----, Kuramsal). [(■), 1 G; (●), 2 G; (▲), 3 G; (▼), 5 G; (◆) 7 G; (●) 10 G].....78
- Şekil 3.45. Galaktoz örneği ESR spektrumunda gözlenen  $I_3$  sinyali için 1 mW mikrodalga gücünde ve farklı modülasyon genliklerindeki doz-cevap eğrileri (Sembol, Deneysel; -----, Kuramsal). [(■), 1 G; (●), 2 G; (▲), 3 G; (▼), 5 G; (◆) 7 G; (●) 10 G].....79
- Şekil 3.46. Galaktoz örneği ESR spektrumunda gözlenen  $I_4$  sinyali için 1 mW mikrodalga gücünde ve farklı modülasyon genliklerindeki doz-cevap eğrileri (Sembol, Deneysel; -----, Kuramsal). [(■), 1 G; (●), 2 G; (▲), 3 G; (▼), 5 G; (◆) 7 G; (●) 10 G].....79

Şekil 3.47. 3 kGy doz değerinde ışınlanmış galaktoz örneği ESR spektrumunda gözlenen $I_1$ rezonans sinyal şiddetinin sıcaklıkla değişimi. (■) 290 K → 130 K; (●) 130 K → 380 K; (▲) 380 K → 290 K .....	82
Şekil 3.48. 3 kGy doz değerinde ışınlanmış galaktoz örneği ESR spektrumunda gözlenen $I_2$ rezonans sinyal şiddetinin sıcaklıkla değişimi. (■) 290 K → 130 K; (●) 130 K → 380 K; (▲) 380 K → 290 K .....	82
Şekil 3.49. 3 kGy doz değerinde ışınlanmış galaktoz örneği ESR spektrumunda gözlenen $I_3$ rezonans sinyal şiddetinin sıcaklıkla değişimi. (■) 290 K → 130 K; (●) 130 K → 380 K; (▲) 380 K → 290 K .....	83
Şekil 3.50. 3 kGy doz değerinde ışınlanmış galaktoz örneği ESR spektrumunda gözlenen $I_4$ rezonans sinyal şiddetinin sıcaklıkla değişimi. (■) 290 K → 130 K; (●) 130 K → 380 K; (▲) 380 K → 290 K .....	83
Şekil 3.51. 3 kGy doz değerinde ışınlanmış galaktoz örneğinde gözlenen $I_1$ , $I_2$ , $I_3$ ve $I_4$ rezonans sinyal şiddetlerinin zamanla değişimi. [(■) $I_1$ ; (●) $I_2$ ; (◆) $I_3$ ; (▼) $I_4$ ] .....	84
Şekil 3.52. 3 kGy doz değerinde ışınlanmış galaktozun oda sıcaklığında farklı zamanlarda kaydedilmiş ESR spektrumları .....	85
Şekil 3.53. 3 kGy doz değerinde ışınlanmış galaktoz örneği ESR spektrumunda gözlenen $I_1$ rezonans sinyal şiddetinin farklı tavlama sıcaklıklarında zamanla değişimi. (■) 320 K; (●) 330 K; (▲) 340 K; (▼) 350 K.....	87
Şekil 3.54. 3 kGy doz değerinde ışınlanmış galaktoz örneği ESR spektrumunda gözlenen $I_2$ rezonans sinyal şiddetinin farklı tavlama sıcaklıklarında zamanla değişimi. (■) 320 K; (●) 330 K; (▲) 340 K; (▼) 350 K.....	87
Şekil 3.55. 3 kGy doz değerinde ışınlanmış galaktoz örneği ESR spektrumunda gözlenen $I_3$ rezonans sinyal şiddetinin farklı tavlama sıcaklıklarında zamanla değişimi. (■) 320 K; (●) 330 K; (▲) 340 K; (▼) 350 K.....	88
Şekil 3.56. 3 kGy doz değerinde ışınlanmış galaktoz örneği ESR spektrumunda gözlenen $I_4$ rezonans sinyal şiddetinin farklı tavlama sıcaklıklarında zamanla değişimi. (■) 320 K; (●) 330 K; (▲) 340 K; (▼) 350 K.....	88
Şekil 3.57. 3 kGy doz değerinde ışınlanmış galaktoz örneği ESR spektrumunun benzetişimi için önerilen kökçeler .....	89
Şekil 3.58. 3 kGy doz değerinde ışınlanmış galaktoz örneği ESR spektrumu ve benzetişim sonucu bulunan parametre değerleri kullanılarak hesaplanan kuramsal spektrum. [(—) Deneysel; (-----) Kuramsal].....	91
Şekil 4.1. 3 kGy doz değerinde ışınlanmış GL, GA ve FR örneklerinin aynı spektrometre çalışma koşullarında kaydedilmiş ESR spektrumları (Mikrodalga Gücü, 0.5 mW; Modülasyon Genliği, 3 G ve Kazanç, $6,3 \times 10^3$ .....	93

## ÇİZELGELER DİZİNİ

### Sayfa

Çizelge 1.1. Glukoz, fraktoz ve galaktozun özellikleri.....	8
Çizelge 2.1. Gaussiyen ve Lorentziyen çizgi fonksiyonlarının temel özellikleri.....	17
Çizelge 2.2. ESR' de kullanılan yaygın frekanslar.....	33
Çizelge 3.1. Düşük ve orta doz bölgesinde ışınlanmış glukoz örneği için farklı modülasyon genliklerinde oluşturulmuş doz-cevap eğrilerinin benzetişimi sonucu hesaplanan parametre değerleri .....	41
Çizelge 3.2. 3 kGy doz değerinde ışınlanmış glukoz örneği ESR spektrumu benzetişimi için önerilen kökçeler ve benzetişim sonucu hesaplanan spektroskopik parametre değerleri .....	50
Çizelge 3.3. Düşük doz bölgesinde ışınlanmış fraktoz örneği için farklı modülasyon genliklerinde oluşturulmuş doz-cevap eğrilerinin benzetişimi sonucu hesaplanan parametre değerleri.....	61
Çizelge 3.4. 3 kGy doz değerinde ışınlanmış fraktoz örneği ESR spektrumu benzetişimi için önerilen kökçeler ve benzetişim sonucu hesaplanan spektroskopik parametre değerleri.. .....	72
Çizelge 3.5. Galaktoz için farklı modülasyon genliklerinde oluşturulmuş deneysel orta bölge doz-cevap eğrilerinin benzetişimi için önerilen matematiksel modeller ve benzetişim sonucu elde edilen parametre değerleri .....	78
Çizelge 3.6. 3 kGy doz değerinde ışınlanmış galaktoz örneği ESR spektrumu benzetişimi için önerilen kökçeler ve benzetişim sonucu hesaplanan spektroskopik parametre değerleri .....	90

## SİMGELER VE KISALTMALAR

ESR	Elektron Spin Rezonans
A	Aşırı İnce Yapı Sabiti
$\mu_B$	Bohr Magnetonu
$\mu$	Toplam Manyetik Moment
$\mu_s$	Elektron Spin Manyetik Momenti
$\mu_L$	Elektron Yörünge Manyetik Momenti
$\mu_N$	Komşu Çekirdeğin Manyetik Momenti
$\mu_e$	Elektronun Manyetik Momenti
h	Planck Sabiti
$\omega$	Larmor Frekansı
g	Spektroskopik Yarıлма Çarpanı
$\Delta B_{1/2}$	Soğurma Eğrisinde Yarı Yükseklikteki Yarı Genişlik
$\Delta B_{tt}$	Türev Eğrisinde Tepeden Tepeye Çizgi Genişliği
$B_r$	Rezonans Manyetik Alan Değeri
$g_r$	Rezonans Manyetik Alan Değerine Karşılık Gelen Spektroskopik Yarıлма Çarpanı
$A_{max}$	Rezonansa Giren Spinlerin Toplam Sayısı ya da Sinyal Şiddeti
$\nu$	Elektromanyetik Radyasyonun Frekansı
I	Çekirdek Spini
H	Toplam Hamiltoniyeni
<b>B</b>	Manyetik Alan
$B_t$	Elektronun Gördüğü Toplam Manyetik Alan
$B_{yerel}$	Komşu Çekirdek Manyetik Momentlerinin Elektronun Bulunduğu Yerde Oluşturduğu Alan
n	Baş Kuantum Sayısı
l	Yörünge Açısal Kuantum Sayısı
s	Spin Açısal Kuantum Sayısı
J	Toplam Açısal Kuantum Sayısı
S	Spin Açısal Momentum Vektörü
L	Yörünge Açısal Momentum Vektörü
J	Toplam Açısal Momentum Vektörü
$m_l$	Yörünge Manyetik Kuantum Sayısı
$m_s$	Spin Manyetik Kuantum Sayısı
$m_j$	Toplam Manyetik Kuantum Sayısı

$m_I$	Çekirdek Spin Kuantum Sayısı
$S_z$	$S'$ nin Manyetik Alan Yönündeki Bileşeni
$L_z$	$L'$ nin Manyetik Alan Yönündeki Bileşeni
$\mu_{sz}$	$\mu_s'$ nin Manyetik Alan Yönündeki Bileşeni
$N_-$	Alt Enerji Düzeyindeki Spinlerin Sayısı
$N_+$	Üst Enerji Düzeyindeki Spinlerin Sayısı
Gy	Gray
$\lambda$	Spin-Yörünge Etkileşme Sabiti
$r$	İki Dipolün Merkezleri Arasındaki Uzaklık
$\hat{r}$	Elektronun Bulunduğu Noktadan Çekirdeğin Bulunduğu Nokta Yönündeki Birim Vektör
$r_b$	Bohr Yarıçapı
$\mu_0$	Boşluğun Manyetik Geçirgenliği
$A_s$	Fermi-Değme Etkileşmesi Terimi
$A_d$	Dipol-Dipol Etkileşmesi Terimi
$ \psi(0)^2 $	Elektronun Çekirdekte Bulunma Olasılığı
AL	Alanin
GL	Glukoz
GA	Galaktoz
FR	Fraktoz

## 1. GİRİŞ

Radyasyon ile ışınlama işlemi kırk yılı aşkın bir süredir ticari amaçlı olarak kullanılmaktadır. Gama radyasyonu, elektron demetleri ve X-ışınları sağlık alanında kullanılan cihazların ve malzemelerin sterilizasyonunda ve bazı hastalıkların tedavisinde uzun yıllardır kullanılmaktadır. Bunun dışında bazı gıdaların ışınlanarak raf ömürlerinin arttırılması, ilaç ve ilaç hammaddeleri ile kozmetik malzemelerin sterilizasyonu radyasyonun endüstriyel uygulama alanlarıdır. İster sağlık, isterse de endüstriyel uygulama alanlarında olsun, ışınlama işleminin uluslararası kurum ve kuruluşların öngördüğü limitler içerisinde yapılıp yapılmadığı insan sağlığı açısından son derece önemlidir. Endüstriyel amaçlı ışınlamalarda uygulanan radyasyon dozları birkaç yüz Gy' den birkaç yüz kGy' e kadar uzanır. Örneğin gıda ışınlama işleminde kullanılan doz gıdadan gıdaya değişiklik gösterse de, ortalama olarak 10 kGy mertebesindedir (Raffi ve ark., 2000; Vanhaelewyn ve ark., 2000). İlaç ve ilaç hammaddeleri ile kozmetik malzemelerin sterilizasyonunda uygulanan ortalama radyasyon dozu 25 kGy civarındadır ve tıbbi malzemelerde bu doz daha da yukarılara çıkabilmektedir (Basly ve ark., 1997). Buna karşılık, radyoterapi tedavisi gören hastalarda, hastalığın derecesine ve ışınlanacak organa göre değişiklik gösterse de; tek seferde birkaç Gy' den fazla doz uygulanmaz (Maghraby ve Tarek, 2006). Bütün bunlar gözönüne alındığında, radyasyon işleminin uygulandığı tüm alanlarda uygulanan radyasyon doz miktarının hızlı, duyarlı ve doğru bir biçimde ölçülmesinin kaçınılmaz bir ihtiyaç olduğu çok açıktır. Radyasyonun madde içerisinde doğrudan veya dolaylı bir şekilde meydana getirdiği değişikliklerden yola çıkarak, malzeme tarafından soğurulan radyasyon doz miktarının belirlenmesi "dozimetri", ölçüm için kullanılan cihaz veya malzeme de "dozimetre" olarak adlandırılır. İyi bir dozimetre malzemesinde olması gereken özellikler şöyle sıralanabilir:

- Ölçüm sonuçları doğru, hassas ve tekrarlanabilir olmalıdır.
- Malzeme içerisinde oluşan hasar radyasyona özgü olmalı, ışınlama dozu arttıkça çizgisel olarak artmalıdır.
- Malzeme içerisinde oluşan hasar, radyasyon kaynağının doz hızına bağlı olmamalıdır.

- Birim doz başına oluşan hasar yüksek olmalı ve uzun süre varlığını korumalıdır.
- Sıcaklık ve nem gibi çevresel koşullardan etkilenmemelidir.
- Ucuz ve kolay bulunabilir olmalıdır.

### 1.1. Radyasyonun Madde ile Etkileşmesi

Radyasyon, dalga, parçacık veya foton olarak adlandırılan enerji paketleri ile taşınan enerjidir. Gama ışınları, diğer elektromanyetik ışınlar arasında, en yüksek frekansa ( $\sim 10^{10}$ - $10^{24}$  Hz) ve en düşük dalga boyuna ( $<10^{12}$  m) sahiptirler. Gama ve x-ışınlarının, alfa ve beta parçacıklarına göre giricilikleri çok daha fazla, iyonlaşmaya sebep olma etkileri ise çok daha azdır. Madde içerisinden geçerken üstel bir fonksiyon şeklinde bir şiddet azalmasına uğrarlar. Yüksüz olduklarından elektrik ve manyetik alanda sapma göstermezler. Radyoaktif bozunum (alfa veya beta) yapmış veya bir nükleer reaksiyondan sonra ortaya çıkan ürün çekirdek, genellikle uyarılmış enerji seviyesinde kalır. Bu durumdaki çekirdek ikinci bir bozunum ile bir foton yayınlamaya daha düşük enerji seviyesine ve sonunda da taban enerji seviyesine düşer. Bu şekilde, çekirdeğin uyarılmış enerji seviyesinden temel seviyesine düşerken yayınladığı fotonlara gama ışını denir.

Bir nükleer bozunma sırasında yayınlanan ve bir MeV' in kesrinden birkaç MeV' e kadar bir aralıkta enerjiye sahip olan gama ışınlarının madde ile etkileşmesi sonucunda enerji kaybettikleri üç temel olay vardır (Dözen, 2006). Bunlar;

- Fotoelektrik olay
- Saçılma
- Çift oluşumdur.

Fotoelektrik olayda, düşük enerjili bir foton genellikle içinden geçtiği ortamdaki atomların K veya L yörüngelerinden bir elektrona bütün enerjisini vererek onu pozitif yüklü çekirdeğin bağlayıcı kuvvetinden kurtarır. Dışarıya fırlatılan bu elektrona fotoelektron denir. Bu olay neticesinde oluşan elektron boşluğu dış yörüngedeki başka bir elektron tarafından doldurulur ve bu sırada X-ışını yayınlanır. 0,5 MeV' den daha küçük enerjili fotonların ağır elementler tarafından soğurulmasında bu olay oldukça önemlidir. Bu olay sırasında, gelen fotonun enerjisinin bir kısmı elektrona bağlı olduğu atomdan koparabilmek için harcanır,

geri kalan kısmı ise koparılan elektrona kinetik enerji olarak aktarılır (Kaçar, 2006). Düşük atom numaralı (Z) elementlerin bağlanma enerjileri de düşük olduğundan fotoelektrik etki bahsedilen fotonlar için güçsüz kalır. Z arttıkça bağlanma enerjisi de artar ve böylece fotoelektrik etki de artar.

Gama ışınının madde ile etkileşmesi olaylarından biri olan saçılma, gelen ve saçılan ışının enerjisine göre koherent ve inkoherent olarak iki şekilde gruplandırılır.

Koherent saçılma, fotonların atomdan, enerjilerinde bir değişiklik olmadan saçılması olarak tarif edilir. Bu saçılmada gelen fotonla saçılan fotonun dalga boyları aynıdır ve Rayleigh, Delbruck, Thomson ve Nükleer Rezonans saçılmaları olarak sınıflandırılır (Dözen, 2006).

Rayleigh saçılması, gelen bir foton bağlı bir elektron üzerine düştüğünde, elektronun atomdan sökülecek kadar enerji alamadığı hallerde meydana gelir. Bu yüzden düşük foton enerjilerinde ve yüksek atom numaralı ağır elementlerde daha çok meydana gelmektedir. Büyük enerjili fotonların düşük atom numaralı hafif elementlerden saçılmasında, elektronun etkileşmeden sonra orjinal pozisyonuna döndüğü saçılma olarak da tanımlanabilir.

Delbruck saçılması fotonun, çekirdeğin oluşturduğu Coulomb alanından saçılmasıdır. Bu olayda çekirdek çevresindeki durgun Coulomb alanında bir elektron-pozitron çifti oluşur. Atomun tamamen geri tepmesiyle bu çiftin yok olması, enerji ve faz farkı bakımından, gelen fotonun aynısı olan yeni bir foton meydana getirir. Bu olayın etkisi oldukça küçük olduğundan deney sonuçlarında çok net olarak gözlenememektedir.

Thomson saçılmasında klasik olarak bir tek yük sistemi gibi düşünülen çekirdek, gelen dalga tarafından titreştirilir. Çekirdeğin kütlesi çok büyük olduğunda bu etki çok düşüktür. Gelen fotonun dalga boyunun çekirdek yarıçapından çok büyük olması durumunda maksimum etki gözlenir.

Nükleer Rezonans saçılma olayı, fotonun atom çekirdeği ile etkileşmesi sonucu meydana gelir. Bu olayda çekirdek iki nükleer enerji seviyesi arasındaki farka eşit

enerjiye sahip olan bir fotonun soğurulması ile uyarılır. Daha sonra bunu çekirdeğin uyarılmış durumdan kurtulması takip eder.

İnkoherent saçılmada, gelen ve saçılan fotonlar arasında enerji farkı vardır. Yani gelen ve saçılan fotonların dalga boyları birbirinden farklıdır. Bu saçılmada fazlar arasında bir girişim gözlenemez. Bu durumda atom tarafından saçılan ışının toplam şiddeti, atomun her bir elektronu tarafından saçılma şiddetleri toplanarak elde edilir. İnkoherent saçılma, Compton saçılması, Nükleer saçılma ve Raman saçılması olmak üzere üç çeşittir.

Atoma gevşek olarak bağlanmış ve durgun olduğu kabul edilen bir dış yörünge elektronun, enerjisi kendisine kıyasla çok daha büyük olan bir fotonla çarpışması sonucunda meydana gelen olaya Compton saçılması denir. Elektron kütleli bir parçacık olduğu için fotonun bütün enerjisini soğurması momentumun korunumu gereği mümkün değildir. Dolayısıyla foton, enerjisinin bir kısmını elektrona aktarır saçılmaya uğrayarak yoluna devam eder (Kaçar, 2006).

Nükleer saçılma, fotonun atom çekirdeği ile etkileşmesi sonucu meydana gelmektedir. Bu saçılmanın toplam inkoherent saçılmadaki katkısı oldukça azdır. Raman saçılması ise, fotonun moleküller tarafından soğurulması olayıdır. Bu saçılmada, fotonu soğuran molekül, soğurmadan önce uyarılmış bir durumda değilse, gelen fotondan daha az enerjiye sahip bir foton yayınlar. Fakat molekül uyarılmış titreşim veya dönme enerji seviyesinde ise, o zaman daha fazla enerjiye sahip bir foton yayınlar (Şahin, 1999).

Fotonların enerjilerini kaybettikleri olaylardan birisi de çift oluşumdur. Eğer fotonun enerjisi yeteri kadar büyük ise ve bu foton atom çekirdeğinin çok yakınından geçerse, kütlesi olmayan fotonun enerjisinden çekirdek yakınında aynı anda biri negatif yüklü elektron diğeri de pozitif yüklü pozitron olmak üzere iki parçacık yaratılır. Bu olay çift oluşumu olarak adlandırılır. Böylece elektromanyetik bir dalgadan madde oluşur. Teorik olarak böyle bir çift oluşumunun meydana gelebilmesi için, fotonun enerjisinin en az  $2 \times 0,511 \text{ MeV} = 1,022 \text{ MeV}$  olması gerekir. Foton enerjisinin daha büyük olduğu durumlarda ise bu enerjinin artakalan kısmı elektron ve pozitrona kinetik enerji olarak aktarılır. Oluşan elektron, atomla serbest elektronlar gibi etkileşirken, pozitron bir yörünge elektronu ile birleşir ve zıt yönlü

iki foton salarak yok olur. Bu foton ise fotoelektrik yolla soğurulur. Pratikte çift oluşumu 2 MeV' den daha büyük enerjili fotonlar ve ağır elementler için göreceli olarak daha baskındır.

Biyolojik sistemler ağırlıklı olarak C, H, N, O, Cl, P ve S gibi hafif elementler içerdiklerinden, bu tür ortamlara gama ışınlarının gönderilmesi durumunda genelde Compton saçılması gözlenir. Ayrıca gama ışınlarının enerjileri, 12 eV' dan daha küçük olan kovalent bağ enerjisinden çok daha büyük olduğundan, gama ışınları bu tür ortamlarda büyük oranda bağ kırılmalarına yol açarak ara ürünlerin oluşmasına neden olurlar (Gopal, 1978).

## **1.2. Yaygın Olarak Kullanılan Doz Ölçüm Teknikleri**

Radyasyon doz ölçümünde kullanılan belli başlı sistem ve yöntemler; film dozimetreler, iyon odaları, termoluminesans (TL) ve Elektron Spin Rezonans (ESR) spektroskopisidir.

Film dozimetrelerde plastik kılıf içine yerleştirilmiş film (fotoğraf emülsiyonu) vardır. Filmin üzeri değişik soğurma özelliği olan ve belirli kalınlıklarda alüminyum, kalay gibi maddelerle kaplanmıştır. Film üzerinde radyasyon etkisiyle meydana gelen kararmanın derecesi densitometrik yöntemlerle ölçülür ve çalışanın aldığı doz belirlenir. Bu dozimetreler, radyasyon çalışanlarının kontrolü amacıyla 1940' dan bu yana yaygın olarak kullanılan dozimetrelerdir. Genellikle aylık kontroller yapılmakta ve okuma işleminden sonra kişisel dozimetre içindeki film değiştirilmektedir. Ülkemizde bu dozimetrelerin dağıtımı ve okunması "Türkiye Atom Enerjisi Kurumu" tarafından yapılmaktadır (Niroomand-Rad ve ark., 1998).

Radyasyon dedektörlerinin pek çoğu, radyasyon dedektörlerinde oluşan iyonları ayırmak ve saymak için bir elektrik alan kullanırlar. İyon odası en basit gaz dolu tipte dedektördür. Bunlar plakaların arasına gaz (genellikle hava) doldurulmuş olan kondansatörlerdir. Radyasyona maruz kalan gaz iyonize olur. İyonize olan gazın iyon çiftleri elektrik alanın etkisiyle zıt yönlerde hareket ederler ve dedektörün katodu ile anodunda toplanırlar. Katoda ve anoda ulaşan iyonlar sinyal ve akım oluşmasına neden olurlar. Oluşan akımın bir elektrik akım ölçüm cihazı tarafından kaydedilmesi ile radyasyonun oluşturduğu iyonlaşma tespit edilmiş olur (Ertürk, 2008).

Termolüminesans dozimetrelerinde ise radyoaktif elementlerin saldığı alfa ve beta parçacıkları ile gama ışınları gibi radyasyonlardan enerji soğurma ve bu enerjinin bir kısmını kristal yapılarında depo etme prensiplerinden faydalanılır. Enerji depolanması şu şekilde olur: Madde içerinden geçen radyasyon yolu üzerindeki birçok atomla çarpışır. Bu sırada atomlardan kopan elektronlar enerji kazanırlar ve atomlardaki enerji düzeylerinden daha yüksek dzeyele çıkarlar. Bu elektronların az bir kısmı maddenin kristal yapısında çeşitli nedenlerle oluşan ve tuzak denilen yerlere bağlanırken, büyük çoğunluğu kazandığı enerjiyi çok kısa bir süre içinde kaybederek tekrar düşük enerji düzeylerine dönerler. Tuzağa bağlanan elektronlara “tuzaklanan elektronlar” denir. Bu elektronlar radyasyondan aldıkları enerjinin büyük bir kısmını geri veremediklerinden maddede enerji depolanmış olur. Elektronların tuzaklardan kurtulmasının yolu ise maddeyi ısıtmaktır. Bu yolla tuzaklardan kurtulan elektronlar, foton salarak düşük enerji düzeylerine dönerler. Bu olaya maddenin ısıtılarak ışımaya yapması anlamına gelen “termolüminesans” denir (Yüksel, 2008).

Elektron Spin Rezonans Spektroskopisi; manyetik momente sahip olan atom, iyon, molekül veya molekül parçalarının manyetik alan içine konularak uygun şartların sağlanması durumunda, bu yapıların uygulanan mikrodalga enerjisini soğurarak içerindeki manyetik birimler hakkında bilgi edinilmesini sağlayan araştırma ve uygulama alanıdır (Anbar, 2006). ESR soğurma spektrumunun altında kalan alan, örnekteki serbest kökçelerin miktarı ile ve dolayısıyla da soğurulan radyasyon dozu ile orantılıdır. ESR spektroskopisi kullanılarak bir maddede radyasyon tarafından oluşturulan serbest kökçelerin miktarı ölçülerek soğurulan radyasyon dozu belirlenebilir. Ayrıca belirli bir yerde bir malzeme için iyonize radyasyonun yıllık doz hızı biliniyorsa, tuzaklanmış paramanyetik merkezlerin nicel ESR lmleri kemiklerin, dişlerin, kayaların, killerin vb. yaşlarını belirlemede de kullanılabilirler.

### **1.3. ESR' nin Doz lmnde Kullanılması**

İyonize radyasyonun üzerine düştüğü malzemede moleküler düzeyde bağ kırılmalarına sebep olduğu ve dolayısıyla da çiftlenimsiz elektrona sahip birimlerin oluştuğu bilinmektedir. Oluşan bu birimlerin, malzeme tarafından soğurulan radyasyon doz miktarını belirlemede kullanılıp kullanılamayacağı son yılların

önemli araştırma konularından birisi olmuştur. Radyasyonun madde ile etkileşmesi sonucu oluşan çiftlenimsiz elektrona sahip bu birimlere serbest kökçe denir ve ESR de bu birimlerin algılanmasında yaygın kullanıma sahip en önemli tekniktir. Son 30 yıldır çok sayıda malzeme üzerinde yürütülen ESR çalışmalarıyla, özellikle endüstriyel ışınlamalarda kullanılan radyasyon dozlarının ölçülmesine olanak sağlayan dozimetrik malzemeler geliştirilmiştir. Alanin, kemik, diş minesi ve şeker bu malzemelerden sadece birkaç tanesidir.

Alanin üzerinde yürütülen ESR çalışmaları, bu örneğin 0.1-100 kGy gibi çok geniş bir doz aralığında standart bir dozimetre malzemesi olarak kullanılabileceğini ortaya koymuş ve Uluslararası Atom Enerjisi Kurumu' nca da onaylanmıştır (Mehta ve Girzikowski, 1996). Yapılan son çalışmalarla birlikte, ölçülebilir minimum doz radyoterapide kullanılan doz aralığına kadar düşürülmüş ve 5 Gy civarındaki dozlar yaklaşık % 1-2 doğrulukla belirlenebilmektedir (Sharpe ve Sephton, 2000).

Diş minesiyile yapılan çalışmalarda, kemik, diş minesi, kıkırdak gibi biyolojik dokuların ana yapısı olan hidroksiapatit kristal örgüsünde radyasyonla oluşan yüklü paramanyetik kusurların ( $CO_2^-$ ), çok uzun ömürlü oldukları ve ESR sinyal şiddetinin 10 mGy ile 10 kGy aralığında ışınlama dozu ile çizgisel olarak arttığı görülmüştür (Ikeya, 1993).

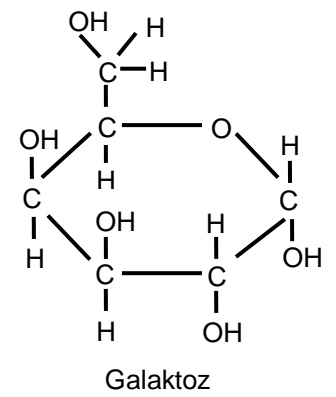
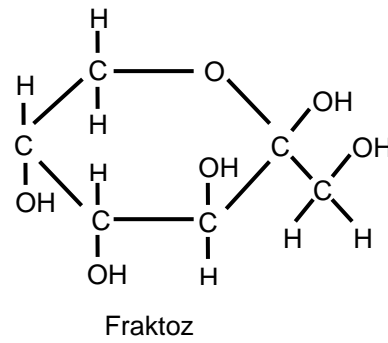
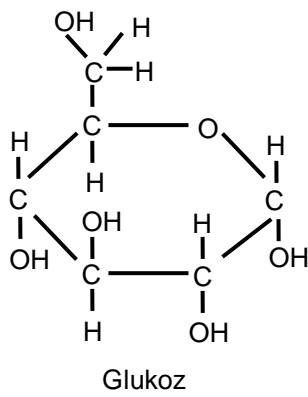
Son 20 yıl içerisinde bu yönde yürütülen çalışmalarda, özellikle radyoterapide kullanılan radyasyon dozlarını doğru ve duyarlı bir biçimde ölçebilecek Alanin' e alternatif daha hassas dozimetrik malzeme arayışları göze çarpmaktadır. Amonyum format, lityum format ve dityonatlar için elde edilen deneysel bulgular, bu örneklerin radyasyon duyarlılıklarının oldukça yüksek olduğunu ve özellikle radyoterapik bölgede dozimetrik amaçlı kullanımının mümkün olduğunu göstermektedir (Gustafsson, 2008).

Karbonhidratlar, genellikle karbon, hidrojen ve oksijen elementlerinden oluşmuş, gıdanın doğal bir bileşeni olan bir grup organik bileşiklerdir. Bitki ve hayvan dokularında yaygın olarak bulunan karbonhidratlar, genel olarak şeker, nişasta, laktoz, galaktoz, fraktoz ve glukoz olarak bilinirler. Karbonhidratların en küçük yapı birimleri monosakkarit (tek-şeker) olarak adlandırılır, kimyasal ve fiziksel özellikleri

ile moleküler yapıları sırasıyla Çizelge 1.1 ve Şekil 1.1' de verilmiştir. Doğada en yaygın olarak bulunan tek-şeker glukozdur (Artık ve ark., 2011).

Çizelge 1.1. Glukoz, fraktoz ve galaktozun özellikleri.

	Glukoz	Fraktoz	Galaktoz
Kimyasal Adı	(3R,4S,5S,6R)-6-(hydroxymethyl) oxane-2,3,4,5-tetrol	[(2R,3R,4S)-2,3,4,6 tetrahydroxy-5-oxohexyl] dihydrogen phosphate	(3R,4S,5R,6R)-6-(hydroxymethyl) oxane-2,3,4,5-tetrol
Kimyasal Formülü	$C_6H_{12}O_6$	$C_6H_{12}O_6$	$C_6H_{12}O_6$
Molekül Ağırlığı	180,16 g mol <sup>-1</sup>	180,16 g mol <sup>-1</sup>	180,16 g mol <sup>-1</sup>
Erime Noktası	146 °C	103 °C	167 °C
Görünüm	Beyaz katı	Beyaz katı	Beyaz katı



Şekil 1.1. Glukoz, fraktoz ve galaktozun moleküler yapıları.

Basit bir şeker olan glukoz meyve şekeri veya kan şekeri olarak bilinen altı karbonlu bir tek-şekerdir. Birçok bitkide ve ayrıca kanda bulunan bir şekerdir. Vücut için temel enerji kaynağıdır. Ayrıca nişasta, glikojen ve selüloz gibi en yaygın polisakkaritlerin temel yapı taşını teşkil eder. Ticari olarak nişastanın enzimatik hidrolizi yolu ile üretilmektedir. Nişasta kökeni olarak pek çok taneli ürün kullanılmaktadır. Mısır, buğday, patates, ararot ve manyok kökü dünya üzerinde nişasta için kullanılan bitkilerdir. Glukozun bakterilerin çoğalmasını önleyen koruyucu bir özelliği olduğundan şekerleme ve diğer yiyeceklerin imalinde kullanılır. Doğal biçimine (D-glukoz) gıda sanayisinde dekstroz olarak da değerlendirilir.

Meyvelerin içinde doğal olarak bulunan ve meyve şekeri olarak bilinen fraktoz, son 30 yılda gıda sanayisinin en çok kullandığı tatlandırıcı haline gelmiştir. Mısırdan elde edilen fraktozdan zengin mısır şurubu, başta alkolsüz içecekler olmak üzere bütün hazır gıdalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Fraktozun ticari amaçlı olarak yiyecek ve içeceklerde kullanılmasının başlıca sebebi, ucuz olmasının yanında mono ve disakkaritler içinde tatlılık oranının en yüksek olmasıdır (Artık ve ark. 2011).

Fraktoz kavun, karpuz, bal, kiraz, ağaç çileği, böğürtlen gibi ağaç meyvelerinde ve tatlı patates, pancar, havuç, soğan gibi kök sebzelerde doğal olarak bulunur. Bu besinlerde başlı başına tek-şeker halde de bulunabilen fraktoz, glukoz ile birleşerek oluşturduğu sükroz (çay şekeri) adlı disakkaritin içinde de bulunabilir. Fraktoz, nemi emmede diğer şekerlerden daha hızlıyken; bu nemi doğaya bırakmada diğer şekerlere göre daha yavaştır. Bu şeker türü, ortamdaki nem oranı ne kadar düşük olursa olsun, her durumda yüksek bir nem tutuculuk özelliği sergilemektedir. Bu nedenle fraktoz, içinde kullanıldığı besin maddelerine kalite, yumuşaklık ve doğal yoldan biraz daha uzun raf ömrü sağlamaktadır. Fraktoz doğal olarak bulunmasının yanı sıra, yapay olarak üretilmiş tatlandırıcılarda ve yüksek fraktozlu mısır şurubunda kullanılır.

Işınlanmış tek-şekerlerin ESR spektrumlarının çok sayıda kökçeden kaynaklandığı yapılan ESR ve ENDOR (Elektron Nükleer Çift Rezonans) çalışmalarıyla gösterilmiştir (Vanhaelewyn ve ark., 2001, 2004; Pauwels ve ark., 2002). Pauwels ve ark. (2006), ışınlanmış  $\alpha$ -D-glukoz ESR spektrumuna, en sağdaki karbon bir nolu karbon olmak üzere saat ibresi yönünde üç ve altı nolu karbonlardan

(Şekil 1.1) kopan hidrojen atomları sonucu oluşan anizotropik özellik gösteren iki farklı kökçenin katkıda bulunduğunu göstermiştir. Vanhaelewyn ve ark. (2006), 80 K sıcaklıkta yaptıkları ışınlama sonucu,  $\beta$ -D-fraktoz' da en az dört farklı karbon merkezli kökçenin oluştuğunu bildirmiştir. Bunlardan iki tanesinin sadece  $\beta$ -protonları ile aşırı ince yapı etkileşmesine girdiği, diğer iki kökçenin ise sadece  $\alpha$ -protonları ile aşırı ince yapı etkileşmesine girdiği bildirilmiştir.

Yordanov ve ark. (2004), gama ışını ile ışınlanmış şeker, fraktoz ve glukoz örneklerinin zaman içerisindeki kararlılıklarını 11 ay boyunca izlemiş ve ESR spektrumlarındaki değişimleri incelemiştir. Glukoz ve şekerin 0.44-21 kGy' lik bölgede ESR doz-cevap eğrileri doğrusallık gösterirken, fraktozun doz cevap eğrisi yalnızca 10 kGy' e kadar doğrusallık göstermiştir. Aynı dozlarda ışınlanmış glukozun ESR sinyal şiddetinin şekerinkinden % 15 daha az, fraktozun ESR sinyal şiddetinin ise şekerinkinden % 20 daha yüksek olduğu görülmüştür. Radyasyon hassasiyeti açısından sıralamanın fraktoz>şeker>glukoz olduğu bulunmuştur. Işınlamadan sonraki ilk 25 saat içerisinde ESR spektrumları karşılaştırıldığında şeker ve glukozda bütün dönüşümlerin 25 saat içinde bittiği görülmüş, takip eden 11 ay boyunca ayırdedilebilir farklılıkların gözlenmediği bildirilmiştir.

Bu tez çalışması kapsamında glukoz, fraktoz ve galaktoz tek-şekerlerin radyasyon duyarlılıklarının, ayrıca gıda ışınlaması ve sterilizasyon amaçlı ışınlamalarda dozimetrik malzeme olarak kullanılıp kullanılmayacaklarının belirlenmesi hedeflenmiştir. Ayrıca ışınlama ile bu örneklerde oluşan kökçelerin oda ve yüksek sıcaklıklardaki kararlılıklarının belirlenmesi de bu çalışmanın hedefleri arasındadır.

Galaktoz, glukozu göre daha az tatlı olan ve sudaki çözünürlüğü fazla olmayan bir şeker türüdür. Süt ve süt ürünlerinde, şeker pancarında, bazı bitkilerden elde edilen sakız ve reçinelerde bol miktarda bulunur. İnsan vücudu tarafından da sentezlenebilen galaktoz, glikolipid ve glikoproteinlerin yapısında bulunur (Staněk ve ark., 1963).

## 2. KURAMSAL BİLGİLER

### 2.1. Elektronun Spini ve Manyetik Momenti

Spin kavramı 1925 yılında Uhlenbeck ve Goudsmit tarafından, bir manyetik alan içindeki alkali metal atomlarının elektronik spektrumlarında gözlenen çizgi yarılmalarını açıklamak için tanımlanmıştır. Spin fonksiyonu, 1926 yılında Pauli tarafından teorik olarak tanıtıldı ve daha sonra 1929 yılında Dirac, rölativistik kuantum mekaniğini geliştirerek elektronun açısal momentum ve manyetik momente sahip olmasının gerekliliğini göstermiştir (Altın, 2006).

Elektronun yörünge hareketinden doğan yörünge açısal momentumu ile elektronun bir iç özelliği olan spin açısal momentumuna birer manyetik moment karşı gelir. Pauli' ye göre elektronun spin kuantum sayısı  $1/2$ ' dir. Güçlü bir dış manyetik alanın varlığında ikincil bir manyetik kuantum sayısı  $m_s = 1/2$  veya  $-1/2$  etkili hale gelir ve  $m_s$  ile ilgili özfonksiyonlar sırasıyla  $\alpha$  ve  $\beta$  ile belirtilir. Spin,  $\mathbf{S}$  vektörü ile temsil edilebilir ve bu vektörün büyüklüğü,

$$|\mathbf{S}| = \hbar\sqrt{s(s+1)} = \hbar\sqrt{3}/2 \quad (2.1)$$

ile verilir. Bağlantıda,  $\hbar = h/2\pi$  ve  $h = 6,626 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$  değerine sahip Planck sabitidir. Manyetik alanın  $z$  doğrultusunda olması durumunda, spini  $1/2$  olan elektronun  $S_z$  bileşeni uygulanan alana paralel ve antiparalel olmalarına göre  $+\hbar/2$  ve  $-\hbar/2$  olur. Dolayısıyla,  $\mathbf{S}$  vektörü  $\mathbf{B}$  etrafında dönerken,  $\cos^{-1}(1/\sqrt{3}) = 54,73^\circ$  lik bir açı yapar (Gerson ve ark., 2003).  $z$  yönüne dik olan  $S_x$  ve  $S_y$  bileşenleri kesin olarak tanımlanamazlar, fakat

$$S_x^2 + S_y^2 = \mathbf{S}^2 - S_z^2 = \hbar^2[(s(s+1) - m_s^2)] = \hbar^2[3/4 - 1/4] = \frac{\hbar^2}{2} \quad (2.2)$$

gözlenebilir bir niceliktir. Elektron sahip olduğu spininden dolayı

$$\boldsymbol{\mu}_s = -g_e \left( \frac{e}{2m_e} \right) \mathbf{S} = - \left( \frac{g_e \mu_B}{\hbar} \right) \mathbf{S} \quad (2.3)$$

ifadesi ile verilen bir manyetik momente sahiptir.

Burada;  $g_e$  elektronun spektroskopik yarıma çarpanıdır ve serbest elektron için 2,0023' tür,  $e$  elektronun yükü ve  $m_e$  de elektronun durgun haldeki kütlesidir.  $\mu_B = \hbar e / 2m_e = 9,274 \times 10^{-24}$  J/T Bohr magnetonu olarak adlandırılır. Kuantum mekaniğine göre, büyüklüğü,  $\hbar \sqrt{s(s+1)}$  değeri ile sınırlanmış olan  $S$  açısai momentum vektörünün yalnızca  $S_z = \hbar m_s$  ile gösterilen bileşeni kesin olarak belirlenebilir.  $m_s$ , spin manyetik kuantum sayısıdır ve  $s, s-1, \dots, -s+1, -s$  olmak üzere toplam  $2s+1$  tane değer alır. Buna göre Eş. 2.3 ile verilen manyetik momentin z doğrultusundaki bileşeni,

$$\mu_{sz} = - \left( \frac{g_e \mu_B}{\hbar} \right) S_z = -g_e \mu_B m_s \quad (2.4)$$

ifadesine dönüşür.

Elektronun toplam manyetik momentine bir diğer katkı da, bağlı olduğu atomun çekirdeği etrafında yaptığı dönü hareketinden gelir. Yarıçapı  $r$  olan çembersel bir yörüngede sabit bir  $v$  hızıyla hareket eden bir elektron düşünelim. Elektronun izlediği yörüngeyi

$$i = \frac{e}{T} = \frac{e\omega}{2\pi} \quad (2.5)$$

akımı taşıyan kapalı bir ilmek gibi düşünebiliriz. Burada  $T$ , elektronun yörüngedeki hareketinin periyodudur. Bu halkanın manyetik momenti de,  $A$  yörüngeyi yüzey alanı olmak üzere,

$$\mu_L = iA = \frac{e\omega}{2\pi} \pi r^2 = \frac{1}{2} e\omega r^2 \quad (2.6)$$

büyüklüğüne sahiptir. Elektronun yörünge açısai momentumunun büyüklüğü ise

$$L = mvr = m\omega r^2 \quad (2.7)$$

ile verilir.  $\mu_L$  manyetik momenti ile  $L$  açısai momentumunu veren bağıntıları birleştiresek, yörüngedeki bir elektron için

$$\mu_L = -g_\ell \frac{e}{2m_e} L \quad (2.8)$$



ifadesine sahip olur. Diğer taraftan, manyetik moment üzerine etki eden tork  $\tau = \mu_L B \sin\theta$  ile de verilebilir. Bu iki ifade birleştirilirse, elektronun yörüngesel manyetik momentinin veya yörünge açısai momentumunun uygulanan manyetik alan etrafında,

$$\omega = \frac{g\ell\mu_B}{\hbar} B \quad (2.13)$$

açısai frekansı ile dönmesi gerektiği sonucuna ulaşılır ve Larmor frekansı adıyla bilinir.

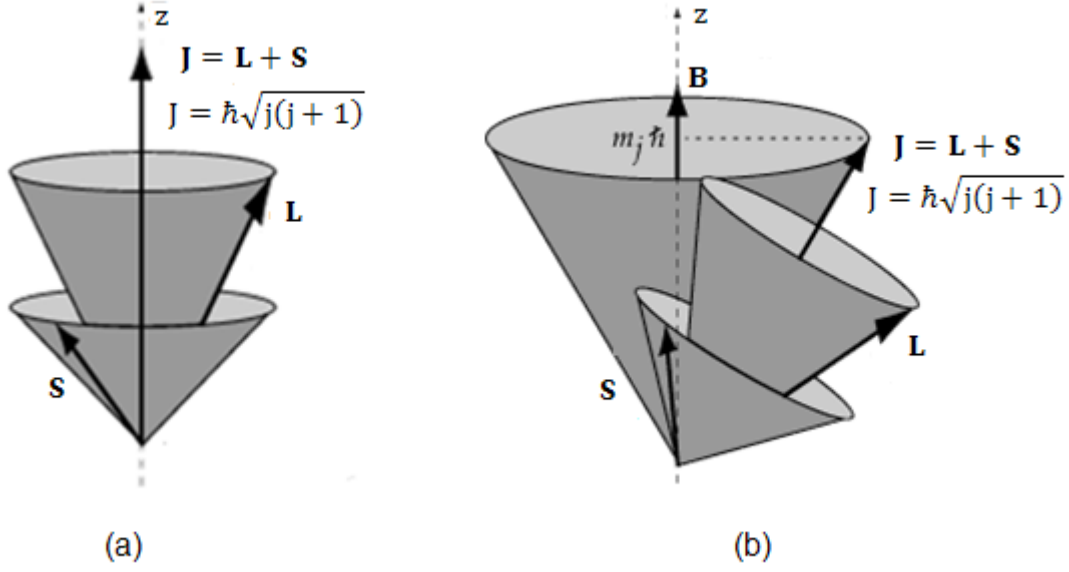
Bir atomdaki her elektronun, atomun toplam açısai momentumuna (**J**) katkıda bulunan belli bir yörüngesel açısai momentumu (**L**) ve belli bir spin açısai momentumu (**S**) vardır. Bu nedenle **J** toplam açısai momentumu **L** ve **S**' nin vektörel toplamıdır. Bütün açısai momentumlar gibi **J**, hem büyüklük hem de doğrultuda kuantumlanmıştır. **J**' nin büyüklüğü, *j* toplam açısai kuantum sayısı olmak üzere,

$$J = \hbar\sqrt{j(j+1)} \quad (2.14)$$

ifadesine sahiptir. Manyetik alanın z yönünde olması durumunda **J**' nin bu yöndeki bileşeni  $J_z = m_j\hbar$  olur. Burada,  $m_j$  toplam manyetik kuantum sayısı adını alır ve *j*, *j*-1, ..., -*j* + 1, -*j* olmak üzere 2*j*+1 tane değer alır.

Yörünge manyetik kuantum sayısının ( $m_\ell$ ) ve spin manyetik kuantum sayısının ( $m_s$ ) alabilecekleri en büyük değerler sırasıyla  $\ell$  ve *s*' dir. Dolayısıyla toplam açısai kuantum sayısı *j*,  $|\ell-s|$  ile  $|\ell+s|$  arasında bir değer alabilir. Böylece *j*' nin alabileceği değerler  $|\ell-s|, |\ell-s|-1, \dots, |\ell+s|$  olarak sınırlanmıştır.

**L** ve **S** açısai momentumları, manyetik olarak etkileşirler. Eğer dış manyetik alan yoksa **J** toplam açısai momentumu büyüklük ve yön olarak korunur ve iç dönme momentlerinin etkisi **L** ve **S**' nin bileşke **J**' nin etrafındaki dönü hareketleridir (şekil 2.2.a). Fakat bir **B** dış alanı varsa, o zaman **J** şekil 2.2.b' de gösterildiği gibi, **B**' nin etrafında dönü hareketi yapar. **L** ve **S** ise **J** etrafındaki dönü hareketlerine devam ederler. Bir atomun **J** toplam açısai momentumuna birden fazla elektron, yörünge ve spin açısai momentumları ile katkıda bulunursa, **J** yine bu tek tek



Şekil 2.1. (a) Yörünge ve spin açısal momentum vektörleri  $L$  ve  $S$ ,  $J$  etrafında dönü hareketi yaparlar. (b) Bir  $B$  dış manyetik alanı varken, toplam açısal momentum vektörü  $J$ ,  $B$  etrafında dönü hareketi yapar.

vektörel toplamıdır. Atom numarası ( $Z < 30$ ) küçük olan atomlarda spin açısal momentumları kendi aralarında etkileşerek toplam spin açısal momentumunu, yörünge açısal momentumları da kendi aralarında etkileşerek toplam yörünge açısal momentumunu oluştururlar.  $L$  ve  $S$  momentumları da spin-yörünge etkileşmesiyle  $J$  toplam açısal momentumunu oluşturmak için bağlaşırlar. **LS bağlaşımı** veya Russell-Saunders bağlaşımı adı verilen bu durum şöyle özetlenebilir:

$$L = \sum \ell_i \quad (2.15)$$

$$S = \sum s_i \quad (2.16)$$

$$J = L + S \quad (2.17)$$

Ağır atomlarda ( $Z > 30$ ) durum daha farklıdır. Bu atomların spin-yörünge etkileşimi genellikle spin-spin veya yörünge-yörünge etkileşmesi mertebesinde. Böyle bir durumda her bir yörünge açısal momentumu  $\ell_i$ , karşılığı olan spin açısal momentumu  $s_i$  ile,  $j_i$  açısal momentumunu oluşturmak üzere, bağlaşır.  $j_i$  açısal momentumları da kendi aralarında etkileşerek toplam açısal momentum  $J'$  yi oluştururlar. Bu duruma ise **JJ bağlaşımı** denir.

## 2.2. Zeeman Yarılması ve Rezonans Şartı

Spini ve bir çekirdek etrafındaki dönü hareketi nedeniyle elektronun sahip olduğu toplam manyetik moment

$$\boldsymbol{\mu} = -\frac{e}{2m_e}(\mathbf{L} + g_e\mathbf{S}) \quad (2.18)$$

ifadesine sahiptir. Elektronun, dışarıdan uygulanan sabit bir manyetik alan ( $\mathbf{B}$ ) içerisine konması durumunda

$$\boldsymbol{\tau} = \boldsymbol{\mu} \times \mathbf{B} \quad (2.19)$$

ile verilen bir torkun etkisi altında kalır ve alan ile aynı yönde yönelmeye çalışır. Dipolün sahip olduğu enerji hamiltoniyeni de

$$\mathcal{H} = -\boldsymbol{\mu} \cdot \mathbf{B} \quad (2.20)$$

ile verilir. Serbest elektron durumunda toplam manyetik momente yalnızca elektronun spininden katkı gelir ve enerji hamiltoniyeni

$$\mathcal{H} = g_e \frac{\mu_B}{\hbar} \mathbf{S} \cdot \mathbf{B} \quad (2.21)$$

ifadesine sahip olur. Uygulanan dış manyetik alanın z yönünde olması durumunda dipolün enerjisi,

$$E = -\mu_{ez}B = -(-g_e\mu_B m_S)B = g_e\mu_B m_S B \quad (2.22)$$

olur. Bu nedenle, spinin iki farklı yönelimi için, enerji değerleri

$$E_+ = (+1/2)g_e\mu_B B \quad m_S = +\frac{1}{2} \text{ için (spin yukarı, } \alpha) \quad (2.23)$$

$$E_- = (-1/2)g_e\mu_B B \quad m_S = -\frac{1}{2} \text{ için (spin aşağı, } \beta) \quad (2.24)$$

olur. Bu enerji düzeyleri arasındaki fark elektron-zeeman yarılması olarak adlandırılır ve Şekil 2.3' ten de görüldüğü gibi uygulanan dış manyetik alan şiddeti ile doğru orantılıdır. Spin sisteminin uygun şartlar altında, elektromanyetik dalgadan enerji soğurması ile enerji düzeyleri arasında geçişler olur. İki düzey

arasındaki  $E_+ \leftrightarrow E_-$  geçişi,  $\Delta m_s = \pm 1$  seçim kuralına uyar. Elektromanyetik dalganın enerjisi ile düzeyler arasındaki enerji farkını birbirine bağlayan

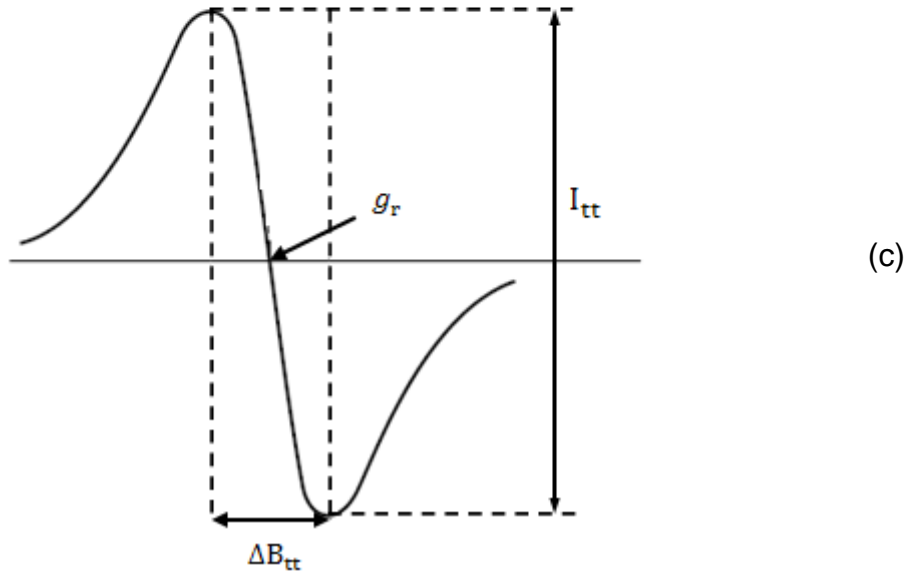
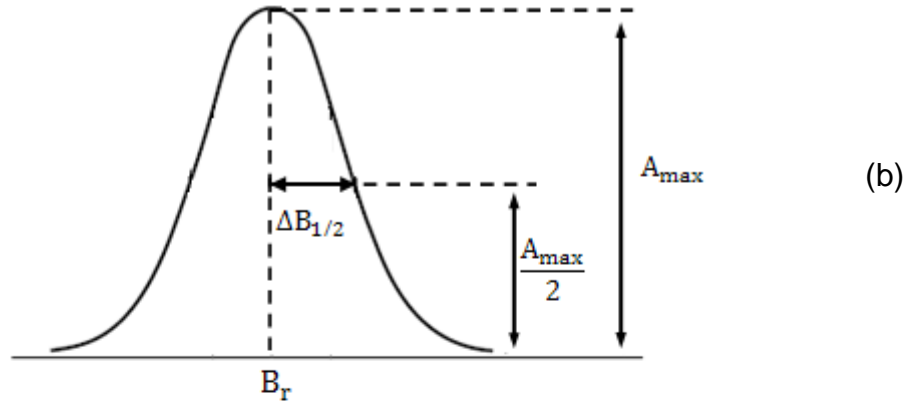
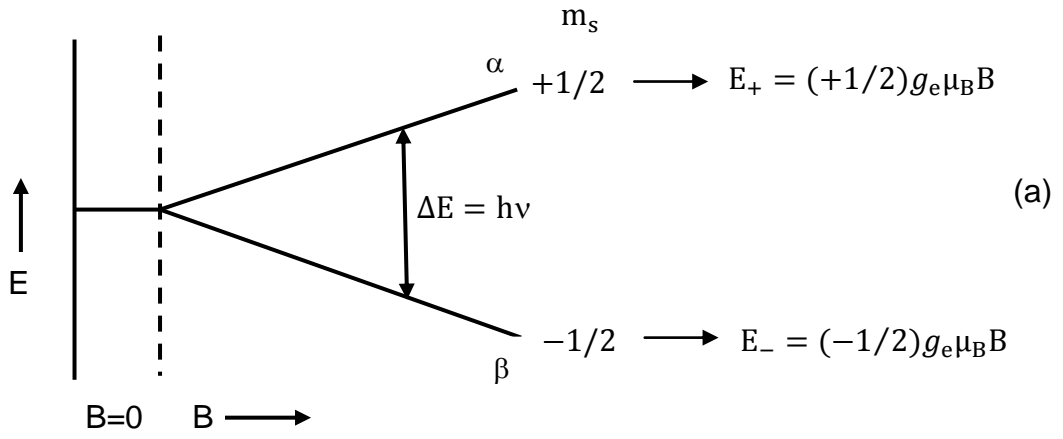
$$h\nu = E_+ - E_- = g_e \mu_B B \quad (2.25)$$

ifadesi “rezonans koşulu” olarak bilinir. Bağlantıda geçen  $\nu$  elektromanyetik radyasyonun frekansıdır. Rezonans şartını sağlamak için, frekans veya manyetik alan ya da her ikisi birden değiştirilebilir. Ancak, gürültü düzeyinin azaltılması ve çözünürlüğün artırılması gibi nedenlerden dolayı, ESR spektrometreleri frekans sabit tutulup manyetik alan taranarak soğurma eğrisinin birinci türevini çizdirecek şekilde tasarlanırlar.

Çizelge 2.1. Gaussiyen ve Lorentziyen çizgi fonksiyonlarının temel özellikleri.

	Gaussiyen	Lorentziyen
Soğurma	$Y = A_{\max} \exp \left[ -\ln 2 \frac{(B - B_r)^2}{(\Delta B_{1/2})^2} \right]$ $A_{\max} = \left( \frac{\ln 2}{\pi} \right)^{1/2} \frac{1}{\Delta B_{1/2}}$	$Y = A_{\max} \frac{(\Delta B_{1/2})^2}{(\Delta B_{1/2})^2 + (B - B_r)^2}$ $A_{\max} = \frac{1}{\pi \Delta B_{1/2}}$
Türev	$Y' = -A_{\max} \frac{(2 \ln 2)(B - B_r)}{(\Delta B_{1/2})^2} \exp \left[ -\ln 2 \frac{(B - B_r)^2}{(\Delta B_{1/2})^2} \right]$ $\Delta B_{tt} = \left( \frac{2}{\ln 2} \right)^{1/2} \Delta B_{1/2}$ $I_{tt} = 2 \left( \frac{2}{\pi e} \right)^{1/2} \frac{\ln 2}{\Delta B_{1/2}}$	$Y' = -A_{\max} \frac{2(\Delta B_{1/2})^2 (B - B_r)}{[(\Delta B_{1/2})^2 + (B - B_r)^2]^2}$ $\Delta B_{tt} = \frac{2}{\sqrt{3}} \Delta B_{1/2}$ $I_{tt} = \frac{3\sqrt{3}}{4\pi} \frac{1}{(\Delta B_{1/2})^2}$

Spin sisteminin elektromanyetik dalgadan soğurduğu enerjiyi, uygulanan dış manyetik alana bağlayan eğri soğurma eğrisi olarak adlandırılır ve Gaussiyen veya Lorentziyen ya da bunların karışımı şeklinde olurlar. Gaussiyen çizgi şekline sahip tek çizgili bir ESR spektrumunun soğurma ve birinci türev eğrileri Şekil 2.3’ de bir arada verilmiştir. Bu eğriler üzerinde verilen  $B_r$  ve  $g_r$  nicelikleri sırasıyla rezonans



Şekil 2.2. Çiftlenimsiz elektronun manyetik alanla etkileşmesi sonucu oluşan (a) enerji düzeyleri; (b) soğurma eğrisi; (c) türev eğrisi.

manyetik alan değeri ve buna karşılık gelen spektroskopik yarıma çarpanıdır.  $A_{max}$  ise çizgi genişliğinin değişmediği durum için, sistem üzerine gönderilen elektromanyetik dalgadan enerji soğurarak rezonansa giren spinlerin toplam sayısını gösteren bir niceliktir.  $\Delta B_{1/2}$  ve  $\Delta B_{tt}$  nicelikleri de sırasıyla soğurma eğrisinde yarı yükseklikteki yarı genişlik ve türev eğrisinde de tepeden tepeye çizgi genişliği olarak tanımlanır. Bu nicelikler, çiftlenimsiz elektronun yakın çevresiyle olan etkileşimi hakkında bilgi verir. Gaussiyen ve Lorentziyen çizgi fonksiyonlarının matematiksel tanımları ve taşıdıkları temel özellikler Çizelge 2.1' de topluca verilmiştir (Gerson, 2003). Elektromanyetik radyasyonla etkileşen herhangi bir kuantum mekaniksel sistem gibi, bir foton da soğurmaya ya da salınımına sebep olabilir. Deneysel yöntem, soğurulan ve salınan fotonların sayıları arasındaki farkı algılar. Soğurma alt enerji düzeyindeki spin sayısı ile salınım da üst enerji düzeyindeki spin sayısı ile orantılı olduğundan, net soğurma bu düzeyler arasındaki spin sayısı farkı ile orantılıdır. Denge durumunda, üst enerji düzeyindeki spinlerin sayısının ( $N_+$ ) alt enerji düzeyindeki spinlerin sayısına ( $N_-$ ) oranı

$$N_+/N_- = \exp(-\Delta E/kT) = \exp(-g_e\mu_B B/kT) \quad (2.26)$$

bağıntısı ile verilen Boltzmann dağılımına uyar. Oda sıcaklığına yakın sıcaklıklarda ve 0,3-0,4 T aralığındaki manyetik alan değerlerinde üstel terim çok düşüktür. Bu durumda,  $e^{-x} = 1 - x$  yaklaşımı ile bu oran

$$N_+/N_- \cong 1 - g_e\mu_B B/kT \quad (2.27)$$

olur. Düzeyler arasındaki spin sayısı farkı da

$$N_- - N_+ = N_- \left(1 - \frac{N_+}{N_-}\right) \cong N_- [(g_e\mu_B B)/kT] \quad (2.28)$$

ile verilebilir.  $N$  alt ve üst enerji düzeylerindeki toplam spin sayısı olmak üzere,  $N_- \cong N_+ \cong N/2$  yaklaşımıyla iki düzey arasındaki spin farkı

$$N_+ - N_- \cong N g_e\mu_B B/2kT \quad (2.29)$$

şeklinde de yazılabilir. Bu bağıntı bize, net soğurmanın toplam spin sayısı ile ve uygulanan manyetik alanla doğru, sıcaklıkla da ters orantılı olduğunu

göstermektedir. Soğurmanın meydana geldiği manyetik alan değeri, spin sistemi üzerine gönderilen elektromanyetik dalganın frekansı ile orantılı olduğundan, yüksek frekanslarda çalışan K ve Q-band ESR spektrometrelerinde duyarlılık X-band ESR spektrometresine göre çok daha yüksektir. Ancak, K ve Q-bandlarında da dalga klavuzları küçüktür ve bu da daha az miktarda örnek kullanmak demektir. Bu ise, toplam spin sayısı açısından bakıldığında bir dezavantaj olarak karşımıza çıkmaktadır. İdeal şartlar altında, ticari bir X-band spektrometresi yaklaşık olarak  $10^{12}$  spini algılayabilir (Rieger 2002).

### 2.3. Spektroskopik Yarılma Çarpanı (g-Faktörü)

Eş. 2.25 ile verilen rezonans koşulu, sabit mikrodalga frekansında ve değişken manyetik alanda ESR sinyalinin konumunun, paramanyetik birimin  $g$ -faktörüne bağlı olduğunu belirtir. Eğer bir manyetik sistemde bütün çiftlenimsiz elektronlar aynı manyetik momente sahip ve bunlar homojen bir alan içerisinde ise, alan taramalı bir spektrometrede gözlenecek rezonansların tümünün

$$B_r = \frac{h\nu}{\mu_B g} \quad (2.30)$$

bağıntısı ile verilen rezonans alanında ortaya çıkması beklenir. Ancak, paramanyetik iyon ve/veya serbest kökçe içeren birçok örnek için kaydedilen deneysel ESR spektrumlarının bunu sağlamadığı görülmüştür. ESR spektrumlarının rezonans alanlarının, bir örnekten diğerine değişiklik göstermesi, paramanyetik iyonların veya serbest kökçelerin manyetik momentlerinin serbest elektron manyetik momentine eşit olmamasına bağlanabilir. Gerçekte, manyetik iyonlarda ve serbest kökçelerde, manyetik momente yörüngesel hareketlerden bir katkı gelir. Örneğin, serbest bir atomda, yani atomun içinde bulunduğu moleküler ya da kristal yapı tarafından oluşturulan dış alanlardan etkilenmediği durumda, spin açısai momentumu ile yörünge açısai momentumu toplam açısai momentumu oluşturmak üzere bağlaşım gösterirler. Buna göre atomun toplam açısai momentumu,

$$\mathbf{J} = \mathbf{L} + \mathbf{S} \quad (2.31)$$

olur. Bu durumda serbest uzaydaki bir atomun  $\mathbf{L}$  ve  $\mathbf{S}$  vektörleri yerine, onların toplamı olan  $\mathbf{J}$  vektörü z-ekseni etrafında bir dönü hareketi yapar. Bu durumda spektroskopik yarıma çarpanı,

$$g = 1 + \frac{J(J + 1) + S(S + 1) - L(L + 1)}{2J(J + 1)} \quad (2.32)$$

bağıntısı ile verilir (Apaydın, 1996).

Herhangi bir çekirdek üzerinde konumlanmayan ve çevresinde etkileşmeye girebileceği çekirdek veya başka elektronların bulunmadığı bir elektron serbest elektron diye adlandırılabilir. Böyle bir durumda elektronun bulunduğu bölgeye sabit bir dış manyetik alan uygulanırsa, sistemin enerji hamiltoniyeni yalnızca Zeeman terimini içerir ve rezonans durumunda Eş. 2.30 ile verilen manyetik alan değerinde bir rezonans sinyali gözlenir. Böyle bir elektron için  $L = 0$  ve dolayısıyla  $J = S$  olduğundan Eş. 2.32 uyarınca  $g_e = 2$  olacaktır. Eş. 2.30 kullanılarak ESR spektrumundaki herhangi bir rezonans sinyaline karşılık gelen  $g$  değeri hesaplanabilir. Deneysel olarak hesaplanan  $g$  değeri ile serbest elektronun  $g_e$  değeri arasında çok küçük farklar varken, metal geçiş iyonları söz konusu olduğunda oldukça büyük farklar görülür. Söz konusu olan bu fark ( $\Delta g$ ), çiftlenimsiz elektronun yakın çevresi hakkında bilgiler verir. Çiftlenimsiz elektronun bir yörüngeye bağlı olması ve yörüngesel açısal momentumun ( $L$ ) sıfırdan farklı olması durumunda, spin ve yörünge açısal momentumları arasında etkileşme olur. Bu da,  $g$  değerinin serbest elektronun  $g_e$  değerinden sapmasına yol açar. Birçok molekül ve katı sistem içinde oluşan elektrik alanlar nedeniyle, yörünge açısal momentumun toplam açısal momentuma katkısı çoğu zaman yok denecek kadar azalabilmektedir. Ancak, yörünge açısal momentumun toplam açısal momentuma katkısı, spin-yörünge etkileşmesiyle kısmen önemli hale gelir. Yörünge açısal momentumun bu katkısı, çiftlenmemiş elektronu koordinat sistemin merkezi olarak kabul etmekle daha kolay bir şekilde anlaşılabilir. Bu durumda elektron, çevresinde dolaşan pozitif yüklerin oluşturduğu yerel manyetik alanla da etkileşmeye girecektir. Dolayısıyla, çiftlenimsiz elektron uygulanan dış manyetik alandan daha farklı bir manyetik alan görecektir. Çekirdek manyetik momentinin sıfır ve  $s=1/2$  olduğu durumda toplam Hamiltoniyen

$$\mathcal{H} = g_e \mu_B \mathbf{B} \cdot \mathbf{S} + \lambda \mathbf{L} \cdot \mathbf{S} \quad (2.33)$$

ile verilir.  $\lambda$  spin-yörünge etkileşme sabitidir ve çiftlenimsiz elektronun üzerinde konumlandığı çekirdeğin atom numarasına sıkı sıkıya bağlıdır. Gerçek paramanyetik sistemlerde çiftlenimsiz elektronun manyetik momenti tam olarak etkin spine ters yönde değildir ve büyüklüğü de serbest elektronun manyetik momentinin büyüklüğüne eşit değildir. Ancak, içinde bulunduğu sistemin dışarıdan uygulanan manyetik alan içerisindeki yönelimine bağlıdır. Böyle durumlarda  $g$  faktörü bir tensörle ifade edilir ve sistemin hamiltoniyeni

$$\mathcal{H} = \mu_B \mathbf{S} \cdot \mathbf{g} \cdot \mathbf{B} \quad (2.34)$$

biçiminde ifade edilir.  $\mathbf{S} = (S_x \ S_y \ S_z)$  Pauli spin operatör vektörüdür ve  $g$ , 3x3' lük bir matristir. Polar koordinatlar kullanılarak manyetik alan bileşenleri şu şekilde ifade edilebilir:

$$B_x = B \sin \theta \cos \phi ; B_y = B \sin \theta \sin \phi ; B_z = B \cos \theta \quad (2.35)$$

Bu durumda Zeeman hamiltoniyeni,

$$\mathcal{H} = \mu_B \cdot \begin{pmatrix} S_x \\ S_y \\ S_z \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} g_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & g_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & g_{zz} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} B_x \\ B_y \\ B_z \end{pmatrix} \quad (2.36)$$

şeklinde yazılabilir (Bennati ve Murphy, 2009). Bu iki eşitlik birlikte değerlendirildiğinde, enerji hamiltoniyeni için

$$\mathcal{H} = \mu_B (g_{xx} B \sin \theta \cos \phi \cdot S_x + g_{yy} B \sin \theta \sin \phi \cdot S_y + g_{zz} B \cos \theta \cdot S_z) \quad (2.37)$$

ifadesi elde edilir.

Paramanyetik birimleri tanımlamada  $g$  faktörünün ayırt edici özelliğe sahip olduğu sistemler vardır.  $g$  faktörünün değeri, sadece düşük viskoziteli çözeltilerdeki organik serbest kökçeler gibi izotropik sistemlerde manyetik alandan bağımsızdır. Çoğu sistemde, örneğin alan içindeki yönelimine göre değişmekte olup anizotropiktir. Anizotropik sistemlerde,  $g$  kristal doğrultusuna bağlı olarak farklı değerler alırken, izotropik sistemlerde tek bir değere sahiptir.

Kristal bir yapı içerisinde bulunan çiftlenimsiz elektrona sahip birimlerin dönme ve ötelenme hareketleri kısıtlıdır ve bu nedenle manyetik etkileşmeleri de anizotropik karakterdedir. Kristal ana eksenleri doğrultusundaki spektroskopik yarıma çarpanı bileşenlerinin  $g_{xx}$ ,  $g_{yy}$  ve  $g_{zz}$  olduğu ortorombik simetri durumunda etkin  $g$  değeri

$$g(\theta, \phi) = [g_{xx}^2 \sin^2 \theta \cos^2 \phi + g_{yy}^2 \sin^2 \theta \sin^2 \phi + g_{zz}^2 \cos^2 \theta]^{1/2} \quad (2.38)$$

ifadesi ile verilir. Burada  $\theta$  ve  $\phi$ , sırasıyla kristal ana ekseninin z eksenine ve xy düzlemindeki izdüşümünün x eksenine yaptığı açıdır. Spektroskopik yarıma çarpanının kristal ana eksenine dik doğrultudaki bileşenlerinin eşit olması ( $g_{xx} = g_{yy} = g_{\perp}$ ) ve  $g_{\parallel}$ ' in de kristal ana eksenine paralel yöndeki bileşeni olması durumunda ( $g_{\parallel} = g_{zz}$ ), yani eksenel simetri durumunda, spektroskopik yarıma çarpanı ifadesi

$$g = [g_{\parallel}^2 \cos^2 \theta + g_{\perp}^2 \sin^2 \theta]^{1/2} \quad (2.39)$$

biçimine dönüşür. Bu bağıntılardan da görüldüğü gibi, rezonansın gözleendiği manyetik alan değeri, örnek üzerine uygulanan manyetik alan ile kristal eksenleri arasındaki açılara bağlıdır. Manyetik alan simetri eksenine dik ( $\theta = 90^\circ$ ) ve paralel olarak ( $\theta = 0^\circ$ ) uygulandığında rezonansın gözleendiği manyetik alan değerleri Eş. (2.30)' dan

$$B_{\parallel} = h\nu / g_{\parallel} \mu_B \quad (2.40)$$

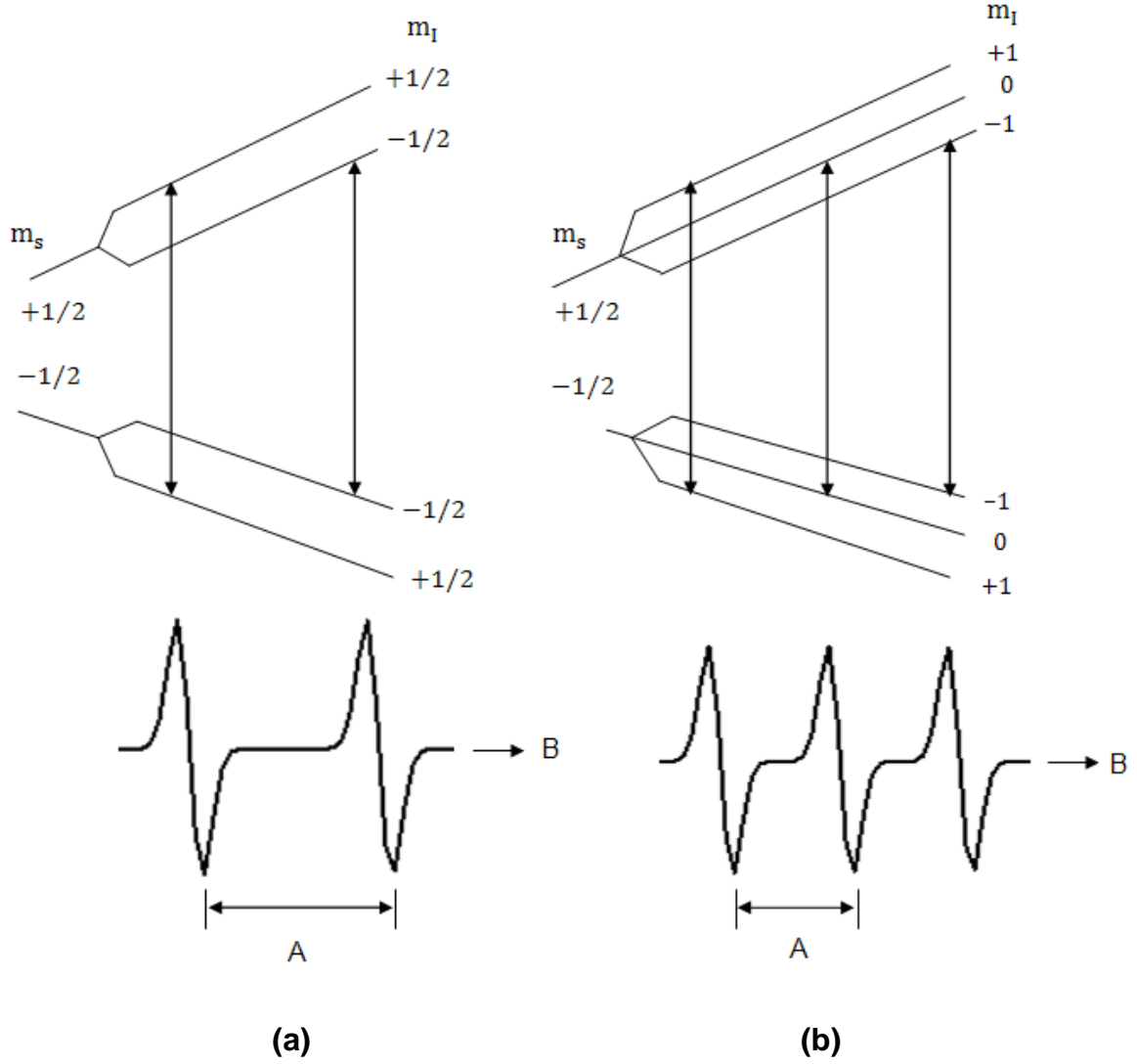
$$B_{\perp} = h\nu / g_{\perp} \mu_B \quad (2.41)$$

olarak bulunur.

#### 2.4. Aşırı İnce Yapı Etkileşmesi

Aşırı ince yapı etkileşmesi, ESR sinyallerinin birden çok çizgiye yarılmasına neden olur. Bu olay çiftlenimsiz elektronun manyetik momenti ile bağlı bulunduğu çekirdeğin ve/veya komşu çekirdeklerin manyetik momentleri ile olan etkileşmeleri sonucu ortaya çıkar. Çiftlenimsiz elektronun bağlı bulunduğu çekirdek veya komşu çekirdeklerin spin kuantum sayılarının sıfırdan farklı olması durumunda, elektronun manyetik momenti dış manyetik alanın yanı sıra bu çekirdeklerin oluşturduğu manyetik alanların da etkisi altında kalır. Bu etkileşmeler sonucu enerji

düzeylerinde ortaya çıkan yarılımlara, aşırı ince yapı yarılımları denir. Çiftlenimsiz elektronun, çekirdek spini  $I=1/2$  ve  $I=1$  olan çekirdeklerle etkileşmesi durumunda, enerji düzeylerinde meydana gelen yarılımlar ve bu düzeyler arasında oluşan izinli geçişler Şekil 2.4' de verilmiştir.



Şekil 2.3. Çiftlenimsiz bir elektronun spini  $I$  olan bir çekirdekle etkileşmesi durumunda enerji düzeylerinde gözlenen yarılımlar ve beklenen rezonans sinyalleri. (a)  $I = 1/2$ , (b)  $I = 1$ .

Komşu çekirdek veya çekirdeklerin manyetik momentleri nedeniyle çiftlenimsiz elektronun gördüğü toplam manyetik alan  $\mathbf{B}_t = \mathbf{B} + \mathbf{B}_{\text{yereel}}$  olacaktır. Bu ifadedeki  $\mathbf{B}_{\text{yereel}}$  komşu çekirdek manyetik momentlerinin elektronun bulunduğu yerde oluşturduğu alan,  $\mathbf{B}$  de dışarıdan uygulanan manyetik alandır. Şekil 2.4.a' dan da

görüldüğü gibi çiftlenimsiz elektronun spini 1/2 olan tek bir çekirdekle etkileşmeye girmesi sonucunda, **B** alanında gözlenmesi gereken rezonans sinyali, biri  $B - B_{\text{yerel}}$  diğeri de  $B + B_{\text{yerel}}$  manyetik alan değerlerinde ortaya çıkan iki rezonans sinyaline yarılr.

Çekirdeğin  $m_l$  manyetik kuantum sayısı  $-I'$  dan  $+I'$  ya kadar  $(2I + 1)$  tane değer aldığı için elektronun gördüğü yerel manyetik alan da  $(2I + 1)$  tane değişik değere sahip olur. Böylece dış manyetik alanın bir tek  $B$  değeri için elde edilen rezonans koşulu, bu kez dış manyetik alanın  $2I + 1$  tane değerinde elde edilir. Bunun sonucu olarak ESR spektrumu  $2I + 1$  tane çizgiye yarılr. Bu çizgilerin her birine aşırı ince yapı çizgisi adı verilir. Çiftlenimsiz elektronun spini  $I = 1/2$  olan  $n$  tane özdeş protonla etkileşmesi durumunda  $(2nI + 1)$  tane aşırı ince yapı çizgisi gözlenir. Bu çizgilerin şiddet oranları ve sayıları pascal üçgeni katsayıları ile tanımlanır. Çiftlenimsiz elektronun çekirdek spini  $I$  olan  $N$  tane özdeş çekirdekle etkileşmesi durumunda, aşırı ince yapı çizgilerinin sayısı ve şiddet oranları

$$\left[ \sum_{n=0}^{2I} x^n \right]^N \quad (2.42)$$

ifadesi ile verilen polinomun katsayıları ile belirlenir. Elde edilen polinomun terimlerinin katsayıları şiddet oranlarını, terim sayısı ise, aşırı ince yapı çizgilerinin sayısını verir.

Çiftlenimsiz elektronun manyetik alana ek olarak çekirdek spini sıfırdan farklı bir çekirdekle etkileşmesi durumunda, enerji hamiltoniyeni

$$\mathcal{H} = g\mu_B \mathbf{B} \cdot \mathbf{S} + A \mathbf{I} \cdot \mathbf{S} \quad (2.43)$$

biçiminde tanımlanır. Bu bağıntıdaki  $A$ , enerji biriminde (Joule) aşırı ince yapı parametresidir.

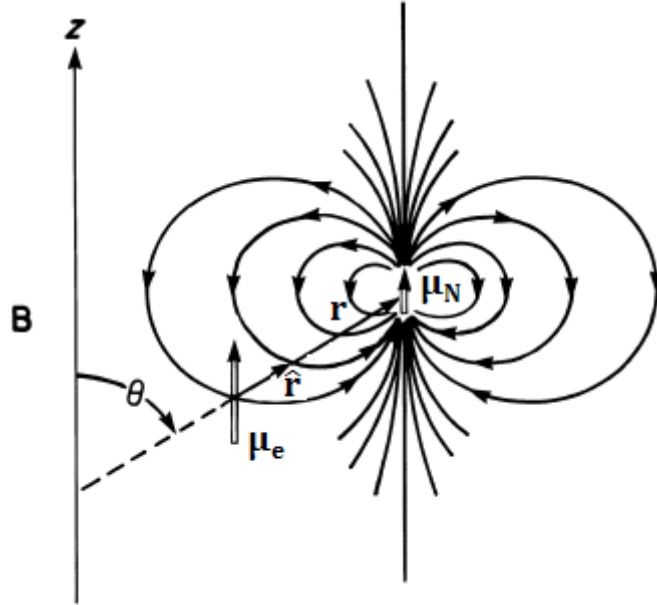
Eğer elektron ve nükleer manyetik dipoller klasik parçacıklar gibi davranırlarsa ve dışarıdan onları hizalayacak şekilde  $z$  doğrultusunda bir dış manyetik alan uygulanırsa, dipol-dipol etkileşme enerjisi

$$U = -\frac{\mu_0}{4\pi} \left[ \frac{3(\boldsymbol{\mu}_e \cdot \hat{\mathbf{r}})(\boldsymbol{\mu}_N \cdot \hat{\mathbf{r}}) - \boldsymbol{\mu}_e \cdot \boldsymbol{\mu}_N}{r^3} \right] \quad (2.44)$$

ifadesi ile verilir. Bağlıdaki  $\mu_e$  ve  $\mu_N$  sırasıyla elektronun ve komşu çekirdeğin manyetik momentleridir.  $r$  iki dipolün merkezleri arasındaki uzaklık ve  $\hat{r}$  de elektronun bulunduğu noktadan çekirdeğin bulunduğu nokta yönündeki birim vektördür.  $\mu_0$  ise boşluğun manyetik geçirgenliğidir ve  $4\pi \times 10^{-7} \text{ N/A}^2$  değerine sahiptir. Elektron ve çekirdek manyetik momentlerinin uygulanan dış manyetik alan ile aynı yönde yönelmeleri durumunda (Şekil 2.5), dipollerin kendilerini birleştiren doğrultu ile yaptıkları açı  $\theta$  olmak üzere, yukarıdaki enerji ifadesi

$$U = -\frac{\mu_0}{4\pi} \left[ \frac{3\cos^2\theta - 1}{r^3} \right] \mu_{ez}\mu_{Nz} \quad (2.45)$$

ifadesine dönüşür.



Şekil 2.4. Uygulanan dış manyetik alanla aynı yönde yönelmiş, aralarında  $r$  mesafesi olan elektron manyetik momentini ile çekirdek manyetik momentini arasındaki etkileşme.

Enerji ifadesinden de görüldüğü gibi  $r$  mesafesi sıfıra yaklaştıkça etkileşme enerjisi sonsuza yaklaşır. Fakat, parçacıkların bu şekilde süperpozisyonlarının olasılıkları çok düşüktür. Elektron uzayda tek bir noktada yer almadığından, etkileşme enerjisi ( $U$ ) elektron olasılık dağılımı üzerinden ortalama olmalıdır. Küresel simetri durumunda  $\langle \cos^2\theta \rangle = 1/3$  değerine sahiptir.

s yörüngelerinde elektron dağılımı küresel simetriye sahip olduğundan dolayı, dipol-dipol etkileşme enerjisi sıfırdır ve dolayısı ile aşırı ince yapının kökeni olamaz. Ancak, bu yörüngedeki bir elektronun çekirdekte bulunma olasılığı sıfırdan farklıdır (Şekil 2.6.a) ve bu da aşırı ince yapı etkileşmesine sebep olur. Bu etkileşme “Fermi-değme etkileşmesi” olarak bilinir ve bir elektronlu sistemlerde etkileşme enerjisi yaklaşık olarak

$$U_{Fd} = -\frac{2\mu_0}{3} |\psi(0)^2| \mu_{ez} \mu_{Nz} \quad (2.46)$$

bağıntısı ile verilir. Bu bağıntıdaki  $|\psi(0)^2|$ , elektronun çekirdekte bulunma olasılığıdır ve sebep oldukları aşırı ince yapı etkileşmesi de izotropiktir. Elektronun p,d,f,... yörüngelerinde bulunması durumunda dipol-dipol etkileşme enerjisi sıfırdan farklı ve dipoller arasındaki yönelime bağlıdır. Şekil 2.6.b ve 2.6.c’ den de görüldüğü gibi, p ve d yörüngelerindeki elektronların çekirdek üzerinde bulunma olasılıkları sıfır olduğundan dolayı aşırı ince yapı etkileşmesinin kaynağı Fermi-etkileşmesi değil, dipol-dipol etkileşmesidir (Weil ve Bolton, 2007).

Dolayısı ile, aşırı ince yapı etkileşmesine biri dipol-dipol diğeri de Fermi-değme olmak üzere iki etkileşme katkı getirir. Bu durumda aşırı ince yapı

$$A = A_s + A_d(3\cos^2\theta - 1) \quad (2.47)$$

bağıntısı ile ifade edilir.  $A_s$  ve  $A_d$ , Fermi-değme etkileşmesi terimi ve dipol-dipol etkileşmesi terimidir.  $\theta$  ise, uygulanan dış manyetik alan ile elektronun bulunduğu yörünge arasındaki açıdır. Sıvı ve gazlarda, aşırı ince yapı etkileşmesinin yalnızca izotropik terimi gözlenebilir. Atom veya moleküllerdeki hızlı yönelim değişimleri nedeniyle dipolar etkileşme teriminin ortalaması sıfırdır ve aşırı ince yapıya katkı getirmez. Katı durumunda ise çekirdeğin konumundaki simetri son derece önemlidir. Örneğin ortorombik simetri durumunda  $A_{xx}$ ,  $A_{yy}$  ve  $A_{zz}$  sırasıyla x, y ve z doğrultularındaki aşırı ince yapı sabitlerini göstermek üzere, aşırı ince yapı tensörü

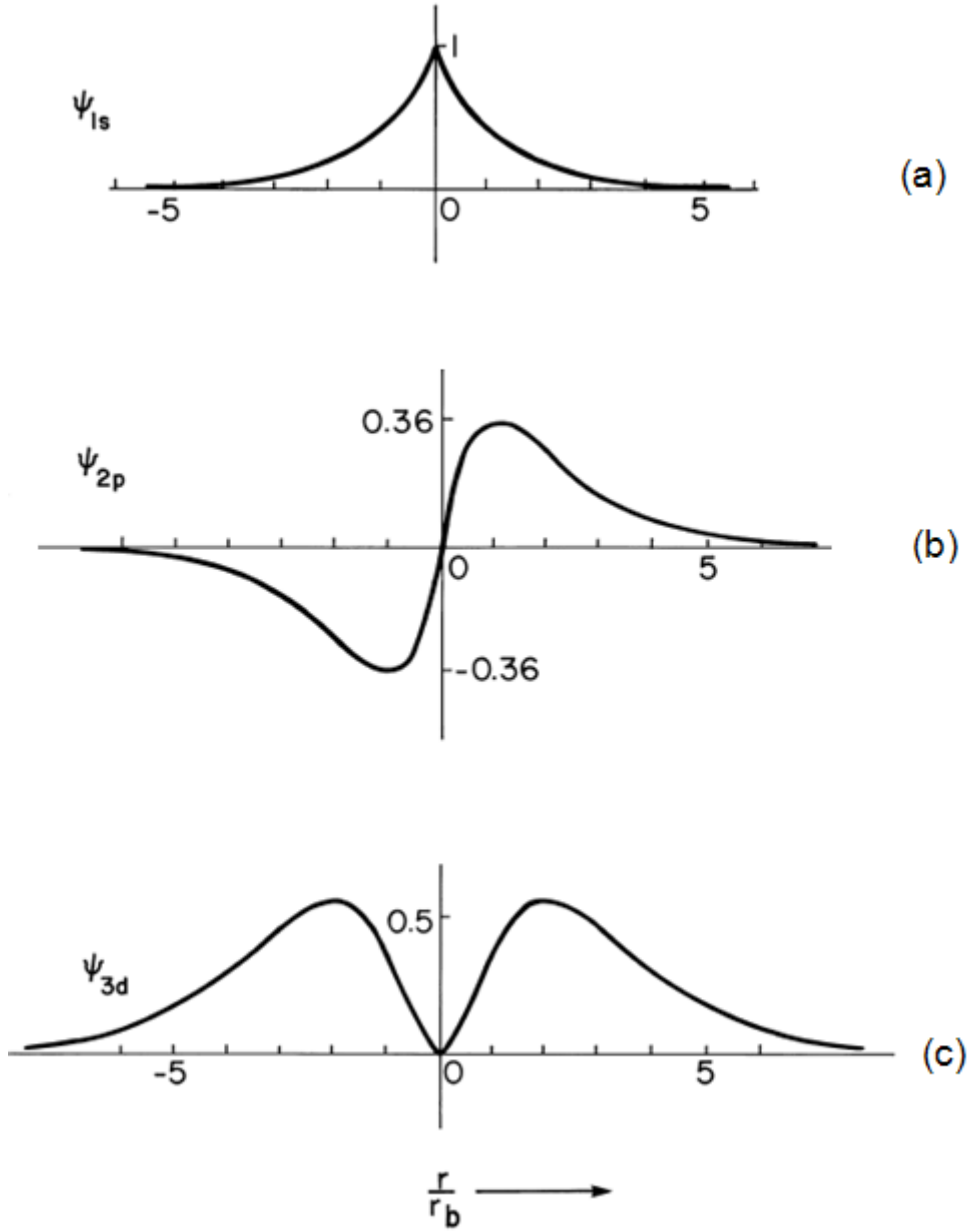
$$A(\theta, \varnothing) = (A_{xx}^2 \sin^2\theta \cos^2\varnothing + A_{yy}^2 \sin^2\theta \sin^2\varnothing + A_{zz}^2 \cos^2\theta)^{1/2} \quad (2.48)$$

ile verilir. Burada  $\theta$  ve  $\varnothing$  sırasıyla kristal ana eksenlerinin z eksenine ve xy düzlemindeki izdüşümün x eksenine yaptığı açıdır.

Eksenel simetri durumunda ise aşırı ince yapı, uygulanan dış manyetik alana paralel ( $A_{\parallel}=A_{zz}$ ) ve dik ( $A_{\perp}=A_{xx}=A_{yy}$ ) bileşenleri ile açıklanır ve

$$A(\theta) = (A_{\parallel}^2 \cos^2 \theta + A_{\perp}^2 \sin^2 \theta)^{1/2} \quad (2.49)$$

ifadesi ile tanımlanır.



Şekil 2.5. 1s, 2p ve 3d dalga fonksiyonlarının radyal bağımlılığı ( $r_b$ , Bohr yarıçapı) (a) 1s, (b) 2p, (c) 3d.

## 2.5. Elektron Spin Rezonans (ESR) Spektroskopisi

İlk ESR deneyi, 1944 yılında şimdiki Rusya Federasyonu olan Kazan (Tataristan)' da E. K. Zavoisky tarafından gerçekleştirilmiştir.  $\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  örneğini, 133 MHz' deki radyofrekans (RF) kaynağını ve bir selenoid tarafından sağlanan birkaç militesla aralığında değişen manyetik alanı kullanmıştır. Rezonansı 4.76 mT' da gözlemiştir ve bu durumda  $g$  değeri yaklaşık olarak 2' dir. İlk deneyden 50 yıl kadar sonra bu teknik çok hızlı bir şekilde gelişmiştir ve fizik, kimya, biyoloji, malzeme bilimi ve bilimin diğer dallarında da geniş uygulama alanlarına sahiptir (Rieger, 2002).

Elektron Spin Rezonans (ESR), statik bir manyetik alanın varlığında elektron spinlerinin elektromanyetik radyasyon sayesinde enerji seviyeleri arasındaki geçişlerini inceleyen bir spektroskopik tekniktir. Bu yöntem bir ya da daha fazla çiftlenmemiş elektron içeren örneklerin incelenmesinde kullanılabilir. Rezonans frekansları, aşırı ince yapı yarılmaları, çizgi şekilleri ve genişlikleri gibi spektral özellikler moleküler hareketlere, elektronik dağılıma ve moleküler yönelimlere bağlıdır.

Maddenin iyonize radyasyon soğurması, maddeyi oluşturan moleküllerin elektronik ve geometrik yapılarında bir dizi değişikliklere sebep olur. Düzenli elektronik durumlarından elektron çıkarma, boş elektronik durumlarına elektron yakalama, temel durumdan yüksek enerji durumlarına elektron uyarma radyasyon enerjisini soğurma işlemini takiben en yaygın ve en önemli başlangıç olaylarıdır. Normal durumdaki çoğu molekül elektron çiftlerine sahipken, radyasyona maruz kalanların ortak özelliği bir tane çiftlenmemiş elektrona sahip olma özelliği sergilemeleridir. Bu tür moleküllere serbest kökçeler denir.

ESR spektrumu, mikrodalga enerjisinin soğurulmasının manyetik alan şiddetine karşı çizilmesinin bir diyagramıdır. ESR spektrumlarını kaydetmek için iki yöntem vardır. Sürekli dalga (CW) yönteminde, düşük yoğunluklu mikrodalga radyasyonu örneğe sürekli olarak yayılır. İkinci yöntemde, şiddetli mikrodalga radyasyonu kısa darbeler ile örnek üzerine gönderilir ve yanıt radyasyon yokluğunda kaydedilir (Puls ESR). Soğurmanın gerçekleştiği manyetik alan değerlerinin konumları, çizgilerin sayısı, birbirlerine olan uzaklıkları ve bağlı şiddetleri, ayrıca genişlikleri ve

şekilleri spektrumu karakterize eden parametreler ve özelliklerdir. Kökçelerin yapısı ile ilgili olan tüm bu parametreler ve özellikleri, çevre ile olan etkileşimlerinden ve kökçelerin yer aldığı dinamik süreçlerden sorumludur (Corvaja, 2009).

İncelenen maddenin yapısında herhangi bir bozunmaya neden olmaması, duyarlılığının yüksek olması, az miktarda örneğin analiz için yeterli olması, algılama zamanının kısa olması ve sinyal şiddetinin örnek içerisinde mevcut olan manyetik birimlerin sayısı ile doğru orantılı olması gibi üstünlükleri nedeniyle ESR spektroskopisi, ilk kez gözlemlendiği 1944 yılından bu yana değişik konularda geniş uygulama alanları bulmuştur. ESR spektrumundaki çizgi genişliği, çizgi şiddeti, çizgi konumu ve çizgi yarılması gibi özelliklerden yararlanarak eşleşmemiş elektronun yeri ve çevresi ile ilgili ayrıntılı bilgiler elde edilebilir.

Katı içerisindeki kökçeler iyonize radyasyon ile üretilebilirler. Yüksek enerjili radyasyonun herhangi bir çeşidi veya parçacık bombardımanı, paramanyetik ürünlerin oluşmasına sebep olurlar. Radyasyonun bu sınıfı elektron açığa çıkartarak ve kökçe katyonlarının oluşumu ile atom ve molekülleri iyonize eder. Bu kökçeler “birincil kökçeler” olarak adlandırılırlar. Değişik ışınlama ve ESR ölçüm sıcaklıkları ile çeşitli reaksiyon adımlarında paramanyetik türlerin gözlenmesi mümkündür. 4 K’ den büyük sıcaklıklarda üretilen birincil kökçeler kararsızdırlar ve genellikle çok kalıcı olan ikincil kökçeleri vermek için tepkimeye girerler (Rieger, 2002).

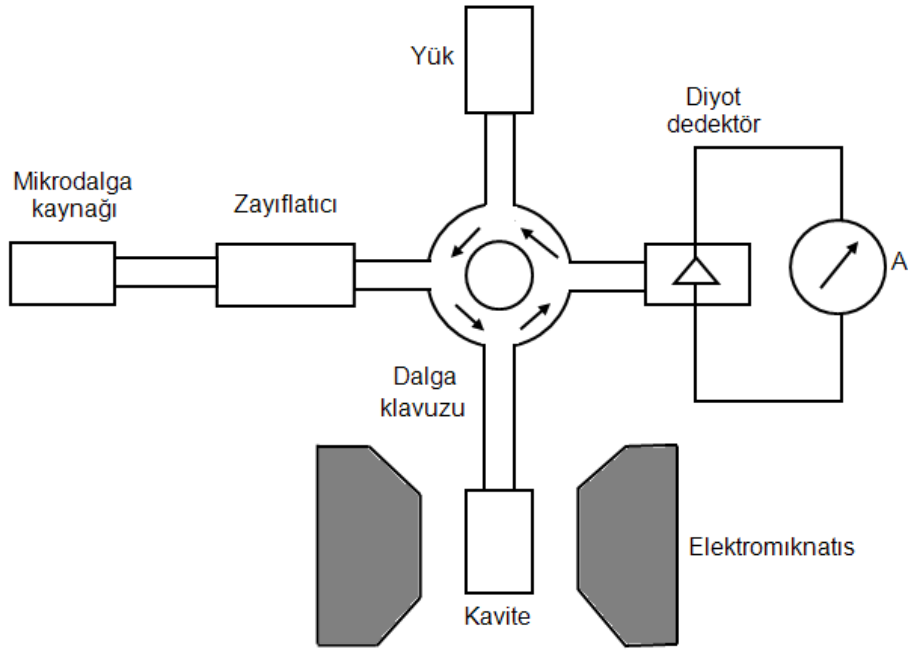
ESR spektroskopisi genellikle çalışılan türlerin elektronik yapısı ile ilgili bilgi elde etmek için kullanılır. Mikrodalganın soğurulduğu manyetik alan bölgesinde rezonans sinyalleri ortaya çıkar (Rieger, 2002). Kökçeye ait spektrum, kimyasal olarak faydalı iki tür bilgi içerebilir:

- i) Çiftlenmemiş elektronla etkileşime giren manyetik çekirdeklerin türü ve sayısı hakkında bilgi veren aşırı ince yapı sabiti.
- ii) Spektrum çizgilerinin aralığı ve yelpazenin ağırlık merkezi, moleküldeki çiftlenmemiş elektron spin yoğunluğunun dağılımı ile ilgili olan  $g$ -değeri hakkında bilgi verir.

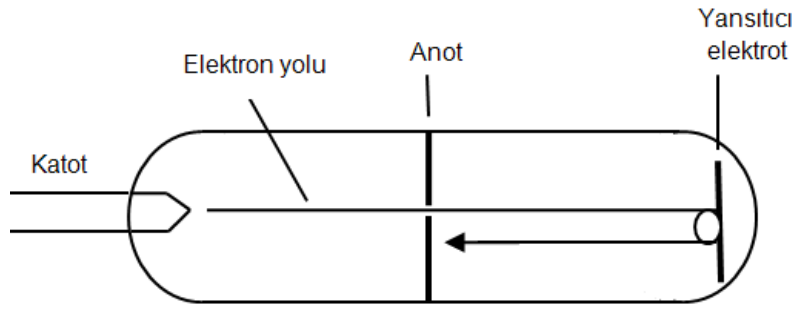
## 2.6. ESR Spektrometresinin Temel Özellikleri

ESR' de deneysel işlem, oldukça şiddetli bir dış manyetik alan içine yerleştirilmiş manyetik sistemde oluşan enerji düzeyleri arasında, ikincil bir mikrodalga alanı sonucu uyarılan geçişleri gözlemektir. Yıllar boyunca birçok spektrometre tasarlanmış olsa da, birçoğu Şekil 2.7' de gösterildiği gibi basitleştirilmiş bir blok diyagramına dayanmaktadır. Mikrodalga klystron tarafından üretilir ve güç seviyesi zayıflatıcı tarafından ayarlanır. Klystrondan gelen mikrodalga, dalga klavuzu aracılığı ile örneğin yerleştirildiği kaviteye yönlendirilir. Kaviteden geri yansıtılan mikrodalga, diyot dedektörüne yönlendirilir ve diyottan yansıyan mikrodalga yük tarafından tamamen emilir. Diyot, mikrodalga'nın elektrik alan vektörü boyunca yerleştirilmiştir ve kaviteden yansıyan mikrodalga gücü ile orantılı olan bir akım üretir. Böylece, ilke olarak, örnek tarafından soğurulan mikrodalga tespit edilerek belirlenebilir. Klystronda (Şekil 2.8) 3 adet elektrot vardır; elektronların yayıldığı ısıtıcı katot, elektronları toplamak için bir anot ve yansıtıcı bir elektrot.

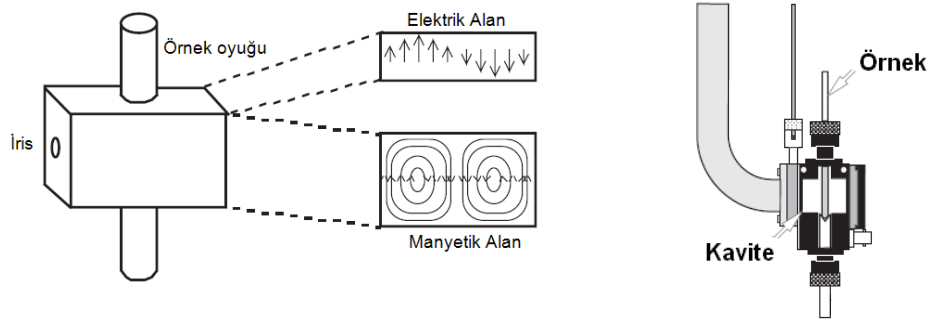
Anottaki boşluktan yansıtıcı elektrotta giden ve tekrar geri dönen elektronların hareketi salınan bir elektrik alanı ve dolayısıyla bir elektromanyetik radyasyon üretir. Yansıtıcı elektrottan anottaki boşluğa gidip gelmesi için geçen zaman salınımın periyoduna karşılık gelmektedir. Böylece anot ve yansıtıcı arasındaki fiziksel mesafe veya yansıtıcı gerilimi değiştirilerek mikrodalga frekansı ayarlanabilir. Bir kangal yardımı ile oyuk dışına alınan bu titreşimler, dalga klavuzunda elektromanyetik dalga olarak yayılır ve incelenecek örneğin içinde bulunduğu kavitede bir mikrodalga alanı olarak ortaya çıkar. Örnek, Şekil 2.9' da gösterilen kavite içerisine yerleştirilir. Kavite, bir dalgaboyu uzunluğunda dikdörtgensel metal bir kutudur ve yaklaşık olarak 1x2x3 cm boyutlarındadır (Rieger, 2002). Duran dalga elektrik ve manyetik alanlar şekilde gösterilmiştir.



Şekil 2.6. ESR spektrometresinin blok diyagramı.



Şekil 2.7. Mikrodalga üreten bir klystronun şematik çizimi.



Şekil 2.8. İncelenecek örneğin içine konduğu kavite.

Elektrik alan bileşeni daima dalga klavuzunun geniş yüzeyine diktir ve her yarı dalga boyunca en büyük ve en küçük değerini alır. Manyetik alan bileşeni ise geniş yüzeye paraleldir ve elektrik alan bileşeninin minimum olduğu yerde maksimum

değerini alır. Örnek, elektrik alanının minimum fakat manyetik alanının maksimum olduğu bölgeye yerleştirilir. Kavite uzunluğu ayarlanabilir değildir, fakat tam olarak bir dalga boyunda olmalıdır. Dolayısıyla, spektrometre, klystron frekansı kavite rezonans frekansına eşit olduğu duruma ayarlanmalıdır. Klystron frekansı kavite rezonans frekansına eşit olduğunda, mikrodalga enerjisi kavite tarafından soğurulur ve kaviteden diyota yansıyan kısım minimum olur.

Çizelge 2.2. ESR' de kullanılan yaygın frekanslar.

isim	$\nu$ (GHz)	$\lambda$ (cm)	B(G)
L	1,1	27	392
S	3,0	10	1070
<b>X</b>	<b>9,75</b>	<b>3,2</b>	<b>3480</b>
K	24	1,2	8600
Q	34	0,85	12000
W	94	0,31	34000

Çalışma şartlarına uygunluk, hassasiyet, çalışma konuları ve amaca yönelik olarak ESR spektrometreleri çeşitlilik gösterirler. Frekans değerlerine göre de çeşitli isimlerle anılırlar. Düşük frekans değerlerinden yüksek değerlere gidildikçe bu sistemlere L, S, X, K, Q, W-band spektrometreler denilmektedir. Değişik frekanslarda ve dolayısıyla farklı manyetik alan bölgelerinde çalışan ESR spektrometreleri Çizelge 2.2' de listelenmiştir. X-band ESR spektrometresi kullanımı en yaygın olan spektrometredir.



Şekil 2.9. Bruker EMX 131 X-Band ESR spektrometresi.

### 3. DENEYSEL BULGULAR

Bu tez çalışması kapsamında incelenen glukoz, fraktoz ve galaktoz örneklerinin tüm ESR spektrumları Hacettepe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Fizik Mühendisliği, Manyetik Rezonans Araştırma Laboratuvarı' nda bulunan Bruker marka EMX-131 X-band ESR spektrometresinde kaydedildi. Kullanılan ESR spektrometresi, yüksek Q değerine sahip Bruker ER 4119HS tipi silindirik bir kavite ile donatılmıştır. Spektrometre ayarları bilgisayar aracılığı ile yapılabilmekte ve tüm spektrumlar bilgisayar ortamında kaydedilebilmektedir. Sıcaklık incelemeleri, üzerinden soğutulmuş veya ısıtılmış azot gazı geçirilerek örnek sıcaklığının kontrol edilmesi ilkesine göre çalışan ER 4131-VT tipi Bruker marka sayısal sıcaklık kontrolcüsü yardımıyla yürütülmüştür. 100-400 K sıcaklık aralığında çalışmaya olanak sağlayan bu sistemle örnek sıcaklığı  $\pm 0,5$  K duyarlılıkla kontrol altında tutulabilmektedir.

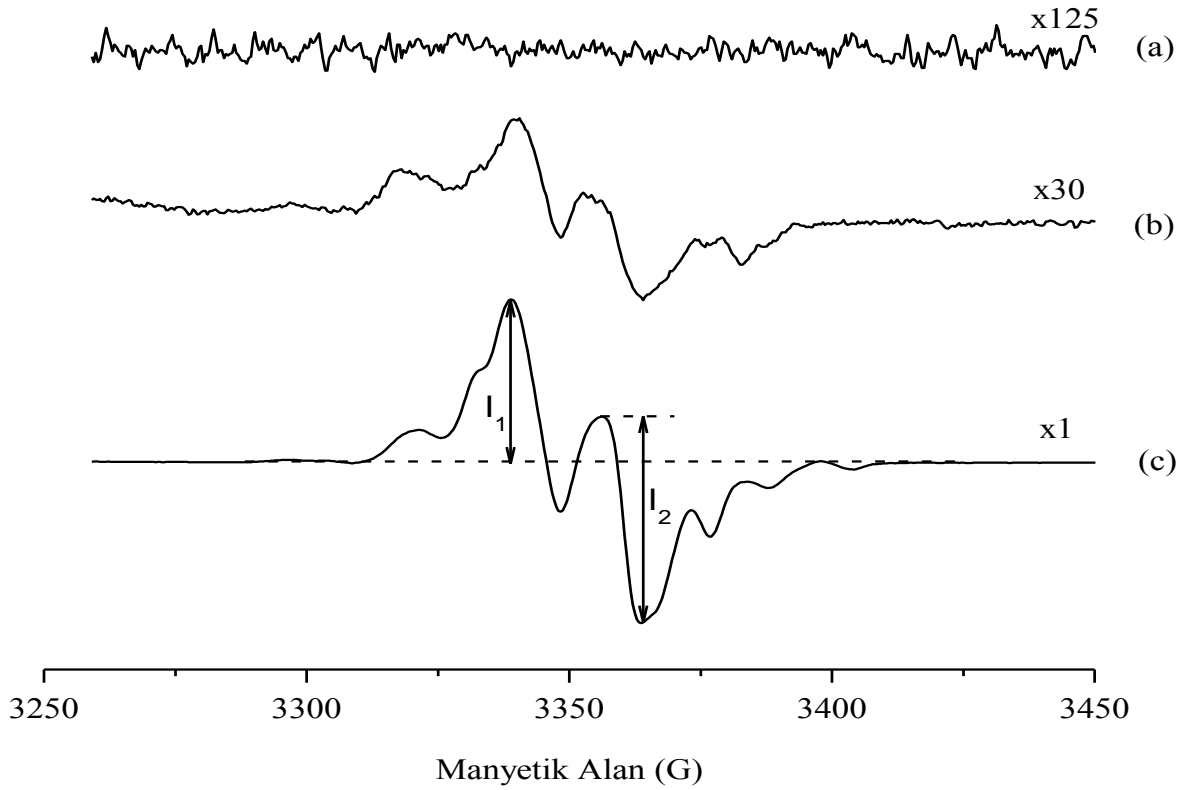
Glukoz, fraktoz ve galaktoz örneklerinin bir kısmı Türkiye Atom Enerjisi Kurumu (TAEK)' nun Sarayköy Birimi' nde bulunan ve 558 Gy/saat doz hızına sahip  $^{137}\text{Cs}$  gama kaynağında 5–100 Gy aralığında değişen dozlarda, diğer bir kısmı da yine aynı birimde bulunan ve 888 Gy/saat doz hızına sahip  $^{60}\text{Co}$  gama kaynağında 0,1-5 kGy aralığında değişen dozlarda ışınlanmıştır.

#### 3.1. Glukoz

##### 3.1.1. Işınlanmış ve ışınlanmamış glukoz ESR spektrumları

Üzerinde herhangi bir işlemin yapılmadığı glukoz örneğinin (kontrol) değişik mikrodalga gücü ve modülasyon genliklerinde ESR spektrumu kaydedilerek herhangi bir rezonans sinyali verip vermediği kontrol edilmiştir. Modülasyon genliğinin ve mikrodalga gücünün sırasıyla 5 G ve 1 mW olduğu bir durumda ışınlanmamış glukoz örneği için kaydedilen ESR spektrumu Şekil 3.1a' da verilmiştir.  $^{137}\text{Cs}$  ve  $^{60}\text{Co}$  gama kaynaklarında 50 Gy ve 3 kGy' lik dozlarda ışınlanmış glukoz örneklerinin, kontrol örneği ile aynı spektrometre çalışma koşullarında kaydedilmiş ESR spektrumları sırasıyla Şekil 3.1b ve 3.1c' de verilmiştir. Elde edilen spektrumlardan, ışınlanmamış glukoz örneğinin anlamlı sayılabilecek herhangi bir ESR sinyali vermediği, 50 Gy ve 3 kGy' lik dozlarda ışınlanmış olan glukoz örneklerinin ise simetrik olmayan ancak büyük ölçüde

benzer karakterli rezonans sinyalleri sergiledikleri gözlenmiştir. Yüksek dozlarda ışınlanmış örneklerdeki rezonans sinyallerinin çok daha belirgin ve şiddetli oldukları Şekil 3.1' den de açıkça görülmektedir. 3 kGy doz değerinde ışınlanmış örnek spektrumu üzerinde belirgin rezonans sinyallerinin şiddetleri  $I_1$  ve  $I_2$  ile simgelenirilmiş ve bunların ışınlama dozu, modülasyon genliği, mikrodalga gücü, sıcaklık ve zamanla nasıl değiştikleri ayrıntılı bir şekilde incelenmiştir. Elde edilen deneysel bulguların ışığı altında, bu sinyallerden hangisinin veya hangilerinin herhangi bir radyasyon kazası sırasında çevreye salınan ve/veya radyoterapide kullanılan radyasyon dozlarını ölçmede kullanılabileceği araştırılmıştır.



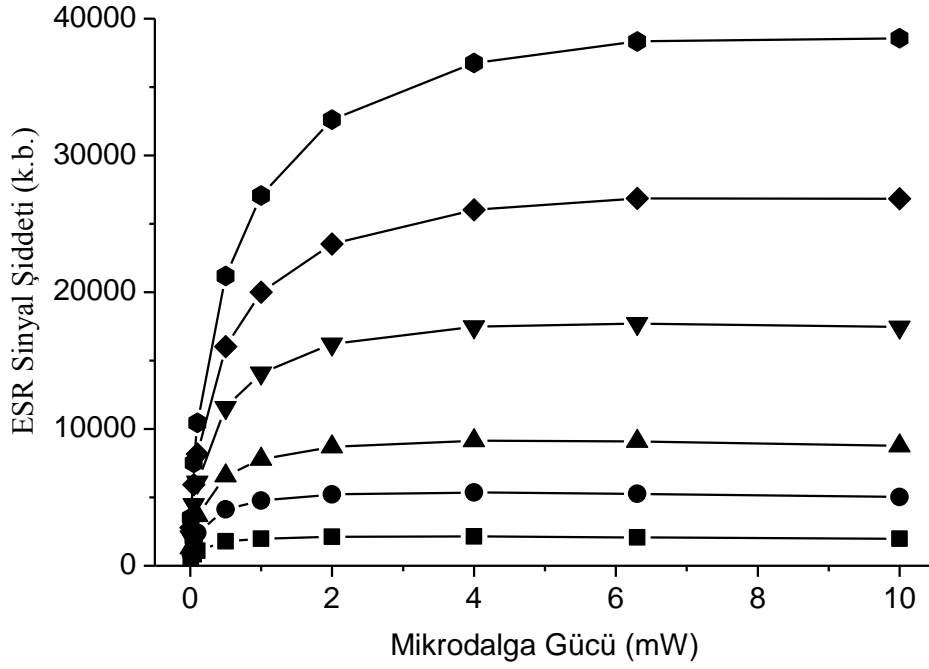
Şekil 3.1. Işınlanmamış ve ışınlanmış glukoz örneği ESR spektrumları. (a) Işınlanmamış; (b)  $^{137}\text{Cs}$  gama kaynağında 50 Gy; (c)  $^{60}\text{Co}$  gama kaynağında 3 kGy doz değerinde ışınlanmış.

### 3.1.2. ESR sinyal şiddetinin modülasyon genliği ve mikrodalga gücü ile değişimi

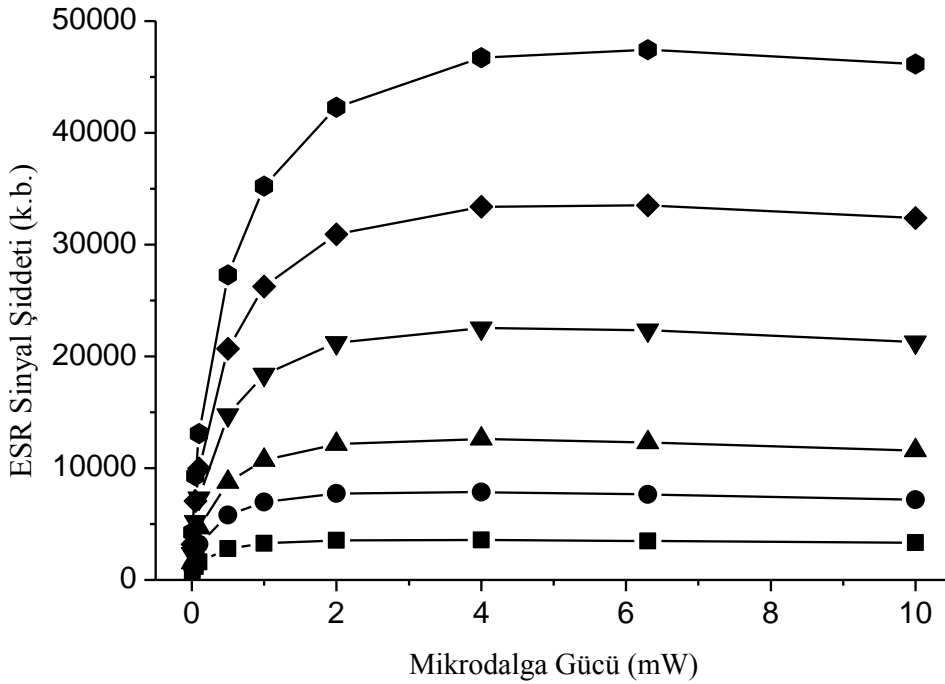
İyi bir dozimetrik malzemenin algılayabileceği minimum radyasyon doz değerinin mümkün olduğunca düşük olması istenir. Bu yüzden, dozimetrik malzeme olarak kullanılacak bir örneğin radyasyon veriminin yüksek olmasının yanısıra, yüksek mikrodalga güç değerlerinde bile doyuma gitmemesi istenir. Böylece, yüksek

mikrodalga güç değerleri kullanılarak rezonans sinyallerinin şiddetleri yapay olarak arttırılabilir. Diğer yandan, sinyal şiddetini yapay olarak arttırmanın bir diğer yolu da rezonans sinyalinin simetrisini bozmayacak şekilde mümkün olan en yüksek modülasyon genlik değerini seçmektir. Bu amaca yönelik olarak, Şekil 3.1c' de işaretlenen rezonans sinyallerinin şiddetlerinin ve ESR spektrumunun genel görünümünün uygulanan mikrodalga gücü ve modülasyon genliği ile nasıl değiştiği, 3 kGy doz değerinde ışınlanmış glukoz örneğinin ESR spektrumları 1-10 G aralığındaki farklı modülasyon genliklerinde ve 0.01-10 mW arasında değişen mikrodalga güç değerlerinde kaydedilerek incelendi. Üzerinde incelemenin yürütüldüğü rezonans sinyallerinin, farklı modülasyon genliklerinde elde edilen mikrodalga doyum davranışları Şekil 3.2 ve Şekil 3.3' de verilmiştir. Uygulanan tüm modülasyon genliklerinde  $I_1$  ve  $I_2$  rezonans sinyallerinin yaklaşık 4 mW mikrodalga güç değerinde doyuma ulaştığı görülmüştür. Ayrıca, incelenen rezonans sinyallerinin modülasyon genliği artırıldıkça daha da şiddetlendikleri gözlenmiştir. Glukoz örneğinin ışınlamadan önce herhangi bir ESR sinyali vermediği, ışınlama sonucu oluşan rezonans sinyallerinin şiddetlerinin uygulanan modülasyon genliği ve mikrodalga gücü ile nasıl değiştikleri gözönüne alındığında, mikrodalga gücünün ve modülasyon genliğinin sırasıyla 4 mW ve 10 G seçilmesi durumunda, rezonans sinyallerinin maksimum şiddete sahip olacağı ve böylelikle algılanabilir en düşük radyasyon doz değerinin 5 Gy' in de altına düşürülebileceği sonucuna varılmıştır.

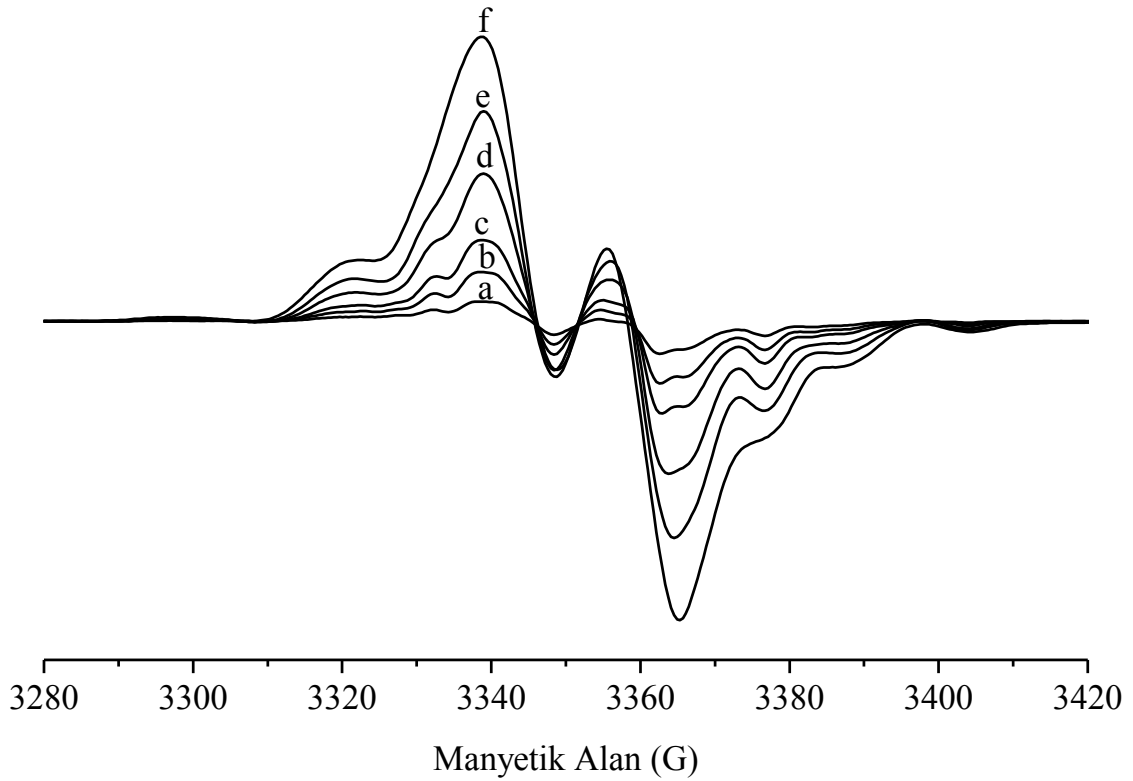
Modülasyon genliğinin ışınlanmış glukoz örneği ESR spektrumuna etkisini görebilmek için, 3 kGy doz değerinde ışınlanmış bir örneğin 1 mW mikrodalga gücü ve değişik modülasyon genliklerinde ESR spektrumları kaydedilmiş ve Şekil 3.4' de birarada verilmiştir. Düşük modülasyon genliklerinde açıkça görülen omuzların, yüksek modülasyon genliklerinde genel spektrumdan ayırt edilemediği ve tüm rezonans sinyallerinin daha da şiddetlendiği görülmektedir. Modülasyon genliğinin 1 G' dan 10 G' a çıkarılması ile  $I_1$  sinyalinin şiddetinde yaklaşık olarak 13.0 katlık,  $I_2$  sinyalinin şiddetinde de yaklaşık olarak 10.5 katlık bir artış meydana gelmiştir.



Şekil 3.2. 3 kGy doz değerinde ışınlanmış glukoz örneğinde gözlenen  $I_1$  rezonans sinyal şiddetlerinin uygulanan mikrodalga gücü ve modülasyon genliği ile değişimleri. [(■), 1 G; (●), 2 G; (▲), 3 G; (▼), 5 G; (◆), 7 G; (◆), 10 G]



Şekil 3.3. 3 kGy doz değerinde ışınlanmış glukoz örneğinde gözlenen  $I_2$  rezonans sinyal şiddetlerinin uygulanan mikrodalga gücü ve modülasyon genliği ile değişimleri. [(■), 1 G; (●), 2 G; (▲), 3 G; (▼), 5 G; (◆), 7 G; (◆), 10 G]

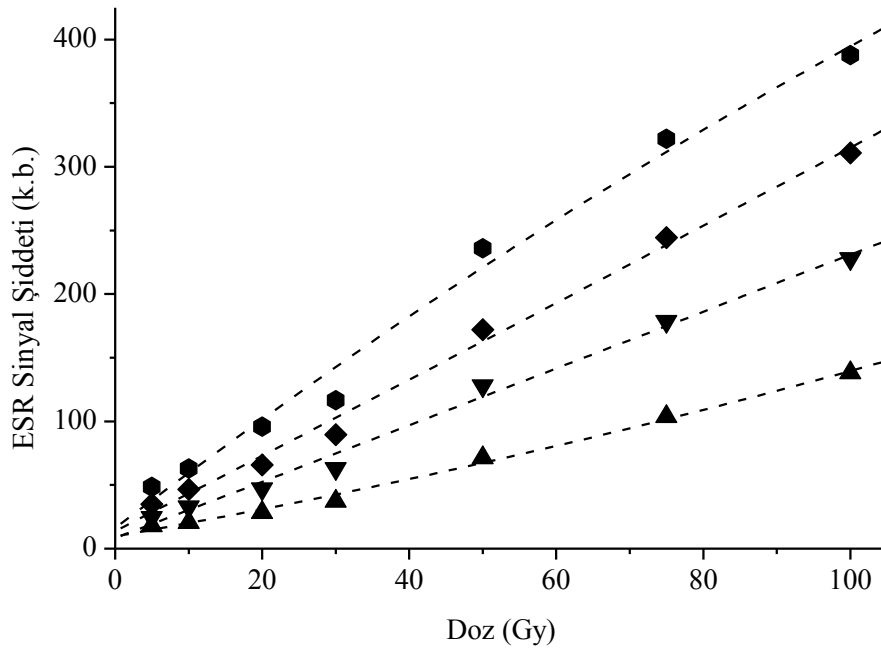


Şekil 3.4. 3 kGy doz değerinde ışınlanmış glukoz örneğinin 1 mW mikrodalga gücü ve değişik modülasyon genliklerinde kaydedilmiş ESR spektrumları. [a, 1 G; b, 2 G; c, 3 G; d, 5 G; e, 7 G; f, 10 G]

### 3.1.3. Doz-cevap eğrileri

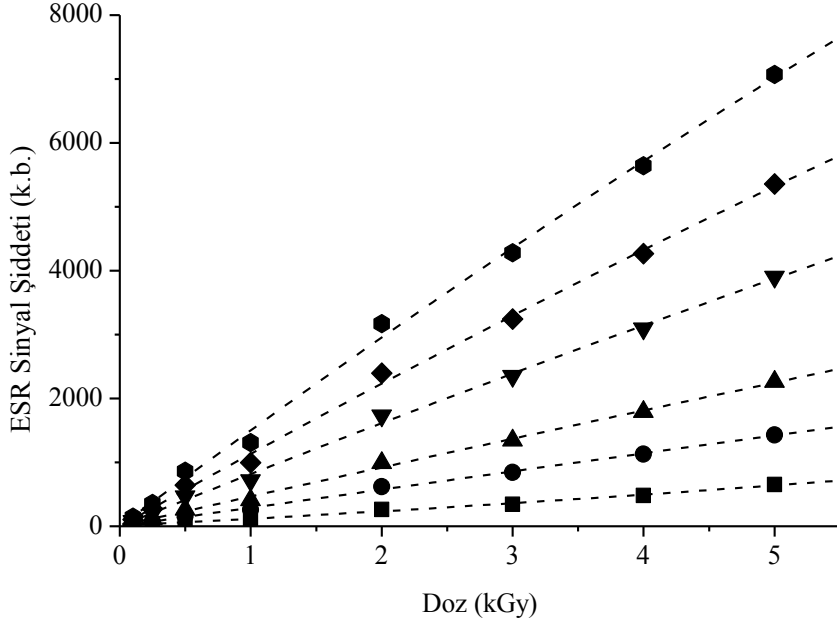
Düşük dozlarda (5–100 Gy) ışınlanan glukoz örneklerinin ESR spektrumları 1 mW mikrodalga gücünde ve 3, 5, 7 ve 10 G modülasyon genliklerinde kaydedilmiştir. Orta doz bölgesinde (0.1-5 kGy) ışınlanan örneklerin ESR spektrumları da yine 1 mW mikrodalga gücünde, ancak 1, 2, 3, 5, 7 ve 10 G modülasyon genliklerinde kaydedilmiştir. Kaydedilen ESR spektrumlarından, üzerinde incelemenin yürütüldüğü rezonans sinyallerinin şiddetleri ölçülmüş ve örnek kütlesine göre normalize edilerek ışınlama dozu ile nasıl değiştikleri belirlenmiştir. Düşük doz bölgesinde ışınlanan örneklerde  $I_1$  ve  $I_2$  rezonans sinyalleri için farklı modülasyon genliklerinde elde edilen doz-cevap eğrileri sırasıyla Şekil 3.5 ve 3.7' de, orta doz bölgesinde aynı rezonans sinyalleri için elde edilen doz-cevap eğrileri ise sırasıyla Şekil 3.6 ve 3.8' de verilmiştir. İncelenen rezonans sinyallerinin normalize şiddet değerlerinin ışınlama dozuna nasıl bir matematiksel fonksiyonla bağlı olduğunun belirlenmesi, ilgili örneğin soğurduğu radyasyon doz miktarının belirlenmesinde

büyük kolaylık sağlar. Bu amaca yönelik olarak deneysel doz-cevap verileri  $a + b * x$  ;  $a + b * x + c * x^2$  ;  $a + b * e^{-c*x}$  ; ve  $a + b * (1 - e^{-c*x})$  ifadelerine sahip fonksiyonlara uyarlanmış ve üzerinde çalışmaların yürütüldüğü tüm rezonans sinyallerinin hem düşük ve hem de orta doz bölgesinde en iyi ikinci dereceden polinomla ifade edilebileceği görülmüştür. Bu fonksiyon kullanılarak yapılan benzetişim sonucunda düşük ve orta doz bölgeleri için hesaplanan a, b ve c parametre değerleri Çizelge 3.1' de topluca verilmiştir. Çizelge 3.1' deki parametre değerleri kullanılarak hesaplanan kuramsal doz-cevap eğrileri de deneysel doz-cevap eğrilerinde kesikli çizgilerle temsil edilmişlerdir.

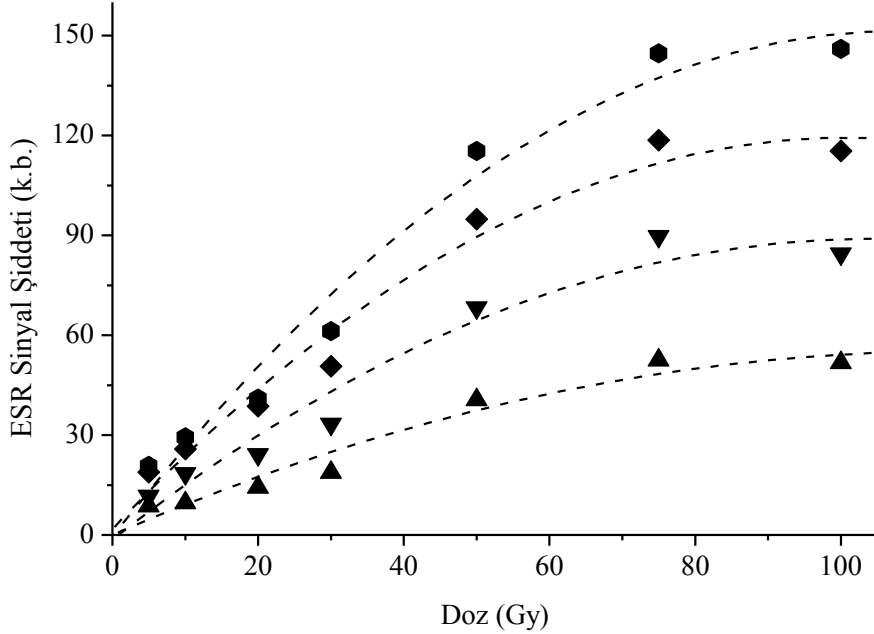


Şekil 3.5. Düşük doz bölgesinde ışınlanmış glukoz örneği ESR spektrumunda gözlenen  $I_1$  sinyali için 1 mW mikrodalga gücünde ve farklı modülasyon genliklerindeki doz-cevap eğrileri (Sembol, Deneysel; -----, Kuramsal).

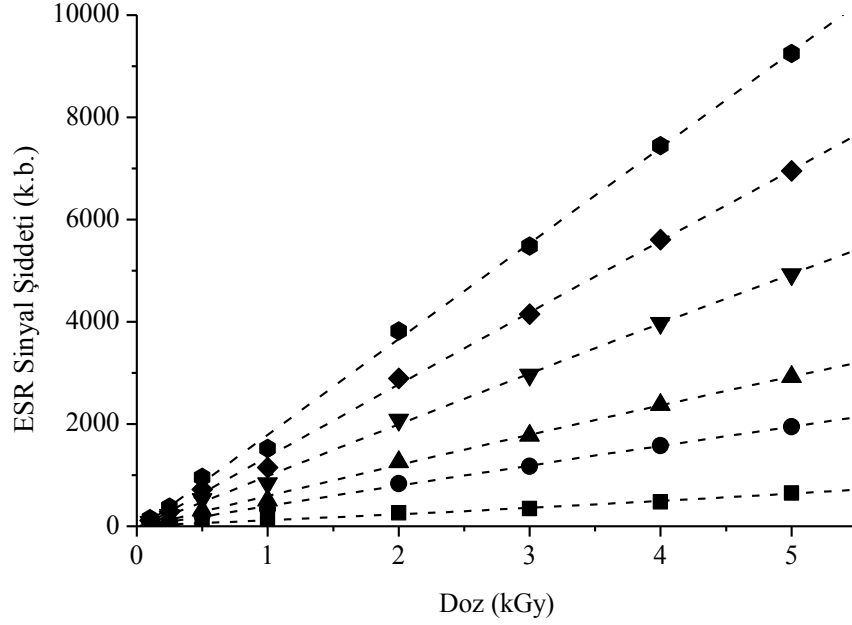
[ (▲), 3 G; (▼), 5 G; (◆), 7 G; (●), 10 G]



Şekil 3.6. Orta doz bölgesinde ışınlanmış glukoz örneği ESR spektrumunda gözlenen I<sub>1</sub> sinyali için 1 mW mikrodalga gücünde ve farklı modülasyon genliklerindeki doz-cevap eğrileri (Sembol, Deneysel; -----, Kuramsal). [(■), 1 G; (●), 2 G; (▲), 3 G; (▼), 5 G; (◆), 7 G; (◆), 10 G]



Şekil 3.7. Düşük doz bölgesinde ışınlanmış glukoz örneği ESR spektrumunda gözlenen I<sub>2</sub> sinyali için 1 mW mikrodalga gücünde ve farklı modülasyon genliklerindeki doz-cevap eğrileri (Sembol, Deneysel; -----, Kuramsal). [(▲), 3 G; (▼), 5 G; (◆), 7 G; (◆), 10 G]



Şekil 3.8. Orta doz bölgesinde ışınlanmış glukoz örneği ESR spektrumunda gözlenen  $I_2$  sinyali için 1 mW mikrodalga gücünde ve farklı modülasyon genliklerindeki doz-cevap eğrileri (Sembol, Deneysel; -----, Kuramsal). [(■) 1 G; (●) 2 G; (▲) 3 G; (▼) 5 G; (◆) 7 G; (●) 10 G]

Çizelge 3.1. Düşük ve orta doz bölgesinde ışınlanmış glukoz örneği için farklı modülasyon genliklerinde oluşturulmuş doz-cevap eğrilerinin benzetişimi sonucu hesaplanan parametre değerleri.

Sinyal	Parametreler									
	Düşük Doz Bölgesi					Orta Doz Bölgesi				
	Mod. Gen. (G)	a	b	c	$r^2$	Mod. Gen. (G)	a	b	c	$r^2$
$I_1$						1	8,6	104	4,4	0,9957
						2	1,2	289	-1,0	0,9981
	3	9,7	1,0	0,002	0,9947	3	2,4	465	-3,2	0,9978
	5	8,2	2,2	0,001	0,9920	5	1,4	828	-10,5	0,9977
	7	13,6	2,9	0,006	0,9939	7	-1,8	1152	-17,5	0,9978
	10	16,0	4,4	-0,060	0,9887	10	-1,1	1524	-23,8	0,9977
$I_2$						1	11	102	4,7	0,9958
						2	16	414	-4,2	0,9984
	3	-0,03	0,9	-0,004	0,9579	3	-29	629	-7,6	0,9985
	5	-1,5	1,7	-0,008	0,9603	5	-38	1030	-7,1	0,9986
	7	1,7	2,3	-0,012	0,9751	7	-66	1428	-4,1	0,9986
	10	-0,6	2,8	-0,013	0,9766	10	-84	1875	-0,6	0,9986

Herhangi bir malzemenin 1 kg' ında 1 Gy' lik doz başına oluşan spin sayısı miktarı, o malzemenin radyasyon verimi olarak tanımlanır. 1 Gy başına 1 kg malzemede  $6.3 \times 10^{16}$  tane spinin olduğu alanin için radyasyon verimi  $G=1$  olarak alınır (Ikeya, 1993). Glukoz örneğinin radyasyon verimini belirlemek için, 2 kGy doz değerinde ışınlanmış glukoz ve alanin (AL) örneklerinin aynı spektrometre çalışma koşullarında (1 mW mikrodalga gücü ve 2 G modülasyon genliği) kaydedilmiş ESR spektrumları kullanıldı. Kaydedilen spektrumların iki defa integralleri alınarak soğurma eğrisi altında kalan alanlar belirlendi ve glukoz için radyasyon verimi,

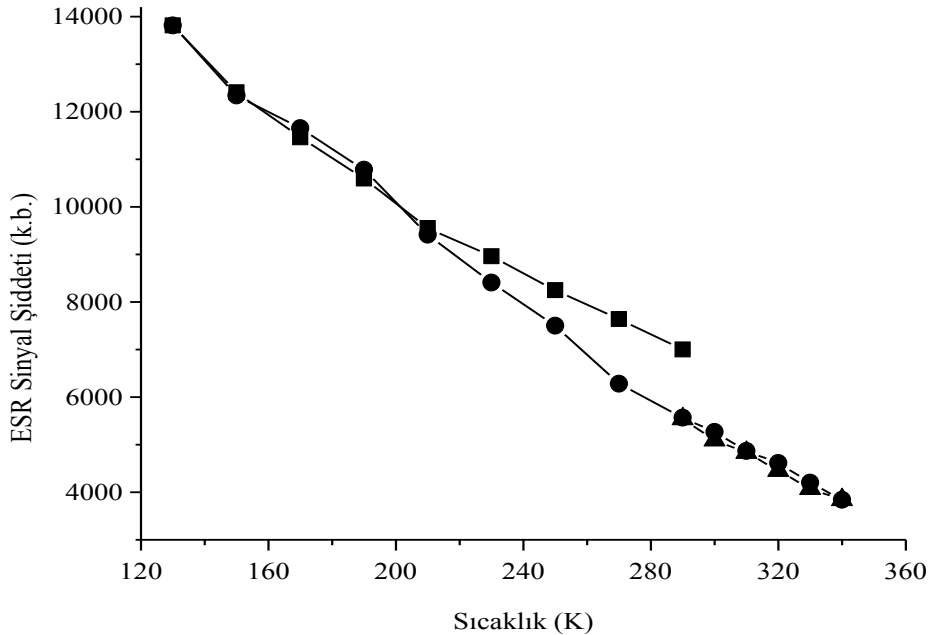
$$G_X = \frac{A_X/m_X}{A_{AL}/m_{AL}} * G_{AL} \quad (3.1)$$

bağıntısı kullanılarak hesaplandı. Bu bağıntıdaki  $A_X$  ve  $A_{AL}$  sırasıyla radyasyon verimi hesaplanacak örneğin ve AL' nin soğurma eğrileri altında kalan alan değerleri,  $m_X$  ve  $m_{AL}$  ise örnek kütleleridir. AL' nin radyasyon verimi ( $G_{AL}$ ) 1 alındığında, glukozun radyasyon verimi ( $G_{GL}$ ) 1.51 olarak hesaplanmıştır. Bu sonuç, glukoz örneğinin radyasyon verimi açısından iyi bir dozimetrik malzeme olabileceğini desteklemektedir.

#### **3.1.4. ESR sinyal şiddetinin sıcaklıkla değişimi**

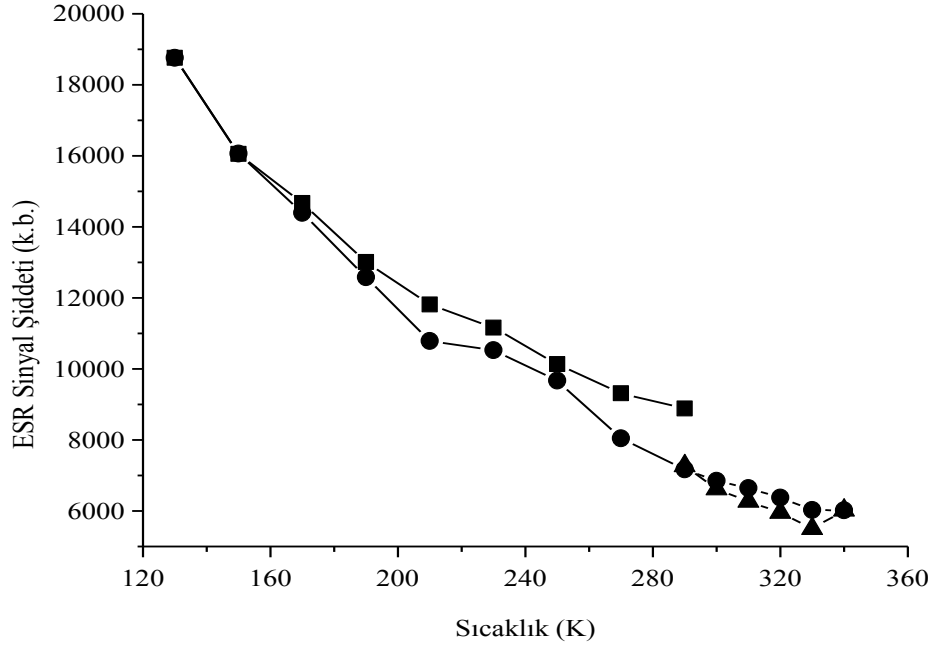
Işınlama sonucu herhangi bir örnekte oluşan kökçe veya kökçelerin miktarları, örneğin bulunduğu ortamın fiziksel özelliklerine ve ışınlama sonrası geçen süreye sıkı sıkıya bağlıdır. İyi bir dozimetrik malzemede bulunması gereken en önemli özellik, malzeme içerisinde oluşan kökçe veya kökçelerin, en azından doz ölçümünde kullanılacak rezonans sinyalinin, sıcaklığa karşı oldukça dirençli ve zaman içerisinde de kararlı olmasıdır. Işınlanmış glukoz örneğinde gözlenen rezonans sinyallerinin ( $I_1$  ve  $I_2$ ) sıcaklıkla değişip değişmediği, 3 kGy doz değerinde ışınlanmış örnek kullanılarak 130-340 K sıcaklık aralığında incelendi. Örnek sıcaklığı oda sıcaklığından (290 K) başlanarak 20 K adımlarla önce 130 K' e kadar düşürüldü ve tekrar 130 K' den başlanarak aynı adımlarla 290 K' e kadar çıkarıldı. 290 K' den 340 K' e kadar ise 10 K adımlarla çıkarıldı. Daha sonra da aynı adımlarla 340 K' den tekrar oda sıcaklığına düşürüldü. 130-340 K aralığındaki her sıcaklık adımında örneğin ESR spektrumu, mikrodalga gücü ve modülasyon genliğinin sırasıyla 0.1 mW ve 2 G olduğu spektrometre çalışma koşullarında

kaydedildi. Bu spektrumlardan, üzerinde incelemelerin yürütüldüğü  $I_1$  ve  $I_2$  rezonans sinyallerinin şiddetleri ölçülmüş ve sıcaklıkla nasıl değiştikleri sırasıyla Şekil 3.9 ve 3.10' da verilmiştir. Örnek sıcaklığı 290 K' den 130 K' e düşürüldüğünde sinyal şiddetlerinin klasik paramanyetizmaya uygun bir şekilde arttığı görülmektedir. Sıcaklığın 130 K' den tekrar 290 K' e çıkarılması ile tüm rezonans sinyallerinin şiddetlerinin yaklaşık geri dönüşümlü olarak 250 K' e kadar azaldığı, bu sıcaklıktan 290 K' e kadar sinyal şiddetlerindeki azalmanın hızlandığı ve başlangıçtaki değerlerinin de altına düştüğü gözlenmiştir. Sıcaklığın 290 K' den 340 K' e çıkarılmasıyla sinyal şiddetlerindeki azalmanın devam ettiği, buradan tekrar 290 K' e düşürüldüğünde de sinyal şiddetlerinin tersinir bir yol izledikleri görülmüştür. Oda sıcaklığının üzerindeki sıcaklıklarda (>290 K) bile sinyal şiddetlerinin önemli sayılabilecek bir kayba uğramamış olmaları bu sinyallere kaynaklık eden kökçelerin sıcaklığa karşı oldukça dirençli olduklarını göstermektedir. Sıcaklığın 130 K' den 340 K' e doğru artırılması esnasında 250 K civarında başlayan hızlı azalmanın, sıcaklık artışı nedeniyle örnek tüpü çeperinde oluşan nem nedeniyle örnek içerisine bir miktar su kaçmış olabileceği ve bu yüzden sinyal şiddetinin bir miktar zayıflamış olabileceği düşünülmektedir.



Şekil 3.9. 3 kGy değerinde ışınlanmış glukoz örneği ESR spektrumunda gözlenen  $I_1$  rezonans sinyal şiddetinin sıcaklıkla değişimi.

(■) 290K → 130K; (●) 130K → 340K; (▲) 340K → 290K

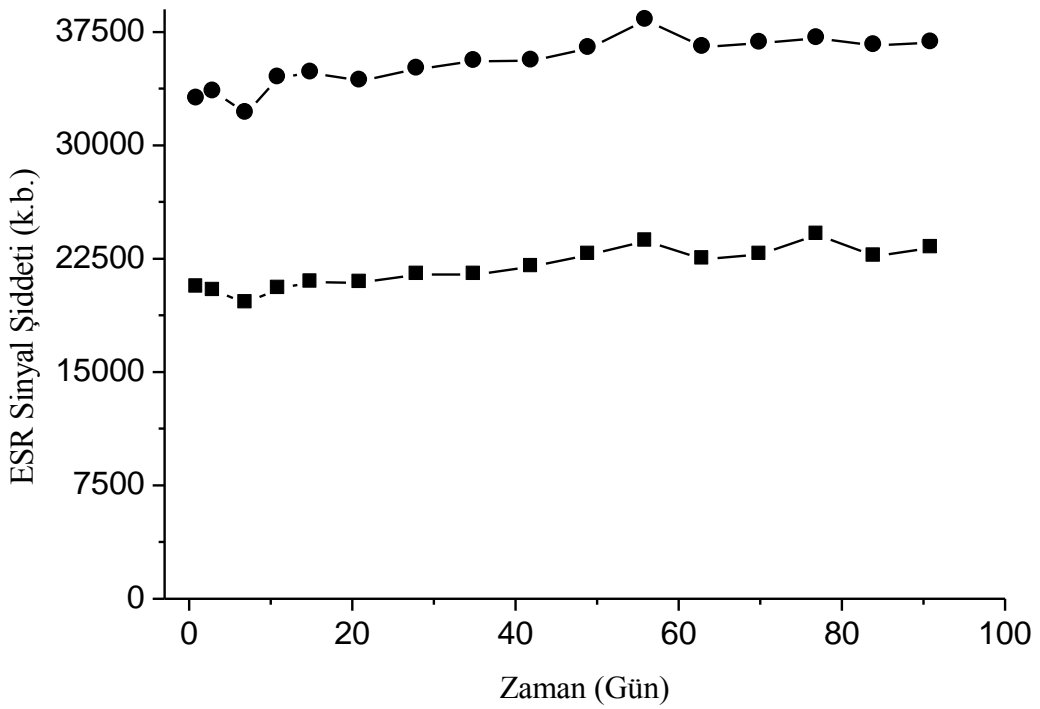


Şekil 3.10. 3 kGy değerinde ışınlanmış glukoz örneği ESR spektrumunda gözlenen  $I_2$  rezonans sinyal şiddetinin sıcaklıkla değişimi. (■) 290K → 130K; (●) 130K → 340K; (▲) 340K → 290K

### 3.1.5. ESR sinyal şiddetinin zamanla değişimi

Çalışmanın bu kesiminde, ışınlanmış glukoz örneği ESR spektrumuna kaynaklık eden kökçe veya kökçelerin oda sıcaklığındaki kararlılıklarının belirlenmesi amaçlanmıştır. Dozimetrik malzeme olarak kullanılacak bir örnekte radyasyonla oluşan kökçe veya kökçelerin oda sıcaklığı civarında geniş bir aralıkta zamanla sönmeye uğramamaları istenir. Yani, ışınlama ile malzeme içerisinde oluşan kökçelerin miktarlarında zamanla herhangi bir azalma olmamalıdır. Bu amaca yönelik olarak, 3 kGy doz değerinde ışınlanmış glukoz örneğinin yaklaşık üç ay boyunca (91 gün), spektrometre çalışma koşullarında herhangi bir değişiklik yapılmadan, belirli zaman aralıklarında ESR spektrumları kaydedilmiş ve bu spektrumlardan Şekil 3.1c' de işaretlenen  $I_1$  ve  $I_2$  rezonans sinyallerinin şiddetleri ölçülerek zamanla nasıl değiştiklerine bakılmıştır. Bu inceleme süresince, örnek pyreks tüp içinde havaya açık şekilde bekletilmiştir. Üzerinde incelemelerin yürütüldüğü rezonans sinyallerinin şiddetlerinin zamanla değişimleri Şekil 3.11' de bir arada verilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi, üç aylık bir sürenin sonunda bile, incelenen rezonans sinyallerinin şiddetlerinde neredeyse hiçbir değişim olmamıştır. Işınlanmış glukoz örneği ESR spektrumunun genel görünümünde

meydana gelen değişimleri takip edebilme açısından, farklı zamanlarda aynı spektrometre çalışma koşullarında kaydedilmiş ESR spektrumlarından bazıları Şekil 3.12' de bir arada verilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi, işınlamayı takip eden 91 günün sonunda bile glukoz rneği ESR spektrumunda gözle görülebilecek ölçüde önemli bir değişiklik olmamıştır. Bunun dışında, üzerinde çalışmaların yürütüldüğü  $I_1$  ve  $I_2$  rezonans sinyal şiddetlerinin oda sıcaklığında zaman içerisinde hiçbir sönüme uğramaması, glukoz örneğinin dozimetrik malzeme olarak kullanılması yönünde mit verici önemli bir sonuçtur.

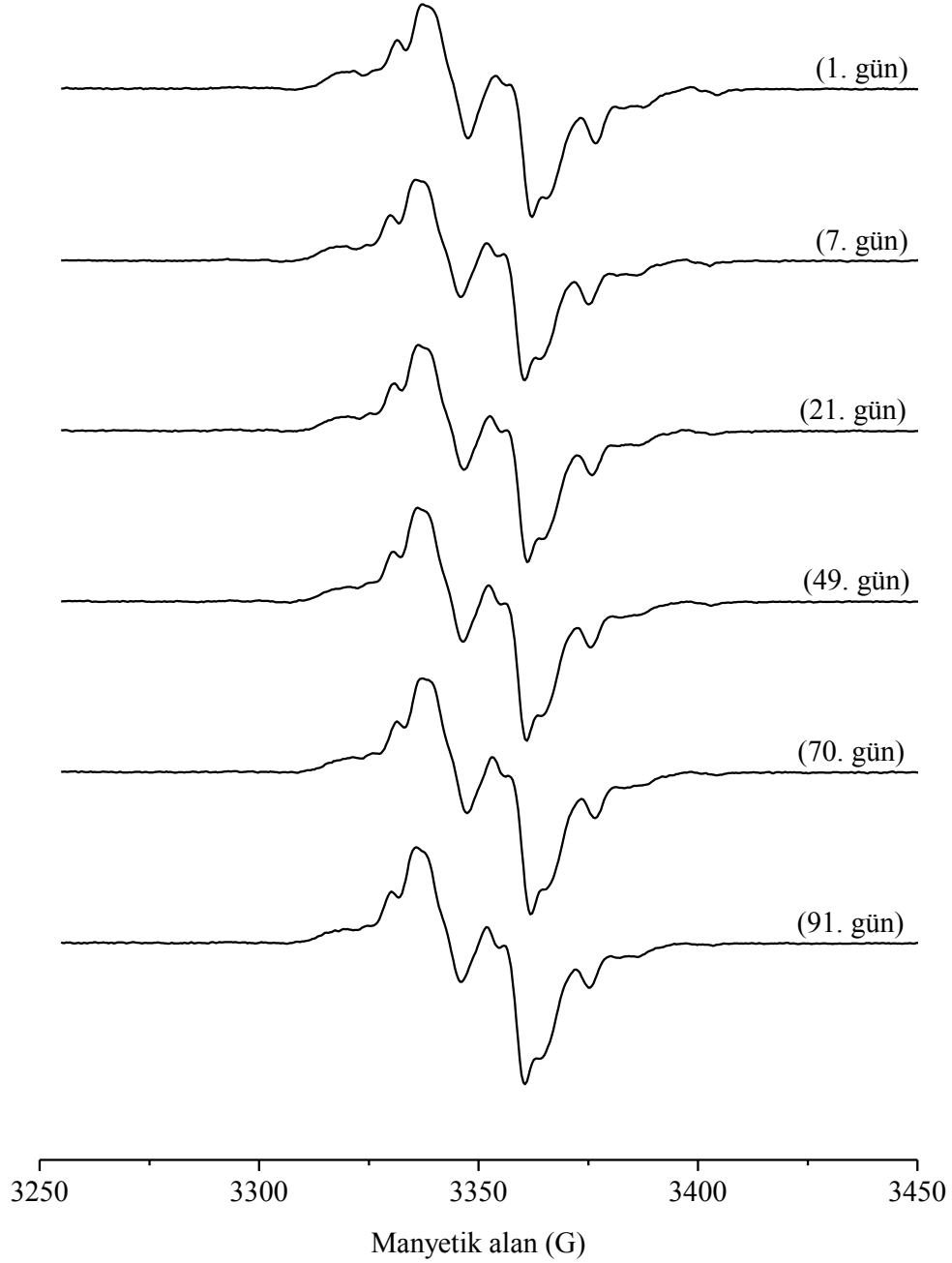


Şekil 3.11. 3 kGy doz değerinde işınlanmış glukoz örneğinde gözlenen  $I_1$  ve  $I_2$  rezonans sinyal şiddetlerinin zamanla değişimi. [(■),  $I_1$ ; (●),  $I_2$ ]

### 3.1.6. ESR Sinyal şiddetinin değişik sıcaklıklardaki sönümü

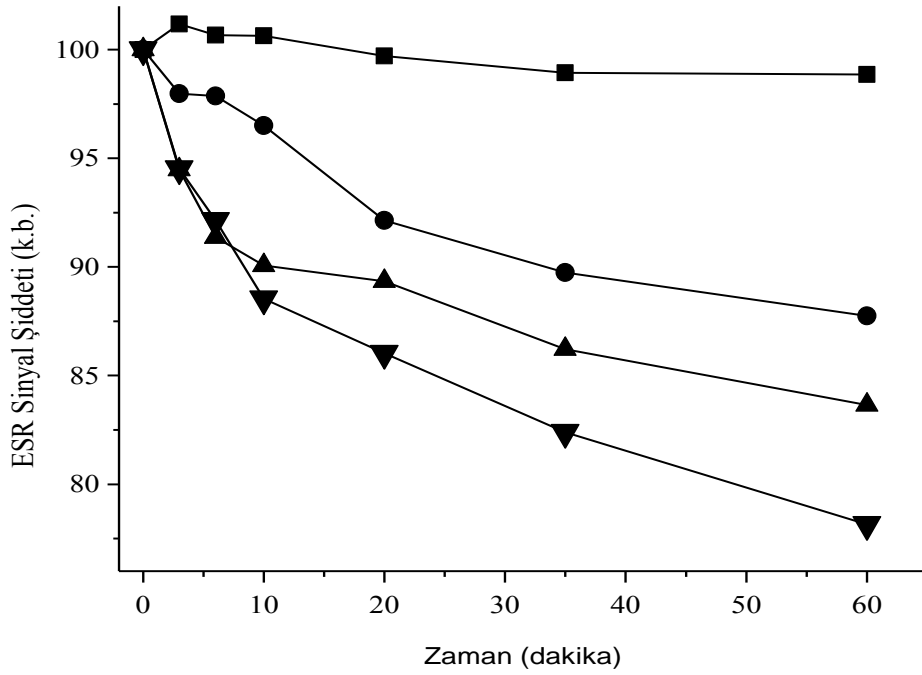
Herhangi bir malzeme içerisindeki kökçelerin, içinde buldukları ortamdaki moleküler hareketliliğin artmasıyla çok daha kolay bir şekilde sönüme uğramaları veya başka paramanyetik birimlere dönüşme olasılıkları artar. 130-340 K sıcaklık aralığındaki incelemeler, işınlanmış glukoz rneği ESR spektrumuna kaynaklık eden kökçelerin yapılarını korudukları ancak rezonans sinyallerinin yüksek sıcaklıklara çıkıldıkça şiddetlerinin azaldığını göstermiştir. Oda sıcaklığında oldukça kararlı olan  $I_1$  ve  $I_2$  rezonans sinyallerinin artan sıcaklıkla birlikte sönüm

hızlarının ne şekilde değiştiğini daha ayrıntılı bir şekilde ortaya koymak için, ışınlanmış glukoz örneğinin farklı sıcaklıklardaki sönüm davranışlarını incelemek gerekir. Bu amaca yönelik olarak, 3 kGy doz değerinde ışınlanmış glukoz örneklerinin 310 K, 320 K, 330 K ve 340 K sıcaklıklarında 60 dak'lık bir süre boyunca, kavite içerisindeki konumu hiç değiştirilmeden, değişik zamanlarda ESR

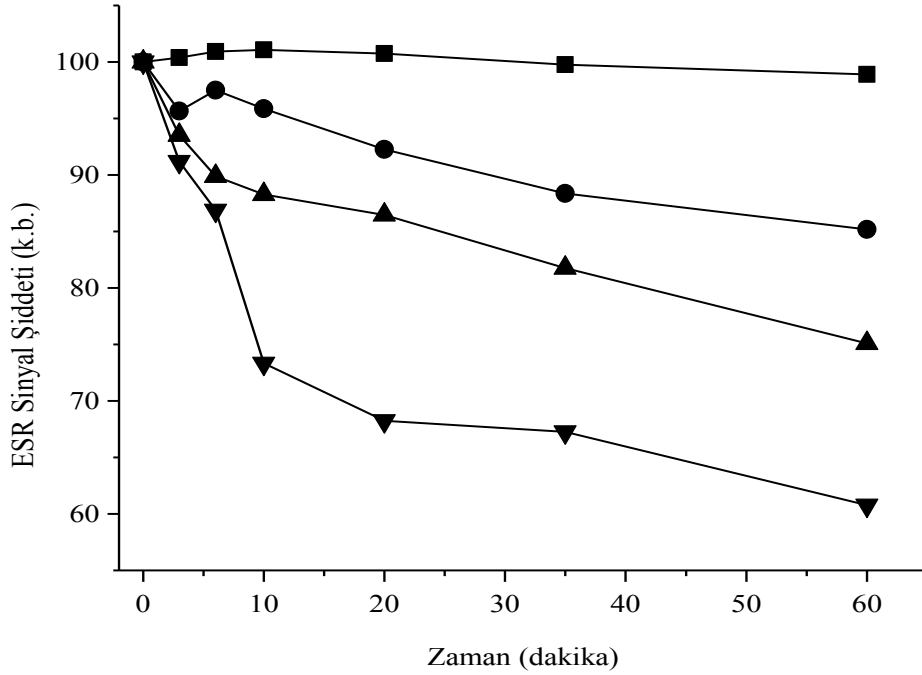


Şekil 3.12. 3 kGy doz değerinde ışınlanmış glukozun oda sıcaklığında farklı zamanlarda kaydedilmiş ESR spektrumları.

spektrumları kaydedilmiştir. Ayarlanan her kavite sıcaklığında kaydedilen bu spektrumlardan  $I_1$  ve  $I_2$  rezonans sinyal şiddetleri ölçülmüş ve zamanla nasıl değiştiklerine bakılmıştır.  $I_1$  ve  $I_2$  rezonans sinyalleri için elde edilen bu değişimler sırasıyla Şekil 3.13 ve 3.14' de verilmiştir. Bu şekillerden de görüldüğü gibi, örneğin bulunduğu ortamın sıcaklığı arttırıldıkça, incelenen rezonans sinyallerinin sönüm hızları beklentiler çerçevesinde artmıştır. Ancak, 340 K gibi oda sıcaklığına göre oldukça yüksek sayılabilecek bir sıcaklıkta, 60 dak'lık sürenin sonunda bile rezonans sinyallerindeki azalmanın çok büyük ölçüde olmadığı görülmektedir. Bu azalmanın  $I_1$  rezonans sinyalinde % 20,  $I_2$  rezonans sinyali için ise % 40 civarında olduğu sonucuna varılmıştır. Oda sıcaklığından oldukça yüksek sayılabilecek bu sıcaklıklardaki sönüm oranları dikkate alındığında, ışınlanmış glukoz örneği ESR spektrumuna kaynaklık eden kökçe veya kökçelerin sıcaklığa karşı son derece dirençli oldukları düşünülmektedir.



Şekil 3.13. 3 kGy doz değerinde ışınlanmış glukoz örneği ESR spektrumunda gözlenen  $I_1$  rezonans sinyal şiddetinin farklı tavlama sıcaklıklarında zamanla değişimi. (■) 310 K; (●) 320 K; (▲) 330 K; (▼) 340 K

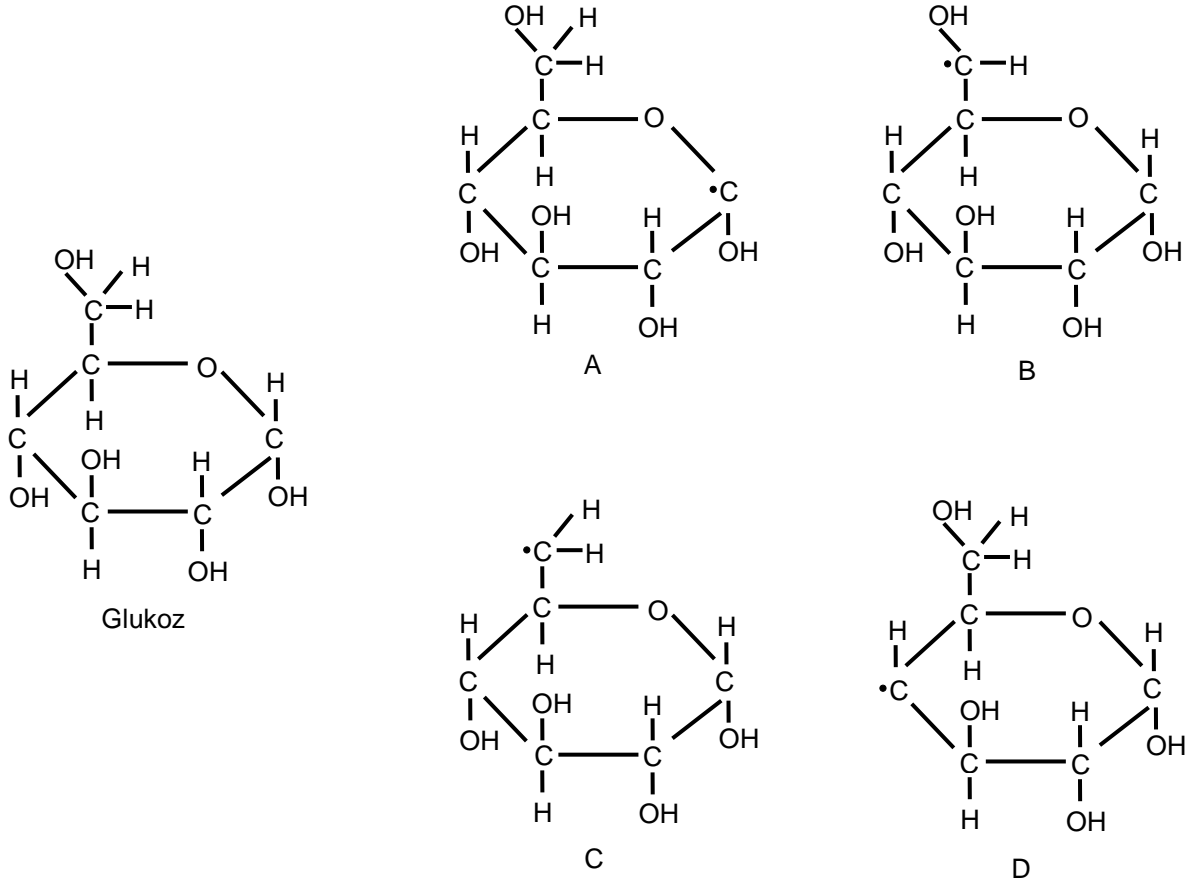


Şekil 3.14. 3 kGy doz değerinde ışınlanmış glukoz örneği ESR spektrumunda gözlenen  $I_2$  rezonans sinyal şiddetinin farklı tavlama sıcaklıklarında zamanla değişimi. (■) 310 K; (●) 320 K; (▲) 330 K; (▼) 340 K

### 3.1.7. ESR spektrum benzetişim çalışmaları

$^{60}\text{Co}$  gama kaynağında 3 kGy doz değerinde ışınlanmış glukoz örneğinin ESR spektrumu Şekil 3.1c' de verilmiştir. Simetrik yapıda olmayan ve çok sayıda rezonans sinyalinin bir toplamı gibi görünen bu spektruma kaynaklık eden kökçe veya kökçelerin belirlenmesi son derece zor görünmektedir. Glukozun moleküler yapısı Şekil 3.15' te verilmiş ve en sağdaki karbon atomu C1 olarak adlandırılmış, diğerleri de saat ibreleri yönünde gidilerek numaralandırılmıştır. Yamauchi ve ark. (1999) ışınlanmış glukozda, C1 karbonuna bağlı protonun, C6 karbonuna bağlı protonlardan birisinin ve C4 ile C6 karbonlarına bağlı OH hidroksil gruplarının kopmalarıyla anizotropik karakterde toplam dört farklı kökçe oluştuğunu bildirmişlerdir. Pauwels ve ark. (2004) ise, ışınlanmış glukozda C3 karbon atomuna bağlı proton ile C6 karbon atomuna bağlı protonlardan bir tanesinin kopmasıyla anizotropik karakterde iki farklı kökçe oluştuğunu bildirmişlerdir. Işınlanmış glukoz örneğinin Şekil 3.1c' de verilen ESR spektrumunun manyetik alana karşı şiddet değerleri, bu spektruma kaynaklık eden kökçelerin bağlı miktarlarının ve spektroskopik parametre değerlerinin belirlenmesi için, NIEHS (National Institute of Environmental Health Science) kurumsal web sayfasından

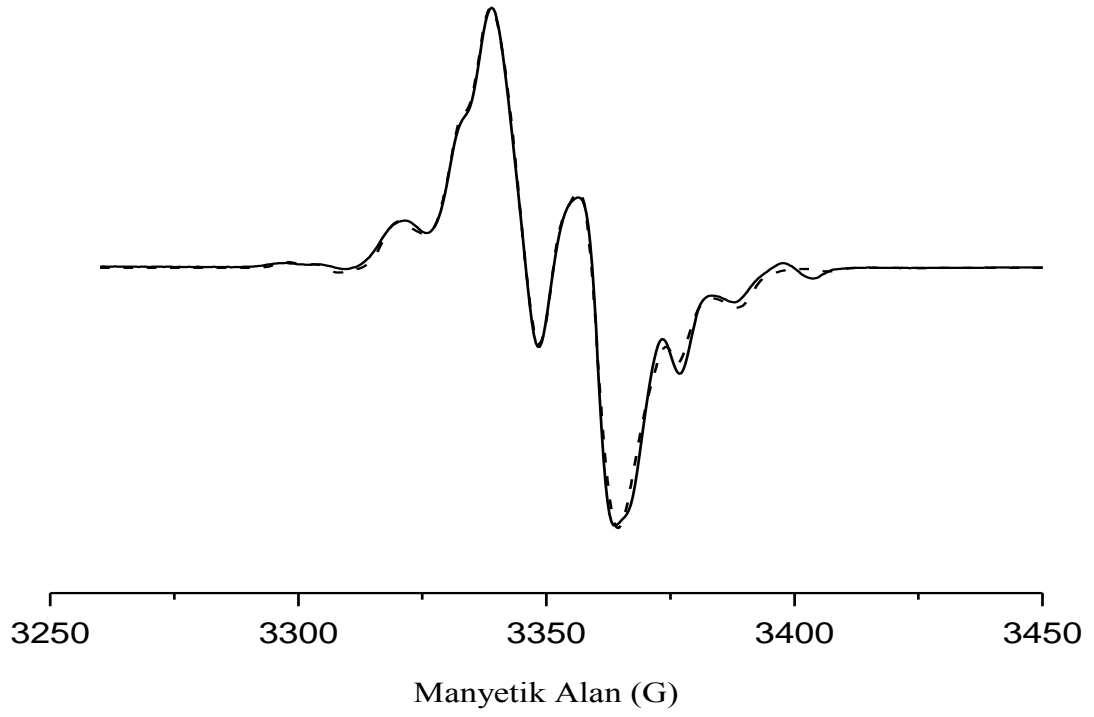
temin edilen "PowFit" simülasyon programında girdi olarak kullanıldı. Işınlanmış glukoz örneğinde, Yamauchi ve ark. (1999) önerileri doğrultusunda, anizotropik karakterde dört farklı kökçenin olduğu durum için oluşturulan modellerle yapılan benzetişim sonucunun, deneysel verilere çok daha uygun olduğu görülmüştür. Benzetişim için önerilen kökçelerin moleküler yapıları ve benzetişim sonucunda bu kökçeler için belirlenen spektroskopik parametre değerleri sırasıyla Şekil 3.15 ve Çizelge 3.2' de verilmiştir. Çizelge 3.2' de verilen parametre değerleri kullanılarak oluşturulan kuramsal spektrum ile deneysel karşı geliri ise Şekil 3.16' da verilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi deneysel spektrum ile kuramsal spektrum arasında iyi sayılabilecek bir uyum vardır.



Şekil 3.15. 3 kGy doz değerinde ışınlanmış glukoz örneği ESR spektrumunun benzetişimi için önerilen kökçeler.

Çizelge 3.2. 3 kGy doz değerinde ışınlanmış glukoz örneği ESR spektrumunun benzetimi için önerilen kökçeler ve benzetim sonucu hesaplanan spektroskopik parametre değerleri.

Kökçe	Bağıl şiddet	$g$ -çarpanı	Aşırı ince yapı (G)		Yarı-eğri genişliği (G)
A	85,2	$g_{xx} = 2,0044$ $g_{yy} = 2,0009$ $g_{zz} = 2,0041$	$A(H)_{xx} = 7,0$ $A(H)_{yy} = 24,3$ $A(H)_{zz} = 18,9$	$A(OH)_{xx} = 3,3$ $A(OH)_{yy} = 16,4$ $A(OH)_{zz} = 1,5$	6,3
B	11,5	$g_{xx} = 2,0072$ $g_{yy} = 2,0018$ $g_{zz} = 2,0025$	$A(H)_{xx} = 21,5$ $A(H)_{yy} = 36,6$ $A(H)_{zz} = 40,5$	$A(OH)_{xx} = 10,1$ $A(OH)_{yy} = 20,2$ $A(OH)_{zz} = 29,9$	5,3
C	1,9	$g_{xx} = 2,0060$ $g_{yy} = 2,0052$ $g_{zz} = 2,0038$	$A(H1)_{xx} = 25,5$ $A(H1)_{yy} = 40,0$ $A(H1)_{zz} = 54,9$	$A(H2)_{xx} = 37,4$ $A(H2)_{yy} = 48,1$ $A(H2)_{zz} = 54,4$	4,4
D	1,4	$g_{xx} = 2,0075$ $g_{yy} = 2,0017$ $g_{zz} = 2,0033$	$A(H)_{xx} = 25,8$ $A(H)_{yy} = 39,7$ $A(H)_{zz} = 47,1$		4,1

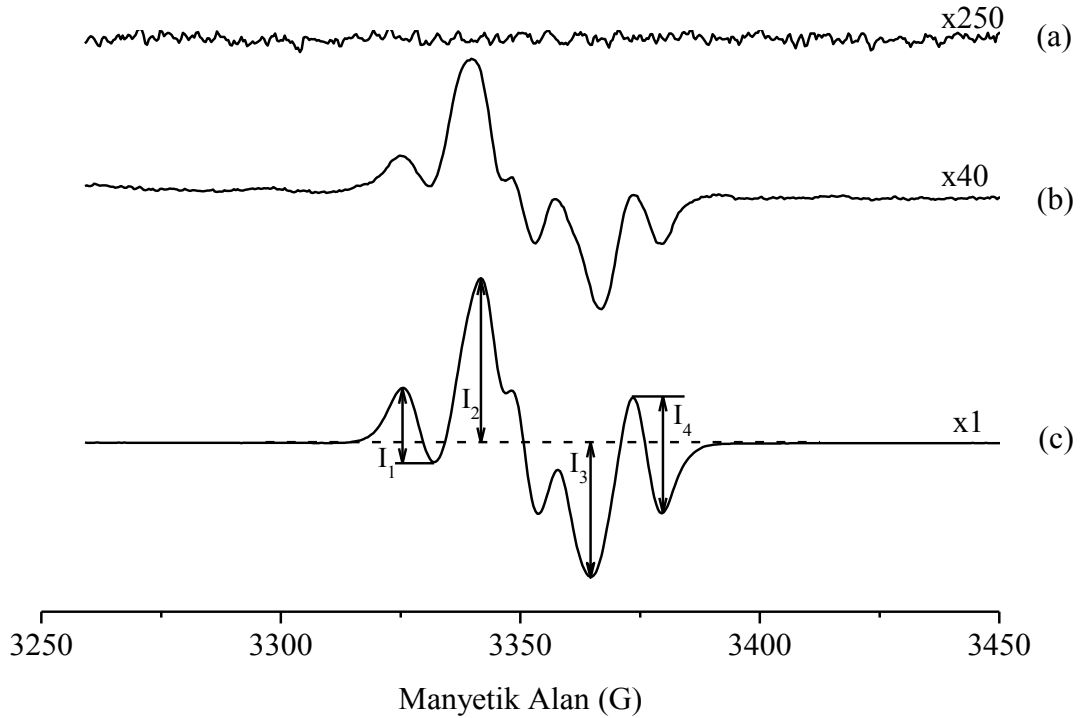


Şekil 3.16. 3 kGy doz değerinde ışınlanmış glukoz örneği ESR spektrumu ve benzetişim sonucu bulunan parametre değerleri kullanılarak hesaplanan kuramsal spektrum. [(—) Deneysel; (-----) Kuramsal].

## 3.2. Fraktoz

### 3.2.1. Işınlanmış ve ışınlanmamış fraktoz ESR spektrumları

Üzerinde herhangi bir işlemin yapılmadığı fraktoz örneğinin değişik spektrometre çalışma koşullarında ESR spektrumu kaydedilmiş ve anlamlı sayılabilecek herhangi bir sinyal vermediği görülmüştür. Türkiye Atom Enerjisi Kurumu (TAEK) Sarayköy Birimi' nde bulunan  $^{137}\text{Cs}$  ve  $^{60}\text{Co}$  gama kaynaklarında sırasıyla 50 Gy ve 3 kGy doz değerlerinde ışınlanmış fraktoz örneklerinin ESR spektrumlarının ise neredeyse simetrik sayılabilecek çok sayıda rezonans sinyalinden oluştuğu, ışınlama dozunun artırılması ile söz konusu rezonans sinyallerinin şiddetlerinde büyük artışlar olduğu ve spektrumdaki simetrimin bir miktar bozulduğu gözlenmiştir. Tam bir karşılaştırma yapılabilmesi için ışınlanmamış, 50 Gy ve 3 kGy doz değerlerinde ışınlanmış fraktoz örneklerinin, modülasyon genliğinin ve mikrodalga

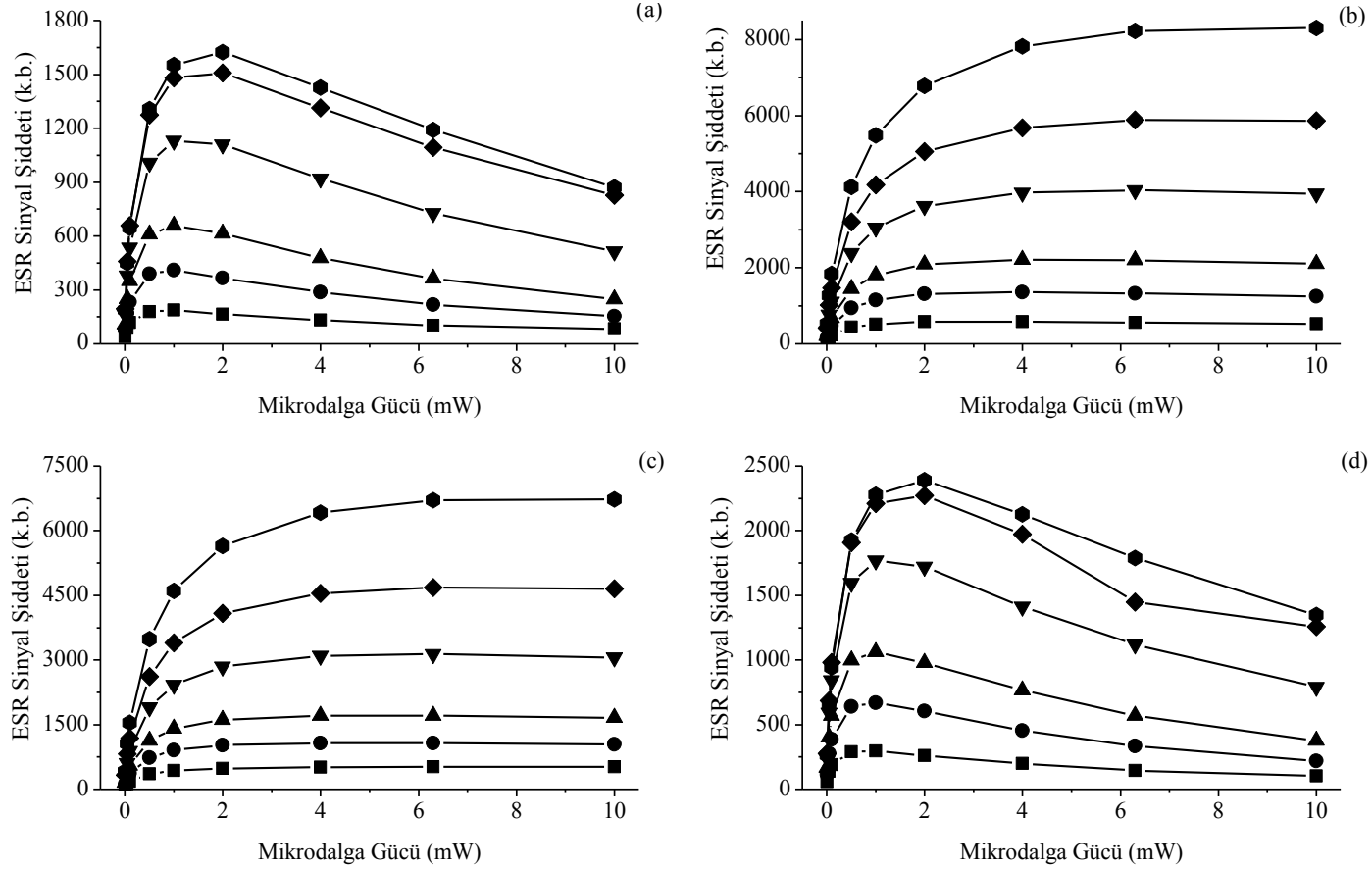


Şekil 3.17. Işınlanmamış ve ışınlanmış fraktoz örneği ESR spektrumları. (a) Işınlanmamış; (b)  $^{137}\text{Cs}$  gama kaynağında 50 Gy; (c)  $^{60}\text{Co}$  gama kaynağında 3 kGy doz değerinde ışınlanmış.

gücünün sırasıyla 5 G ve 1 mW olduğu spektrometre koşullarında kaydedilmiş ESR spektrumları sırasıyla Şekil 3.17a, b ve c' de verilmiştir. Çalışmanın bu bölümünde, yüksek modülasyon genliklerinde rezonans sinyallerinin daha şiddetli olacağı fikrinden yola çıkarak, rezonans sinyallerinin bozulmadan kalabildiği en yüksek modülasyon genliği olan 5 G değeri seçilmiştir. Işınlanmış fraktoz örneklerinde gözlenen rezonans sinyallerinin farklı kökçelerden kaynaklanabileceği fikrinden hareketle, yüksek mikrodalga güç değerlerinde çalışmak yerine 1 mW gibi düşük sayılabilecek bir mikrodalga güç değerinde çalışmanın uygun olacağı düşünülmüştür.

### **3.2.2. ESR sinyal şiddetinin modülasyon genliği ve mikrodalga gücü ile değişimi**

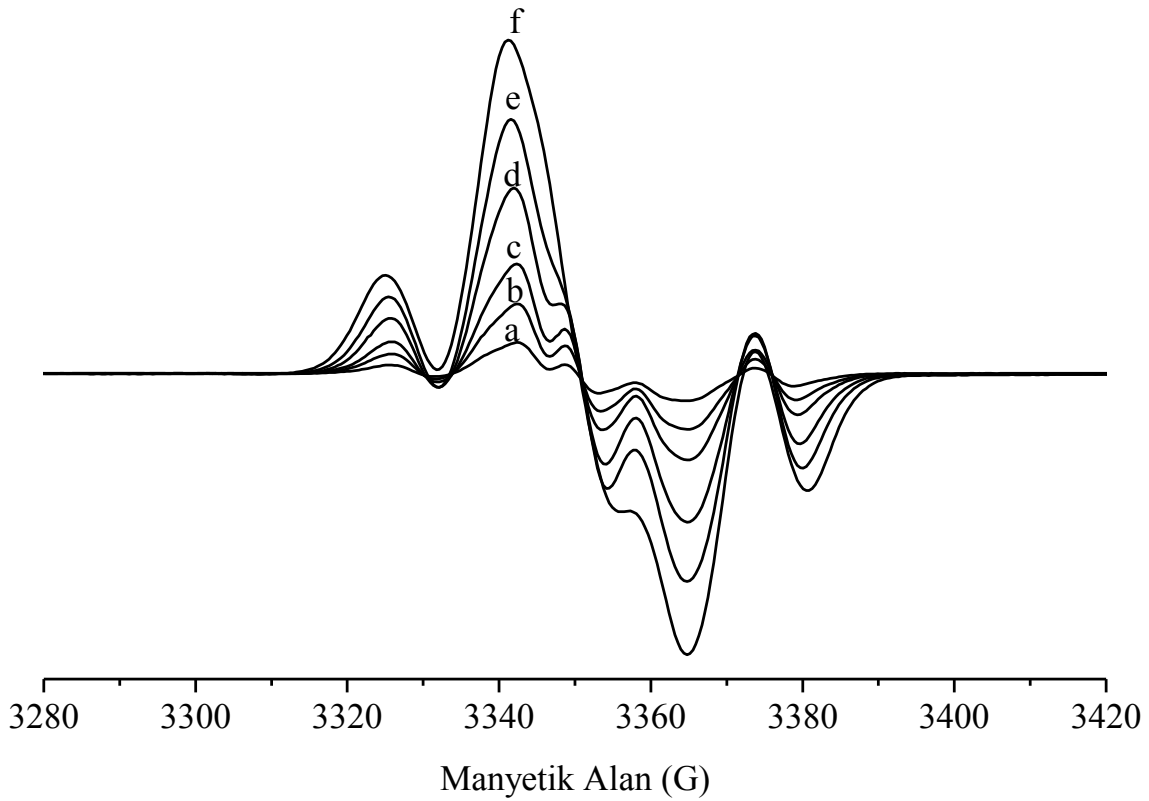
3 kGy doz değerinde ışınlanmış örnek spektrumu üzerinde işaretlenen  $I_1$ ,  $I_2$ ,  $I_3$  ve  $I_4$  rezonans sinyallerinin şiddetlerinin (Şekil 3.17c), uygulanan mikrodalga gücü ile nasıl değiştikleri farklı modülasyon genliklerinde incelenmiş ve söz konusu rezonans sinyallerinin hangi mikrodalga güç değerlerinde doyuma ulaştıkları belirlenmiştir. Bu amaca yönelik olarak, yine 3 kGy doz değerinde ışınlanmış fraktoz örneğinin farklı modülasyon genliklerindeki (1, 2, 3, 5, 7 ve 10 G) ESR spektrumları 0.01-10 mW aralığında farklı mikrodalga güç değerlerinde kaydedilmiştir. Kaydedilen spektrumlardan üzerinde incelemelerin yürütüldüğü  $I_1$ ,  $I_2$ ,  $I_3$  ve  $I_4$  rezonans sinyallerinin şiddetleri belirlenmiş ve farklı modülasyon genliklerinde, uygulanan mikrodalga gücü ile nasıl değiştiklerine bakılmıştır. İncelenen rezonans sinyallerinin bu yolla elde edilen mikrodalga doyum davranışları Şekil 3.18' de topluca verilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi, uygulanan tüm modülasyon genliklerinde  $I_2$  ve  $I_3$  rezonans sinyal şiddetleri yaklaşık 4 mW mikrodalga güç değerinin üzerinde doyuma ulaşmaktadır. Benzer mikrodalga doyum davranışı sergilemeleri nedeniyle, bu iki sinyale kaynaklık eden kökçe veya kökçelerin aynı türde olabilecekleri gözardı edilmemelidir. Buna karşın  $I_1$  ve  $I_4$  rezonans sinyal şiddetlerinin 1 mW mikrodalga güç değerine kadar hızlı bir şekilde arttığı, 1-2 mW aralığında yatay bir seyir izlediği ve daha yüksek mikrodalga güç değerlerine çıkıldığında ise belirgin bir şekilde azalmaya başladığı görülmektedir. Bu iki rezonans sinyalinin ( $I_1$  ve  $I_4$ ) benzer mikrodalga doyum



Şekil 3.18. 3 kGy doz değerinde ışınlanmış fraktoz örneğinde gözlenen rezonans sinyal şiddetlerinin ( $I_1$ ,  $I_2$ ,  $I_3$  ve  $I_4$ ) uygulanan mikrodalga gücü ve modülasyon genliği ile değişimleri. (a)  $I_1$ ; (b)  $I_2$ ; (c)  $I_3$  ve (d)  $I_4$ . [(■), 1 G; (●), 2 G; (▲), 3 G; (▼), 5 G; (◆), 7 G; (●), 10 G]

davranışı sergilemeleri,  $I_2$  ve  $I_3$  rezonans sinyallerinde olduğu gibi, aynı tür kökçe veya kökçelerden kaynaklanabilecekleri şüphesini doğurmaktadır.

Uygulanan modülasyon genliğinin, ışınlanmış fraktoz örneği ESR spektrumunun genel görünümünde meydana getirdiği değişiklikleri daha ayrıntılı bir şekilde görebilmek için, 3 kGy doz değerinde ışınlanmış fraktoz örneğinin mikrodalga gücünün 1 mW olduğu değişik modülasyon genliklerinde kaydedilmiş ESR spektrumları topluca Şekil 3.19' da verilmiştir. Modülasyon genliğinin arttırılması ile tüm rezonans sinyallerinin şiddetlerinin arttığı, ancak  $I_2$  ile  $I_3$  rezonans sinyalleri arasında bulunan ve düşük modülasyon genliklerinde belirgin olan sinyalin, büyük ölçüde  $I_2$  rezonans sinyali tarafından perdelendiği görülmüştür. Modülasyon genliğinin 1 G' dan 10 G' a çıkarılması ile  $I_1$  ve  $I_2$  sinyallerindeki şiddet artışının yaklaşık 10 kat olduğu,  $I_3$  ve  $I_4$  sinyallerindeki şiddet artışının ise yaklaşık 5 kat olduğu hesaplanmıştır. Bu farklılığın,  $I_3$  rezonans sinyalinin negatif kısmı ile  $I_4$



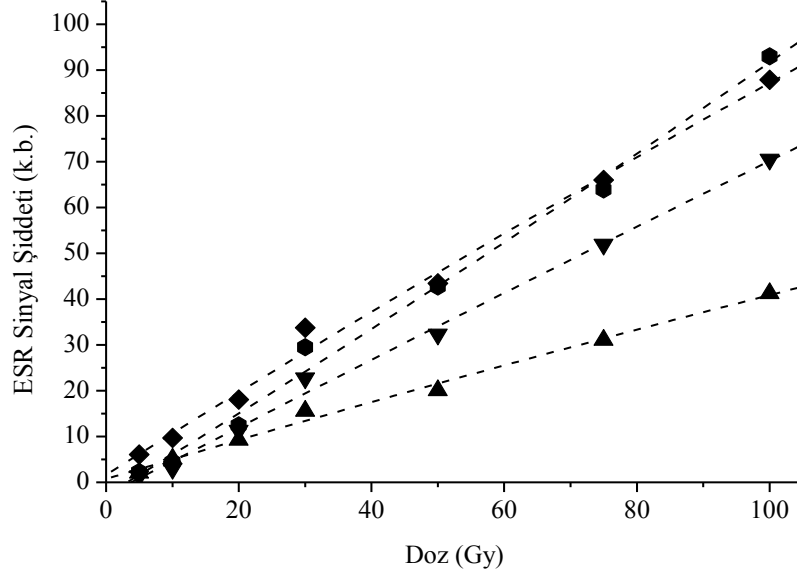
Şekil 3.19. 3 kGy doz değerinde ışınlanmış fraktoz örneğinin 1 mW mikrodalga gücü ve değişik modülasyon genliklerinde kaydedilmiş ESR spektrumları. [a, 1 G; b, 2 G; c, 3 G; d, 5 G; e, 7 G; f, 10 G]

rezonans sinyalinin pozitif kısmının kısmen üstüste bindiği ve bu nedenle birbirlerini perdelemiş olabileceklerinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Mikrodalga gücünün 4 mW ve modülasyon genliğinin 10 G seçilmesi durumunda, özellikle  $I_2$  rezonans sinyalinin şiddetinde yapay olarak önemli bir artışın sağlanabileceği ve böylece, bu çalışmadaki en düşük ışınlama dozu olan 5 Gy' in altındaki radyasyon dozlarının da algılanabileceği sonucuna varılmıştır.

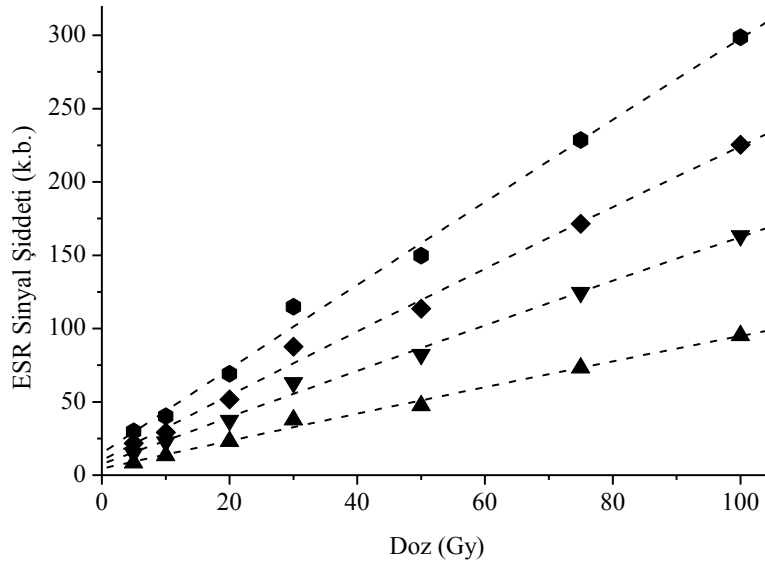
### 3.2.3. Doz-cevap eğrileri

Herhangi bir işlemde geçmemiş fraktoz örnekleri, glukoz örneklerinde olduğu gibi TAEK' nda bulunan  $^{137}\text{Cs}$  ve  $^{60}\text{Co}$  gama kaynaklarında 5-100 Gy ve 0.1-5 kGy aralıklarında farklı doz değerlerinde ışınlanmıştır. Düşük dozlarda (5-100 Gy) ışınlanan fraktoz örneklerinin ESR spektrumları 1 mW mikrodalga gücünde ve 3-10 G aralığında değişen dört farklı modülasyon genliğinde, orta doz bölgesinde (0.1-5 kGy) ışınlanan fraktoz örneklerinin ESR spektrumları ise 1-10 G aralığında değişen altı farklı modülasyon genliğinde aynı spektrometre çalışma koşullarında kaydedilmiştir. Kaydedilen ESR spektrumlarından, üzerinde incelemelerin yürütüldüğü  $I_1$ ,  $I_2$ ,  $I_3$  ve  $I_4$  rezonans sinyallerinin şiddetleri ölçülerek örnek kütlelerine göre normalize edilmiş ve ışınlama dozuna bağlı değişimleri düşük doz bölgesi için sırasıyla Şekil 3.20, 3.21, 3.22 ve 3.23' de verilmiştir. Bu yolla oluşturulan doz-cevap eğrilerini betimleyebilecek en uygun matematiksel fonksiyonun belirlenmesi amacıyla, glukoz örneği doz-cevap eğrilerinin benzetişimi için önerilen matematiksel fonksiyonlar fraktoz örneğinde gözlenen rezonans sinyallerine ait doz-cevap eğrilerinin benzetişiminde de kullanılmıştır. Yapılan benzetişim çalışmaları sonucunda, düşük doz bölgesinde  $I_1$ ,  $I_2$ ,  $I_3$  ve  $I_4$  rezonans sinyallerine ait doz-cevap eğrilerinin en iyi ikinci dereceden polinomla ifade edilebileceği görülmüştür. İncelenen rezonans sinyalleri için, farklı modülasyon genliklerinde oluşturulan doz-cevap eğrilerinin benzetişimi sonucu bulunan parametre değerleri Çizelge 3.3' de birarada verilmiştir. Bu parametre değerleri kullanılarak hesaplanan kuramsal doz-cevap eğrileri de düşük doz bölgesi için Şekil 3.20, 3.21, 3.22 ve 3.23' de kesikli çizgilerle gösterilmiştir. Benzer işlemler orta doz bölgesinde ışınlanmış fraktoz örnekleri için de tekrarlanmış ve  $I_1$ ,  $I_2$ ,  $I_3$  ve  $I_4$  rezonans sinyalleri için farklı modülasyon genliklerinde oluşturulan deneysel doz-cevap eğrileri sırasıyla Şekil 3.24, 3.25, 3.26 ve 3.27' de verilmiştir. İkinci dereceden polinom fonksiyonu kullanılarak yapılan benzetişim işlemleri sonucu bulunan parametre değerleri yine Çizelge 3.3' de verilmiş ve bu parametre değerleri

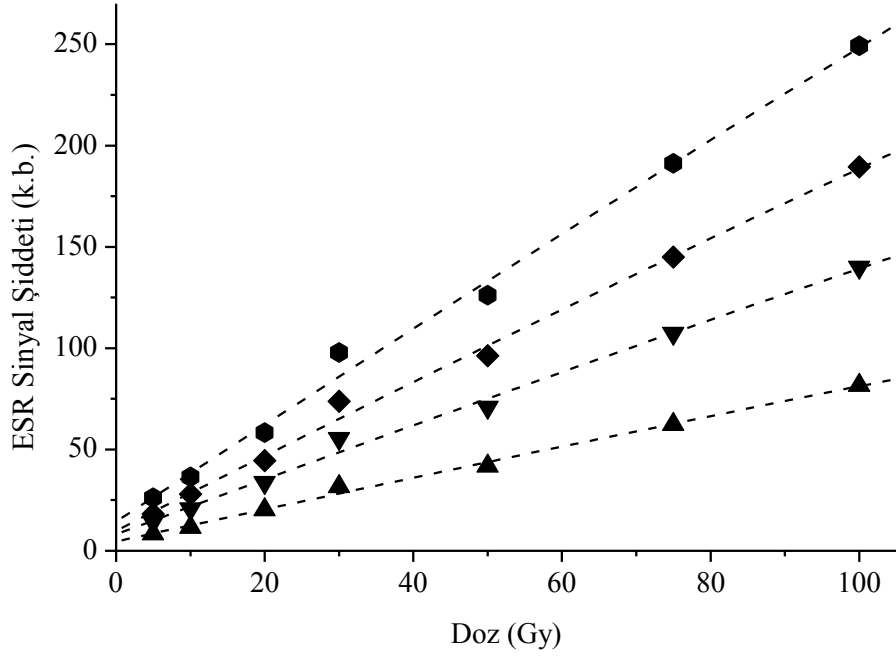
kullanılarak hesaplanan kuramsal doz-cevap eğrileri de Şekil 3.24, 3.25, 3.26 ve 3.27’ de kesikli çizgilerle temsil edilmiştir. Fraktoz örneğinin radyasyon verimi, 3.1 eşitliği ile verilen bağıntı kullanılarak  $G_{FR} = 1.46$  olarak hesaplanmıştır.



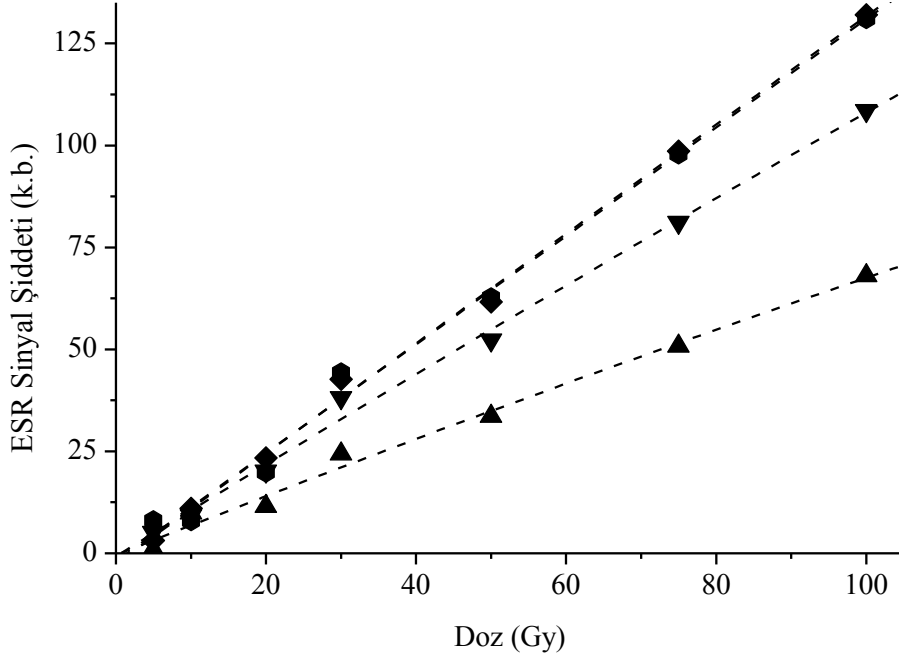
Şekil 3.20. Düşük doz bölgesinde ışınlanmış fraktoz örneği ESR spektrumunda gözlenen  $I_1$  sinyali için 1 mW mikrodalga gücünde ve farklı modülasyon genliklerindeki doz-cevap eğrileri (Sembol, Deneysel; -----, Kuramsal). [ (▲), 3 G; (▼), 5 G; (◆), 7 G; (●), 10 G]



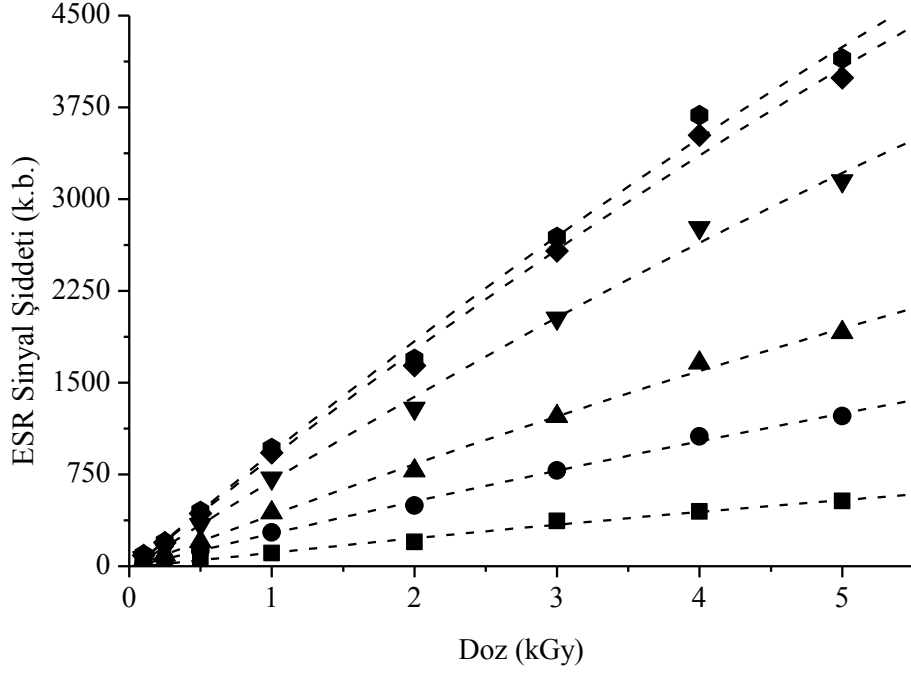
Şekil 3.21. Düşük doz bölgesinde ışınlanmış fraktoz örneği ESR spektrumunda gözlenen  $I_2$  sinyali için 1 mW mikrodalga gücünde ve farklı modülasyon genliklerindeki doz-cevap eğrileri (Sembol, Deneysel; -----, Kuramsal). [ (▲), 3 G; (▼), 5 G; (◆), 7 G; (●), 10 G]



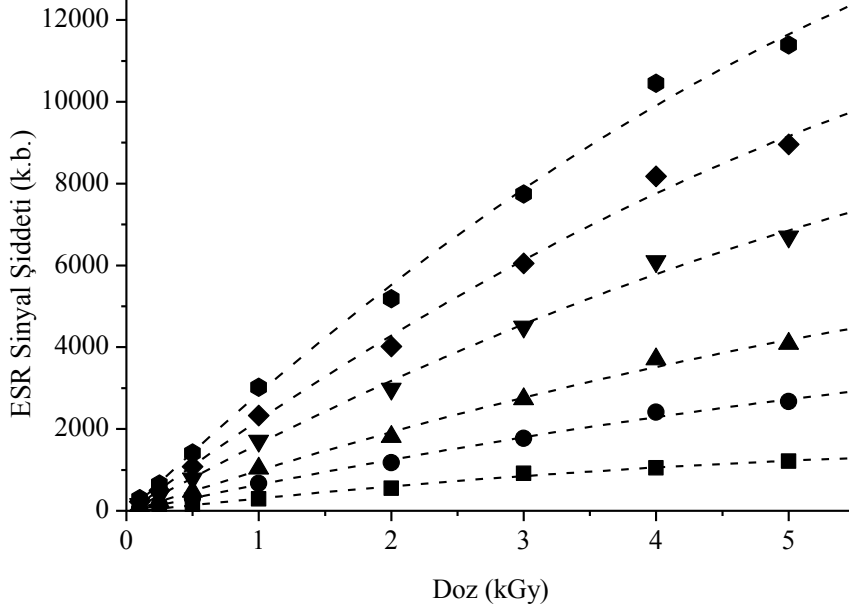
Şekil 3.22. Düşük doz bölgesinde ışınlanmış fraktoz örneği ESR spektrumunda gözlenen  $I_3$  sinyali için 1 mW mikrodalga gücünde ve farklı modülasyon genliklerindeki doz-cevap eğrileri (Sembol, Deneysel; -----, Kuramsal).  
 [ (▲), 3 G; (▼), 5 G; (◆), 7 G; (●), 10 G ]



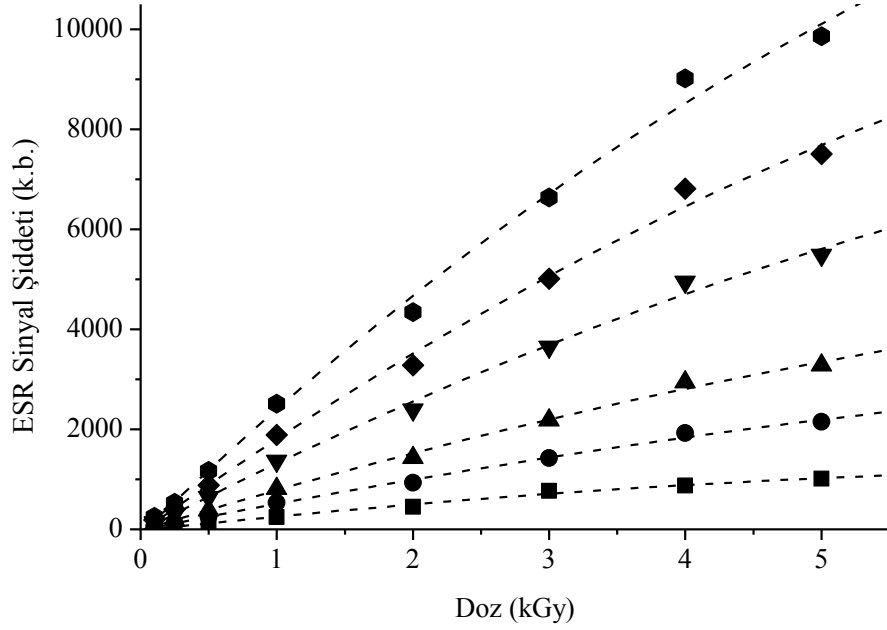
Şekil 3.23. Düşük doz bölgesinde ışınlanmış fraktoz örneği ESR spektrumunda gözlenen  $I_4$  sinyali için 1 mW mikrodalga gücünde ve farklı modülasyon genliklerindeki doz-cevap eğrileri (Sembol, Deneysel; -----, Kuramsal).  
 [ (▲), 3 G; (▼), 5 G; (◆), 7 G; (●), 10 G ]



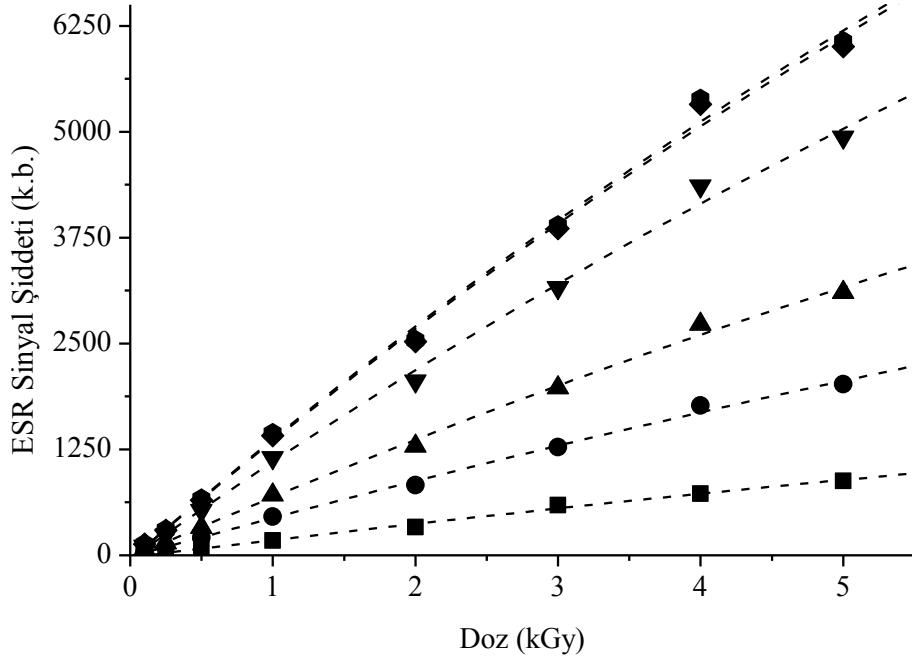
Şekil 3.24. Orta doz bölgesinde ışınlanmış fraktoz örneği ESR spektrumunda gözlenen  $I_1$  sinyali için 1 mW mikrodalga gücünde ve farklı modülasyon genliklerindeki doz-cevap eğrileri (Sembol, Deneysel; -----, Kuramsal). [(■), 1 G; (●), 2 G; (▲), 3 G; (▼), 5 G; (◆), 7 G; (⬢), 10 G]



Şekil 3.25. Orta doz bölgesinde ışınlanmış fraktoz örneği ESR spektrumunda gözlenen  $I_2$  sinyali için 1 mW mikrodalga gücünde ve farklı modülasyon genliklerindeki doz-cevap eğrileri (Sembol, Deneysel; -----, Kuramsal). [(■) 1 G; (●) 2 G; (▲) 3 G; (▼) 5 G; (◆) 7 G; (⬢) 10 G]



Şekil 3.26. Orta doz bölgesinde ışınlanmış fraktoz örneği ESR spektrumunda gözlenen  $I_3$  sinyali için 1 mW mikrodalga gücünde ve farklı modülasyon genliklerindeki doz-cevap eğrileri (Sembol, Deneysel; -----, Kuramsal). [(■) 1 G; (●) 2 G; (▲) 3 G; (▼) 5 G; (◆) 7 G; (⬢) 10 G]



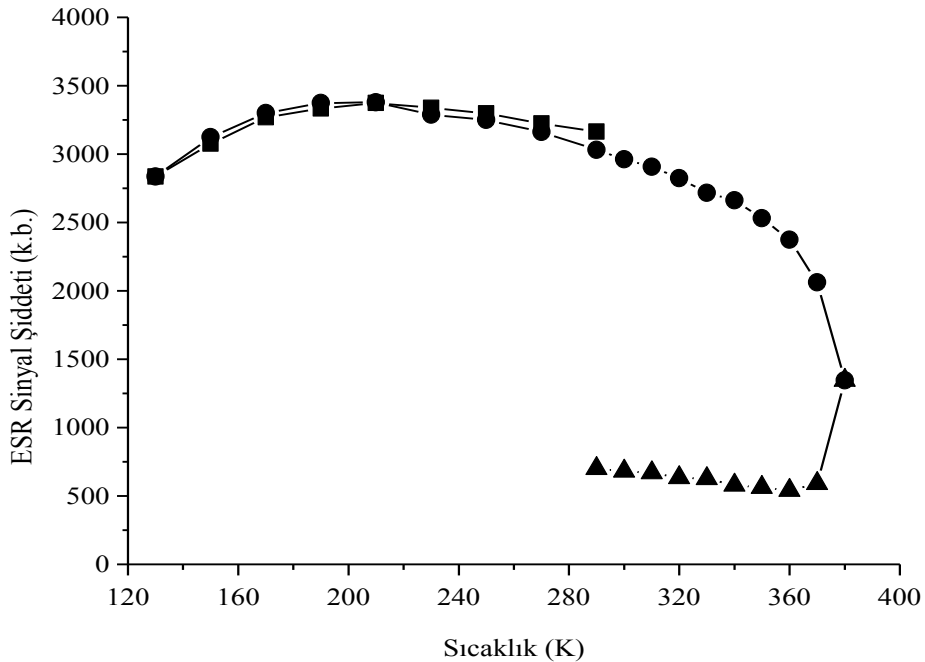
Şekil 3.27. Orta doz bölgesinde ışınlanmış fraktoz örneği ESR spektrumunda gözlenen  $I_4$  sinyali için 1 mW mikrodalga gücünde ve farklı modülasyon genliklerindeki doz-cevap eğrileri (Sembol, Deneysel; -----, Kuramsal). [(■) 1 G; (●) 2 G; (▲) 3 G; (▼) 5 G; (◆) 7 G; (⬢) 10 G]

Çizelge 3.3. Düşük doz bölgesinde ışınlanmış fraktoz örneği için farklı modülasyon genliklerinde oluşturulmuş doz-cevap eğrilerinin benzetişimi sonucu hesaplanan parametre değerleri.

Sinyal	Parametreler									
	Düşük Bölge					Orta Bölge				
	Mod. Gen. (G)	a	b	c	r <sup>2</sup>	Mod. Gen. (G)	a	b	c	r <sup>2</sup>
I <sub>1</sub>						1	-14	128	-3,3	0,9933
						2	-11	282	-6,2	0,9977
	3	0,7	0,4	-2x10 <sup>-4</sup>	0,9935	3	-17	446	-10,9	0,9976
	5	-2,8	0,7	-1x10 <sup>-4</sup>	0,9955	5	-27	745	-19,3	0,9971
	7	1,6	0,9	-5x10 <sup>-4</sup>	0,9931	7	-35	951	-25,8	0,9968
	10	-2,8	0,8	6 x10 <sup>-4</sup>	0,9928	10	-39	993	-27,3	0,9961
I <sub>2</sub>						1	-36	359	-21,6	0,9949
						2	-28	694	-28,6	0,9967
	3	4,4	1,0	-5x10 <sup>-4</sup>	0,9935	3	-43	1075	-46,3	0,9964
	5	7,4	1,6	-6x10 <sup>-4</sup>	0,9953	5	-62	1778	-78,9	0,9964
	7	10,1	2,2	-9x10 <sup>-4</sup>	0,9946	7	-74	2401	-110,9	0,9963
	10	14,8	2,9	-7x10 <sup>-4</sup>	0,9953	10	-82	3106	-151,8	0,9962
I <sub>3</sub>						1	-26	297	-17,5	0,9935
						2	-15	546	-20,9	0,9970
	3	4,6	0,8	-3x10 <sup>-4</sup>	0,9962	3	-23	839	-32,9	0,9969
	5	8,0	1,4	-5x10 <sup>-4</sup>	0,9947	5	-39	1411	-56,1	0,9965
	7	10,0	1,9	-7x10 <sup>-4</sup>	0,9955	7	-62	1948	-79,7	0,9961
	10	14,3	2,4	-6x10 <sup>-4</sup>	0,9950	10	-89	2607	-113,4	0,9957
I <sub>4</sub>						1	-24	207	-4,8	0,9957
						2	-20	470	-10,8	0,9972
	3	-0,43	0,7	-5,2x10 <sup>-4</sup>	0,9902	3	-28	734	-19,3	0,9972
	5	-0,75	1,1	-4,8x10 <sup>-4</sup>	0,9956	5	-42	1180	-32,8	0,9970
	7	-2,70	1,4	-1,5x10 <sup>-4</sup>	0,9974	7	-51	1449	-42,7	0,9968
	10	-2,02	1,3	-1,6x10 <sup>-4</sup>	0,9934	10	48	1460	-42,3	0,9966

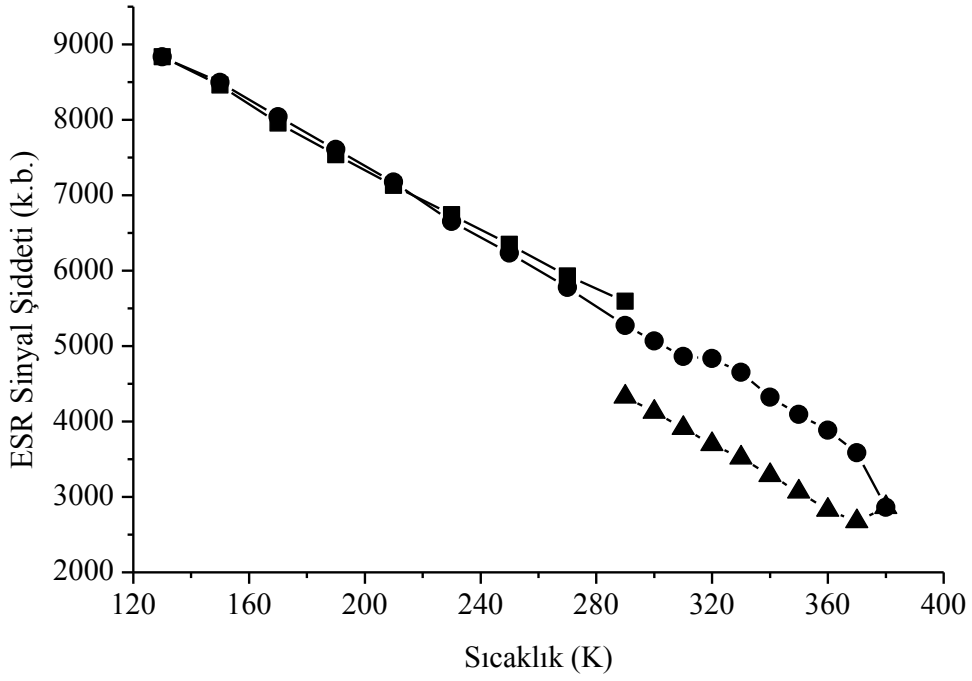
### 3.2.4. ESR sinyal şiddetinin sıcaklıkla değişimi

Işınlanmış fraktoz örneği ESR spektrumunda gözlenen rezonans sinyal şiddetlerinin sıcaklıkla nasıl değiştiklerini belirlemek amacıyla 3 kGy' lik doz değerinde ışınlanmış bir örnek, daha önceden herhangi bir ESR sinyali vermediği test edilmiş bir tüpe konarak kaviteye yerleştirildi. Örnek sıcaklığı önce 290 K' den 130 K' e kadar 20 K adımlarla düşürüldü, buradan tekrar aynı adımlarla 290 K' e kadar artırıldı. Daha sonra, örnek sıcaklığı 10 K adımlarla 380 K' e kadar arttırılmış ve buradan aynı adımlarla tekrar oda sıcaklığına kadar düşürülmüştür. Oda sıcaklığının üzerindeki sıcaklıklarda örnek içerisindeki moleküler hareketliliğin artabileceği, böylece kökçe sönümlerinin hızlanabileceği düşünülmüş ve bu nedenle, sinyal şiddeti değişimindeki ayrıntıyı gözden kaçırmamak için, oda sıcaklığının üzerindeki sıcaklık değiştirme adımı 10 K' e düşürülmüştür. 130-380 K aralığındaki bu çevrimde, her sıcaklık adımında ışınlanmış fraktoz örneğinin mikrodalga gücü ve modülasyon genliğinin sırasıyla 0.1 mW ve 2 G olduğu spektrometre çalışma koşullarında ESR spektrumları kaydedilmiştir. Kaydedilen bu spektrumlardan  $I_1$ ,  $I_2$ ,  $I_3$  ve  $I_4$  rezonans sinyallerinin şiddetleri ölçülmüş ve sıcaklığa bağlı değişimleri sırasıyla Şekil 3.28, 3.29, 3.30 ve 3.31' de verilmiştir.

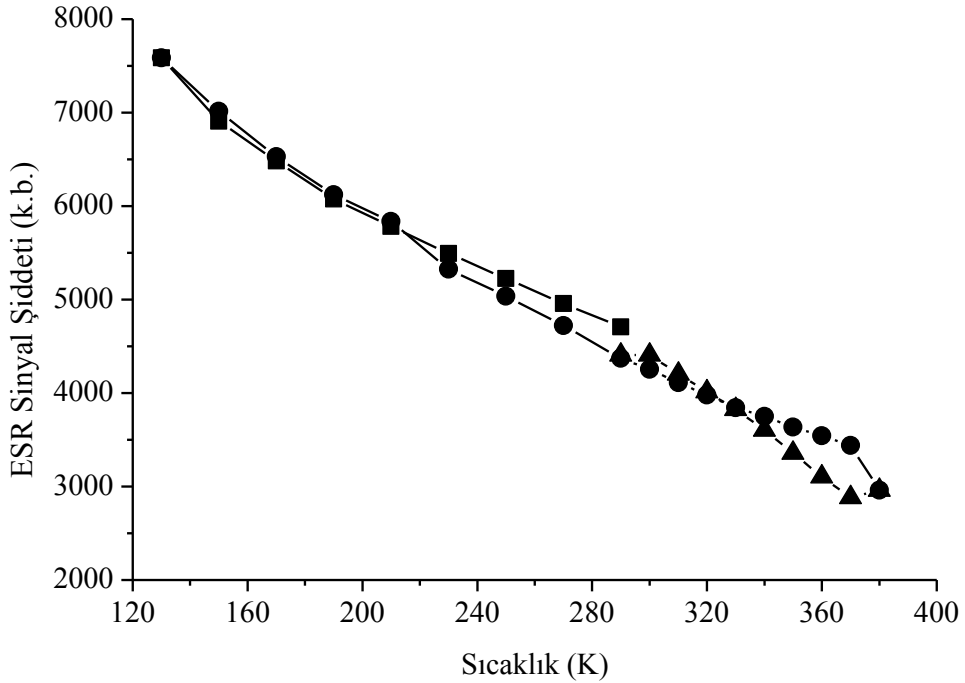


Şekil 3.28. 3 kGy doz değerinde ışınlanmış fraktoz örneği ESR spektrumunda gözlenen  $I_1$  rezonans sinyal şiddetinin sıcaklıkla değişimi.

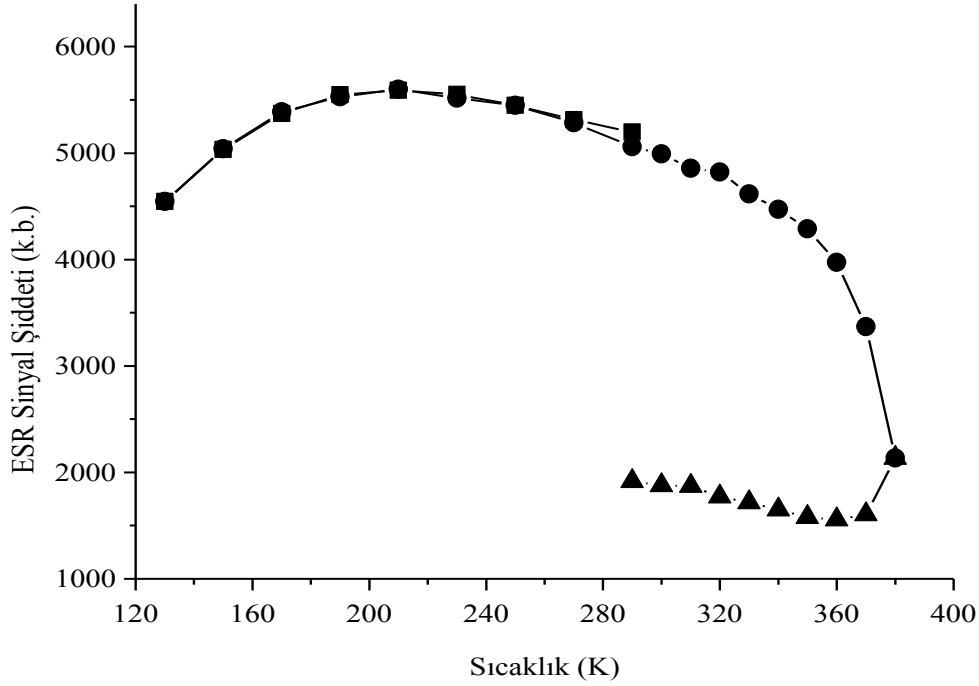
(■) 290K → 130K; (●) 130K → 380K; (▲) 380K → 290K



Şekil 3.29. 3 kGy doz değerinde ışınlanmış fraktoz örneği ESR spektrumunda gözlenen I<sub>2</sub> rezonans sinyal şiddetinin sıcaklıkla değişimi.  
 (■) 290K → 130K; (●) 130K → 380K; (▲) 380K → 290K



Şekil 3.30. 3 kGy doz değerinde ışınlanmış fraktoz örneği ESR spektrumunda gözlenen I<sub>3</sub> rezonans sinyal şiddetinin sıcaklıkla değişimi.  
 (■) 290K → 130K; (●) 130K → 380K; (▲) 380K → 290K



Şekil 3.31. 3 kGy doz değerinde ışınlanmış fraktoz örneği ESR spektrumunda gözlenen  $I_4$  rezonans sinyal şiddetinin sıcaklıkla değişimi.

(■) 290K → 130K; (●) 130K → 380K; (▲) 380K → 290K

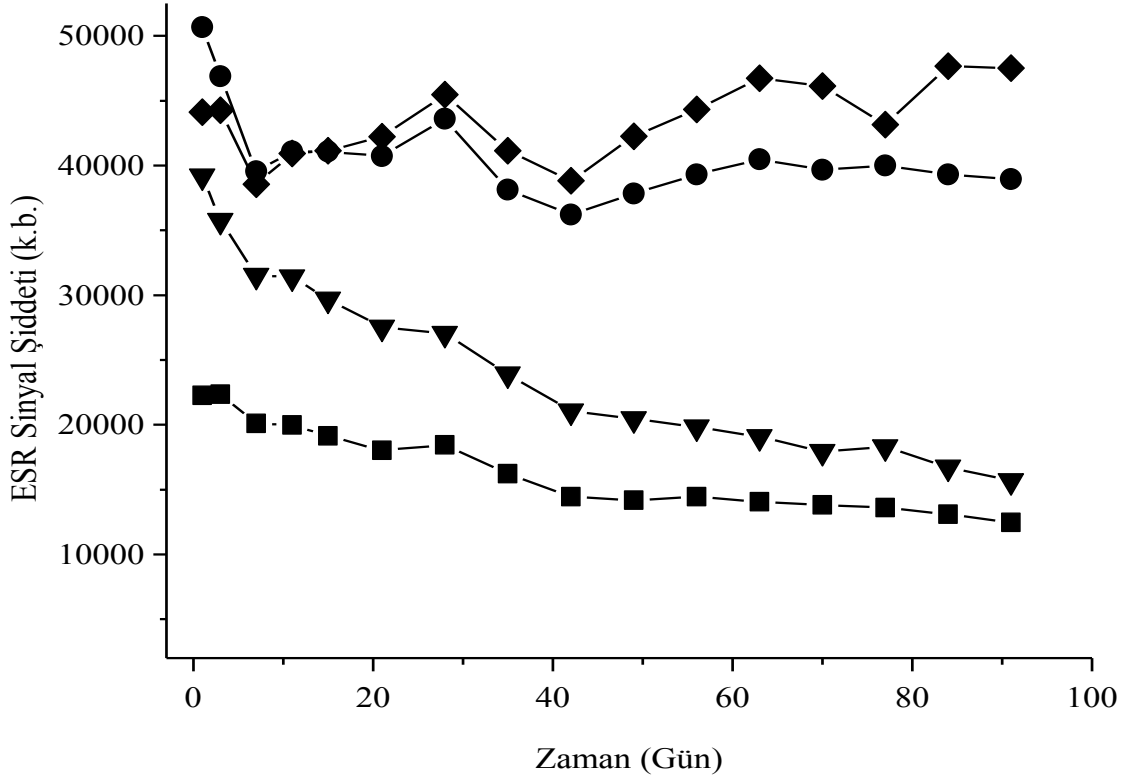
Örnek sıcaklığın 290 K' den 130 K' e düşürülmesiyle,  $I_1$  ve  $I_4$  rezonans sinyal şiddetlerinin 210 K sıcaklığına kadar çok yavaş bir şekilde arttığı gözlenmiştir. Ancak, sıcaklığın daha da düşürülmesi ile bu sinyallerin şiddetlerinde bir azalma gözlenmiş ve hatta bu azalmanın 170 K' in aşağılarında daha da hızlandığı görülmüştür. Bunun yanında, sıcaklığın düşürülmesiyle  $I_2$  ve  $I_3$  rezonans sinyal şiddetlerinde çok daha belirgin bir artış gözlenmiş ve herhangi bir azalma eğilimine rastlanmamıştır. Sıcaklığın 130 K' den tekrar 290 K' e çıkarılması ile incelenen tüm rezonans sinyal şiddetlerinin aynı yolu izleyerek yaklaşık olarak başlangıçtaki değerlerine ulaştıkları görülmektedir. Paramanyetik sistemlerde, sıcaklığın düşürülmesiyle sinyal şiddetinin klasik paramanyetizmaya uygun olarak bir artış eğiliminde olması beklenir.  $I_2$  ve  $I_3$  rezonans sinyallerine kaynaklık eden kökçe veya kökçelerin klasik paramanyetizmaya uygun bir davranış sergiledikleri kolayca görülebilir. Ancak  $I_1$  ve  $I_4$  rezonans sinyalleri için durum daha karmaşıktır. Bilindiği gibi, düşük sıcaklıklarda mikrodalga-doyum durumu çok daha düşük mikrodalga güç değerlerinde oluşur. Bu nedenle, doyum durumunun olumsuz etkileri düşünülerek çok daha düşük mikrodalga güç değerlerinde çalışmak uygundur. Çalışmanın bu kesiminde kullanılan 0.1 mW' lık mikrodalga güç değerinin, düşük sıcaklıklarda  $I_1$  ve  $I_4$  rezonans sinyallerini olumsuz

etkilediği ancak,  $I_2$  ve  $I_3$  rezonans sinyallerine olumsuz herhangi bir etkiye bulunmadığı düşünülmektedir. Bu durum,  $I_1$  ve  $I_4$  sinyallerine kaynaklık eden kökçelerle,  $I_2$  ve  $I_3$  sinyallerine kaynaklık eden kökçelerin farklı karakterlerde olduklarının bir başka göstergesidir.

Sıcaklığın 290 K' den 380 K' e doğru artırılması ile, tüm rezonans sinyal şiddetlerinin, beklendiği gibi, azalma eğilimine girdiği ve bu azalmanın geri dönüşümlü olmadığı görülmüştür. Rezonans sinyal şiddetlerinde gözlenen bu davranış, yüksek sıcaklıklarda örnek içerisindeki moleküler hareketliliğin artması sonucunda kökçelerin kendi aralarındaki ve çevreleri ile olan etkileşimleri sonucunda ESR' ye duyarlı olmayan birimlere dönüştükleri şeklinde yorumlanabilir. Sıcaklığın tekrar 290 K' e doğru düşürülmesiyle de yüksek sıcaklıklarda meydana gelen kökçe sönümleri nedeniyle rezonans sinyal şiddetlerinin başlangıçtaki değerlerine ulaşamadıkları gözlenmiştir. Ancak, en fazla kaybın  $I_1$  ve  $I_4$  rezonans sinyal şiddetlerinde olduğu ve her ikisinin de tamamen benzer bir davranış sergilemeleri, bunların aynı orijinli olduklarını göstermektedir. Aynı yorum,  $I_2$  ve  $I_3$  rezonans sinyalleri için de yapılabilir. 130-380 K sıcaklık çevriminin sonunda,  $I_1$  ve  $I_4$  rezonans sinyal şiddetlerindeki kayıpların sırasıyla % 78 ve % 63,  $I_2$  ve  $I_3$  rezonans sinyallerindeki kayıpların ise sırasıyla % 23 ve % 7 civarında olduğu görülmüştür. Sinyal şiddetlerindeki kayıp miktarları göz önüne alındığında, bu sinyallere kaynaklık eden kökçe veya kökçelerin sıcaklığa karşı son derece duyarlı oldukları söylenebilir. Bu sonuçlar,  $I_1$  ve  $I_4$  rezonans sinyallerine kaynaklık eden kökçelerin sıcaklığa karşı çok duyarlı olduklarını göstermektedir. Bu nedenle,  $I_1$  ve  $I_4$  rezonans sinyallerinin doz ölçümünde kullanılmaları uygun görünmemektedir. Buna karşılık,  $I_2$  ve özellikle de  $I_3$  rezonans sinyallerine kaynaklık eden kökçeler sıcaklığa karşı oldukça dirençlidirler. Dolayısıyla doz ölçümünde kullanılabilecekleri düşünülebilir.

### 3.2.5. ESR sinyal şiddetinin zamanla değişimi

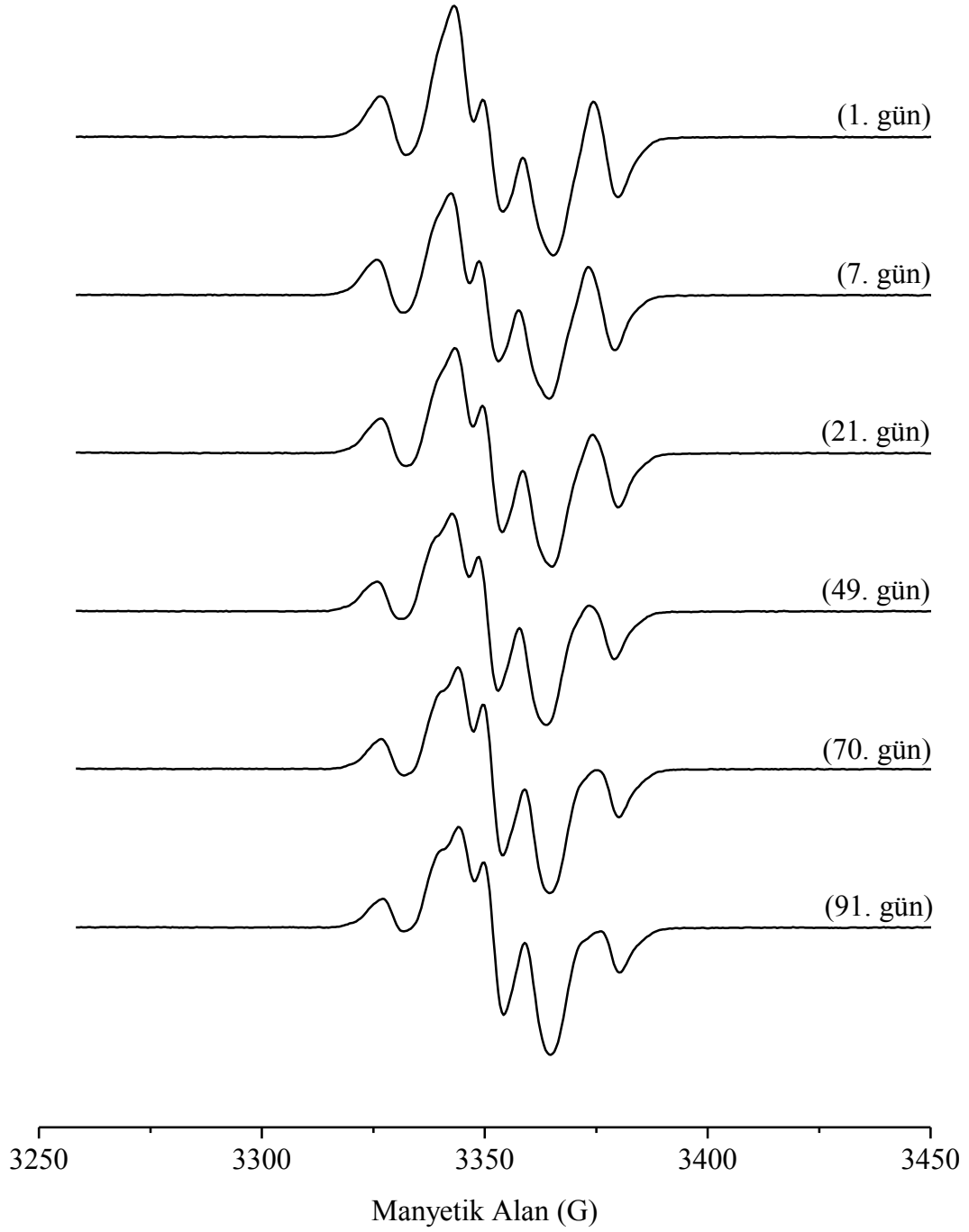
Işınlanmış fraktoz örneği ESR spektrumuna kaynaklık eden kökçe veya kökçelerin zaman içerisindeki kararlılıkları dozimetrik açıdan son derece önemlidir. Bu amaca yönelik olarak, 3 kGy' lik bir doz değerinde ışınlanmış fraktoz örneği pyreks tüp içerisinde havaya açık bir ortamda bekletilmiş ve üç ay boyunca aynı spektrometre çalışma koşullarında belirli zaman aralıklarında ESR spektrumu kaydedilmiştir. Kaydedilen bu spektrumlardan, üzerinde incelemelerin yürütüldüğü  $I_1$ ,  $I_2$ ,  $I_3$  ve  $I_4$  rezonans sinyallerinin şiddetleri ölçülmüş ve zamanla nasıl değiştikleri Şekil 3.32' de topluca verilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi, ışınlamayı takip eden ilk 10 gün içerisinde tüm rezonans sinyallerinde belirgin bir düşüş vardır. Bu düşüşün,  $I_1$  ve  $I_4$  rezonans sinyallerinde üç ay boyunca devam ettiği ancak,  $I_2$  ve  $I_3$  rezonans sinyallerinin şiddetlerinde belirgin dalgalanmalar olduğu görülmektedir. Bunun,  $I_2$  ve  $I_3$  rezonans sinyallerine komşuluk eden ve özellikle de bunların arasında bulunan sinyal veya sinyallerden kaynaklanabileceği düşünülmektedir.  $I_1$  ve  $I_4$  rezonans sinyal şiddetlerinde herhangi bir dalgalanmanın gözlenmemesi,  $I_2$  ve  $I_3$  rezonans sinyal şiddetlerinde gözlenen dalgalanmanın örneğin kaviteye yerleştirilmesi veya spektrometrenin ayarlanmasından kaynaklanmadığını göstermektedir.  $I_1$  ve  $I_4$  rezonans sinyal şiddetlerinde herhangi bir dalgalanmaya sebep olabilecek komşu sinyal veya sinyaller olmadığından, bu sinyallerin sönümlerinde olağandışı bir davranış gözlenmemiştir. Işınlanmış fraktoz örneği ESR spektrumunun genel görünüşünde ne gibi değişimlerin olduğunu tam olarak ortaya koymak için, aynı örneğin farklı zamanlarda ancak, aynı spektrometre çalışma koşullarında kaydedilmiş spektrumları Şekil 3.33' de birarada verilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi, özellikle  $I_2$  rezonans sinyal şiddetindeki dalgalanmanın aynı manyetik alan değerinde ortaya çıkan başka bir sinyalden ve kısmen de yukarıda sözü edilen sağındaki sinyalden kaynaklandığı görülebilir. Işınlanmamış fraktoz örneğinin herhangi bir ESR sinyali vermediği göz önüne alındığında, ışınlanmış örneklerde gözlenen rezonans sinyallerinin oda sıcaklığında üç aydan daha uzun sürelerde bile varlıklarını korumaları dozimetrik açıdan ümit verici bir sonuç olarak değerlendirilmektedir.



Şekil 3.32. 3 kGy doz değerinde ışınlanmış fraktoz örneğinde gözlenen I<sub>1</sub>, I<sub>2</sub>, I<sub>3</sub> ve I<sub>4</sub> rezonans sinyal şiddetlerinin zamanla değişimi. [(■), I<sub>1</sub>; (●), I<sub>2</sub>; (◆), I<sub>3</sub>; (▼) I<sub>4</sub>]

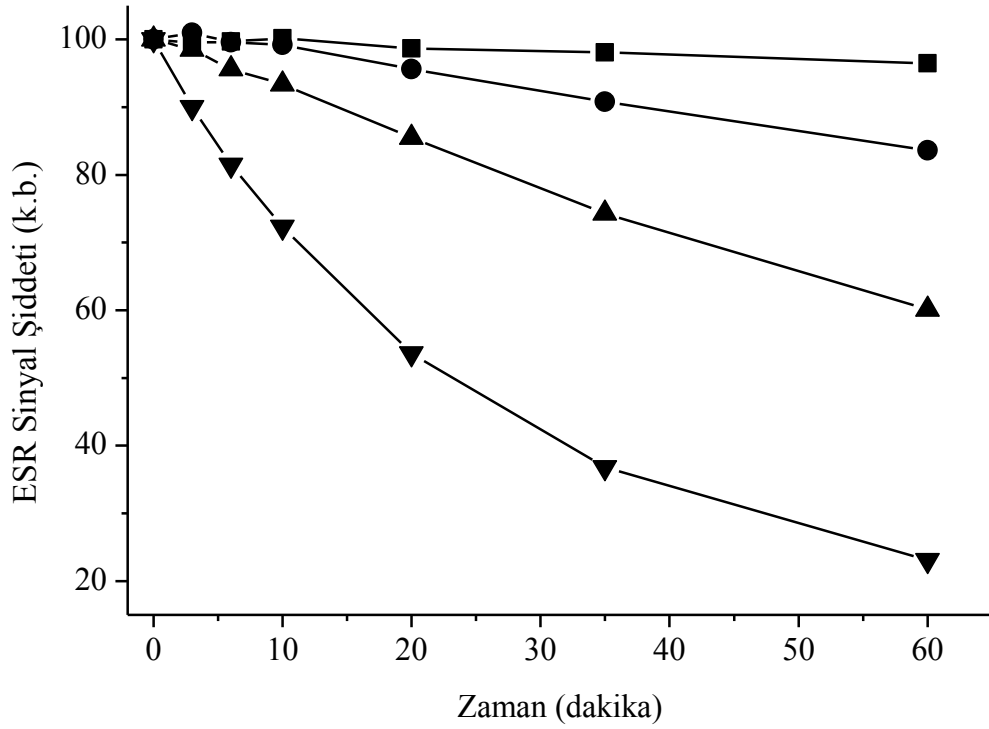
### 3.2.6. ESR Sinyal şiddetinin değişik sıcaklıklardaki sönümü

Işınlanmış fraktoz örneği ESR spektrumunda gözlenen I<sub>1</sub>, I<sub>2</sub>, I<sub>3</sub> ve I<sub>4</sub> rezonans sinyal şiddetlerinin 130-380 K aralığında sıcaklığa karşı farklı değişim sergilemeleri, I<sub>1</sub> ve I<sub>4</sub> sinyalleri ile I<sub>2</sub> ve I<sub>3</sub> sinyallerine kaynaklık eden kökçe veya kökçelerin farklı türde olduklarını göstermiştir. Benzer bulgular, mikrodalga-doyum değişimlerinden de elde edilmiştir. Özellikle yüksek sıcaklıklarda I<sub>1</sub> ve I<sub>4</sub> sinyal şiddetlerinde büyük kayıplar gözlenmesi nedeniyle, oda sıcaklığının üzerindeki sıcaklıklarda sönüm davranışlarını daha ayrıntılı görebilmek için, 3 kGy doz değerinde ışınlanmış fraktoz örnekleri sıcaklığın 330 K, 340 K, 350 K ve 360 K olarak ayarlandığı kaviteye yerleştirilmiş ve 60 dak'lık bir süre boyunca farklı zamanlarda (3, 6, 10, 20, 35 ve 60 dak), kavite içerisindeki konumu hiç değiştirilmeden, ESR spektrumları kaydedilmiştir. Kaydedilen spektrumlardan, üzerinde incelemelerin yapıldığı tüm rezonans sinyal şiddetleri ölçülmüş ve ayarlanan sıcaklıklarda zamanla nasıl değiştikleri Şekil 3.34, 3.35, 3.36 ve 3.37' de verilmiştir. I<sub>1</sub> ve I<sub>4</sub> rezonans sinyal şiddetlerinin beklendiği gibi

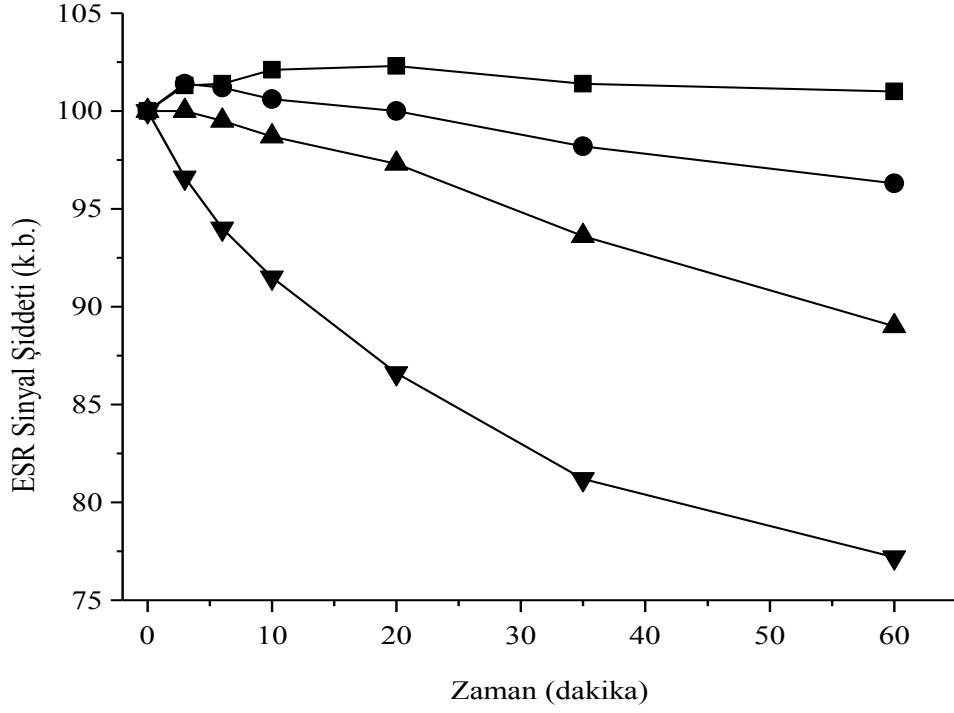


Şekil 3.33. 3 kGy doz değerinde ışınlanmış fraktozun oda sıcaklığında farklı zamanlarda kaydedilmiş ESR spektrumları.

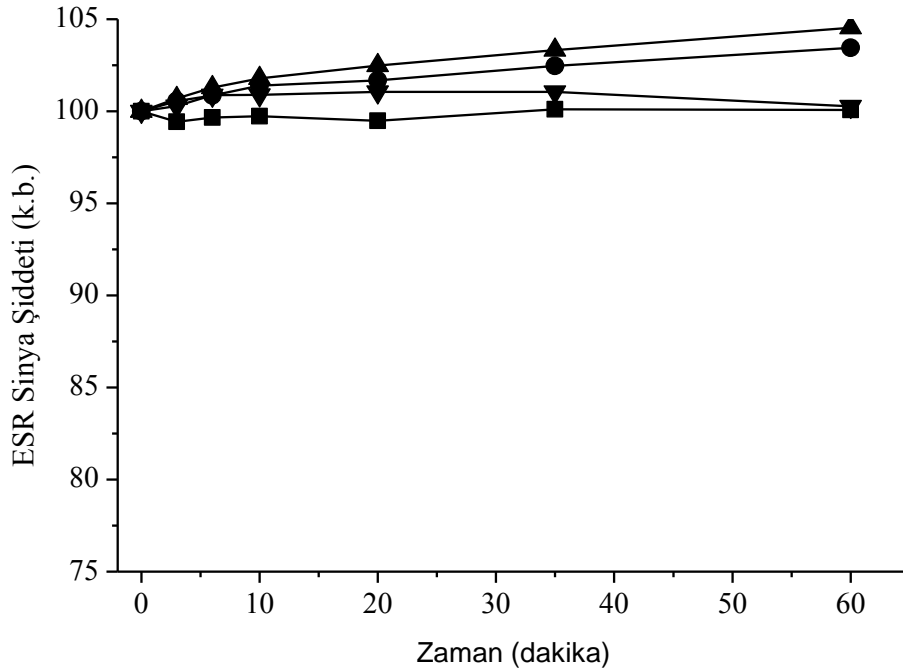
benzer davranış sergiledikleri gözlenmiştir. En yüksek kavite sıcaklığı olan 360 K'de 60 dak sonunda her iki sinyalin şiddetindeki kayıp miktarının yaklaşık % 80 civarında olduğu,  $I_2$  rezonans sinyalinde ise bu kaybın % 23 mertebesinde olduğu görülmüştür. Bunlardan farklı olarak, her sıcaklıkta  $I_3$  rezonans sinyalinin şiddetinde ise küçük de olsa artış meydana gelmiştir. 350 K' e kadar sıcaklıkla birlikte sinyal şiddetindeki artış hızı da artmakta, ancak sıcaklığın 360 K' e çıkarılmasıyla sinyal şiddetindeki artış hızının yavaşlamaya başladığı görülmüştür. Bu sonuç,  $I_3$  rezonans sinyalinin de  $I_2$  rezonans sinyali gibi birden fazla bileşenin üstüste binmesinden oluştuğunu göstermektedir.



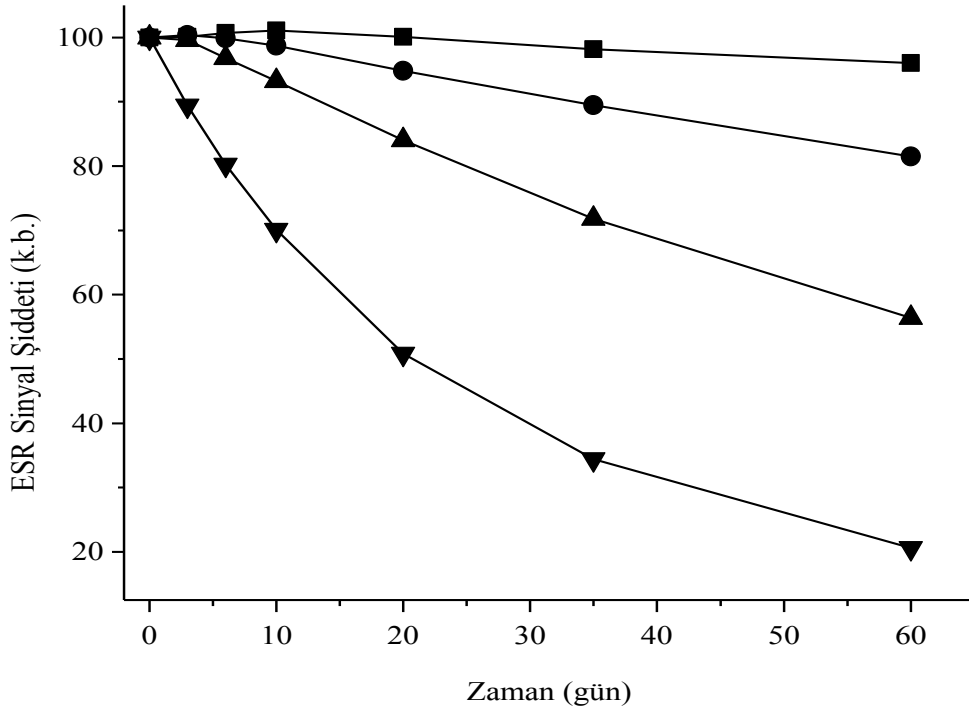
Şekil 3.34. 3 kGy değerinde ışınlanmış fraktoz örneği ESR spektrumunda gözlenen  $I_1$  rezonans sinyal şiddetinin farklı tavlama sıcaklıklarında zamanla değişimi. (■) 330 K; (●) 340 K; (▲) 350 K; (▼) 360 K



Şekil 3.35. 3 kGy değerinde ışınlanmış fraktoz örneği ESR spektrumunda gözlenen  $I_2$  rezonans sinyal şiddetinin farklı tavlama sıcaklıklarında zamanla değişimi. (■) 330 K; (●) 340 K; (▲) 350 K; (▼) 360 K



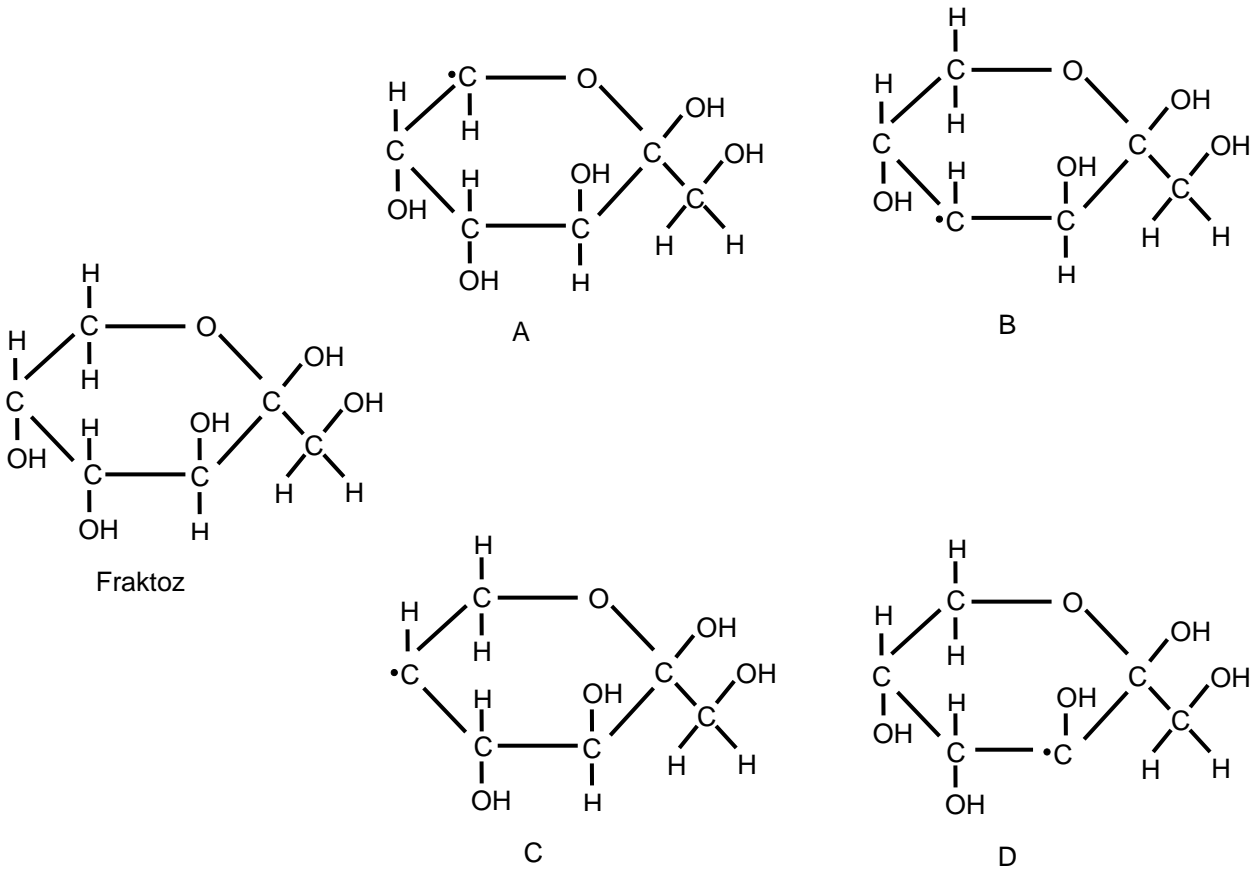
Şekil 3.36. 3 kGy değerinde ışınlanmış fraktoz örneği ESR spektrumunda gözlenen  $I_3$  rezonans sinyal şiddetinin farklı tavlama sıcaklıklarında zamanla değişimi. (■) 330 K; (●) 340 K; (▲) 350 K; (▼) 360 K



Şekil 3.37. 3 kGy değerinde ışınlanmış fraktoz örneği ESR spektrumunda gözlenen  $I_4$  rezonans sinyal şiddetinin farklı tavlama sıcaklıklarında zamanla değişimi. (■) 330 K; (●) 340 K; (▲) 350 K; (▼) 360 K

### 3.2.7. ESR spektrum benzetişim çalışmaları

Glukoz örneğinde olduğu gibi,  $^{60}\text{Co}$  gama kaynağında 3 kGy doz değerinde ışınlanmış fraktoz örneğinin ESR spektrumuna kaynaklık eden kökçelerin bağlı miktarları ve spektroskopik parametre değerleri, 3 kGy doz değerinde ışınlanmış bir örneğin ESR spektrumdan elde edilen manyetik alana karşı sinyal şiddeti değerleri kullanılarak yapılan benzetişim hesaplamaları ile belirlendi. Fraktozun moleküler yapısı Şekil 3.38' de verilmiş ve  $\text{CH}_2\text{OH}'$  in karbonu C1 olarak, diğer karbonlar da saat ibreleri yönünde hareket edilerek numaralandırılmıştır. Abagyan ve Apresyan (2004), C6 karbonuna bağlı protonlardan birisinin, C4 karbonuna bağlı OH hidroksil grubunun, C5 karbonuna bağlı protonun, ve C3 karbonuna bağlı protonun kopmasıyla izotropik karakterde dört farklı kökçenin oluştuğunu bildirmişlerdir. Vanhaelewyn ve ark. (2004) ise, C3, C4 ve C5 karbonlarına bağlı protonların ve C2 karbonuna bağlı OH hidroksil grubunun kopmasıyla anizotropik karakterde dört farklı kökçenin oluştuğunu vurgulamıştır. Benzetişim çalışmaları, Abagyan ve Apresyan (2004) tarafından öne sürülen kökçeler dikkate alınarak oluşturulan matematiksel model yardımıyla yürütülmüş ve önerilen kökçelerle bağlantılı olarak Çizelge 3.4' te

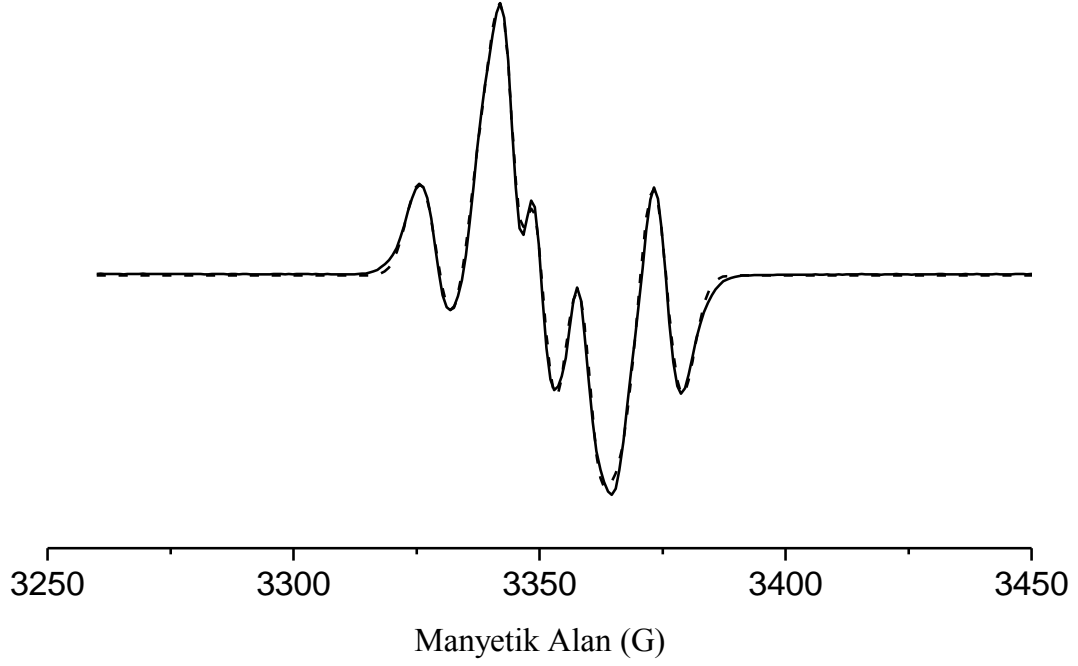


Şekil 3.38. 3 kGy doz değerinde ışınlanmış fraktoz örneği ESR spektrumunun benzetişimi için önerilen kökçeler.

Çizelge 3.4. 3 kGy doz değerinde ışınlanmış fraktoz örneği ESR spektrumu benzetişimi için önerilen kökçeler ve benzetişim sonucu hesaplanan spektroskopik parametre değerleri.

Kökçe	Bağıl Şiddet	$g$ -çarpanı	Aşırı ince yapı (G)	Yarı-eğri genişliği (G)
A	2,5	2,0042	$A(H) = 14,6$	1,8
B	15,5	2,0037	$A(H)_1 = 33,0$ $A(H)_2 = 14,0$	3,6
C	66,5	2,0042	$A(H) = 9,6$	6,9
D	15,5	2,0050	-----	3,3

verilen spektroskopik parametre değerleri bulunmuştur. Bu izelgedeki parametre değerleri kullanılarak oluşturulan kuramsal spektrum ile deneysel karşı geliri Şekil 3.39' da verilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi deneysel spektrum ile kuramsal spektrum arasında iyi sayılabilecek bir uyum vardır.

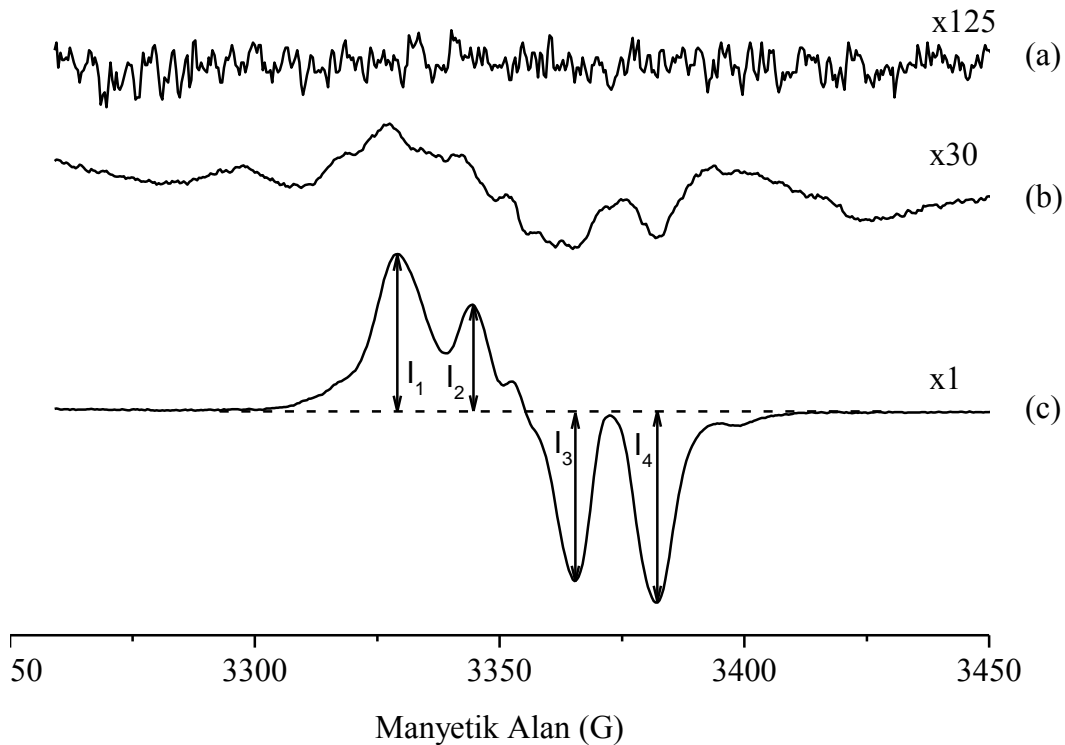


Şekil 3.39. 3 kGy doz değerinde ışınlanmış fraktoz rneği ESR spektrumu ve benzetim sonucu bulunan parametre değerleri kullanılarak hesaplanan kuramsal spektrum. [(—) Deneysel; (-----) Kuramsal]

### 3.3. Galaktoz

#### 3.3.1. Işınlanmış ve ışınlanmamış galaktoz ESR spektrumları

Üzerinde herhangi bir işlemin yapılmadığı toz halindeki galaktoz örneğinin değişik spektrometre çalışma koşullarında kaydedilen ESR spektrumlarında herhangi bir rezonans sinyaline rastlanmamıştır. Mikrodalga gücünün 1 mW ve modülasyon genliğinin 5 G seçildiği bir durumda, üzerinde hiçbir işlemin yapılmadığı galaktoz örneği için kaydedilen ESR spektrumu Şekil 3.40a' da verilmiştir.  $^{137}\text{Cs}$  gama kaynağında 50 Gy ve  $^{60}\text{Co}$  gama kaynağında ise 3 kGy doz değerinde ışınlanmış galaktoz örneklerinin yine aynı spektrometre çalışma koşullarında kaydedilmiş ESR spektrumları da sırasıyla Şekil 3.40b ve 3.40c' de verilmiştir. 50 Gy doz değerinde ışınlanmış galaktoz örneği ESR spektrumunun çok sayıda rezonans sinyalinin bir toplamı olduğu, ancak bu sinyallerin birbirlerinden açıkça ayırdedilemediği görülmektedir. Buna karşın, 3 kGy doz değerinde ışınlanmış galaktoz örneğinde, söz konusu rezonans sinyallerinin çok daha belirgin ve birbirlerinden ayırdedilebilir olduğu görülmüştür.

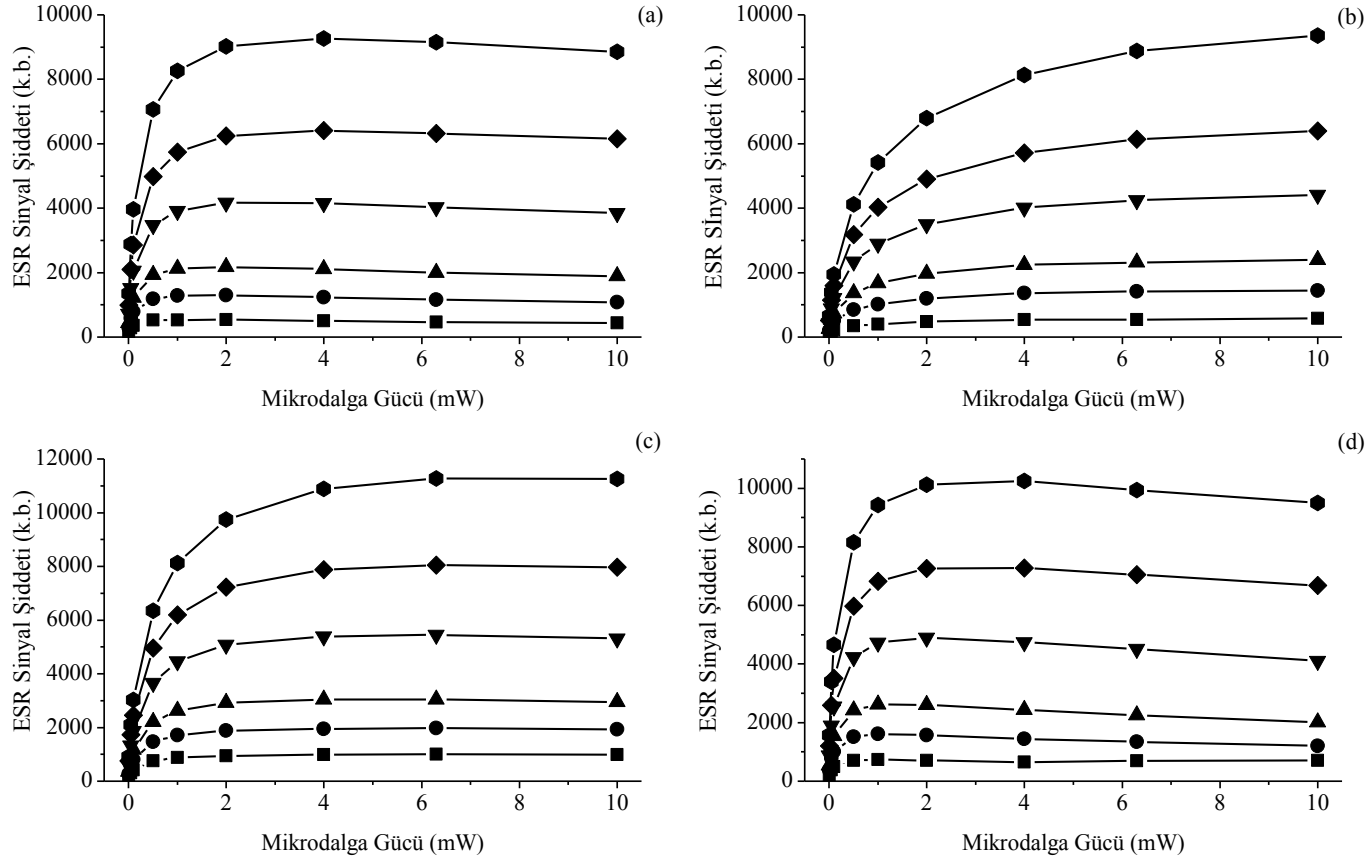


Şekil 3.40. Işınlanmamış ve ışınlanmış galaktoz örneği spektrumları.

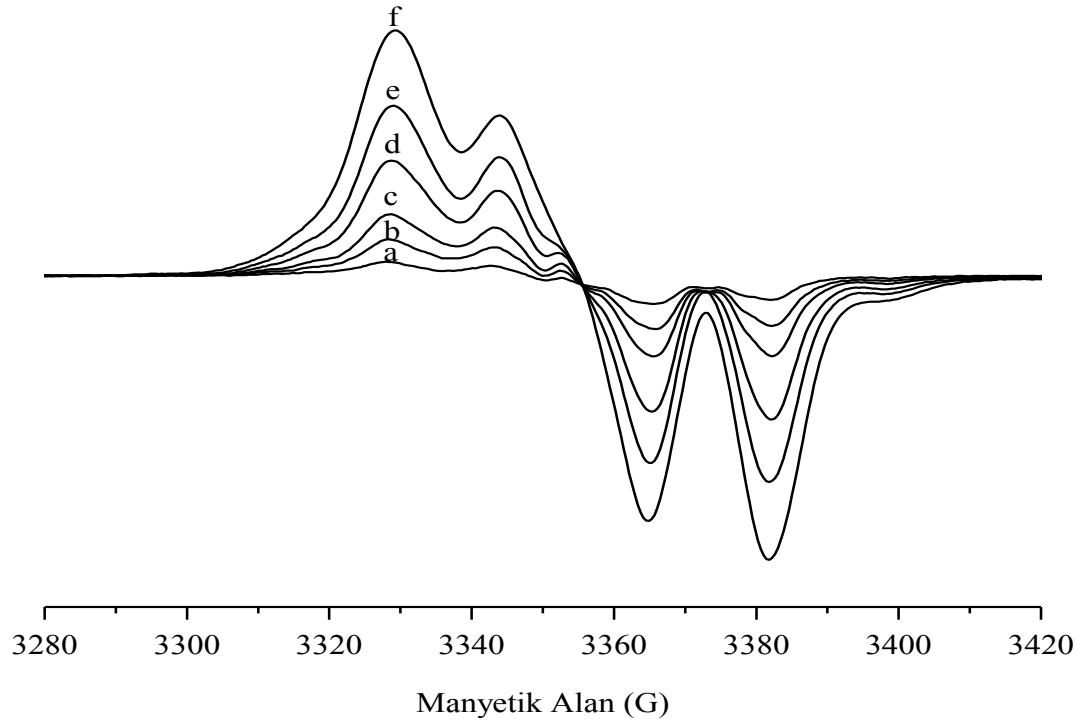
(a) Işınlanmamış; (b)  $^{137}\text{Cs}$  gama kaynağında 50 Gy; (c)  $^{60}\text{Co}$  gama kaynağında 3 kGy' lik dozlarda ışınlanmış.

### 3.3.2. ESR sinyal şiddetinin modülasyon genliği ve mikrodalga gücü ile değişimi

Çalışmanın bu kesiminde, ışınlanmış galaktoz örneği ESR spektrumunda belirtilen (Şekil 3.40c) rezonans sinyallerinin şiddetlerinin uygulanan mikrodalga gücü ve modülasyon genliği ile nasıl değiştiği araştırılmıştır. Bu amaca yönelik olarak, 3 kGy doz değerinde ışınlanmış galaktoz örneğinin 0.01-10 mW aralığında değişik modülasyon genliklerindeki ESR spektrumları kaydedilmiş ve Şekil 3.40c' de işaretlenen  $I_1$ ,  $I_2$ ,  $I_3$  ve  $I_4$  rezonans sinyal şiddetleri belirlenmiş ve her bir rezonans sinyali için, farklı modülasyon genliklerinde elde edilen mikrodalga-doyum eğrileri Şekil 3.41'de verilmiştir. Herbir rezonans sinyali için elde edilen mikrodalga-doyum eğrileri dikkatli bir şekilde incelendiğinde,  $I_1$  ve  $I_4$  rezonans sinyallerinin 2 mW mikrodalga güç değerinde doyuma ulaştıkları görülebilir. Buna karşılık,  $I_2$  ve  $I_3$  rezonans sinyallerinin ise yaklaşık 4 mW mikrodalga güç değerinde doyuma ulaştıkları ve hatta bu değer  $I_2$  rezonans sinyali için biraz daha yukarılarda olduğu da söylenebilir. Farklı mikrodalga-doyum davranışı sergileyen rezonans sinyallerinin farklı kökçelerden kaynaklandığı gerçeğini gözönüne alırsak, üzerinde incelemelerin yürütüldüğü rezonans sinyallerine ( $I_1$ ,  $I_2$ ,  $I_3$  ve  $I_4$ ) kaynaklık eden kökçe veya kökçeler hakkında kesin bir yargıya varmak mümkün gözükmemektedir. Uygulanan farklı modülasyon genliklerinin, ışınlanmış galaktoz örneği ESR spektrumunda ne gibi değişiklikler meydana getirdiğini net bir şekilde görebilmek için, 3 kGy doz değerinde ışınlanmış bir galaktoz örneğinin 1 mW mikrodalga gücünde ve farklı modülasyon genliklerinde kaydedilmiş ESR spektrumları Şekil 3.42' de topluca verilmiştir. Şekil 3.42' den de görüldüğü gibi, spektrum genel görünüşünde,  $I_2$  sinyalinin belirginliğini büyük ölçüde kaybetmesi dışında önemli bir değişim gözlenmemiştir. Modülasyon genliğinin artırılması ile spektrumda gözlenen rezonans sinyallerinin şiddetlendiği açıkça görülmektedir. Modülasyon genliğinin 1 G' dan 10 G' a çıkarılması ile  $I_1$ ,  $I_2$ ,  $I_3$  ve  $I_4$  rezonans sinyallerindeki şiddet artışının sırasıyla ~14.6, ~13.2, ~8.6 ve ~12.1 civarında olduğu belirlenmiştir. Bu sonuçlar, galaktoz örneğinin dozimetrik malzeme olarak kullanılması ve mikrodalga gücü ile modülasyon genliğinin sırasıyla 4 mW ve 10 G seçilmesi durumunda, sinyal şiddetlerinin yapay olarak arttırılabileceğini göstermektedir. Ancak, rezonans sinyallerinin gerektiği kadar belirgin olmaması, galaktoz örneğinin düşük doz bölgelerinde dozimetrik malzeme olarak kullanılmasının uygun olmadığını göstermektedir.



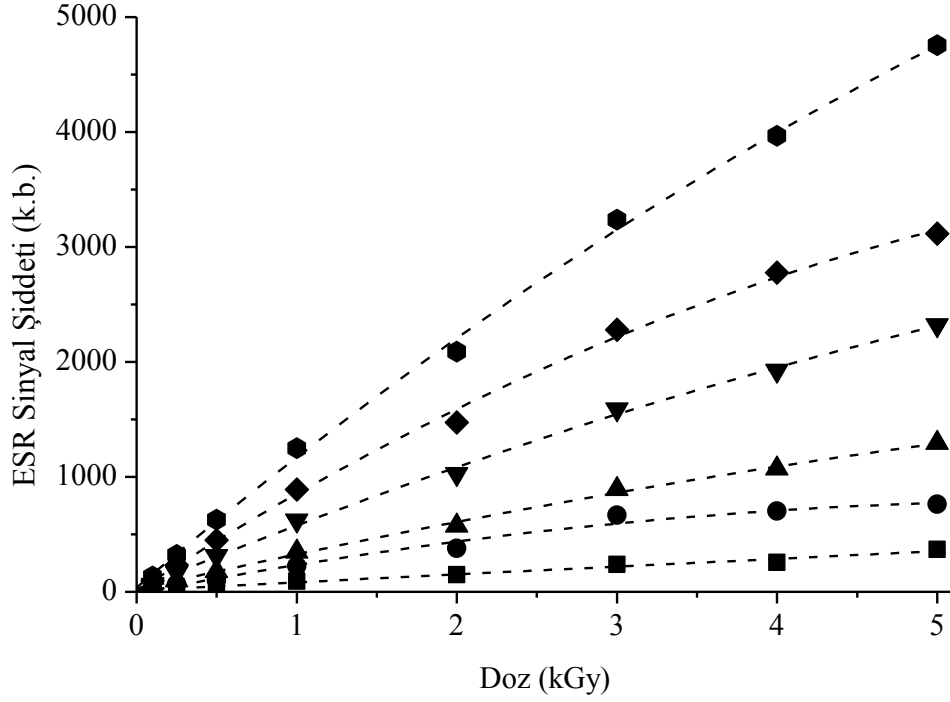
Şekil 3.41. 3 kGy doz değerinde ışınlanmış galaktöz örneğinde gözlenen rezonans sinyal şiddetlerinin ( $I_1$ ,  $I_2$ ,  $I_3$  ve  $I_4$ ) uygulanan mikrodalga gücü ve modülasyon genliğine bağlı değişimleri. (a)  $I_1$ ; (b)  $I_2$ ; (c)  $I_3$  ve (d)  $I_4$ . [(■), 1 G; (●), 2 G; (▲), 3 G; (▼), 5 G; (◆), 7 G; (●), 10 G]



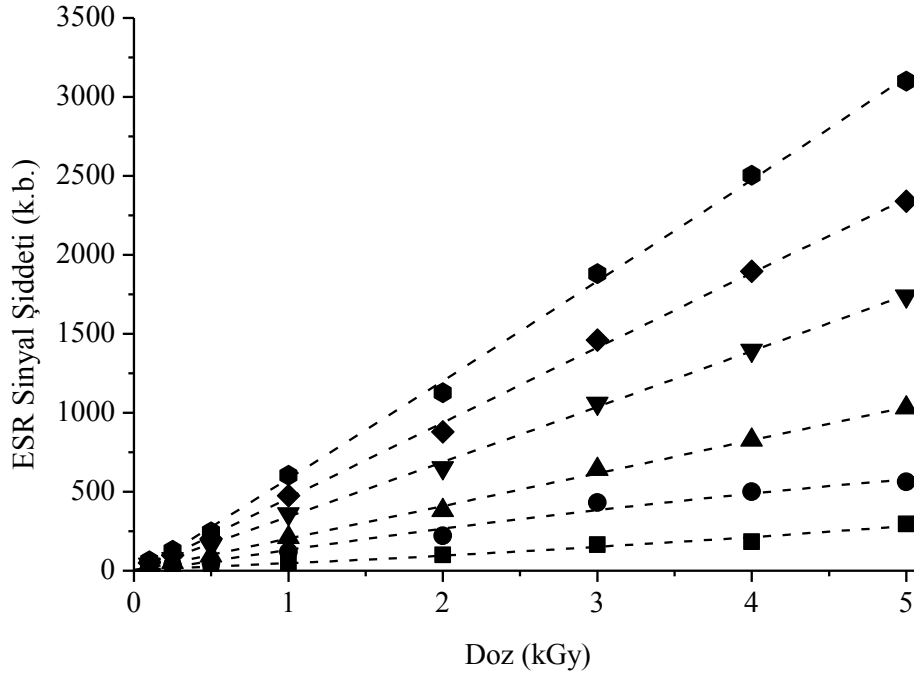
Şekil 3.42. 3 kGy doz değerinde ışınlanmış galaktoz örneğinin 1 mW mikrodalga gücü ve değişik modülasyon genliklerinde kaydedilmiş ESR spektrumları. [a, 1 G; b, 2 G; c, 3 G; d, 5 G; e, 7 G; f, 10 G]

### 3.3.3. Doz-cevap eğrileri

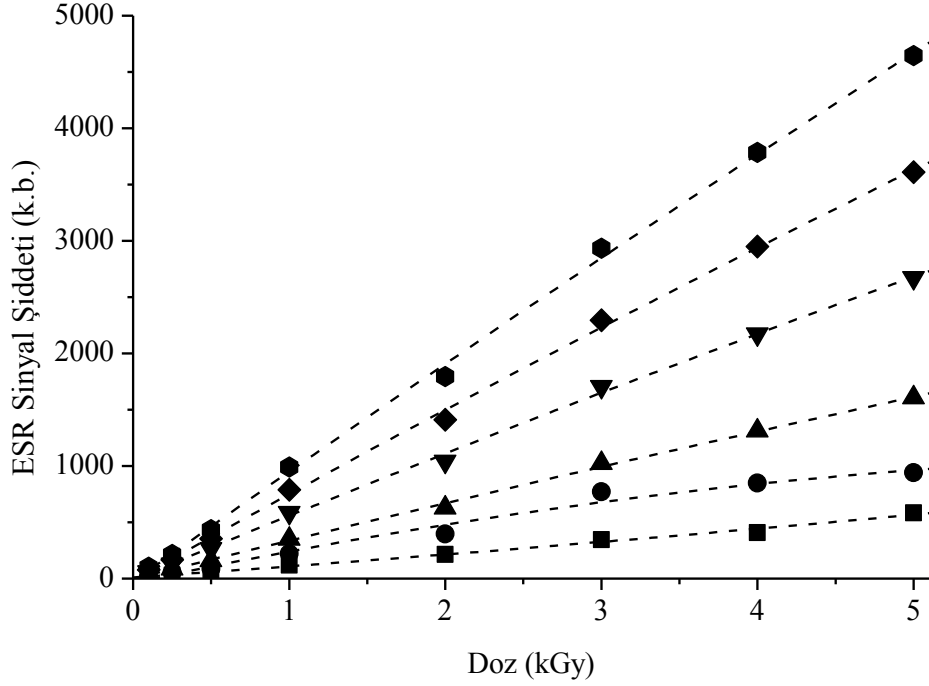
Üzerinde incelemelerin yapıldığı rezonans sinyallerinin düşük radyasyon doz bölgesinde (5-100 Gy) çok belirgin olmaması nedeniyle, çalışmanın devamında orta doz bölgesinde (0.1-5 kGy) ışınlanan örnekler üzerinde yapılan incelemelere yer verilecektir.  $^{60}\text{Co}$  gama kaynağında 0.1-5 kGy aralığında değişik doz değerlerinde ışınlanmış galaktoz örneklerinin, 1 mW mikrodalga gücü ve 1-10 G aralığında farklı modülasyon genliklerinde ESR spektrumları kaydedilmiştir. Kaydedilen spektrumlardan Şekil 3.40c' de gösterilen  $I_1$ ,  $I_2$ ,  $I_3$  ve  $I_4$  rezonans sinyallerinin şiddetleri belirlenerek örnek kütlesine göre normalize edilmiş ve farklı modülasyon genliklerinde ışınlama dozuna bağlı değişimleri sırasıyla Şekil 3.43, 3.44, 3.45 ve 3.46' da verilmiştir. Normalize edilmiş sinyal şiddetlerinin ışınlama dozuna bağlı değişimlerinin nasıl bir matematiksel fonksiyonla temsil edilebileceğini belirlemek için, deneysel doz-cevap verileri daha önceki kesimlerde olduğu gibi,  $a + b * x$  ;  $a + b * x + c * x^2$  ;  $a + b * e^{-c*x}$  ; ve  $a + b * (1 - e^{-c*x})$  ifadelerine sahip fonksiyonlara uyarlandı. Yürütülen veri uyarlama işlemleri sonucunda, farklı



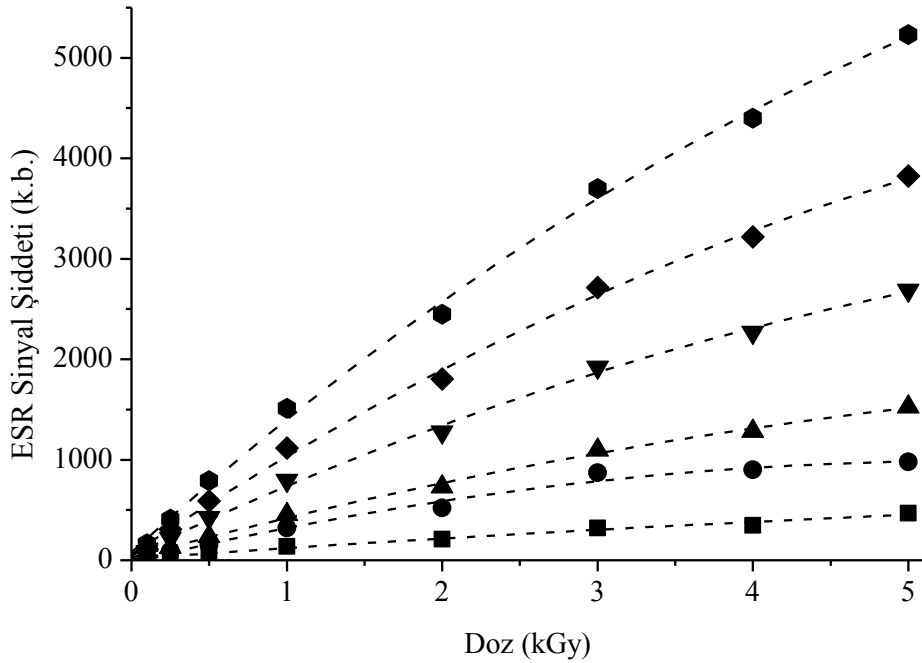
Şekil 3.43. Galaktoz örneği ESR spektrumunda gözlenen  $I_1$  sinyali için 1 mW mikrodalga gücünde ve farklı modülasyon genliklerindeki doz-cevap eğrileri (Semboller: Deneysel; -----: Kuramsal).  
 [(■) 1 G; (●) 2 G; (▲) 3 G; (▼) 5 G; (◆) 7 G; (●) 10 G]



Şekil 3.44. Galaktoz örneği ESR spektrumunda gözlenen  $I_2$  sinyali için 1 mW mikrodalga gücünde ve farklı modülasyon genliklerindeki doz-cevap eğrileri (Semboller: Deneysel; -----: Kuramsal).  
 [(■) 1 G; (●) 2 G; (▲) 3 G; (▼) 5 G; (◆) 7 G; (●) 10 G]



Şekil 3.45. Galaktoz örneği ESR spektrumunda gözlenen  $I_3$  sinyali için 1 mW mikrodalga gücünde ve farklı modülasyon genliklerindeki doz-cevap eğrileri (Semboller: Deneysel; -----: Kuramsal).  
 [(■) 1 G; (●) 2 G; (▲) 3 G; (▼) 5 G; (◆) 7 G; (◆) 10 G]



Şekil 3.46. Galaktoz örneği ESR spektrumunda gözlenen  $I_4$  sinyali için 1 mW mikrodalga gücünde ve farklı modülasyon genliklerindeki doz-cevap eğrileri (Semboller: Deneysel; -----: Kuramsal).  
 [(■) 1 G; (●) 2 G; (▲) 3 G; (▼) 5 G; (◆) 7 G; (◆) 10 G]

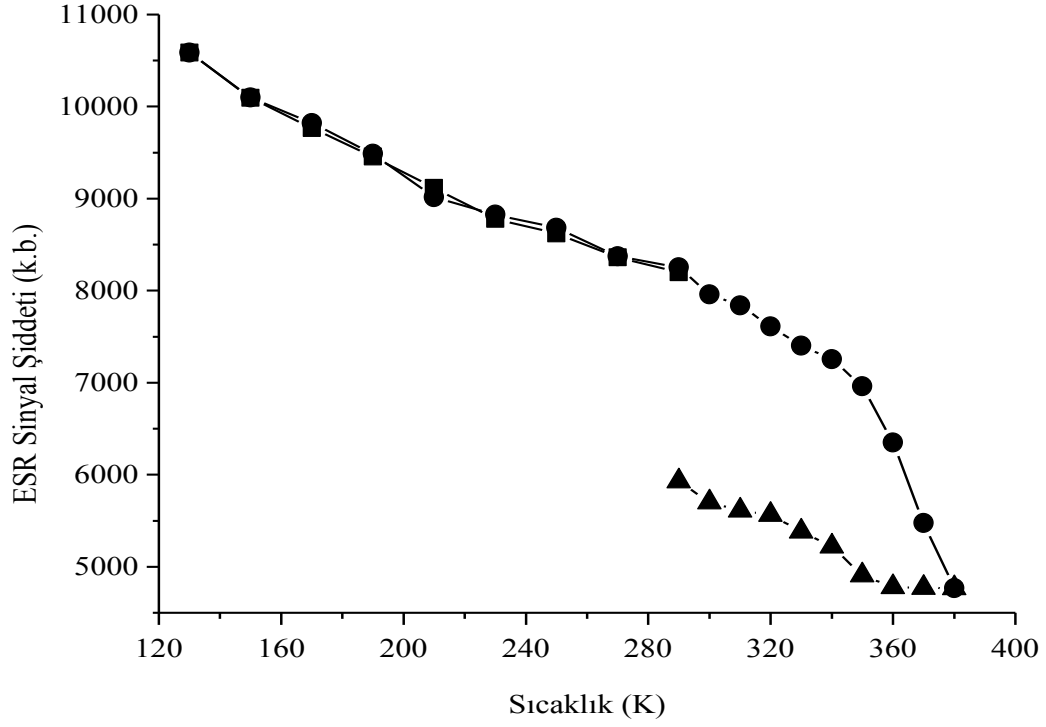
modülasyon genliklerinde elde edilen doz-cevap eğrilerinin en iyi  $a + b * x + c * x^2$  ifadesi ile verilen ikinci dereceden polinom şeklindeki bir matematiksel fonksiyonla tanımlanabileceği sonucuna varılmıştır. Benzetişim sonucu elden edilen parametre değerleri Çizelge 3.5’ de, bu parametre değerleri kullanılarak oluşturulan kuramsal doz-cevap eğrileri ise Şekil 3.43, 3.44, 3.45 ve 3.46’ da kesikli çizgilerle temsil edilmiştir. Galaktoz örneğinin radyasyon verimi, Eş. 3.1 kullanılarak,  $G_{GA} = 1.53$  olarak hesaplanmıştır.

Çizelge 3.5. Galaktoz için farklı modülasyon genliklerinde oluşturulmuş deneysel orta bölge doz-cevap eğrilerinin benzetişimi için önerilen matematiksel modeller ve benzetişim sonucu elde edilen parametre değerleri.

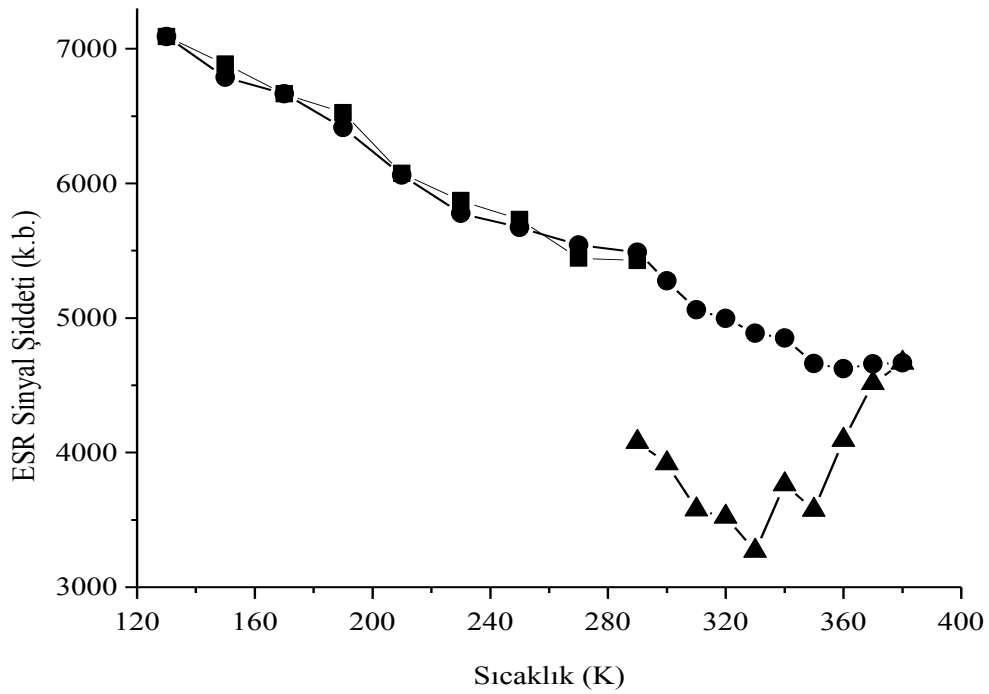
Sinyal	Mod. Gen. (G)	Parametreler			
		a	b	c	r <sup>2</sup>
I <sub>1</sub>	1	14	69	-0,2	0,9844
	2	-13	270	-22,5	0,9851
	3	-20	321	-13,4	0,9981
	5	24	579	-24,2	0,9983
	7	6	902	-54,7	0,9978
	10	39	1179	-47,3	0,9986
I <sub>2</sub>	1	7	37	3,7	0,9809
	2	-16	155	-7,3	0,9847
	3	-2	204	0,7	0,9985
	5	-2	342	1,5	0,9991
	7	-20	481	-1,2	0,9987
	10	-26	603	5,5	0,9987
I <sub>3</sub>	1	9	96	3,2	0,9932
	2	-36	295	-19,0	0,9825
	3	-2	344	-4,1	0,9988
	5	-10	576	-7,6	0,9987
	7	-19	780	-10,1	0,9988
	10	-27	986	-9,2	0,9988
I <sub>4</sub>	1	16	108	-4,2	0,9888
	2	-13	-369	-33,9	0,9881
	3	27	418	-24,1	0,9976
	5	46	732	-41,4	0,9978
	7	59	1031	-56,6	0,9980
	10	79	1397	-74,5	0,9981

### 3.3.4. ESR sinyal şiddetinin sıcaklıkla değişimi

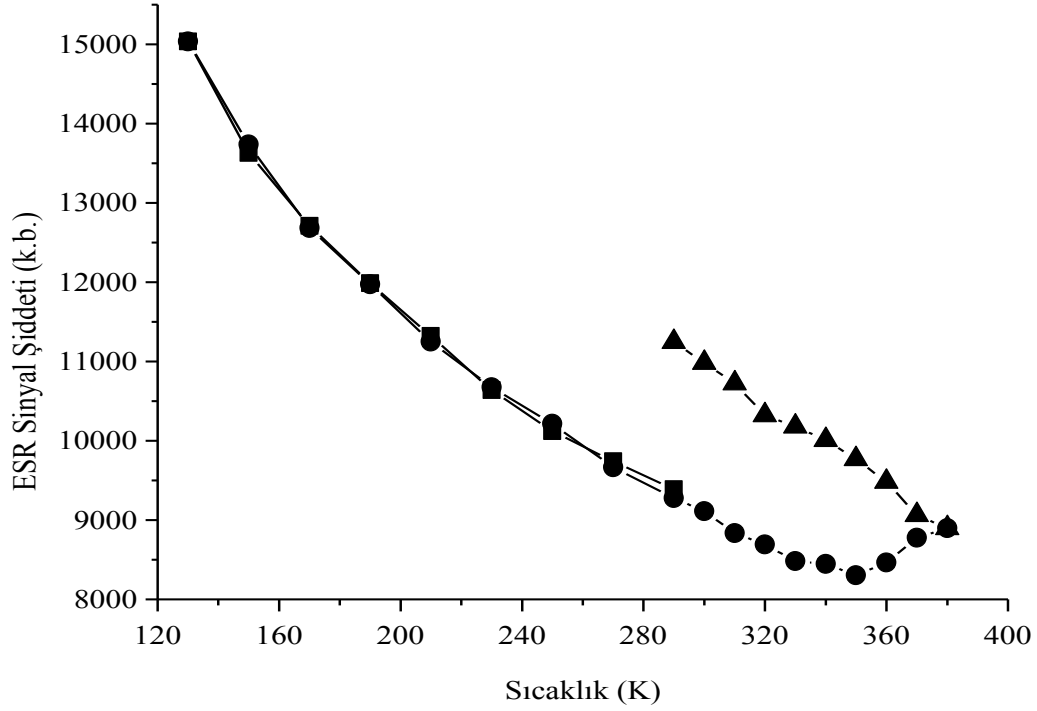
Galaktoz örneğinin dozimetrik malzeme olarak kullanılması durumunda, ışınlama ile oluşan kökçe veya kökçelerle bağlantılı rezonans sinyallerinin ortam sıcaklığına bağlılığı son derece önemlidir. Bu nedenle, çalışmanın bu kesiminde 3 kGy doz değerinde ışınlanmış galaktoz örneğinde gözlenen rezonans sinyallerinin 130-380 K aralığında sıcaklıkla nasıl değiştiği incelenmiştir. Kavite içerisine konan galaktoz örneğinin sıcaklığı 290 K' den başlanarak 20 K adımlarla önce 130 K' e kadar düşürüldü, buradan aynı adımlarla tekrar 290 K' e kadar artırıldı. 290 K' den 380 K' e kadar ise, yüksek sıcaklıklarda sinyal şiddetlerinde ortaya çıkabilecek hızlı sönümlerin ayrıntılarını gözden kaçırmamak için, sıcaklık artış adımları 10 K olarak seçildi. Daha sonra, örnek sıcaklığı 380 K' den tekrar 290 K' e aynı adımlarla düşürüldü. 130-380 K aralığındaki her sıcaklık adımında galaktoz örneğinin ESR spektrumu, mikrodalga gücü ve modülasyon genliğinin sırasıyla 0.1 mW ve 2 G olarak seçildiği spektrometre çalışma koşullarında kaydedilmiştir. Bu spektrumlardan  $I_1$ ,  $I_2$ ,  $I_3$  ve  $I_4$  rezonans sinyallerinin şiddetleri belirlendi ve sıcaklığa bağlı değişimleri sırasıyla Şekil 3.47, 3.48, 3.49 ve 3.50' de verilmiştir. Örnek sıcaklığının 290 K' den 130 K' e düşürülmesiyle, incelenen tüm rezonans sinyallerinin şiddetlerinde klasik paramanyetizmaya uygun olarak belirgin artışlar gözlenmiştir. Buradan tekrar 290 K sıcaklığına doğru çıkıldığında da, sinyal şiddetlerinin geri dönüşümlü olarak başlangıçtaki değerlerine ulaştıkları görülmektedir. Örnek sıcaklığının 380 K' e çıkarılmasıyla birlikte, tüm rezonans sinyallerinin şiddetlerinde belirgin azalmalar gözlenmiştir. Bu azalmanın, özellikle  $I_1$  ve  $I_4$  rezonans sinyalleri için yaklaşık 350 K sıcaklığında çok keskin olduğu açıkça görülmektedir.  $I_2$  ve  $I_3$  rezonans sinyallerinin şiddetlerinde ise böyle keskin bir azalma gözlenmemiş aksine, hafif bir artış eğilimi belirlenmiştir. Örnek sıcaklığının tekrar 290 K' e düşürülmesi ile birlikte,  $I_1$  ve  $I_4$  rezonans sinyallerinin şiddetlerinde bir miktar artış olmasına rağmen, başlangıçtaki değerlerinin oldukça aşağılarında kalmışlardır. Bu sonuç,  $I_1$ ,  $I_2$  ve  $I_4$  rezonans sinyallerine kaynaklık eden kökçe veya kökçelerin yüksek sıcaklıklarda sönüme uğradıklarını göstermektedir.  $I_3$  rezonans sinyalinin sıcaklığa karşı gösterdiği davranış biraz daha farklıdır. Yüksek sıcaklıklarda  $I_3$  rezonans sinyalinin şiddetinde gözlenen artışın, büyük ölçüde  $I_4$  rezonans sinyalinin  $I_3$  sinyaline getirdiği pozitif katkının azalmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.



Şekil 3.47. 3 kGy değerinde ışınlanmış galaktoz örneği ESR spektrumunda gözlenen I<sub>1</sub> rezonans sinyal şiddetinin sıcaklıkla değişimi.  
 (■) 290K → 130K; (●) 130K→380K; (▲) 380K→290K.

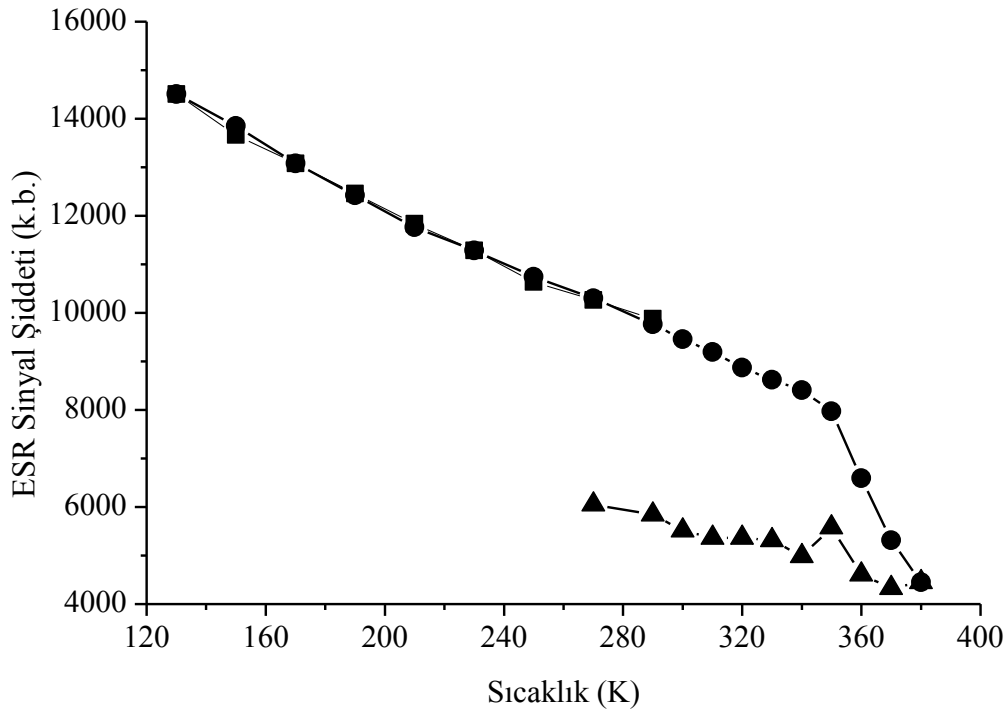


Şekil 3.48. 3 kGy değerinde ışınlanmış galaktoz örneği ESR spektrumunda gözlenen I<sub>2</sub> rezonans sinyal şiddetinin sıcaklıkla değişimi.  
 (■) 290K → 130K; (●) 130K→380K; (▲) 380K→290K.



Şekil 3.49. 3 kGy değerinde ışınlanmış galaktoz örneği ESR spektrumunda gözlenen  $l_3$  rezonans sinyal şiddetinin sıcaklıkla değişimi.

(■) 290K → 130K; (●) 130K→380K; (▲) 380K→290K.

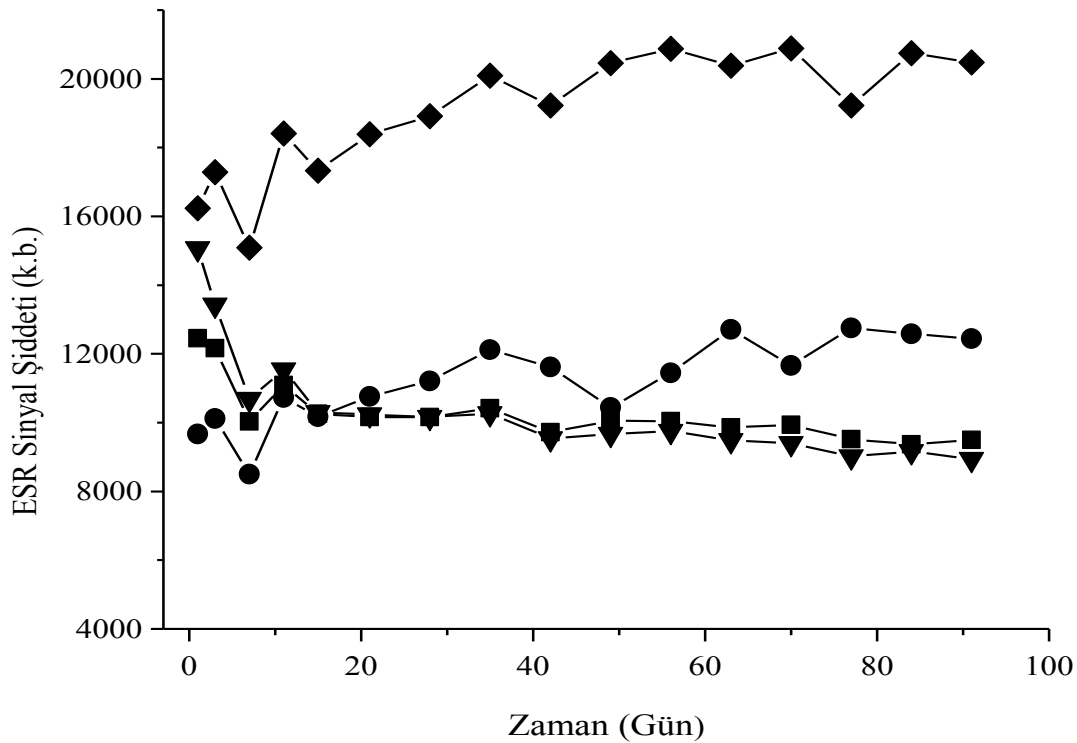


Şekil 3.50. 3 kGy değerinde ışınlanmış galaktoz örneği ESR spektrumunda gözlenen  $l_4$  rezonans sinyal şiddetinin sıcaklıkla değişimi.

(■) 290K → 130K; (●) 130K→380K; (▲) 380K→290K.

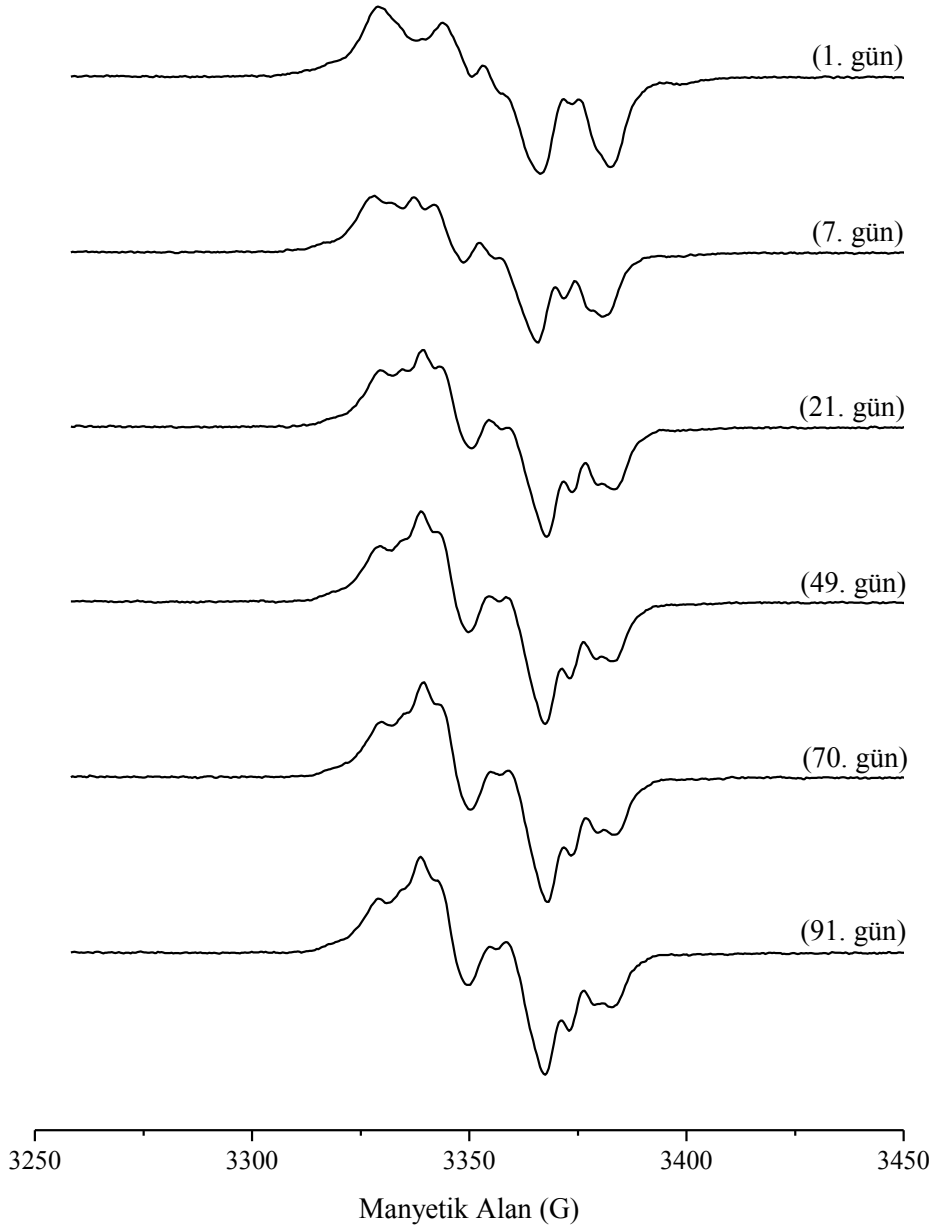
### 3.3.5. ESR sinyal şiddetinin zamanla değişimi

Işınlanmış galaktoz örneği ESR spektrumunda gözlenen rezonans sinyallerinin oda sıcaklığındaki kararlılıkları, bu sinyallerin radyasyon doz ölçümünde kullanılıp kullanılmayacaklarının belirlenmesi açısından son derece önemlidir. Bu amaca yönelik olarak, 3 kGy doz değerinde ışınlanmış galaktoz örneğinin, aynı spektrometre çalışma koşullarında, yaklaşık olarak üç ay boyunca (91 gün) belirli zaman aralıklarında ESR spektrumları kaydedilmiştir. Kaydedilen spektrumlardan  $I_1$ ,  $I_2$ ,  $I_3$  ve  $I_4$  rezonans sinyallerinin şiddetleri ölçülmüş ve zamanla nasıl değiştikleri Şekil 3.51’ de topluca verilmiştir. Işınlamayı takip eden ilk 10 gün içerisinde tüm rezonans sinyallerinde dalgalanmalar gözlenmesine rağmen, daha sonraki zaman diliminde bu dalgalanmalar büyük ölçüde azalmıştır.  $I_1$  ve  $I_4$  rezonans sinyallerinin zaman içerisindeki sönümlerinin çok benzer olmaları, bu iki sinyale kaynaklık eden kökçelerin benzer olduklarını destekler niteliktedir.  $I_3$  rezonans sinyalinde zamanla küçüğe olsa bir artışın meydana geldiği göze çarpmaktadır. Bunun da yine,  $I_4$  sinyalinin getirdiği pozitif katkının azalmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Işınlanmış galaktoz örneği ESR spektrumunun genel görünümünde zamanla meydana gelen değişimleri net olarak görebilmek için, aynı spektrometre çalışma



Şekil 3.51. 3 kGy doz değerinde ışınlanmış galaktoz örneğinde gözlenen  $I_1$ ,  $I_2$ ,  $I_3$  ve  $I_4$  sinyal şiddetlerinin zamanla değişimi [(■),  $I_1$ ; (●),  $I_2$ ; (◆),  $I_3$ , (▼)  $I_4$ ].

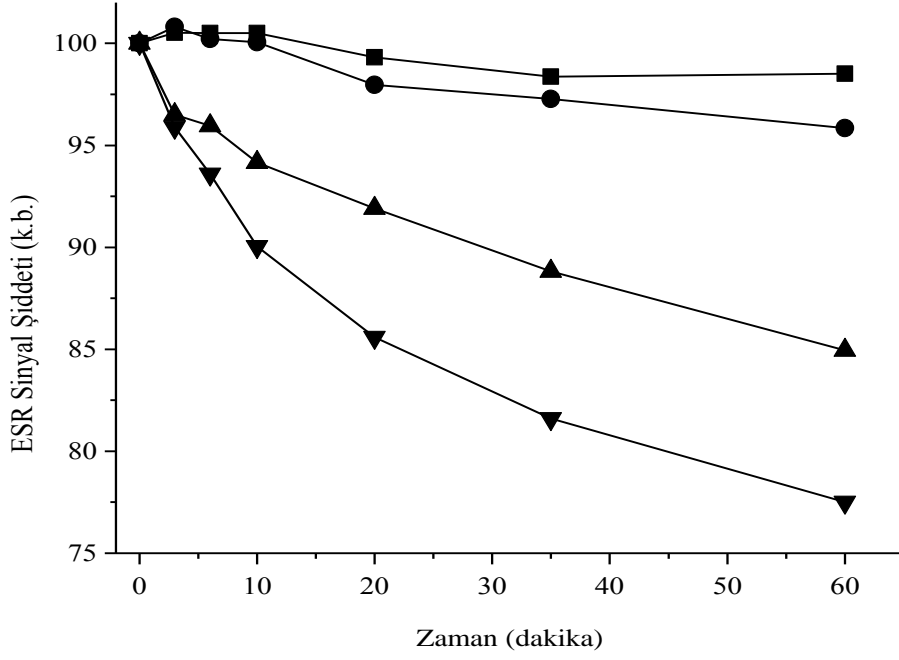
koşullarında farklı zamanlarda kaydedilmiş ESR spektrumlarından bazıları Şekil 3.52' de birarada verilmiştir. Spektrumlar dikkatlice incelendiğinde,  $I_2$  ve  $I_3$  rezonans sinyallerinin gerçekte iki veya daha fazla rezonans sinyalinin toplamları olduğu kolayca görülmektedir. Bu sinyallerin şiddetlerinde sıcaklık ve zamanla meydana gelen dalgalanmaların bundan kaynaklanmış olabileceği olasılıklar dahilindedir.



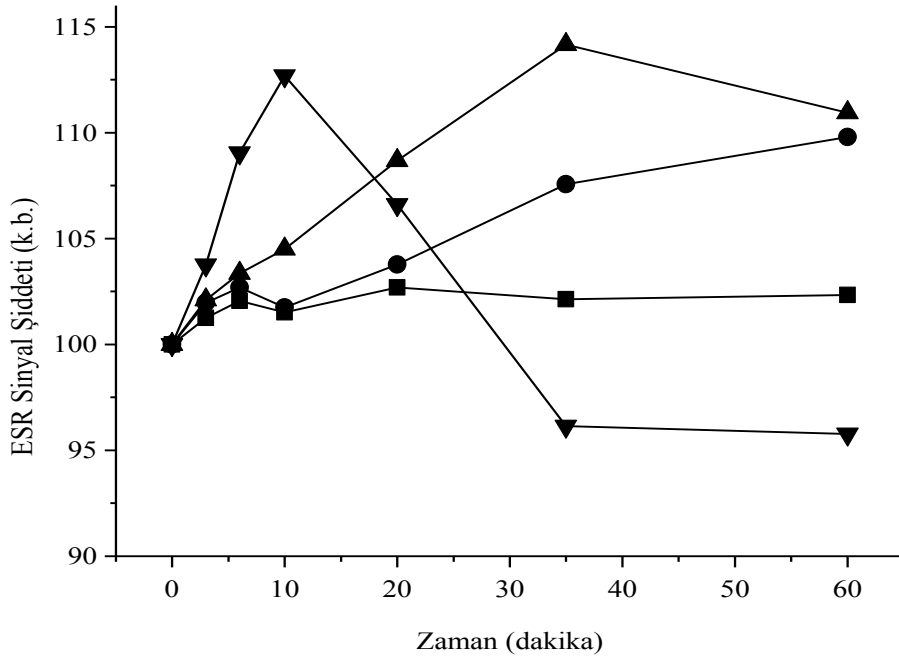
Şekil 3.52. 3 kGy doz değerinde ışınlanmış galaktozun oda sıcaklığında farklı zamanlarda kaydedilmiş ESR spektrumları.

### 3.3.6. ESR Sinyal şiddetinin değişik sıcaklıklardaki sönümü

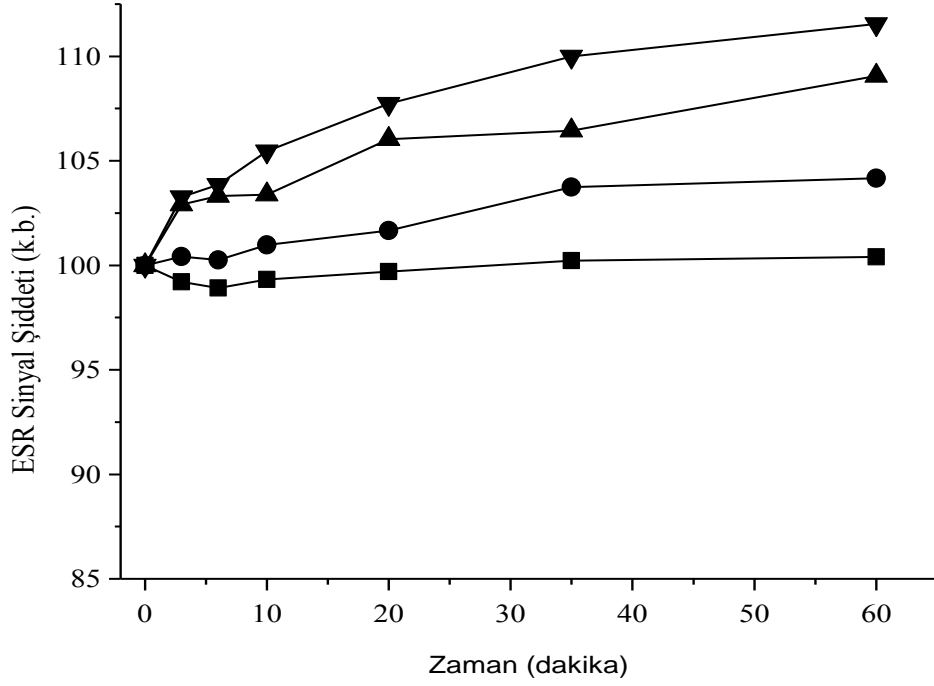
Işınlanmış galaktoz örneği ESR spektrumunda gözlenen  $I_1$ ,  $I_2$ ,  $I_3$  ve  $I_4$  rezonans sinyallerinin şiddetlerinin 130-380 K aralığında sıcaklıkla nasıl değiştikleri Kesim 3.3.4' de verilmişti. Sıcaklığın arttırılmasıyla birlikte  $I_1$  ve  $I_4$  rezonans sinyallerinin şiddetlerinde hızlı bir azalma,  $I_2$  ve  $I_3$  rezonans sinyallerinin şiddetlerinde ise özellikle belli bir sıcaklığın üzerinde (~350 K) gözle görülebilir artışlar gözlenmiştir. Üzerinde incelemelerin yapıldığı bu sinyallerin yüksek sıcaklıklardaki sönüm davranışlarını daha ayrıntılı bir şekilde görmek için, 3 kGy doz değerinde ışınlanmış dört farklı galaktoz örneği, 320 K, 330 K, 340 K ve 350 K sıcaklıklarına ayarlanmış kavite içerisine yerleştirilerek 60 dak' lık bir zaman dilimi süresince değişik zamanlarda ESR spektrumları kaydedilmiştir. Kaydedilen spektrumlardan  $I_1$ ,  $I_2$ ,  $I_3$  ve  $I_4$  rezonans sinyallerinin şiddetleri belirlenmiş ve her sıcaklık değerinde zamanla nasıl değiştikleri sırasıyla Şekil 3.53, 3.54, 3.55 ve 3.56' da verilmiştir. Şekil 3.53 ve 3.56' dan da görüldüğü gibi, sıcaklığın arttırılmasıyla birlikte  $I_1$  ve  $I_4$  rezonans sinyallerinin şiddetlerindeki sönümlerde hızlanmıştır. 350 K sıcaklığında 60 dak süreyle bekletilen örnekte bile  $I_1$  ve  $I_4$  rezonans sinyallerindeki kaybın ~% 25-30 aralığında olması, bu sinyallere kaynaklık eden kökçe veya kökçelerin sıcaklığa karşı oldukça dirençli olduklarının bir göstergesidir. Şekil 3.54 ve 3.55' e bakıldığında ise,  $I_2$  ve  $I_3$  rezonans sinyal şiddetlerinin yüksek sıcaklıklarda zamana bağlı değişimleri, sıcaklığa bağlı davranışlarında olduğu karmaşıklığını hala korumaktadır. Sıcaklığın arttırılmasıyla birlikte,  $I_2$  rezonans sinyalinin şiddeti de zamanla artmaktadır. Ancak, 340 K ve 350 K sıcaklıklarında, sinyal şiddetinde zamanla meydana gelen bu artışın belirli zamanlarda durduğu ve azalmaya başladığı görülmektedir. Sinyal şiddetindeki bu davranış değişikliği, 340 K ve 350 K sıcaklıklarında sırasıyla yaklaşık 35. ve 10. dakikalarda gözlenmiştir.  $I_3$  rezonans sinyalinde ise, incelemenin yapıldığı tüm sıcaklıklarda zamanla bir artış gözlenmiştir. Bu artışın,  $I_3$  rezonans sinyaline pozitif katkı getiren  $I_4$  sinyalindeki sönümden kaynaklandığı düşünülmektedir.



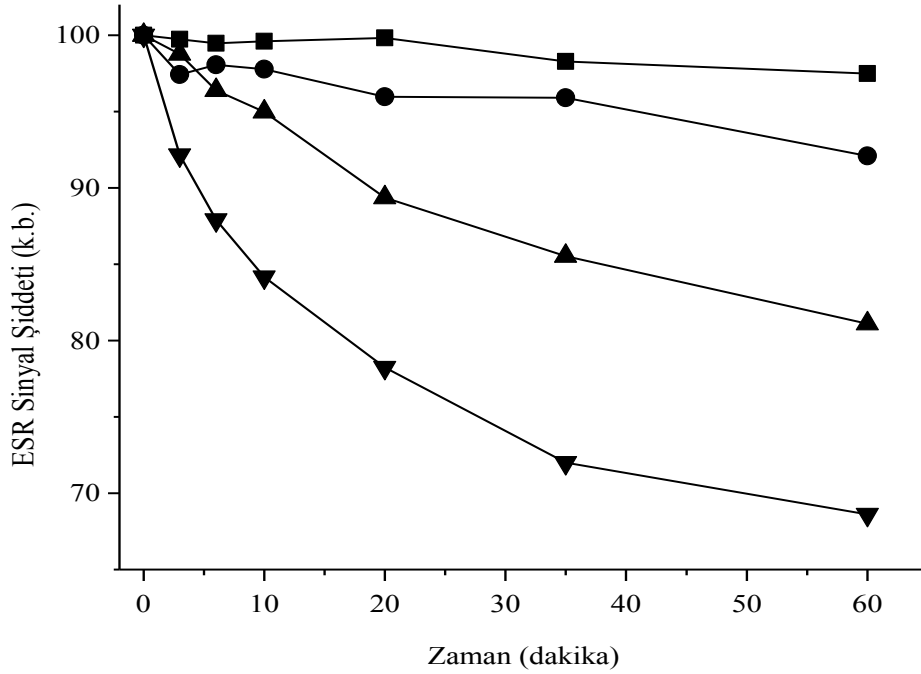
Şekil 3.53. 3 kGy değerinde ışınlanmış galaktoz örneği ESR spektrumunda gözlenen  $I_1$  rezonans sinyal şiddetinin farklı tavlama sıcaklıklarında zamanla değişimi. [(■),320 K; (●),330 K; (▲),340 K, (▼)350 K].



Şekil 3.54. 3 kGy değerinde ışınlanmış galaktoz örneği ESR spektrumunda gözlenen  $I_2$  rezonans sinyal şiddetinin farklı tavlama sıcaklıklarında zamanla değişimi. [(■),320 K; (●),330 K; (▲),340 K, (▼)350 K].



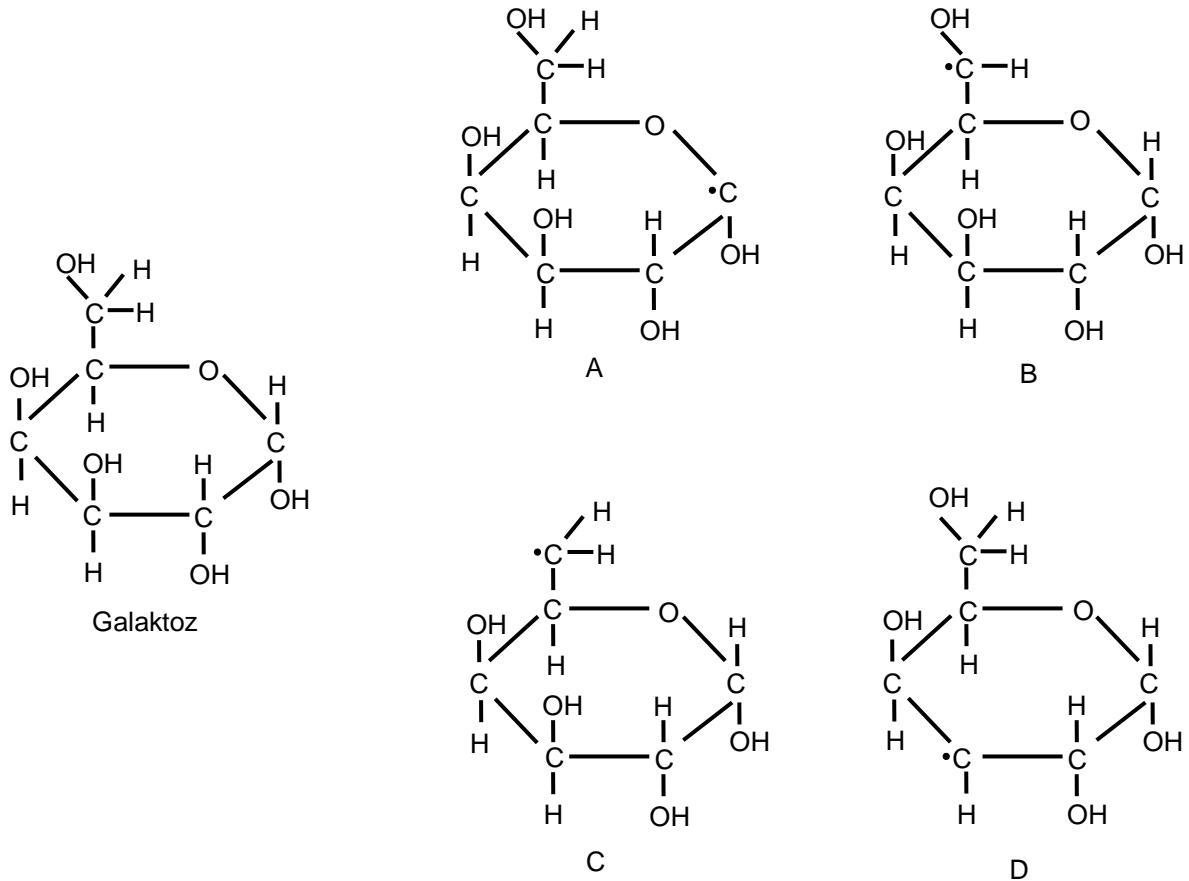
Şekil 3.55. 3 kGy değerinde ışınlanmış galaktoz örneği ESR spektrumunda gözlenen  $I_3$  rezonans sinyal şiddetinin farklı tavlama sıcaklıklarında zamanla değişimi. [(■),320 K; (●),330 K; (▲),340 K, (▼)350 K].



Şekil 3.56. 3 kGy değerinde ışınlanmış galaktoz örneği ESR spektrumunda gözlenen  $I_4$  rezonans sinyal şiddetinin farklı tavlama sıcaklıklarında zamanla değişimi. [(■),320 K; (●),330 K; (▲),340 K, (▼)350 K].

### 3.3.7. ESR spektrum benzetişim çalışmaları

Işınlanmış galaktoz içerisinde oluşan kökçe veya kökçelerin hangi tür ve yapıda oldukları, bunların bağıl miktarları ve spektroskopik parametre değerleri glukoz ve fraktoz örneklerinde olduğu gibi,  $^{60}\text{Co}$  gama kaynağında 3 kGy doz değerinde ışınlanmış bir örneğinin ESR spektrumu (Şekil 3.40c) kullanılarak yürütülen benzetişim çalışmalarıyla belirlenmiştir. Galaktozun moleküler yapısı Şekil 3.57' de verilmiş ve en sağdaki karbon atomu C1 olarak, diğerleri de saat ibreleri yönünde hareket edilerek numaralandırılmıştır. Glukozun moleküler yapısıyla karşılaştırıldığında, aralarındaki tek farkın C4 karbonuna bağlı proton ve hidroksil grubunun yer değiştirmiş olmasıdır. Bu noktadan hareketle, ışınlama ile glukoz örneğinde oluşan kökçelerin büyük ölçüde ışınlanmış galaktozda da oluşabileceği düşünülmüş ve benzetişim için oluşturulan model bu fikir üzerine kurulmuştur.

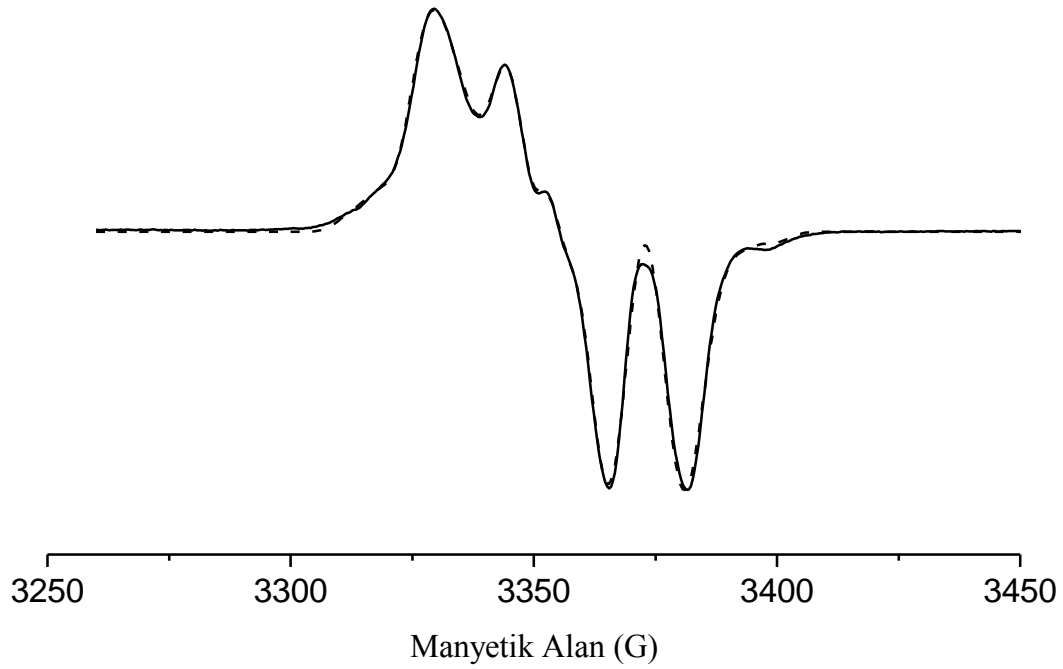


Şekil 3.57. 3 kGy doz değerinde ışınlanmış galaktoz örneği ESR spektrumunun benzetişimi için önerilen kökçeler.

Çizelge 3.6. 3 kGy doz değerinde ışınlanmış galaktoz örneği ESR spektrumu benzetişimi için önerilen kökçeler ve benzetişim sonucu hesaplanan spektroskopik parametre değerleri.

Kökçe	Bağıl şiddet	$g$ -çarpanı	Aşırı ince yapı (G)		Yarı-eğri genişliği (G)
A	37,3	$g_{xx} = 2,0037$ $g_{yy} = 2,0022$ $g_{zz} = 2,0031$	$A(H)_{xx} = 13,2$ $A(H)_{yy} = 27,3$ $A(H)_{zz} = 12,3$	$A(OH)_{xx} = 6,3$ $A(OH)_{yy} = 6,5$ $A(OH)_{zz} = 8,8$	9,0
B	55,5	$g_{xx} = 2,0015$ $g_{yy} = 2,0034$ $g_{zz} = 2,0018$	$A(H)_{xx} = 23,6$ $A(H)_{yy} = 30,7$ $A(H)_{zz} = 25,3$	$A(OH)_{xx} = 18,3$ $A(OH)_{yy} = 18,6$ $A(OH)_{zz} = 8,2$	10,0
C	4,8	$g_{xx} = 2,0057$ $g_{yy} = 2,0015$ $g_{zz} = 2,0012$	$A(H1)_{xx} = 14,7$ $A(H1)_{yy} = 43,8$ $A(H1)_{zz} = 26,7$	$A(H2)_{xx} = 25,0$ $A(H2)_{yy} = 44,5$ $A(H2)_{zz} = 20,5$	5,4
D	2,4	$g_{xx} = 2,0064$ $g_{yy} = 2,0017$ $g_{zz} = 2,0011$	$A(H1)_{xx} = 28,8$ $A(H1)_{yy} = 33,8$ $A(H1)_{zz} = 33,9$	$A(H2)_{xx} = 27,0$ $A(H2)_{yy} = 41,1$ $A(H2)_{zz} = 31,0$	6,4

Yapılan çok sayıda benzetişim denemeleri sonucunda, ışınlanmış galaktoz örneği ESR spektrumuna dört farklı kökçenin kaynaklık ettiği görülmüştür. Bunlardan üç tanesi, glukoz örneği ESR spektrumuna kaynaklık eden A, B ve C kökçelerine karşılık gelen C1 ve C6 karbonlarından proton kopması ve C6 karbonundan hidroksil grubunun kopması ile oluşan kökçelerdir. Dördüncü kökçe ise C3 karbonundan hidroksil grubunun kopmasıyla oluşan D kökçesidir. Benzetişim sonucunda moleküler yapıları Şekil 3.57' de verilen bu kökçeler için belirlenen spektroskopik parametre değerleri Çizelge 3.6' da, bu parametre değerleri kullanılarak oluşturulan kuramsal spektrum ile deneysel karşı geliri ise Şekil 3.58' de verilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi deneysel spektrum ile kuramsal spektrum arasında iyi sayılabilecek bir uyum vardır.

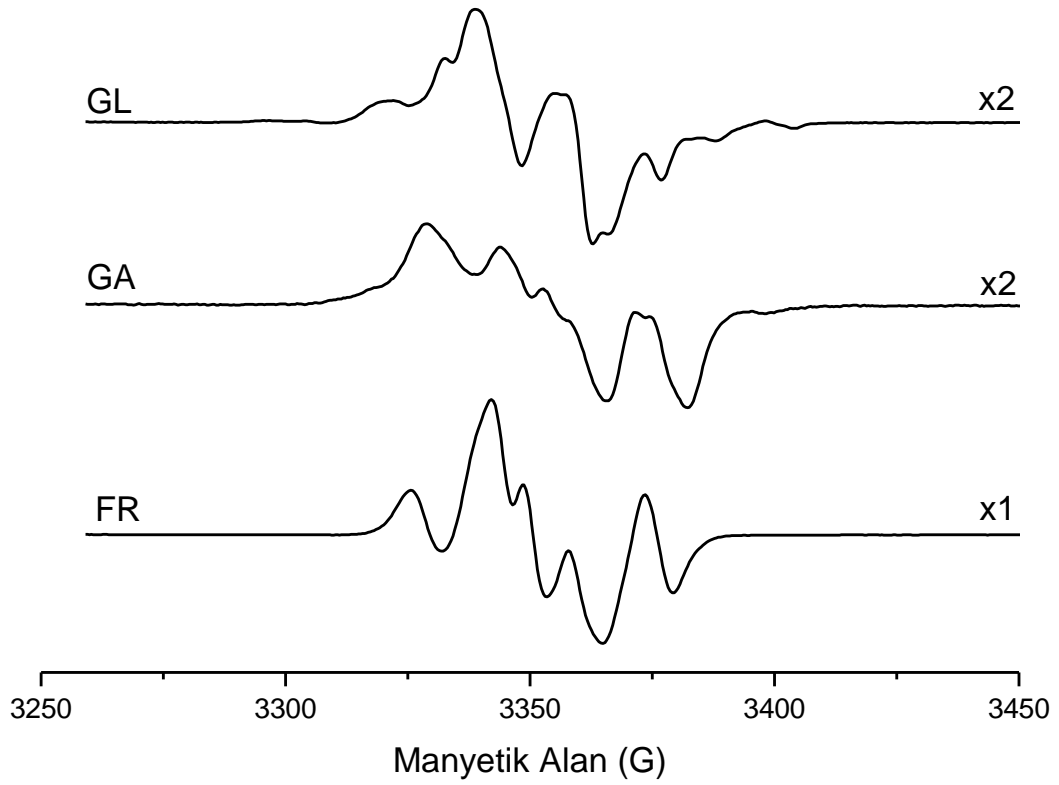


Şekil 3.58. 3 kGy doz değerinde ışınlanmış galaktoz örneği ESR spektrumu ve benzetişim sonucu bulunan parametre değerleri kullanılarak hesaplanan kuramsal spektrum. [(—) Deneysel; (-----) Kuramsal].

#### 4. SONUÇ VE TARTIŞMA

Bu tez çalışmasında, glukoz (GL), fraktoz (FR) ve galaktoz (GA) tek şekerlerinin düşük (5-100 Gy) ve orta (0.1-5 kGy) doz bölgelerinde ESR spektroskopisi yardımıyla dozimetrik malzeme olarak kullanılıp kullanılmayacakları ayrıntılı bir biçimde incelenmiştir.

İlk olarak, herhangi bir işlemde geçirilmemiş GL, FR ve GA örneklerinin herhangi bir rezonans sinyaliyle sahip olup olmadıklarına bakılmış ve hiçbirinde anlamlı sayılabilecek bir ESR sinyali gözlenmemiştir. Buna karşılık, <sup>137</sup>Cs ve <sup>60</sup>Co gama kaynaklarıyla ışınlanan örneklerin ESR spektrumlarında ise çok sayıda rezonans sinyali görülmüştür. Işınlanmış örnek spektrumları arasında genel bir karşılaştırma yapılabilmesi amacıyla, 3 kGy doz değerinde ışınlanmış GL, GA ve FR örneklerinin aynı spektrometre çalışma koşullarında kaydedilmiş spektrumları Şekil 4.1' de birarada verilmiştir. Işınlanmış örnek spektrumlarındaki rezonans sinyallerinden bazıları işaretlenerek, uygulanan mikrodalga gücü, modülasyon genliği, ışınlama dozu, örnek sıcaklığı ve depolama süresi ile bu sinyallerin şiddetlerinde meydana gelen değişimler incelenmiştir. Her üç örnek için de farklı modülasyon genliklerinde oluşturulan mikrodalga-doyum eğrilerinden, yaklaşık 4 mW' lık bir mikrodalga gücü ve 10 G' luk bir modülasyon genlik değerinin seçilmesi durumunda, ESR spektrumlarının simetrisi bozulmadan rezonans sinyallerinin şiddetlerinde yapay artışlar sağlanabileceği ve böylece algılanabilir minimum radyasyon doz değerinin 5 Gy' in de aşağılarına çekilebileceği sonucuna varılmıştır. Işınlanmış GL, FR ve GA örnekleri ESR spektrumlarında işaretlenen rezonans sinyalleri için farklı modülasyon genliklerinde oluşturulan doz-cevap eğrilerinin, yapılan benzetişim hesaplamaları sonucunda en iyi ikinci dereceden polinom şeklindeki bir fonksiyonla betimlenebileceği görülmüştür. Işınlanmış FR örneğinde gözlenen I<sub>1</sub> ve I<sub>4</sub> rezonans sinyallerinin yüksek modülasyon genliklerinde simetri özelliklerini kaybettikleri ve bu nedenle radyasyon doz ölçümünde I<sub>2</sub> ve I<sub>3</sub> rezonans sinyallerinin kullanılmasının daha uygun olacağı düşünülmektedir. GA örneğinin ise, rezonans sinyallerininin keskin bir biçimde belirgin olmaması nedeniyle düşük doz bölgesinde dozimetrik amaçlı kullanılmayacağı sonucuna varılmıştır.



Şekil 4.1. 3 kGy doz değerinde ışınlanmış GL, GA ve FR örneklerinin aynı spektrometre çalışma koşullarında kaydedilmiş ESR spektrumları (Mikrodalga Gücü, 0.5 mW; Modülasyon Genliği, 3 G ve Kazanç,  $6,3 \times 10^3$ ).

Işınlanmış GL, FR ve GA örnekleri ESR spektrumlarında gözlenen rezonans sinyallerinin şiddetlerinde 130-380 K bölgesinde sıcaklıkla meydana gelen değişimlere bakıldığında, GL örneğinde gözlenen rezonans sinyallerinin sıcaklığa karşı son derece kararlı oldukları görülür. Ayarlanan her sıcaklık adımındaki toplam bekleme süresi (sıcaklığın dengeye gelmesi ve spektrumun kaydedilmesi için geçen süre) gözönüne alındığında, böylesi yüksek sıcaklıklarda bile rezonans sinyallerinin şiddetlerinde çok belirgin bir azalma olmaması dozimetrik açıdan olumlu bir sonuç olarak değerlendirilmiştir. Bunun yanısıra, oda koşullarında yaklaşık üç ay boyunca değişik zamanlarda kaydedilmiş ESR spektrumlarından, GL örneğinde gözlenen rezonans sinyallerinin şiddetlerinde de zamanla anlamlı bir değişim gözlenmemiştir. FR örneğinde ise durum biraz daha farklıdır. Bu örnekte gözlenen  $I_1$  ve  $I_4$  rezonans sinyallerinin yüksek sıcaklıklarda büyük ölçüde sönüme uğradıkları ve bu sönümün yaklaşık 360 K civarında çok hızlandığı görülmüştür. Buna karşın  $I_2$  ve  $I_3$  rezonans

sinyallerinin, özellikle de  $I_3$  rezonans sinyalinin sıcaklığa karşı daha dirençli olduğu anlaşılmıştır. Rezonans sinyallerinin oda sıcaklığındaki uzun erimli sönümlerine bakıldığında da,  $I_1$  ve  $I_4$  rezonans sinyallerinin ışınlamadan sonra sürekli olarak bir azalma eğilimi içinde oldukları görülmektedir. Bu azalma  $I_2$  ve  $I_3$  rezonans sinyallerinde ışınlamayı takip eden ilk 10 gün içerisinde görülmekte, daha sonraki zamanlarda ise yaklaşık olarak değişmeden sabit kalmaktadır. GA örneğinde gözlenen  $I_1$  ve  $I_4$  rezonans sinyallerinin şiddetlerinde sıcaklıkla oluşan değişimler çok benzerdir. Her iki sinyal de yaklaşık 350 K sıcaklığından sonra hızlı bir şekilde sönüme uğramıştır.  $I_2$  ve  $I_3$  rezonans sinyallerinin sıcaklıkla değişimleri biraz daha karmaşıktır. 350 K sıcaklığından daha yüksek sıcaklıklara çıkıldığında  $I_2$  rezonans sinyal şiddeti değişmez kalırken,  $I_3$  rezonans sinyal şiddeti artmaya başlamıştır. Sıcaklığın 380 K' den aşağılara düşürülmesi ile  $I_2$  sinyalinde zayıflama gözlenirken,  $I_3$  sinyalindeki artış eğilimi devam etmiştir. Rezonans sinyallerinin oda sıcaklığındaki uzun erimli sönümlerine bakıldığında, ışınlamayı takip eden ilk 10 gün dışında  $I_1$  ve  $I_4$  rezonans sinyallerinin son derece kararlı oldukları,  $I_2$  ve  $I_3$  rezonans sinyallerinin ise hafif bir artış eğiliminde oldukları görülmektedir. GA örneğinde gözlenen rezonans sinyallerinin sıcaklığa sıkı sıkıya bağlı olması nedeniyle, dozimetrik amaçlı kullanım durumunda, örneğin oda sıcaklığı üzerindeki sıcaklıklardan korunması ve ölçümlerin ışınlamayı takip eden ilk birkaç gün içerisinde tamamlanması gerektiği sonucuna varılmıştır.

Oda sıcaklığının üzerindeki dört farklı sıcaklıkta, ışınlanmış örneklerde gözlenen rezonans sinyal şiddetlerinin zamanla nasıl değiştiklerine bakılmıştır. GL örneğinde gözlenen rezonans sinyal şiddetlerinin, beklendiği gibi, artan sıcaklıkla birlikte daha hızlı bir biçimde azaldıkları görülmüştür. Işınlanmış FR örneğinde gözlenen  $I_1$ ,  $I_2$  ve  $I_4$  rezonans sinyal şiddetlerinin de artan sıcaklıkla birlikte zayıfladığı ancak,  $I_3$  rezonans sinyal şiddetinin hafif bir artış eğiliminde olduğu belirlenmiştir. Bunun yanında, her tavlama sıcaklığında  $I_1$  ve  $I_4$  rezonans sinyallerinin  $I_2$  rezonans sinyaline göre çok daha fazla sönüme uğradıklarını da vurgulamak gerekir. GA örneğinde de benzer bir durum söz konusudur. Işınlanmış GA örneğinde gözlenen  $I_1$  ve  $I_4$  rezonans sinyal şiddetlerinin sıcaklığın artırılması ile zayıfladığı,  $I_2$  rezonans sinyalinin ise belirli bir zamana kadar önce arttığı ve daha sonra azalma eğilimine girdiği görülmüştür.  $I_2$  sinyalindeki bu davranış değişikliğinin, sıcaklığın artırılması ile daha da öne çekildiği anlaşılmıştır.  $I_3$  rezonans sinyalinde ise tüm sıcaklıklarda tavlama zamanına bağlı olarak anlamlı sayılabilecek artışlar gözlenmektedir. Işınlanmış FR ve GA

örneklerinde, düşük ve yüksek manyetik alan bölgelerinde gözlenen rezonans sinyallerinin kendi içlerinde benzer davranışlar sergilemeleri, bu sinyallere kaynaklık eden kökçelerin aynı orijinli olabileceklerini düşündürmektedir. Ancak, spektrum merkezi yakınlarında gözlenen  $I_2$  ve  $I_3$  rezonans sinyalleri için net birşey söylemek zordur. Bu sinyallerin birbirlerinden ve dikkate alınmayan başka rezonans sinyallerinden etkilendikleri düşünülmektedir. Işınlanmış GL, FR ve GA örneklerinde oluşan kökçe veya kökçelerin yapılarının, bağıl miktarlarının ve spektroskopik parametre değerlerinin belirlenmesi amacıyla yapılan benzetişim hesaplamaları, her üç örnekte de toplam dört farklı kökçenin oluştuğunu göstermiştir. Ancak, bu kökçelerin GL ve GA örneklerinde anizotropik karakterde, FR örneğinde ise izotropik karakterde olduklarını vurgulamak gerekir.

Bu tez kapsamında yürütülen çalışmalar sonucunda elde edilen tüm bulgular birlikte değerlendirildiğinde, dozimetrik kullanım açısından GL örneğinin hem düşük hem de orta doz bölgesinde diğer iki örneğe göre (FR ve GA) daha uygun olduğu sonucuna varılmıştır. FR örneğinde  $I_2$  ve  $I_3$  rezonans sinyallerinin, GA örneğinde ise  $I_2$  dışındaki tüm rezonans sinyallerinin doz ölçümünde kullanılabileceği düşünülmektedir. Ancak, GA örneğinin düşük bölgedeki radyasyon dozlarını ölçmede kullanılamayacağını, orta doz bölgesinde ise ışınlandıktan sonra oda sıcaklığının üzerindeki sıcaklıklardan korunması gerektiğini hatırlatmak gerekir.

## Kaynaklar

- Abagyan, G. V. and Apresyan, A. S., 2004, Free-Radical Reaction Routes in  $\gamma$ -Irradiated  $\beta$ -D-Fructose, High Energy Chemistry, 38, pp. 369-372.
- Altın, V., Eylül 2006, BİLİM ve TEKNİK, Yeni Ufuklara, Kuantum Ölçümü, TÜBİTAK, s. 1-15.
- Anbar, G., 2006, Mağara Çökellerinin Elektron Spin Rezonans Yöntemi ile İncelenmesi, ESR (Electron Spin Resonance) Studies of Cave Deposits, Hacettepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Ankara, 3.
- Apaydın, F., 1996, Manyetik Rezonans, H.Ü. Mühendislik Fak. Ders Kitapları No:3, Ankara.
- Artık, N., Bayındırlı, L. ve Mert, İ., 2011, Karbonhidratlar, Mısır Şekeri ve Gıda Endüstrisinde Kullanımı, Comart, Ankara, 11, 59.
- Basly, J. P., Longy I. and Bernard M., 1997, ESR identification of radiosterilized pharmaceuticals: latamoxef and ceftriaxone, International Journal of Pharmaceuticals 158, 241-245.
- Bennati, M. and Murphy, D. M., 2009, Electron Paramagnetic Resonance Spectra in the Solid State. Electron Paramagnetic Resonance. Brustolon, M. And Giamello, E. (eds.), Wiley, New Jersey, 198-200.
- Corvaja, C., 2009, Introduction to Electron Paramagnetic Resonance. Electron paramagnetic Resonance, a Practitioner' s Toolkit. Brustolon, M. And Giamello, E. (eds.), , John Wiley and Sons, INC., Publication, New Jersey, 4-18.
- Dözen, C., 2006, M Tabakası X-ışınları Üretim Tesir Kesitlerinin Hesaplanması, Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Kahramanmaraş, 11-20.
- Ertürk, M. E., 2008, Film dozimetre ve iki boyutlu iyon odası kullanılarak oluşturulan doz haritalarının tedavi planlama sisteminden elde edilen doz haritaları ile karşılaştırılması, Hacettepe Üniversitesi, Sağlık Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Ankara, 133s.
- Gerson, F. and Huber, W., 2003, Electron Spin Resonance Spectroscopy of Organic Radicals, WILEY-VCH, Weinheim, pp. 3-42.
- Gopal, N. G. S., 1978, Radiation Sterilization of Pharmaceuticals and Polymers, Radiat. Phys. Chem., 12, pp. 35-50.
- Gustafsson, H., 2008, Development of Sensitive EPR Dosimetry Methods, PH. D. Thesis, Division of Radiation Physics, Department of Medical and Health Sciences, Faculty of Health Sciences, Linköping University, Sweden, 39p.

- Ikeya, M., 1993, New Application of Electron Spin Resonance Dating, Dosimetry and Microscopy, World Scientific, Singapore, pp. 408-417.
- Kaçar, A., 2006, Yapılarda radyasyon kalkanı olarak kullanılan barit agregalı ağır beton elemanların zırh kalınlık hesaplarının belirlenmesi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Isparta, s. 20-23.
- Maghraby, A. and Tarek, E. 2006, A new EPR dosimeter based on sulfanilic acid, Radiation Measurements 41, 170-176.
- Mehta, K. and Girzikowski, R., 1996, Alanine-ESR dosimetry for radiotherapy IAEA Experience, Appl. Radiat. Isot. 47, 1189-1192.
- Niroomand-Rad, A., Blackwell, C. R., Coursey, B. M., Gall, K. P., Galvin, J. M., McLaughlin, W. L., Meigooni, A. S., Nath, R., Rodgers, J. E. and Soares, C. G., 1998, Radiochromic Film Dosimetry, AAPM, Report No:63, Medical Physics, 25, pp. 2094-2115.
- Pauwels, E., Lahorte, P., Vanhaelewyn, G., Callens F., De Proft, F., Geerlings, P. and Waroquier, M., 2002, Tentative structure for the radiation-induced radicals in crystalline  $\beta$ -D-fructose using density functional theory, J. Phys. Chem. A, 106, 12340-12348.
- Pauwels, E., Speybroeck, V. V., Vanhaelewyn, G., Callens, F. and Waroquier, M., 2004, DFT-EPR Study of Radiation-Induced Radicals in  $\alpha$ -D-glucose, Inc. Int. J. Quantum Chem., 99, 102-108.
- Pauwels, E., Speybroeck, V. V. and Waroquier, M., 2006, Radiation-induced radicals in  $\alpha$ -D-glucose: Comparing DFT cluster calculations with magnetic resonance experiments, Spectrochimica Acta Part A, 63, 795-801.
- Raffi, J., Yordanov, N. D., Chabane, S., Douifi, L., Gancheva, V. and Ivanova, S., 2000, Identification of irradiation treatment of aromatic herbs, spices and fruits by electron paramagnetic resonance and thermoluminescence, Spectrochimica Acta Part 56, 409-416.
- Rieger, P. H., 2002, Electron Spin Resonance: Analysis and Interpretation, RSC Publishing, Cambridge, 4-10p.
- Sharpe, P. and Sephton, J., 2000, An automated system for the measurement of alanine/EPR dosimeters, Applied Radiation and Isotopes 52, 1185-1188.
- Staněk, J., Černý, M., Kocourek, J. and Pacák, J., 1963., The Monosaccharides, Academic Press Inc., New York, pp 78, 79.
- Şahin, Y., 1999, Çekirdek Fiziğinin Esasları. Çeviri, Atatürk Üniversitesi Yayınları, Erzurum, 340s.
- Vanhaelewyn, G.C., Sadlo, J., Callens, F., Mondelaers, W., De Frenne, D. and Matthys, P., 2000, A decomposition study of the EPR spectrum of irradiated sucrose, Application Radiation and Isotopes 52, 1221-1227.

- Vanhaelewyn, G.C., Lahorte, P., De Proft, F., Mondelaers, W., Geerlings, P. and Callens, F., 2001, Electron magnetic resonance study of stable radicals in irradiated D-fructose single crystals, *Phys. Chem. Chem. Phys.*, 3, 1729-1735.
- Vanhaelewyn, G.C., Jansen, B., Callens F. J. and Sagstuen, E., 2004, ENDOR-assisted study of the stable EPR spectrum of X-irradiated  $\alpha$ -L-sorbose single crystals: MLCFA and simulation decomposition analyses, *Radiat. Research* 162, 96-104.
- Vanhaelewyn, G.C., A. M., Pauwels, E., Callens, F. J., Waroquier, M., Sagstuen, E. and Matthys, P. F. A. E., 2006, Q-Band EPR and ENDOR of Low Temperature X-Irradiated  $\beta$ -D-Fructose Single Crystals, *J. Phys. Chem. A*, 110, 2147-2156.
- Weil, J. A. and Bolton, J. R., 2007, *Electron Paramagnetic Resonance: Elementary Theory and Practical Applications*, John Wiley and Sons, New Jersey, 3, pp. 38-40.
- Yamauchi, Y., Sugito, M., and Kuzuya, M., 1999, Plasma-Induced Free Radicals of Polycrystalline Monocarbohydrates Studied By Electron Spin Resonance, *Chem. Pharm. Bull.* 47(2). pp. 273-278.
- Yordanov, N. D. And Georgieva, E., 2004, EPR and UV spectral study of gamma-irradiated white and burned sugar, fructose and glucose, *Spectrochimica Acta Part A*, 60, pp. 1307-1314.
- Yüksel, M., 2008, Orta Anadolu Fluoritlerinin ( $\text{CaF}_2$ ) Termolüminesans (TL) Işıma Tepelerine Tavlamanın Etkisi, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Adana, 25,26p.

## ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Fulya ÖZSAYIN

Doğum Yeri : ANKARA

Doğum Yılı : 21/07/1986

Medeni Hali : BEKAR

Eğitim ve Akademik Durumu:

Lisans : Hacettepe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Fizik Mühendisliği  
Bölümü (2004-2009)

Y. Lisans : Hacettepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Mühendisliği  
A.B.D. (2009-devam ediyor)

Yabancı Dil : İngilizce

İş Tecrübesi : Araştırma Görevlisi, Hacettepe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi,  
Fizik Mühendisliği Bölümü (2010-devam ediyor)

