

**ANKARA ÜNİVERSİTESİ
NÜKLEER BİLİMLER ENSTİTÜSÜ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**DOZİMETRİ ÇALIŞMALARINDA EPR TEKNİĞİNİN KULLANILMASI VE
SOFRA ŞEKERİNİN DOZİMETRİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

Gül Bayramiye ÖZMEN

**MEDİKAL FİZİK ANABİLİM DALI
SAĞLIK FİZİĞİ TEZLİ YÜKSEK LİSANS PROGRAMI**

**ANKARA
2022**

Her hakkı saklıdır

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

Tarih:

Gül Bayramiye ÖZMEN

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

DOZİMETRİ ÇALIŞMALARINDA EPR TEKNİĞİNİN KULLANILMASI VE SOFRA ŞEKERİNİN DOZİMETRİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Gül Bayramiye ÖZMEN

Ankara Üniversitesi
Nükleer Bilimler Enstitüsü
Medikal Fizik Anabilim Dalı
Sağlık Fiziği Tezli Yüksek Lisans Programı

Danışman: Doç. Dr. Eren ŞAHİNER

Bu tez çalışmasında Elektron Paramanyetik Rezonans (EPR) tekniğinin geriye dönük radyasyon dozu ölçümlerinde kullanılabilirliği araştırılarak sofrta şekerinin dozimetre olarak kullanılabilmesi için yüksek doz değerlerinde (3 kGy, 5 kGy, 10 kGy) gama ışınları ve düşük doz değerlerinde (100 cGy, 200cGy, 300 cGy, 500 cGy, 800 cGy, 1000 cGy, 1200 cGy) X-ışınları ile ışınlanan şekerin doz cevabı incelenmiştir. Ölçümler oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. Işınlanmış sofrta şeker (sükroz- sakkaroz) örneğinde oluşan kararsız serbest radikallerin sinyallerde yanıtıcı etkisi olmaması için literatürün de önerdiği gibi en az 72 saat beklenerek ölçümler alınmıştır. EPR spektrumlarında tepe-tepe yükseklikleri dikkate alınarak doz cevap grafikleri oluşturulmuştur. Artan dozla birlikte sinyallerin doğrusal olarak arttığı gözlenmiştir. Yüksek dozların (kGy mertebesinde) kullanıldığı şeker örneklerinde yaklaşık 14 ay boyunca farklı aralıklarda EPR ölçümleri gerçekleştirilerek radikallerin kararlılığı izlenmiştir. Elde edilen grafiklerin ve Z Skorlarının incelenmesi sonucunda radikal kararlılığının; Z değerinin 2'nin altında olması nedeniyle yüksek olduğu gözlenmiştir. Işınlanmış gıdaların ölçülmesinde de elde edilen EPR spektrumlarının literatürdeki spektrumla uyumlu olduğu gözlenmiştir.

Ayrıca radyoterapi tedavilerinde uygulanan fraksiyonel doz aralığında (cGy mertebesinde) şekerin dozimetre olarak kullanılabilmesi adına gerçekleştirilen kalibrasyon çalışmasında verilen doz aralığında şekerde doğrusal bir doz- cevap grafiği görülmüştür.

Şubat 2022, 54 Sayfa

Anahtar Kelimeler: Şeker, Sükroz, Elektron Paramagnetik Rezonans (EPR), Retrospektif Dozimetri, Işınlanmış Gıdaların Dedeksiyonu, Dozimetri

ABSTRACT

Master's Thesis

USING EPR TECHNIQUE IN DOSIMETRY STUDIES AND ANALYSIS OF DOSIMETRIC PROPERTIES OF TABLE SUGAR

Gül Bayramiye ÖZMEN

Ankara University
Institute of Nuclear Sciences
Department of Medical Physics
Health Physics Master's Degree Program

Supervisor: Assoc. Prof. Dr Eren ŞAHİNER

In this thesis study, the usability of the Electron Paramagnetic Resonance (EPR) technique in retrospective radiation dose measurements was investigated and in order to use table sugar as a dosimeter, high dose values (3 kGy, 5 kGy, 10 kGy) gamma rays and low dose values (100 cGy, 200cGy, 300 cGy , 500 cGy, 800 cGy, 1000 cGy, 1200 cGy) dose response of sugar irradiated with X-rays was investigated. Measurements were carried out at room temperature. In order to prevent unstable free radicals formed in the irradiated table sugar (sucrose) sample to have a misleading effect on the signals, measurements were taken by waiting for at least 72 hours, as suggested by the literature. Dose response graphs were created by considering the peak to peak heights of the EPR spectra. It was observed that the signals increased linearly with increasing dose. In sugar samples using high doses (in kGy unit), EPR measurements were carried out at different intervals for about 14 months, and the stability of the radicals was monitored. As a result of the analysis of the obtained graphics and Z scores;It was observed that the signal stability was high. Because Z-score was below 2. It has been observed that the EPR spectra obtained in the measurement of irradiated foods are compatible with the spectra in the literature.

In addition, a linear dose-response graph was observed in the low doses of sugar given in the calibration study carried out in order to use sugar as a dosimeter in the fractional dose range (in cGy unit) applied in radiotherapy treatments.

February 2022, 54 pages

Key Words: Sugar, Sucrose, Electron Paramagnetic Resonance (EPR), Retrospective Dosimetry, Food irradiation, Dosimetry

TEŞEKKÜR

Öncelikle; Yüksek lisans çalışmam süresince bana her zaman destek olan, güvenen, yol gösteren danışman hocam Doç. Dr. Eren ŞAHİNER'e teşekkürlerimi sunarım.

Tez kapsamında yaptığım deneysel çalışmalar için imkanlarından ve cihazlarından faydalandığım Ankara Üniversitesi Nükleer Bilimler Enstitüsü'ne, tez çalışmam sırasında gama ışınları ile ışınlanmış örnek temininde yardımcı olan sayın Dr. Ülkü Rabia YÜCE SEMİZ'e (TENMAK), numunelerimin X ışınları ile ışınlanmasında çok yardımcı olan Medikal Fizik Uzmanı Esil KARA'ya (ONKO Ankara Onkoloji Merkezi), EPR laboratuvar çalışmalarında her daim destek olan Araş. Gör. Dr. Engin AŞLAR'a, Sasan GERANMAYEH'e, Öğr. Gör. Dr. Şule KAYA KELEŞ'e, Nükleer Bilimler Enstitüsü'nde (NBE) ders veren tüm hocalarıma, biz öğrencilere her daim yardımcı olan Enstitü personeline ve motive edici yaklaşımlarından ötürü sevgili iş arkadaşım Gaye UMURHAN'a çok teşekkür ederim. Ayrıca, yüksek öğrenim hayatımda her zaman büyük desteği olan Emekli Öğretim Üyesi Sayın Prof. Dr. Niyazi MERİÇ'e teşekkürü bir borç bilirim.

Son olarak da hayatımı her zaman güzelleştiren, her daim yanımda olarak desteklerini hissettiren geniş aileme ve canım çekirdek ailem eşim Ayhan ÖZMEN'e, oğlum Ömer Kaan'a, kızım Zehra Işık'a sonsuz teşekkür ederim.

Gül Bayramiye ÖZMEN
2022

İÇİNDEKİLER

TEZ ONAYI	i
ÖZET.....	ii
ABSTRACT	iii
TEŞEKKÜR	iv
İÇİNDEKİLER	v
SİMGELER DİZİNİ VE KISALTMALAR	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ	x
1. GİRİŞ	1
2.KURAMSAL TEMELLER	6
2.1 Elektron Paramanyetik Rezonans (EPR) Teorisi	6
2.1.1 Zeeman etkisi.....	8
2.1.2 Aşırı ince yapı etkileşimleri.....	10
2.2 Soğurulan Doz Ölçüm Protokolü.....	13
2.2.1 Suda soğurulan dozun belirlenmesi.....	14
3. MATERYAL VE YÖNTEM	17
3.1 Materyal.....	17
3.1.1 Sofra şekeri (sakkaritler).....	17
3.1.2 Elektron Paramanyetik Rezonans spektroskopi sistemi	17
3.1.3 Elekta Versa HD lineer hızlandırıcı	20
3.1.4 PTW Unidos elektrometre ve silindirik iyon odası	20
3.1.5 RW3 fantom.....	22
3.2 Yöntem	23
3.2.1 Örneklerin temini ve ışınlanması.....	23
3.2.2 Kalibrasyon işlemi.....	23
3.2.3 Sinyal şiddetinin zamanla sönümü	24
3.2.4 Genlik ve güç çalışması.....	24
3.2.5 Doz cevap çalışması.....	25
4. BULGULAR.....	26
4.1 Kalibrasyon İşlemi	26
4.2 Sinyal Şiddetinin Zamanla Sönümü	27
4.3 Genlik ve Güç Çalışması.....	33
4.4 TRS 398 (IAEA 2000) Çalışmasında Doz Cevap Çalışması	36
4.5 Işınlanmış Gıda Çalışması	46
5. TARTIŞMA VE SONUÇ	49
KAYNAKLAR	52

SİMGELER DİZİNİ VE KISALTMALAR

k_{TP}	Basınç-sıcaklık düzeltme faktörü
μ_B	Bohr Manyetonu
cGy	Centigray
k_{Q,Q_0}	Demet kalite düzeltme faktörü
k_{elec}	Elektrometreye ait kalibrasyon faktörü
EPR	Elektron Paramanyetik Rezonans
μ_e	Elektronun manyetik dipol moment
ESR	EPR Elektron Spin Rezonans
G	Gauss, Manyetik alan ölçü birimi
GHz	Giga Hertz
Gy	Gray
Gy/min	Gray/dakika
TPR_{10}^{20}	Işın kalitesi
QA	Kalite güvenilirliği
SSD	Kaynak Yüzey Mesafesi
k.b.	Keyfi birim
kGy	Kilo gray
Co-60 (^{60}Co)	Kobalt 60 Radyoaktif Çekirdeği
B	Manyetik Alan
MD	Mikrodalga
mT	Militesla, Manyetik alan ölçü birimi
mW	Miliwatt, Güç birimi
k_h	Nem düzeltme faktörü
NÜKEN	Nükleer Enerji Araştırma Enstitüsü
h	Planck Sabiti
h_{pl}	Plastik fantom düzeltme faktörü
k_{pol}	Polarite düzeltme faktörü
KCl	Potasyum Klorür
N_{D,w,Q_0}	Referans demet kalitesinde (Q_0) suda soğurulan doz kalibrasyon faktörü
R	Röntgen

R/min	Röntgen/dakika
s	saniye
g	Spektroskopik Yarıлма Çarpanı
m_s	Spin manyetik kuantum sayısı
H₂O	Su
TRS	Teknik Rapor Serisi
I_{pp}	Tepeden Tepeye Çizgi Genişliği
TLD	Termoluminesans dozimetre
T	Tesla, Manyetik alan ölçü birimi
TENMAK	Türkiye Enerji, Nükleer ve Maden Araştırma Kurumu
IAEA- UAEA	Uluslararası Atom Enerjisi Ajansı
k_s	Yeniden birleşme düzeltme faktörü
% DD	Yüzde derin doz

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1 Elektromanyetik enerjinin soğurulmasıyla ilgili geçiş	6
Şekil 2.2 B_0 manyetik alanına göre μ_e 'nin minimum ve maksimum enerji yönelimleri ..	8
Şekil 2.3 Yakındaki bir çekirdeğe bağlı olarak elektrondaki yerel manyetik alan, BI ..	11
Şekil 2.4 Yakındaki bir çekirdeğin yerel manyetik alanı nedeniyle bir EPR sinyalinde bölünme	12
Şekil 2.5 Absorpsiyon sinyallerinin entegre yoğunluğu	12
Şekil 2.6 Kalibrasyon için lineer hızlandırıcının, fantom ve iyon odasının yerleşimi ..	13
Şekil 3.1 Nükleer Bilimler Enstitüsü laboratuvarında bulunan EPR cihazı ve Kuvars tüplerin ölçüm için EPR cihazının kavitesine yerleştirilmesi	18
Şekil 3.2 (a) Bruker EMX EPR Spektrometresi (b) Örnek tüpü kavitesi	18
Şekil 3.3 Elekta Versa HD lineer hızlandırıcı	20
Şekil 3.4 (a) PTW Unidos Weblin elektrometre (b) Silindirik iyon odası	21
Şekil 3.5 RW3 Fantom.....	22
Şekil 4.1 Strong Pitch referans malzemesinin EPR spektrumu	26
Şekil 4.2 (a) 3 kGy Işınlanmış ve Işınlanmamış şeker örneğine ait EPR Spektrumu (ayrı ayrı gösterim) (b) 3 kGy Işınlanmış ve Işınlanmamış şeker örneğine ait EPR Spektrumu (birlikte gösterim)	29
Şekil 4.3 3 kGy ışınlanmış şekerin I_{pp} sönüm grafiği	30
Şekil 4.4 5 kGy ışınlanmış şekerin I_{pp} sönüm grafiği.....	31
Şekil 4.5 10 kGy ışınlanmış şekerin I_{pp} sönüm grafiği	32
Şekil 4.6 Modülasyon genliğinin belirlenmesi	33
Şekil 4.7 Optimum güç çalışması	35
Şekil 4.8 Modülasyon Genliği 4 G ve güç değeri 2mW için elde edilen EPR spektrumu	36
Şekil 4.9 Şeker paketlerinin RW3 fantomu üzerine yerleştirilmesi.....	38
Şekil 4.10 Işınlama için hazırlanan sistem	38
Şekil 4.11 Işınlanmamış ve ışınlanmış şekerin EPR spektrumları	42
Şekil 4.12 1200 cGy ışınlanmış şekerin EPR spektrumu	43
Şekil 4.13 6MV X-ışınıyla ışınlanmış şeker örneğinin tüm dozları içeren EPR Spektrumu	43

Şekil 4.14 Işınlanmamış şekerin farklı genlik ve güç değerlerindeki EPR spektrumları.....	44
Şekil 4.15 Ipp sinyal değerlerine ait doz cevap grafiği	45
Şekil 4.16(a)Işınlanmamış kuru mangoya ait tipik ESR spektrumu (TS EN 13708 2004)	
(b) Işınlanmış kuru mangoya ait tipik ESR spektrumu (3,0 kGy) (TS EN 13708 2004).....	47
Şekil 4.17 (a) Işınlanmamış kuru incire ait tipik ESR spektrumu (TS EN 13708 2004)	
(b) Işınlanmış kuru incire ait tipik ESR spektrumu (3,0 kGy) (TS EN 13708 2004)	47
Şekil 4.18 3 kGy ışınlanmış şeker örneği	48



ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1 $g = 2$ sinyaline isabet eden mikrodalga frekansları ve rezonans alanı	10
Çizelge 4.1 Strong Pitch referans malzemesinin g değeri için hesap parametreleri	27
Çizelge 4.2 3 kGy ışınlanmış şekerin I_{pp} sönüm değerlerine ait Z skorları	30
Çizelge 4.3 5 kGy ışınlanmış şekerin I_{pp} sönüm değerlerine ait Z skorları.....	31
Çizelge 4.4 10 kGy ışınlanmış şekerin I_{pp} sönüm değerlerine ait Z skorları	32
Çizelge 4.5 Genlik ve güç çalışması için kullanılan deneysel parametreler	34
Çizelge 4.6 Güç-dB çalışması	34
Çizelge 4.7 6 MV X ışınları için % DD dağılımları $10 \times 10 \text{ cm}^2$ alan büyüklüğü için 5 cm derinlikteki %DD=86,9 (BIR 1972).....	37
Çizelge 4.8 Teorik ve deneysel doz değerleri	41
Çizelge 4.9 Doz cevap değerleri için kullanılan ölçüm parametreleri	42
Çizelge 4.10 Doz-cevap eğrisinin uyumlu olduğu matematiksel lineer fonksiyon katsayıları	46
Çizelge 4.11 TS EN 13708 (2004) standartında önerilen ile tezde kullanılan spektrometre değerlerinin karşılaştırılması	46

1. GİRİŞ

Günümüzde; sağlık sektörü, laboratuvar çalışmaları, gıda ışınlaması, radyasyonla sterilizasyon, nükleer santraller gibi alanlarda iyonlaştırıcı radyasyonlar yaygın olarak kullanılmakta ve bu radyasyonlara maruziyet her geçen gün artmaktadır. Oluşan bu maruziyeti takip altında tutabilmek için dozimetre kullanılması bir zorunluluktur. Ayrıca, radyasyon kazası oluşan bölgelerde maruz kalınan radyasyon dozlarını tahmin edebilmek hayati öneme sahiptir. Bu nedenle, zaman içinde alınan radyasyon dozuna karşı cevapları güvenilir olan hassas dozimetreler gerekmektedir. Laboratuvar ortamlarında çalışanlarda genellikle TLD 100 LiF, Al₂O₃ gibi dozimetreler zaten kullanılmaktadır. Dozimetre maliyetlerini düşürmek, daha yüksek dozlarla karşı doz cevabının olması ve aynı zamanda dozimetrenin doku eşdeğer olmasının istenmesi gibi nedenler yeni dozimetre arayışlarına neden olmaktadır. Bir malzemenin dozimetre olarak kullanılabilmesi için; ışınlama sonrası oluşan belirgin sinyal, ihmal edilebilir arka plan sinyali, doz-cevap ilişkisinin doğrusallığı, minimum saptama sınırı ve ışınlama sonrası sinyal kararlılığı araştırılmalıdır.

Radyasyon çalışmalarında; teşhis, tedavi veya araştırma laboratuvarlarında dozimetre kullanmak bir zorunluluktur. Radyasyon çalışanlarının maruziyetleri her daim çeşitli dozimetrelerle takip edilmektedir. Bunun yanında sterilizasyon amaçlı gıda ışınlamalarında kilogray (kGy) mertebelerinde dozlarla ışınlamalar gerçekleştirilmektedir. Gıdaların ışınladığı dozların takibi yüksek maliyetli alanin dozimetreler aracılığıyla takip edilmektedir. Bu durumlar bilinçli radyasyon kullanımı durumlarında söz konusudur. Bu durumların haricinde radyasyon kazaları neticesinde bilinçsizce radyasyon maruziyetleri gerçekleşebilmektedir. Böyle durumlarda çevrede bulunan doğal malzemelerin dozimetrik özellikleri yol gösterici olmaktadır. Bu tez çalışmasında; temin edilmesi kolay, efektif atom numarası 6,92 (El-Ahdal 2007) ile doku eşdeğerine oldukça yakın, maliyeti son derece düşük olan şekerin (sükroz, sakkaroz) dozimetrik özellikleri araştırılmıştır.

Sakaritler, iş yerleri de dahil olmak üzere çeşitli yerlerde kolayca bulunabilen kristal bir maddedir. Sakaritler, monosakkaritler (ör. mannoz, glikoz, galaktoz ve fruktoz) ve disakkaritler (ör. sakaroz, laktoz ve maltoz) olarak ikiye ayrılır. Granül sakkarozun diğer adı sofr şekeridir. Monosakkarit türevleri (örn. askorbik asit ve sorbitol) ayrıca gıdalarda yaygın olarak bulunur. Literatürde incelenen tüm sakkaritlerden, saf formlarında ölçüldüğünde radyasyon kaynaklı bir EPR sinyali ölçülmektedir (Herve 2006b). Sakkaroz için en az 3 radikal tanımlanmıştır (De Cooman vd. 2008). Başka bir yayında ise sükrozun en az 6 bileşeninin olduğu fakat bunlardan tatmin edici olarak sadece 3 tanesinin spektrum analiz metotlarıyla ortaya çıkarılabildiği belirtilmiştir (Vanhaelewyn vd. 2000).

Literatür çalışmalarında; iyonlaştırıcı radyasyona maruz kalan şekerin yapısında serbest radikallerin oluştuğu, ortam sıcaklık ve nemindeki değişimlerde kararlı yapısını koruduğu, çok yüksek dozlarda dahi doz cevabını koruduğu görülmüştür. Oluşan kararlı paramanyetik merkezler Elektron Paramanyetik Rezonans (EPR) spektrometresiyle ölçülebilmektedir.

EPR spektroskopisi; iyonlaştırıcı radyasyonun neden olduğu radikallerin tespitine dayalı bir dozimetri yöntemidir. Retrospektif dozimetri ve radyolojik acil dozimetride oldukça fazla kullanılmaktadır. Ölçümde kullanılan malzemede tahribat yapmaması, numune için hazırlık aşamasının gerekmemesi, çok az bir numunenin yeterli olması, aynı numunenin defalarca ölçümüne izin vermesi gibi nedenler EPR spektroskopisini iyonize radyasyonun etkilerinin araştırılmasında oldukça tercih edilebilir yapmaktadır.

Birçok dozimetri yöntemi, iyonlaştırıcı radyasyonun dozimetrelerdeki kimyasal bileşiklerle etkileşimlerine dayanır. Bu tür etkileşimler, özellikle kristal kafes kusurları, serbest radikaller ve paramanyetik metal iyonları şeklinde bir eşleşmemiş elektron popülasyonu üretebilir. Üretilen paramanyetik merkezler kararlıysa, konsantrasyonları EPR ile ölçülebilir. EPR spektroskopisi, iyonlaştırıcı radyasyonun etkilerinin araştırılmasında güçlü bir araçtır (Ikeya 1993, IAEA-TECDOC-1331 2002).

Mikou vd. (2015) yaptıkları bir çalışmada 6 MV ve 18 MV X ışınları ile ışınladıkları şekerin radyoterapide kullanılan tekli fraksiyonlar halinde verilen dozların büyük çoğunluğunu kapsayan 1-20 Gy aralığında lineer bir doz cevabı olduğunu gözlemlemişlerdir. Enerji farklılığının bir etkisi olmadığını belirtmişlerdir. Şekerlerden elde edilecek peletlerin EPR dozimetre olarak kullanılabileceğini önermişlerdir

Sofra şekerinin dozimetre olarak kullanılması için literatürde birçok farklı radyasyon kaynağı ile ışınlama yapılmıştır. Nakagawa ve Sato (2004) tarafından Demir (Fe), Neon (Ne), Helyum (He), Karbon (C) ve Argon (Ar) ağır iyonlarıyla ışınlanan şeker için soğurulan doza karşı lineer bir doz cevabının görüldüğü ve dozimetre olarak iyi bir aday olabileceği rapor edilmiştir. Bir diğer çalışma da Mikou vd. (2009) tarafından şekerin ışınlaması için hızlandırılmış karbon iyonlarının ve hızlı nötronların kullanımıdır. Işınlamadan sonra yapılan EPR analizi, gama ışını ışınlamalarından sonra gözlemlenene benzer bir spektrum ortaya çıkardığı, hızlandırılmış karbon iyonları ve nötronlar tarafından indüklenen paramanyetik merkezlerin toplam konsantrasyonunun soğurulan dozla orantılı olduğu ve sonuçların, bir radyasyon kazası durumunda sofra şekerinin dozimetri için yararlı bir malzeme olabileceğini gösterdiği bildirilmiştir.

Gıda ışınlama işlemi, pastörizasyon ve sterilizasyon amaçlı olarak gıdaları iyonlaştırıcı radyasyona maruz bırakarak gıdaların raf ömrünün uzatılmasıdır. Pastörizasyon için gıdaya 1-10 kilogray (kGy) arasında doz uygulanmaktadır. Pastörizasyon ile mikroorganizmaların sayısı azaltırken sterilizasyonda radyasyona dirençli bakteri sporları kontrol edilmektedir (Başbayraktar 2012). Bu yüksek radyasyon dozlarının belirlenmesi sırasında alanin dozimetreler kullanılmaktadır. Alanin dozimetreler; basit amino asit ($C_3H_7O_2N$) formlarıdır ve basit Amino asit ($C_3H_7O_2N$) α ve β olmak üzere iki forma sahiptir. Dozimetrik olarak α -alanin ($CH_3-CH(NH_2)-COOH$) kullanılmaktadır. β alaninin ($CH_2(NH_2)CH_2-COOH$) radikallerinin düşük kararlılığı nedeniyle dozimetrik materyal olarak kullanımı uygun değildir (Stuglik 2007). Bu dozimetreler 1Gy-100 kGy aralığında çalışmaktadır ve 10 kGy'e kadar lineer doz cevabı vardır. Dozimetrik sinyalleri uzun süre sönmemektedir. Maliyetleri oldukça yüksektir.

TS EN 13708 (2004) standardı EPR spektroskopisi analizi ile kristal şeker içeren iyonlaştırıcı ışınla ışınlanmış gıdaların belirlenmesi için hazırlanmıştır. Standart kapsamında kuru incir, kuru mango, kuru papaya ve kuru üzüm örnekleri üzerinde çalışılmıştır. İhracatta ışınlanmış gıdaların tercih edilebilirliği arttıkça, uygulamalar artmakta ve dolayısıyla gıdaların gerçekten ışınlanıp ışınlanmadığının da denetlenmesi gerekmektedir. EPR tekniği ile iyonlaştırıcı radyasyonun gıdalarda oluşturduğu serbest radikaller tespit edilebilmektedir. Serbest radikallerin sönüme uğraması söz konusu olduğunda termoluminesans tekniği ile tespit yapılmaktadır. Çünkü ışınlamadan sonra TL sinyalleri yıllarca kalabilmektedir (Nakajima 1989).

Retrospektif (geçmişe dönük) dozimetri iyonize radyasyon kaynaklı biyolojik dokuların veya materyallerin yapısındaki fiziksel, kimyasal ve biyolojik değişimin incelenerek soğurulan dozun tespit edilmesidir (Şahiner 2015). EPR tekniği; geriye dönük doz hesabı, ışınlanmış gıdaların incelenmesi, radyasyon kaza dozu ölçümünde ve malzemelerdeki serbest radikallerin incelenmesinde son derece önemli bir tekniktir. Bu konularda, tekniğin çıktığı günden beri farklı malzemeler üzerinde çalışmalar devam etmektedir. Tezde incelenmesi önerilen Sofra şekerinin (sakkaroz) geriye dönük (retrospektif) dozimetri çalışmalarında, kaza dozunun ölçülmesinde önemli malzemelerden biridir ve doku eşdeğerine yakın etkin atom numarasına sahip olması sayesinde bireysel doz ölçümlerinde de son derece önemli bir yere sahiptir (Son vd. 2001; Tchen vd. 1993). Ayrıca her evde bulunabilen maliyeti düşük ve ulaşılması kolay bir gıdadır. Bu yüzden dozimetri araştırmalarında çalışmaya değer malzemeler arasındadır. Tüm bunlar göz önünde bulundurulduğunda, farklı dozimetrik çalışmalarda pratik bir dozimetre olma potansiyeline sahip sofr şekerinin EPR tekniği ile çalışılarak literatürdeki çalışmalara katkı sağlanması tez çalışması için ve radyoterapi çalışmalarındaki uygulanan tedavi dozlarının ölçümünde alternatif bir dozimetre olarak ve ışınlanmış gıda tespitinde kullanılabilirliği deneysel çalışmalarla incelenmiştir.

Tez kapsamında her yerde bulunma ihtimali oldukça yüksek olan sofr şekerinin dozimetrik olarak kullanımını mevcut literatürle araştırılmış ve laboratuvar çalışmalarıyla incelenmiştir. Tezin ilk kısmında neden sofr şekerinin dozimetrik özelliklerinin incelendiği ve neden EPR tekniği kullanıldığı genel olarak açıklanmış ve

literatür çalışmalarına yer verilmiştir. Tezin ikinci kısmında deneysel çalışmaların teorik alt yapısı sunulmuştur. EPR tekniği hakkında ve radyoterapi çalışmaları kalite temini (QA) aşamasında kullanılan TRS 398 (2000) protokolü hakkında bilgilere yer verilmiştir. Tezin üçüncü kısmında deneylerde kullanılan cihazlardan, numunelerden bahsedilmiş ve yöntem olarak deneylerin gerçekleştirildiği aşamalar açıklanmıştır. Tezin dördüncü kısmında gerçekleştirilen deneylerin sonuçları ayrıntılı olarak açıklanmıştır. Tezin beşinci kısmında deneysel bulgular literatürle karşılaştırılarak yorumlanmış ve genel değerlendirme yapılmıştır. Tezin geri kalanında sofr şeker (toz şeker) sadece “şeker” olarak ifade edilmiştir.



2.KURAMSAL TEMELLER

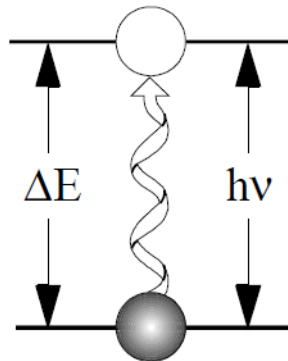
Evgeny K. Zavoisky 1945 yılında, paramanyetik metal tuzların elektromanyetik enerjiyi soğurmasını inceleyerek EPR spektroskopisi tekniğinin temelini atmıştır (Zavoisky 1945).

2.1 Elektron Paramanyetik Rezonans (EPR) Teorisi

Atomları veya molekülleri tanımlamak için kuantum mekaniğinin ilkeleri uygulanmaya başlandığında, bir molekül veya atomun her birine karşılık gelen bir enerjinin olduğu bulunmuştur. Spektroskopi, atomik veya moleküler durumlar arasındaki enerji farklarının ölçülmesi ve yorumlanmasıdır. Bu enerji farklılıkları hakkında bilgi sahibi olduğunda, incelenen numunenin kimliği, yapısı ve dinamikleri hakkında fikir edinilebilmektedir. ΔE ile elektromanyetik radyasyonun absorpsiyonu arasındaki önemli ilişkiden dolayı bu enerji farklılıkları ölçülebilmektedir. Planck yasasına göre, elektromanyetik radyasyon aşağıdaki durumlarda soğurulmaktadır:

$$\Delta E = h\nu \quad (2.1)$$

h Planck sabiti ve ν ise radyasyonun frekansıdır.



Şekil 2.1 Elektromanyetik enerjinin soğurulmasıyla ilgili geçiş (EMX User's Manual 1998)

Enerjinin soğurulması, düşük enerji durumundan yüksek enerji durumuna geçişe neden olmaktadır (Şekil 2.1). EPR deneyleri için frekans olarak gigahertz (GHz) mertebesindeki radyasyon (mikrodalga) kullanılır.

EPR spektroskopisi, organik ve inorganik malzemelerdeki radikal konsantrasyonunu ölçmek için kullanılan bir tekniktir. Radikaller manyetik momentleri sayesinde EPR tekniği ile saptanabilir. Spektrumun oluşması yoğun bir manyetik alan uygulanarak rezonans gerçekleşmesi durumunda eşleşmemiş elektronlar tarafından soğurulan mikrodalga enerjisinin saptanmasına dayanır. Manyetik alan taranırken soğurulan mikrodalga enerjisinin EPR spektrumu elde edilir. Spektrum kaydındaki gürültüyü azaltmak için, EPR spektrometreleri, mikrodalga soğurmasının tespiti ile birlikte yüksek frekanslı manyetik alan modülasyonu kullanır. Bu nedenle, rezonans bir absorpsiyon eğrisi olarak değil, manyetik indüksiyon alanına göre absorbe edilen mikrodalga enerjisinin ilk türevi olarak ortaya çıkar. Rezonans mikrodalga absorpsiyon eğrisinin ilk türevi EPR sinyali olarak adlandırılır ve tepeden tepeye (I_{pp}) genliği radikal konsantrasyonuyla orantılıdır. EPR dozimetrisi, iyonlaştırıcı radyasyon kaynaklı soğurulan dozun değerlendirilmesi yöntemidir. EPR spektrometrisi ise uygulanan radyasyon nedeniyle oluşan radikallerin konsantrasyonunun ölçülmesine dayanır (Herve vd. 2006a). EPR sinyal yoğunluğunun absorbe edilen dozun bir fonksiyonu olarak kalibrasyonu, bir laboratuvar kaynağı ile iletilen ek radyasyon dozları ve ardından EPR ölçümü ile her numune için ayrı ayrı yapılabilir. Bu yaklaşım çok zaman alıcıdır ve oldukça geniş bir doz aralığı için EPR yanıtı ile doz arasında doğrudan bir orantılılık gerektirir.

Ölçümler genellikle X-bandında mikrodalgalar (yaklaşık 9 GHz) kullanılarak yapılır. Örneğin, amino asit alaninin radikallerini ölçerek dozimetrik amaçlı, kuvars ve karbonatlardaki radikalleri ölçerek arkeolojik veya paleontolojik tarihlemeye yaş tayini amaçlı kullanımları bulunur. EPR ölçümleri, L- ve Q-bantları gibi diğer mikrodalga frekanslarıyla da gerçekleştirilebilir.

Radikal türler, numune alma sırasında tipik olarak UV ışığı ve mekanik işlemler gibi iyonlaştırıcı radyasyon dışındaki ajanlar tarafından da üretilebilmektedir. UV ışığı

benzer türler üretebilmesine rağmen, bu radikaller genellikle iyonlaştırıcı radyasyon tarafından üretilenlerden farklıdır. UV ve mekanik olarak indüklenen radikaller, bazı malzemelerde arka plan EPR sinyalinden sorumludur.

Radikallerin ortalama ömrü birkaç saat ile yıl arasında değişebilir. Sıcaklık ve nemin artmasıyla sönüm oranı artar. Sıvı bir numuneyi aldıktan sonra dondurmak, radikallerin sönüm oranını yavaşlatabilmektedir (Desrosiers ve Wadley 2006).

2.1.1 Zeeman etkisi

EPR spektroskopisinde incelenen enerji farklılıkları, ağırlıklı olarak numunedeki eşleşmemiş elektronların laboratuvarında bir mıknatıs tarafından üretilen bir manyetik alanla etkileşiminden kaynaklanmaktadır. Bu etkiye Zeeman etkisi denir. Elektronun manyetik bir momenti olduğundan, onu B_0 manyetik alanına yerleştirdiğinizde bir pusula veya çubuk mıknatıs gibi davranır. Elektronun manyetik dipol momenti, μ_e , manyetik alanla hizalandığında en düşük enerji durumuna ve μ_e manyetik alana karşı hizalandığında en yüksek enerji durumuna sahip olacaktır (Şekil 2.2). İki durum, manyetik alan yönünde elektron spininin (m_s) izdüşümü ile etiketlenmektedir. Elektron bir spin 1/2 parçacığı olduğu için paralel durum $m_s = -1/2$ ve antiparalel durum $m_s = +1/2$ olarak gösterilir.



Şekil 2.2 B_0 manyetik alanına göre μ_e 'nin minimum ve maksimum enerji yönelimleri (EMX User's Manual 1998)

$$E = g \mu_B B_0 M_s = \pm \frac{1}{2} g \mu_B B_0 \quad (2.2)$$

$$\Delta E = h\nu = g \mu_B B_0 \quad (2.3)$$

g : Spektroskopik yarılmaya çarpanı

μ_B : elektronik manyetik momentin doğal birimi olan Bohr manyetonu

$$\mu_B = 9,2740 \times 10^{-24} \text{ J/T (Bohr manyetonu)}$$

$$h = 6,63 \times 10^{-34} \text{ J.s (Plank sabiti)}$$

ν : Mikrodalganın frekansı (s^{-1})

Denklem 2.2 ve 2.3 sonucunda şu bilgilere erişilebilmektedir:

- Manyetik alanın yokluğunda iki spin durumu aynı enerjiye sahiptir.
- Manyetik alan arttıkça spin durumlarının enerjileri lineer olarak birbirinden uzaklaşır. Bu iki gerçeğin spektroskopisi için önemli sonuçları vardır.

Bunlar;

- Manyetik alan olmadan ölçülecek enerji farkı olmaz.
- Ölçülen enerji farkı lineer olarak manyetik alana bağlıdır.

Manyetik alan kuvvetini değiştirerek iki spin durumu arasındaki enerji farkları değiştirilebilir. Sabit bir manyetik alan uygulayabilir ve geleneksel spektroskopide olduğu gibi elektromanyetik radyasyonun frekansı değiştirilebilir. Alternatif olarak, elektromanyetik radyasyon frekansı sabit tutularak manyetik alan değiştirilebilir. Manyetik alan, iki dönme durumunu, enerji farkları radyasyonun enerjisiyle eşleşecek şekilde "ayarladığında" soğurmada bir tepe oluşacaktır. Bu alana "rezonans alanı" denir. Mikrodalga elektroniğinin sınırlamaları nedeniyle, ikinci yöntem üstün performans sunmaktadır (EMX User's Manual 1998).

Rezonans alanı, bir bileşiğin tanımlanması için benzersiz bir "parmak izi" değildir, çünkü spektrumlar birkaç farklı frekansta elde edilebilmektedir. Mikrodalga

frekansından bağımsız olan g faktörü bileşiği tanımlamak için kullanılmaktadır. Manyetik alan ve g değeri denklem 2.4 'te görüldüğü gibi ters orantılıdır.

$$g = \frac{h\nu}{\mu_B B_0} \quad (2.4)$$

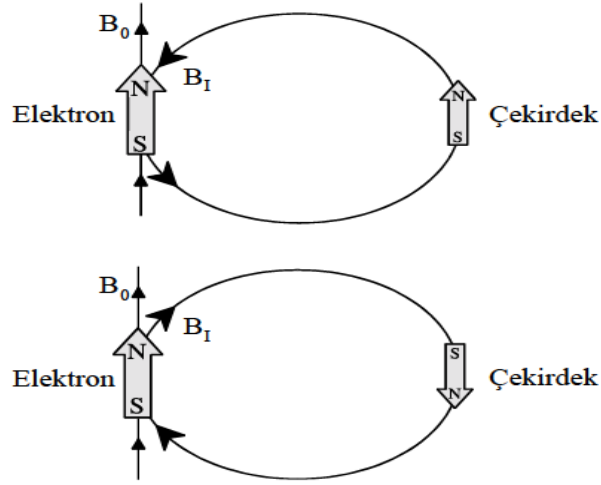
EPR spektrometrelerinde yaygın olarak bulunan mikrodalga frekanslarında g = 2 sinyali için rezonans alanlarının bir listesi Çizelge 2.1'de sunulmuştur.

Çizelge 2.1 g = 2 sinyaline isabet eden mikrodalga frekansları ve rezonans alanı, B_{rezonans} (EMX User's Manual 1998)

Mikrodalga Bandı	Frekans (GHz)	B _{rezonans} (G)
L	1.1	392
S	3.0	1070
X	9.75	3480
Q	34.0	12000
W	94.0	34000

2.1.2 Aşırı ince yapı etkileşimleri

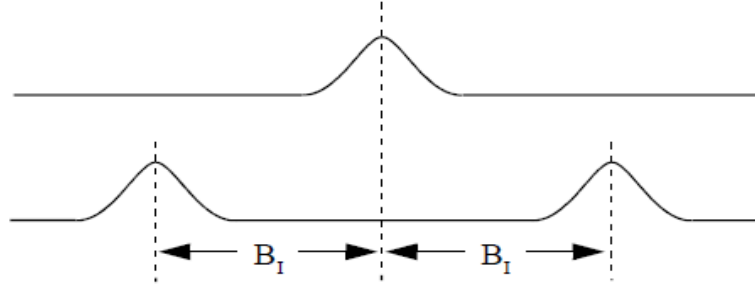
Sadece g-faktörlerini ölçmek yararlı bilgiler verebilmektedir; ancak, örneğin moleküler yapısı hakkındaki bilgilere EPR spektrumunu veren eşleşmemiş elektronun yerel çevresine karşı çok hassas olması sayesinde ulaşılır. Bir molekül veya kompleksteki atomların çekirdeği genellikle elektronda yerel bir manyetik alan oluşturan bir manyetik momente sahiptir. Elektron ve çekirdek arasındaki etkileşime aşırı ince yapı etkileşimi denir. Bir molekülü veya kompleksi oluşturan atomların kimliği ve sayısı ile bunların eşleşmemiş elektrona olan uzaklıkları örnek hakkında zengin bilgiler vermektedir.



Şekil 2.3 Yakındaki bir çekirdeğe bağlı olarak elektrondaki yerel manyetik alan, B_I (EMX User's Manual 1998)

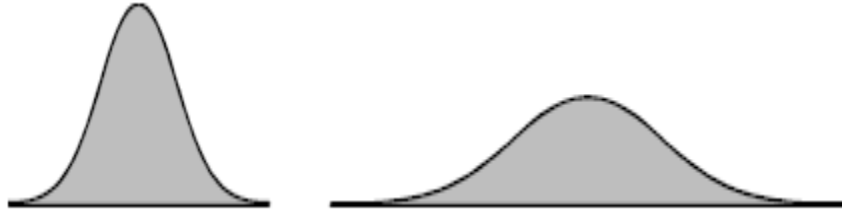
Şekil 2.3, aşırı ince etkileşimin kaynağını göstermektedir. Çekirdeğin manyetik momenti (elektrondan daha zayıf olsa da) bir çubuk mıknatıs gibi davranır ve elektronda bir manyetik alan, B_I üretir. Bu manyetik alan, çekirdeğin momentinin hizalanmasına bağlı olarak, laboratuvar mıknatısından gelen manyetik alana karşı çıkar veya buna katkıda bulunur. B_I manyetik alana eklendiğinde, laboratuvardaki mıknatıstan daha az manyetik alana ihtiyaç duyulur ve bu nedenle rezonans alanı B_I tarafından düşürülür. B_I laboratuvardaki manyetik alana karşı olduğunda bunun tersi durum gerçekleşir.

Hidrojen çekirdeği gibi bir spin 1/2 çekirdeği için Şekil 2.4'teki gibi tek EPR soğurma spektrumu, her biri orijinal sinyalden B_I uzakta olan iki sinyale bölünür. İkinci bir çekirdek varsa, sinyallerin her biri ayrıca bir çifte daha bölünür ve dört sinyale dönüşmüş olur. N spin 1/2 çekirdek için genellikle 2^N tane EPR sinyali gözlenmektedir. Çekirdek sayısı arttıkça, sinyal sayısı katlanarak artar. Bazen sinyal sayısı çok artar ve üst üste binerler. Bu durumda sadece tek bir geniş sinyal görülebilmektedir.



Şekil 2.4 Yakındaki bir çekirdeğin yerel manyetik alanı nedeniyle bir EPR sinyalinde bölünme (EMX User's Manual 1998)

Şimdiye kadar EPR sinyalinin nerede olduğu açıklanmıştır ancak örneğimizdeki EPR aktif türlerinin konsantrasyonunu ölçmek için EPR sinyalinin boyutu da önemlidir. Spektroskopi dilinde, bir sinyalin boyutu, entegre yoğunluk, yani soğurma eğrisinin altındaki alan olarak tanımlanır (Şekil 2.5). Bir EPR sinyalinin entegre yoğunluğu, konsantrasyonla orantılıdır.



Şekil 2.5 Absorpsiyon sinyallerinin entegre yoğunluğu. Her iki sinyal de aynı yoğunluğa sahiptir. (EMX User's Manual 1998)

Sinyal yoğunlukları yalnızca konsantrasyonlara bağlı değildir. Ayrıca mikrodalga gücüne de bağlıdır. Çok fazla mikrodalga gücü kullanılmazsa sinyal yoğunluğu gücün karekökü kadar büyür. Daha yüksek güç seviyelerinde, sinyal, mikrodalga güç seviyeleri arttıkça azalır ve genişler. Bu etkiye doygunluk (saturasyon) denir. Doğru çizgi genişliklerini, çizgi şekillerini ve yakın aralıklı aşırı ince bölmeleri ölçmek için düşük mikrodalga gücü kullanarak doygunluktan kaçınılabilir. Doygunluğun olmadığını kontrol etmenin hızlı bir yolu, mikrodalga gücünü azaltmak ve sinyal yoğunluğunun da mikrodalga gücünün karekökü kadar azaldığını doğrulamaktır.

2.2 Soğurulan Doz Ölçüm Protokolü

TRS 398 (IAEA 2000) protokolünde; TRS-277 (IAEA 1987), TRS-381 (IAEA 1997) protokollerinden farklı olarak iyon odasına özgü 2 farklı parametre tanımlanmıştır. TRS 398 (IAEA 2000) protokolünde kullanılan bu parametrelerden ilki sudaki soğurulan doz kalibrasyon faktörü ($N_{D,w}$), diğeri de referans demet kalitesi (Q_0) ile kullanıcı demet kalitesi (Q) arasındaki demet kalite düzeltme faktörüdür (k_{Q,Q_0}).

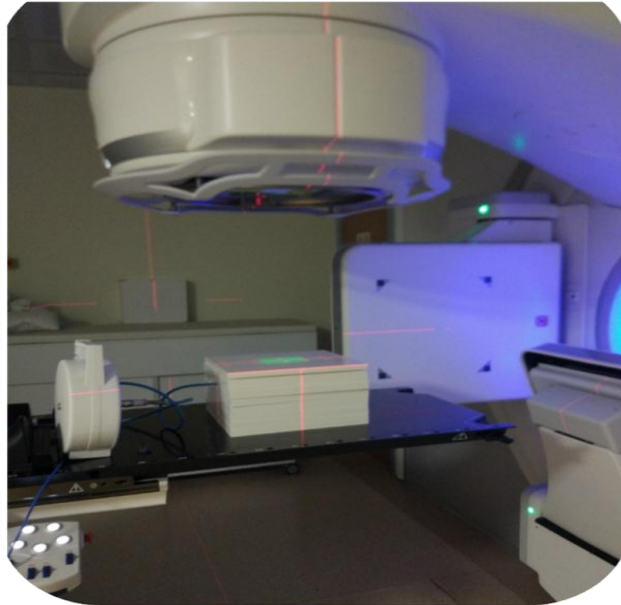
Birim kütle başına soğurulan enerji Gray (Gy) olarak tanımlanır.

$$1 \text{ Gy} = 1 \text{ Joule} / 1 \text{ kilogram}$$

$$1 \text{ rad} = 100 \text{ erg} / 1 \text{ gram}$$

$$1 \text{ Gy} = 100 \text{ cGy} = 100 \text{ rad}$$

Soğurulan dozu ölçmek için; elektrometreler, iyon odaları ve fantomlar düzenek olarak kullanılır.



Şekil 2.6 Kalibrasyon için lineer hızlandırıcının, fantom ve iyon odasının yerleşimi

Hızlandırıcılardan elde edilen X ışınları hızlandırılan elektronların hedefe çarpmasıyla oluşturulur. Oluşan sürekli spektrum (Bremsstrahlung) gelen elektronun enerjisine, hedef materyale, hedef kalınlığına, demet düzleştirici filtrenin özelliklerine bağlıdır.

2.2.1 Suda soğurulan dozun belirlenmesi

Polarite Etkisi (k_{pol}): Polarite düzeltme faktörü (k_{pol}) de iyon odalarının kullanımında dikkate alınması gereken faktörlerdendir. Bu durum yük açısından önemli olan özellikle elektron ışınlarında etkili olmaktadır. Ters kutupluluğun polarizasyon üzerindeki etkisi doz okuma işlemi ve hesaplamaları sırasında dikkate alınmalıdır. Kullanılan iyon odasında gerçek okuma değerinin hesaplanması için her iki polaritede elde edilen okuma değerlerinin mutlak değerlerinin ortalaması alınır. Bu değer aşağıdaki gibidir;

$$k_{pol} = \frac{|M_+| + |M_-|}{2} \quad (2.5)$$

Denklemden yer alan M_+ pozitif polaritede elde edilen elektrometre okuması, M_- negatif polaritede elde edilen elektrometre okumasıdır. M değeri ise rutinde kullanılan polarite değerindeki elektrometre okumasıdır (Khan ve Gibbons 2014).

Sıcaklık ve Basınç (k_{TP}): İyon odaları, ölçümler esnasında iyon odasını çevreleyen havadan etkilenmektedir. İyon odasının kalibrasyonu sırasındaki oda sıcaklığı T_o (20°C), basınç P_o (1013 mbar) ölçümler esnasındaki sıcaklık T ve hava basıncı P denklem 2.6'ya göre hesaplanır (Dirican 2014).

$$k_{TP} = \frac{273,2+T}{273,2+T_o} \times \frac{P_o}{P} \quad (2.6)$$

Nem (k_h) : Kalibrasyon faktörü %50 bağıl neme atıfta bulunuyorsa ve %20 ile %80 arasındaki bağıl nemde kullanılıyorsa, nem için herhangi bir düzeltmeye gerek yoktur. Kalibrasyon kuru havada gerçekleşmişse nem düzeltme faktörü gerekir (Huq 2006).

Tekrar Birleşme (k_s): İyonlar tekrar birleştiği bir düzeltme faktörü ile düzeltilmelidir. Düzeltme faktörü, pulslu radyasyonlarda oldukça önemli iken sürekli radyasyon için etki, genellikle çok küçüktür (Dirican 2014).

İyonların yeniden birleşme etkisi uygulanan polarizasyon gerilimine ve iyon odasının geometrisine bağlıdır. Puls şeklindeki radyasyon kaynakları için k_s düzeltme faktörü iki voltaj yöntemi kullanılarak bulunur. Bunun için aynı referans koşullarda V_1 ve V_2 polarizasyon voltajları için M_1 ile M_2 dozimetre okuma değerleri kullanılır. Bu koşullar altında yeniden birleşme düzeltme faktörü k_s aşağıdaki 2.7 denklemi ile elde edilir. a_0 , a_1 , a_2 değerleri ilgili tablolardan alınan sabitlerdir.

$$k_s = (a_0 + a_1 (M_1 / M_2) + a_2 (M_1 / M_2)^2) \quad (2.7)$$

Elektrometre kalibrasyon faktörü (k_{elec}): Elektrometre ile iyon odasının ayrı ayrı kalibre edildiği durumlarda kullanılmaktadır. Bu durumda kalibrasyon laboratuvarı tarafından her biri için kalibrasyon faktörü kullanıcıya verilir. Eğer iyon odası ile elektrometre birlikte kalibre edilmiş ise ayrı bir k_{elec} yani elektrometre kalibrasyon faktörüne gerek yoktur. Bu durumda kombine kalibrasyon faktörü $N_{D,w}$ Gy/Nc veya Gy/rdg olarak verilmektedir (Huq 2006).

Diğer Faktörler: Referans kalitedeki bir ışın, Q_0 ile ışınlanan bir fantom içersinde ve referans noktadaki bir iyon odası ile suda absorblanan doz

$$D_{W,Q} = M_{corr,Q} N_{DW,Q_0} \quad (2.8)$$

Referans kalitedeki ışıdan farklı ışınlar için eşitlik

$$D_{W,Q} = M_{corr,Q} N_{DW,Q_0} k_{Q,Q_0} \quad (2.9)$$

Düzeltilmiş okuma değerlerinin ifadesi ($M_{corr,Q}$);

$$M_{corr,Q} = M_1 h_{pl} k_{TP} k_{elec} k_{pol} k_s \quad (2.10)$$

h_{pl} : fantomun sudan farkını veren faktör

k_{TP} : Basınç-sıcaklık düzeltme faktörü

k_{elec} : Elektrometre kalibrasyon faktörü

k_{pol} :Polarite düzeltme faktörü

k_s : Yeniden birleşme düzeltme faktörü



3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1 Materyal

Bu bölümde tezde kullanılan materyallere yer verilmiştir.

3.1.1 Sofra şekeri (sakkaritler)

Sakkaroz: (glikoz + fruktoz = sakkaroz + H₂O) Sükroz olarak da bilinen sofra şekeridir (Da Costa vd. 2005). Şeker pancarı ve şeker kamışından elde edilir.

Bu tez çalışmasında kullanılan şeker Ankara'daki bir marketten satın alınmıştır. Gama radyasyonu ile TENMAK NÜKEN Gama Işınlama Tesisi'nde ışınlanmış (3 kGy, 5 kGy, 10 kGy) şeker numuneleri ve 6 MV X ışınları ile ışınlama için Elekta Versa HD cihazı kullanılmıştır. Işınlanmış şekerin içinde oluşan radikallerin ölçümleri Ankara Üniversitesi Nükleer Bilimler Enstitüsü EPR Laboratuvarı'nda gerçekleştirilmiştir.

3.1.2 Elektron Paramanyetik Rezonans spektroskopisi sistemi

Bu tez çalışması kapsamında farklı dozlarda ışınlanmış şekerin içeriğinde oluşan radikalleri gözlemlemek amacıyla EPR spektroskopisi ölçüm tekniği olarak kullanılmıştır.

Çiftlenimsiz elektrona sahip ara ürünlerin türlerini, yapılarını, miktarlarını ve dinamik özelliklerini incelemek için ESR spektrometresi kullanılan başlıca bir ölçüm tekniğidir (Tepe Çam 2005).

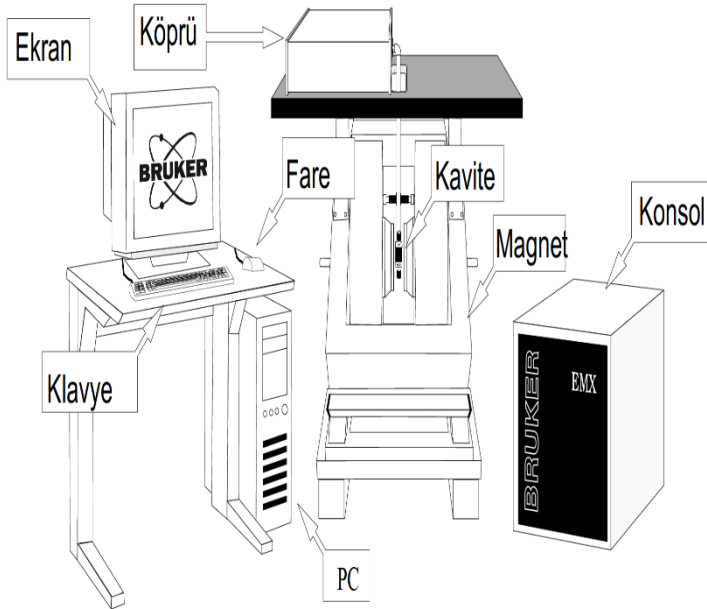
EPR ölçümleri X-band mikrodalga frekans aralığı 9.2-9.9 GHz olan Bruker EMX plus 10/12 EPR cihazında yapılmıştır (Şekil 3.1, Şekil 3.2).



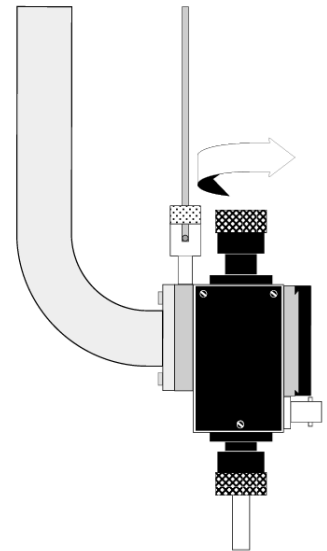
Şekil 3.1 Nükleer Bilimler Enstitüsü laboratuvarında bulunan EPR cihazı ve Kuvars tüplerin ölçüm için EPR cihazının kavitesine yerleştirilmesi

EPR sistemi; güç kaynağı, spektrometre, magnetler, mikrodalga köprüsü, kavite, bilgisayar ve soğutma ünitelerinden oluşur. Tüp içindeki örneklerin cihaza yerleştirildiği kısım kavite olarak adlandırılır (Şekil 3.1 ve Şekil 3.2)

(a)



(b)



Şekil 3.2 (a) Bruker EMX EPR Spektrometresi (b) Örnek tüpü kavitesi

EPR spektrometresinde çalışılan banta ait mikrodalga frekansı sabit tutularak manyetik alan değiştirilir. İki enerji düzeyi arasındaki fark mikrodalga fotonunun enerjisine eşit olduğunda yani rezonans koşulları sağlandığında spektrumdaki soğurma çizgileri oluşur. 9 GHz civarındaki frekanslar EPR Spektrometresinin X-Bandına aittir.

Mikrodalga köprüsü içinde elektromanyetik dalga kaynağı ve kristal algılayıcı bulunur. Homojen dış manyetik alan elektromıknatıstan elde edilir. Kristal algılayıcı ise mikrodalga gücünü doğru akıma dönüştürür. Ölçülecek numune mikrodalga kavitesine yerleştirilir. Kavitenin merkezinde manyetik alan maksimumdur. Mıknatıslar, enerji seviyeleri ile uyumu (tune) sağlamaktadır. Spektrumlar bilgisayarda elde edilir.

Magnetron (Mikrodalga Üretici) ve Klaystron: Magnetron düşük güçte ve dar bantta kararlı mikrodalga enerjisini üreten bir vakum tüpüdür. Klaystron ise üretilen mikrodalgaların frekanslarını daha da yükseltir. Hızları artıp azalarak ivmeli hareket yapan elektronlar mikrodalga frekansında elektromanyetik dalga yaymaktadırlar.

Elde edilen frekans, klaystronun kavite (rezonans oyuğu) boyutları ile belirlenir ve çok kararlı olması istenir. Çünkü; frekanstaki dalgalanmalar, spektrum çizgilerinin kalınlıklarında farklılıklara neden olmaktadır. Kararlılığın sağlanması için devreye otomatik frekans kontrol sistemi girmektedir.

İncelenen numunenin doyum (saturasyon) noktası açısından mikrodalga gücünün değiştirilmesi gerekmektedir. Seçilecek güç; sinyalleri doyuma ulaştırmayacak lineer bölgenin orta noktası olmalıdır. Kullanılacak mikrodalga gücünü belirlemek için tez kapsamında şeker numunesi için mikrodalga güç çalışması gerçekleştirilmiştir.

Manyetik alan kontrol edici: EPR spektrumu elde etmek için manyetik alan tarama işlemleri sırasında manyetik alan kontrol edici kullanılır. 2 bölümden oluşur. İlk bölüm; manyetik alan değerlerini ve alan taramasının zamanını ayarlar. İkinci bölüm ise; birinci bölümde ayarlanan zaman değerlerine gereken akımı sağlar. Alan taraması için 4096 kanal kullanılmaktadır.

Elektromıknatıs: Bir akım kaynağından akım gönderilen bir çift bobinden oluşmuştur. Bu bobinler kutupları arasında kararlı bir manyetik alan üretmektedirler. EPR soğurma çizgisinin oluşması için rezonans koşullarını sağlayan manyetik alanı oluşturur.

3.1.3 Elekta Versa HD lineer hızlandırıcı

Bu çalışmada kullanılan şeker örneklerinin radyoterapi tedavilerindeki fraksiyonel doz aralıklarındaki dozlarda ışınlanması için benzer dozların verilebileceği Elekta marka Versa HD model lineer hızlandırıcı kullanılmıştır (Şekil 3.3). 6 MV, 6 MV FFF, 10 MV, 15 MV foton enerjilerinde kullanılabilir. Cihazda 160 adet çok yapraklı kolimatör (MLC) bulunmaktadır. Bu kolimatörler sayesinde tedavi sırasında hedef tümör daha iyi belirlenebilmekte ve sağlam organların alacağı dozun azaltılabilmesi mümkün olmaktadır.



Şekil 3.3 Elekta Versa HD lineer hızlandırıcı

3.1.4 PTW Unidos elektrometre ve silindirik iyon odası

Tez çalışması kapsamında 0.6cc silindirik iyon odası PTW 30013 Farmer (PTW, Freiburg, Almanya) iyon odası ile birlikte kalibre edilen “PTW UNIDOS Webline” marka elektrometre kullanılmıştır (Şekil 3.4 (a)).

PTW Unidos Elektrometresi dozimetrik bir sistemdir. Bu sistemin çalışma prensibi iyon odasının merkezindeki elektrotta toplanan yükün ölçülmesine dayanmaktadır. Radyoterapide soğurulan dozun belirlenmesi için gerçekleştirilen kalibrasyon çalışmalarında kullanılır. Soğurulan dozun belirlenmesi için kullanılan düzeltme faktörlerinin (polarite, voltaj, hava basıncı ve sıcaklığı) sisteme girilmesi gerekmektedir.. Unidos elektrometre cihazıyla; doz ve doz hızı R, Gy, Gy/min, R/min, birimleri şeklinde verilebilmektedir.

İyon odaları Silindirik ve Paralel düzlem İyon odaları olarak ikiye ayrılmaktadır. Silindirik iyon odaları yönden bağımsızdır. Silindirik iyon odasının referans noktası merkez eksende ve kavitenin merkezindedir (Şekil 3.4(b)).



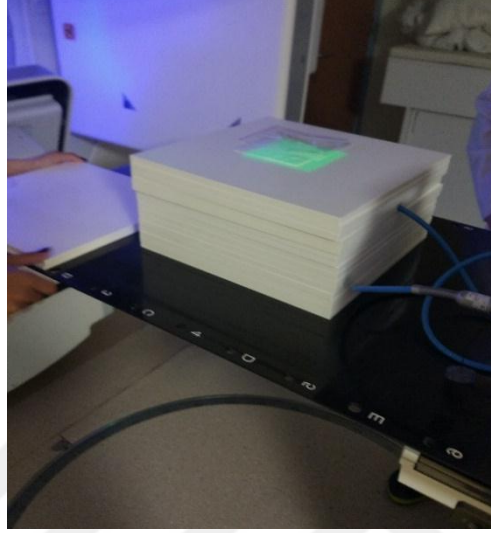
(a)



(b)

Şekil 3.4 (a) PTW Unidos Webline elektrometre (b) Silindirik iyon odası

3.1.5 RW3 fantom



Şekil 3.5 RW3 fantom

Hem yüksek enerjili fotonlarda hem de elektron dozimetrisinde su yerine suya eşdeğer RW3 fantom malzemesi kullanılabilir. Şekil 3.5'te görülen RW3'te ölçülen nispi çapraz doz dağılımları, sudaki ölçümlerle iyi bir uyum içindedir.

Mutlak dozun belirlenmesi için, elektronlara olduğu kadar fotonlara da 1'den büyük bir düzeltme faktörü uygulanmalıdır. Bu düzeltme faktörü, enerji ve spektral dağılım, ölçüm derinliği, alan boyutu, iyon odası tipi ve ek faktörler gibi çok sayıda parametreye bağlıdır. RW3 katı su fantomu, beyaz polystyrene'den (C_8H_8) yapılmıştır. %2 TiO_2 içeren fantomun fiziksel yoğunluğu $1.045g/cm^3$ 'dir. 40x40 cm boyutlarına sahip ve 1, 2, 5 ve 10mm olarak farklı kalınlıklarda bulunmaktadır. Buna ek olarak, arada hava boşluğu bırakmadan paralel ve silindirik iyon odalarının yerleştirildiği levhaları da mevcuttur. Elektron yoğunluğu sudan 1.012 kat daha fazladır (Sportdocbox 2022). Tez çalışmasında 30x30 cm boyutlu RW3 katı su fantomu kullanılmıştır.

3.2 Yöntem

Bu bölümde tezde gerçekleştirilen deneylerde kullanılan yönteme yer verilmiştir.

3.2.1 Örneklerin temini ve ışınlaması

Bu çalışmada marketten aldığımız sofra şekeri; yüksek dozlar için TENMAK Gama Işınlama Tesisinde Co-60 radyoizotopu kullanılarak 3 kGy, 5 kGy ve 10 kGy ışınlanmıştır. Bu numunelerin EPR spektrumları incelenmiş ve sönümlene durumları incelenmiştir.

Düşük dozlar için sofra şekeri 100 cGy, 200cGy, 300 cGy, 500 cGy, 800 cGy, 1000 cGy ve 1200 cGy doz değerlerinde LINAC cihazı 6 MV X ışınları ile ışınlanmıştır. TRS 398 (IAEA 2000) Kalite Güvence (QA) işlemlerinde dozimetre olarak kullanılabilirliği incelenmiştir.

3.2.2 Kalibrasyon işlemi

Deneyisel çalışmalarda kalibrasyon aşaması çok önemlidir. Kalibrasyon, bir cihazın, sistemin veya referans malzemenin performansını gösterir. Cihazdan alınan ölçüm sonuçlarının birbiriyle tutarlılığını, cihazın güvenilirliğini, izlenebilirliğini , sonuçların doğruluğunu sağlamak için kalibrasyon yapılması gerekir. Bruker EMX EPR spektrometresinin kalibrasyonu için Standard Örnekler de kullanılabilir. Kullanılan örneklerin kararlı ve uzun ömürlü paramanyetik merkezlerinin olması istenir.

Tez çalışması kapsamında kullanılan standart malzeme Strong Pitch olarak KCl (Potasyum Klorür) standard malzemesidir. Düşük dielektrik kayıp özelliği ve radikallerinin uzun ömürlü olması gibi nedenler KCl'yi tercih edilebilir kılmıştır. g faktörü 2.0028'dir.

Elekta Versa HD lineer hızlandırıcıya ait kalibrasyon çalışması için ise TRS 398 (IAEA 2000) QA (Kalite Güvence) protokolü kullanılmıştır. PTW Unidos Elektrometre ve silindirik iyon odası kullanılarak 6 MV X ışınları ile verilen dozların doğrulaması gerçekleştirilmiştir.

3.2.3 Sinyal şiddetinin zamanla sönümü

^{60}Co gama ışınlarıyla 3 kGy, 5 kGy ve 10 kGy ışınlanmış örneklerin sinyallerinde gerçekleşebilecek değişimleri gözlemlemek amacıyla yaklaşık 13 ay boyunca çeşitli aralıklarda oda sıcaklığında spektrumları alınmıştır.

Z-skoru, standart skor olarak da adlandırılır. Bir veri noktasının ortalama ne kadar uzak olduğunu tanımlar. Yani; verinin ortalama değerin kaç standart sapma altında veya üstünde bir değer olduğu anlamına gelmektedir. Z değeri; eğer pozitif ise veri noktasının ortalamanın üzerinde olduğu anlaşılmaktadır. Eğer Z değeri negatif bir sayı ise veri noktasının ortalamanın altında olduğunu anlaşılmaktadır (Statisticshowto 2022).

Varyans, standart sapmanın karesidir (σ^2). Standart sapma, verilerin ortalama ne kadar saptığıdır(Wikihow 2022).

Tez kapsamında Z-skorları hem ortalama hem de standart sapma değerlerine göre hesaplanmaktadır.

3.2.4 Genlik ve güç çalışması

EPR spektrumlarında modülasyon genliğinin ve güç değerinin doğru bir şekilde belirlenmesi çok önemlidir. Modülasyon genliğinin belirlenmesi için farklı genliklerde alınan EPR spektrumlarının soğurma çizgisinin tepe-tepe değerlerinin belirgin bir şekilde gözlenmesi gerekmektedir. Bruker EMX cihazında standart parametrelerden modülasyon genliği 100 G (10 mT) değerine kadar arttırılabilmektedir. Modülasyon

genlik değeri düşürüldükçe daha detaylı bir spektrum gözlenir. Yüksek genlik değerlerinde EPR sinyalinde artışla birlikte çizgi şeklinde bozulmalar gözlenebilir.

Sinyal şiddeti sadece konsantrasyona bağlı değildir aynı zamanda mikrodalga gücüne de bağlıdır. Sinyal şiddeti gücün kareköküyle orantılıdır. Güç çok arttırıldığında sistem saturasyona gireceği için ölçümler doğru olmayacaktır. Bu nedenle en uygun mikrodalga gücünün belirlenmesi gerekmektedir. Bu çalışmayla amacımız, deney yaparken kullanılması en uygun olan optimum mikrodalga gücü ve modülasyon genliği değerlerinin belirlenmesidir.

3.2.5 Doz cevap çalışması

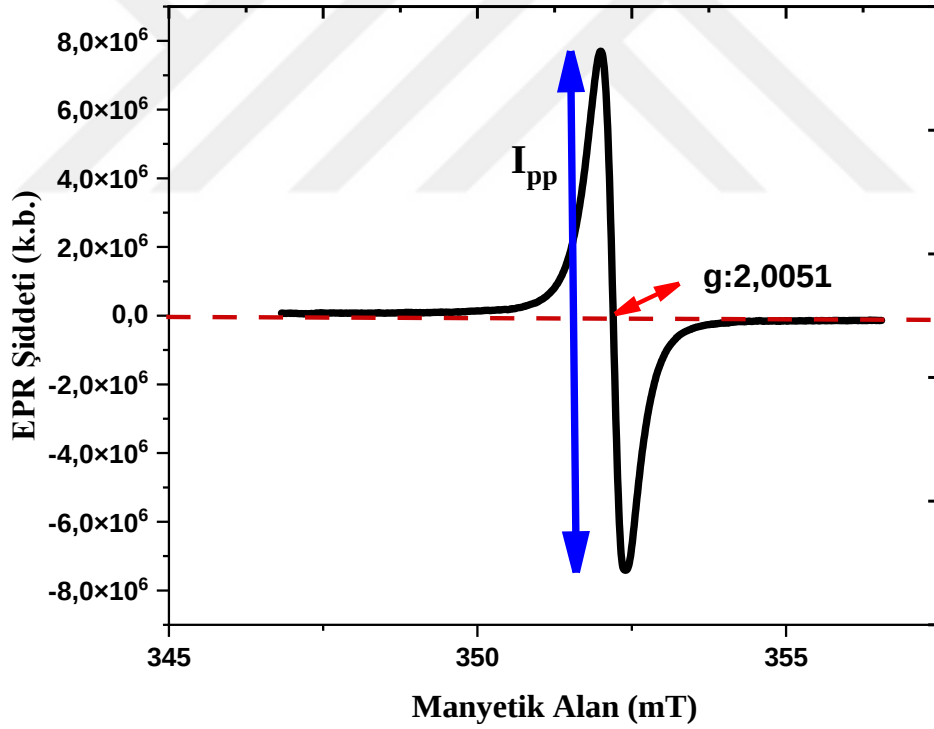
Çoğu tatlı endüstriyel üründe, çeşitli şeker veya şeker benzeri maddelerin ilişkili görünebileceği ve içeriklerindeki diğer maddelerin de ışınlanmadan önce veya sonra EPR sinyallerini indükleyebileceği bilinmektedir. Örneğin; şekerin pudralanması radyasyonun neden olduğu radikallerinkine benzer bir çizgi şekli ile radikaller üretebilmektedir. Aşırı tozlama ile indüklenen radikallerin sayısının 10 Gy'ye kadar bir dozla üretilene eşdeğer olduğu rapor edilmiştir. Şeker işleme sırasında radikal oluşumu nedeniyle, ışınlanmamış bazı örnekler ışınlamadan önce bir arka plan sinyali gösterebilmektedir (Fattibene vd. 1996, Herve 2006b). Bu çalışmada da belirtilen nedenlerden kaynaklı olabileceği düşünülen ışınlanmamış şekerle ait arka plan sinyali gözlenmiştir. Dozimetrik çalışmalarda numunenin radyasyona maruz kalması sonucu artan doz maruziyetiyle birlikte oluşan serbest radikal sayısının da orantılı olarak artması beklenmektedir. Bu artışın lineer olması dozimetri çalışmalarında numuneyi daha tercih edilebilir yapmaktadır.

Tez çalışması kapsamında ışınlanmış şekerin doz cevap grafikleri incelenmiştir.

4. BULGULAR

4.1 Kalibrasyon İşlemi

Tez kapsamında gerçekleştirilen deneylerin sonuçlarının doğru olabilmesi için kalibrasyon ve ara doğrulama işlemleri ile cihazın doğru çalışıp çalışmadığı kontrol edilmelidir. EPR Spektrometresinin kalibrasyon işlemi için ER-213-SPS strong pitch (KCl) referans örneği kullanılmıştır. Örneğe ait EPR spektrumu Şekil 4.1’de verilmiştir. Şekildeki uygulanan merkez manyetik alan değeri 3521,92 G (~352,2 mT)’dir. Çizelge 4.1’deki değerlerle $g = h\nu / (\mu_B \cdot B_0)$ denklemi kullanılarak spektroskopik yarıлма çarpanı (g) deneysel olarak hesaplanmıştır. ($1 \text{ T} = 10^4 \text{ G}$)



Şekil 4.1 Strong Pitch referans malzemesinin EPR spektrumu

Çizelge 4.1 Strong Pitch referans malzemesinin g değeri için hesap parametreleri

Strong Pitch (KCl)	
B_0	3521,92G~ 352,2 mT
ν	9,873866GHz
h	$6,63.10^{-34}$ J.s
μ_B	$9,27.10^{-24}$ J/T
$g=2,0051$ (Deneyssel)	$g=2,0028$ (Referans değer)

Strong pitch numunesine ait bulmuş olduğumuz $g=2,0051$ değeri beklediğimiz $g=2,0028$ değerine (EMX User's Manual 1998) % hata 0,115 olarak hesaplanmıştır. Cihazın çalışma performansı referans malzemeyle doğrulanmıştır.

4.2 Sinyal Şiddetinin Zamanla Sönümü

Işınlanmış örneklerin içerisinde oluşan radikallerin yapılarında, sayılarında veya türlerinde gerçekleşebilecek olası değişimleri takip edebilmek amacıyla 3 kGy-5 kGy- 10 kGy ışınlanmış eşit kütleli şeker örneklerinin yaklaşık 14 ay boyunca farklı aralıklarda EPR spektrumları incelemiştir. Işınlandığı tarih referans alınarak (25.06.2020) ölçüm gününe kadar geçen süre saniyeye çevrilerek Şekil 4.3, Şekil 4.4 ve Şekil 5.5 grafikleri elde edilmiştir.

- Co-60 Gama kaynağında ışınlanmış (3 kGy-5 kGy- 10 kGy) şekerin ilk ölçümü 29.06.2020 tarihinde yapılmıştır.
- Co-60 Gama kaynağında ışınlanmış (3 kGy-5 kGy- 10 kGy) şekerin 2. ölçümü 23.03.2021 tarihinde yapılmıştır.
- Co-60 Gama kaynağında ışınlanmış (3 kGy-5 kGy- 10 kGy) şekerin 3. Ölçümü 28.06.2021 tarihinde yapılmıştır.

- Co-60 Gama kaynağında ışınlanmış (3 kGy-5 kGy- 10 kGy) şekerin 4. ölçümü 05.08.2021'dir.

Elde edilen sinyal şiddetlerinin I_{pp} değerlerinin istatistiki olarak anlamlı olması için Z skoru hesapları için Denklem 4.1 ve Denklem 4.2 kullanılmıştır (Statisticshowto 2022).

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X - \mu)^2}{n-1}} \quad (4.1)$$

$$Z = \frac{X - \mu}{\sigma} \quad (4.2)$$

X: Deneysel sonuç

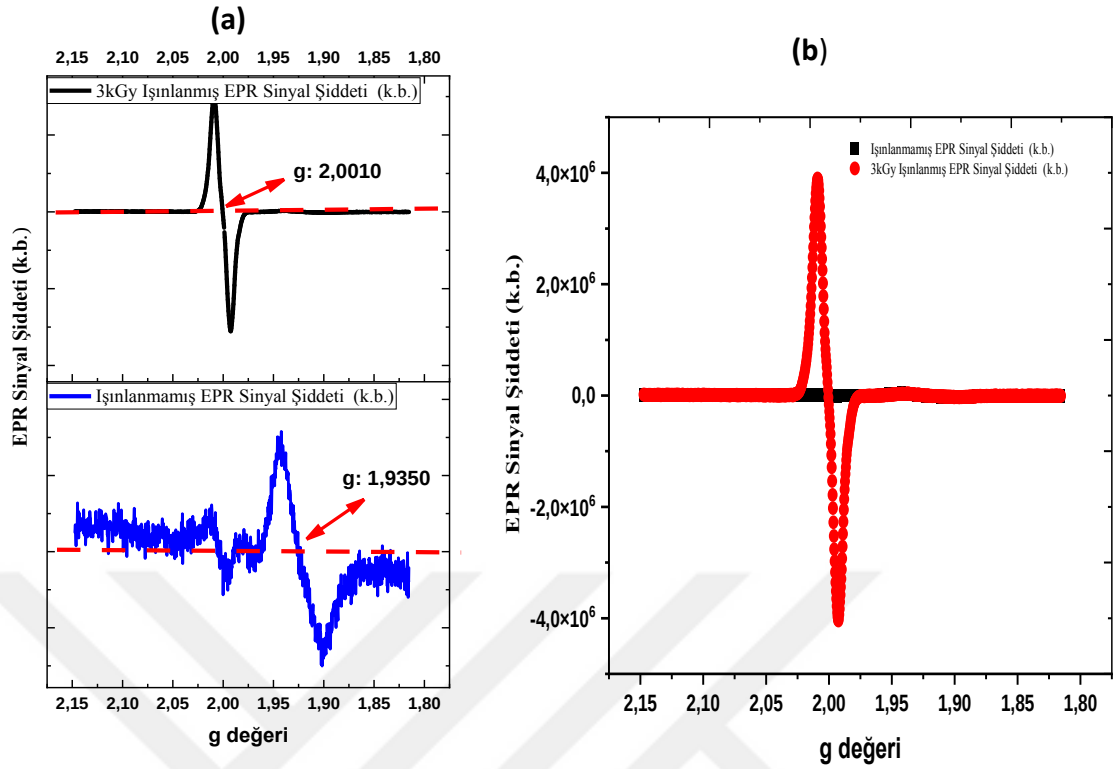
μ : Ortalama sonuç

σ : Standart Sapma

Z: Z skoru

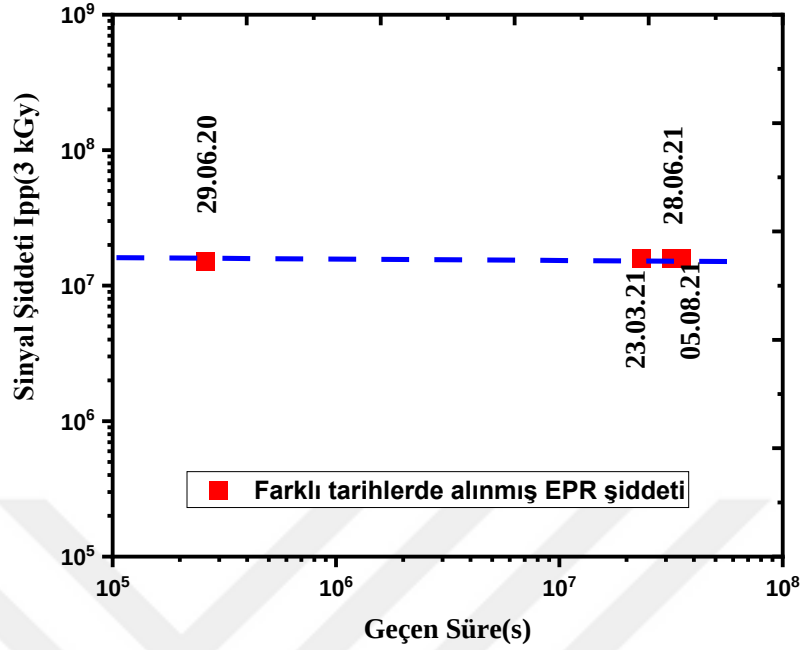
Z-skorlarının sonuçlarının değerlendirilmesi 3 koşulla gerçekleştirilir.

- $|z| \leq 2,0$ analiz sonucu uygundur;
- $2,0 < |z| < 3,0$ analiz sonucu kabul edilebilir fakat problemin irdelenmesi tavsiye edilir şüphelidir (Dikkat edilmesi gerekmektedir.);
- $|z| \geq 3,0$ analiz sonucu kabul edilemez (Nedenleri araştırılmalıdır.)



Şekil 4.2 (a) 3 kGy Işınlanmış ve Işınlanmamış şeker örneğine ait EPR Spektrumu (ayrı ayrı gösterim) (b) 3 kGy Işınlanmış ve Işınlanmamış şeker örneğine ait EPR Spektrumu (birlikte gösterim)

Şekil 4.2’de şekerin aynı deneysel parametreler ile ışınlanmadan önce (mavi spektrum) ve ışılandıktan sonra (kırmızı spektrum) elde edilen EPR spektrumları görülmektedir. Işınlanmayla birlikte sinyal şiddeti artmıştır. 3 kGy ışınlanmış şekerde sinyal gürültü oranı arttığı için spektrum daha net olarak görülmektedir. 3 kGy ışınlanmış ve ışınlanmamış şeker örneğine ait EPR spektrumu (a) seçeneğindeki gibi ayrı ayrı gösterildiğinde ışınlanmamış numuneye ait sinyal net olarak görülmektedir. (b) seçeneğindeki gibi birlikte gösterildiğinde ışınlanmamış şekerin sinyali yokmuş gibi algılanmaktadır. Bunun nedeni; 3 kGy gama radyasyonu ile ışınlanmış şekerin içerdiği radikal sayısının (dolayısıyla sinyalin), ışınlanmamış şekerde ait radikal sayısına göre 100 kat artmış olmasıdır.

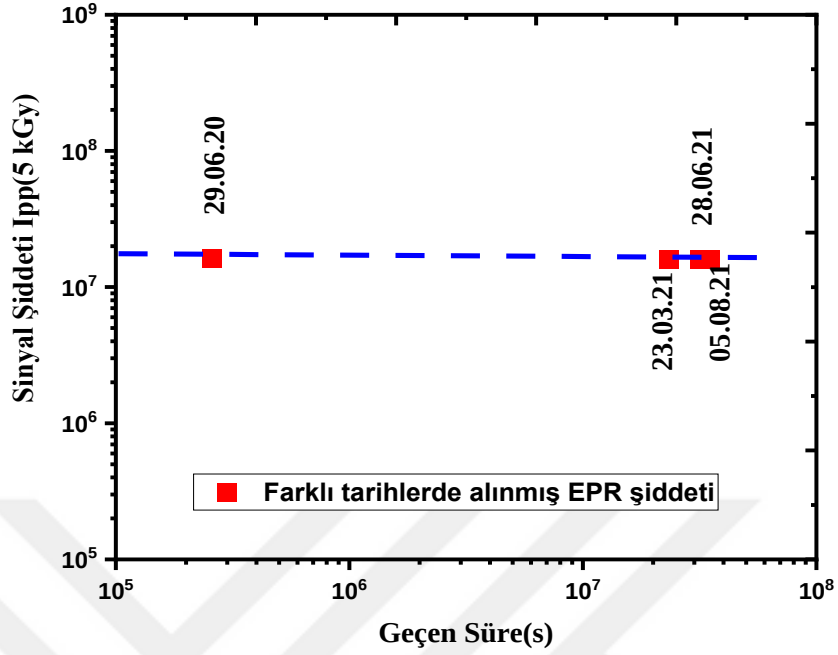


Şekil 4.3 3 kGy ışınlanmış şekerin I_{pp} sönüm grafiği

Şekil 4.3'te yaklaşık 14 ay boyunca 3 kGy ışınlanmış şekerin 4 farklı tarihte alınan EPR spektrumuna ait I_{pp} (Tepe- tepe) çizgi genişliği değeri görülmektedir. Çizelge 4.2'de verilen I_{pp} değerleriyle zamanla değişmiş sinyal şiddetlerinin istatistiki olarak anlamlı olup olmadığı Z skoru ile hesaplanmıştır. Elde edilen Zskor sonuçlarının 2'den küçük olduğu için uygun olduğu görülmüştür.

Çizelge 4.2 3 kGy ışınlanmış şekerin I_{pp} sönüm değerlerine ait Z skorları

Tarih	I_{pp}	Z Skoru	Z Skor Sonucu
29.06.2020	15195000	-1,49176	UYGUN
23.03.2021	15860000	0,63134	UYGUN
28.06.2021	15814000	0,48448	UYGUN
5.08.2021	15780000	0,37593	UYGUN
Varyans(σ^2)	5,21E+09		
Standard Sapma(σ)	72199,99		

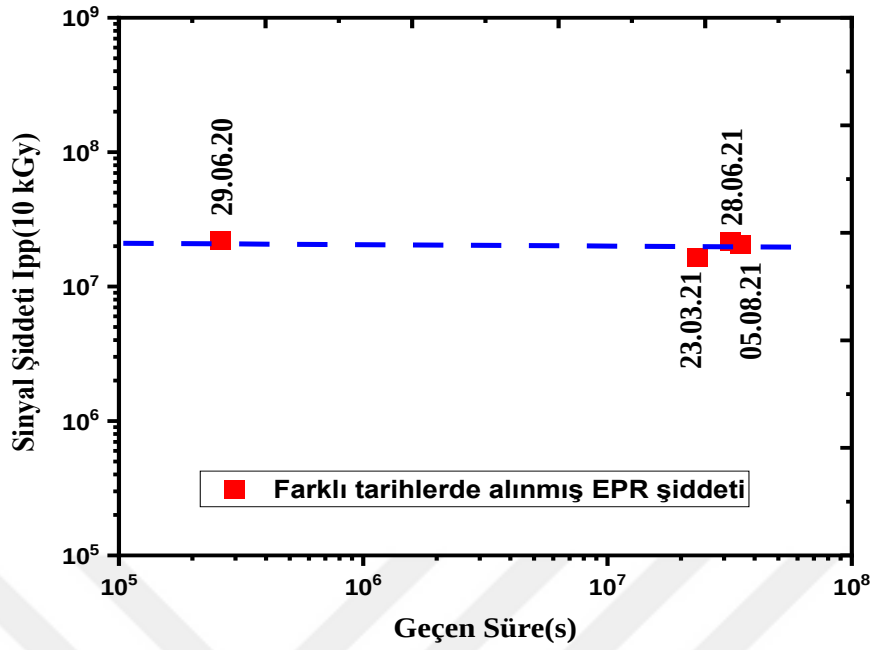


Şekil 4.4 5 kGy ışınlanmış I_{pp} sönüm grafiği

Şekil 4.4'te yaklaşık 14 ay boyunca 5 kGy ışınlanmış şekerin 4 farklı tarihte alınan EPR spektrumuna ait I_{pp} (Tepe- tepe) çizgi genişliği değeri görülmektedir. Çizelge 4.3'te verilen I_{pp} değerleriyle zamanla değişmiş sinyal şiddetlerinin istatistiki olarak anlamlı olup olmadığı Z skoru ile hesaplanmıştır. Elde edilen Z skor sonuçlarının 2'den küçük olduğu için uygun olduğu görülmüştür.

Çizelge 4.3 5 kGy ışınlanmış şekerin I_{pp} sönüm değerlerine ait Z skorları

Tarih	I_{pp}	Z Skoru	Z Skor Sonucu
29.06.2020	16125915	1,44271	UYGUN
23.03.2021	16006616	-0,20962	UYGUN
28.06.2021	15959969	-0,85570	UYGUN
5.08.2021	15994504	-0,37738	UYGUN
Varyans(σ^2)	5,21E+09		
Standard Sapma(σ)	72199,99		



Şekil 4.5 10 kGy ışınlanmış şekerin I_{pp} sönüm grafiği

Şekil 4.5'te yaklaşık 14 ay boyunca 10 kGy ışınlanmış şekerin 4 farklı tarihte alınan EPR spektrumuna ait I_{pp} (Tepe- tepe) çizgi genişliği değeri görülmektedir. Çizelge 4.4'de verilen I_{pp} değerleriyle zamanla değişmiş sinyal şiddetlerinin istatistiki olarak anlamlı olup olmadığı Z skoru ile hesaplanmıştır. Elde edilen Zskor sonuçlarının 2'den küçük olduğu için uygun olduğu görülmüştür.

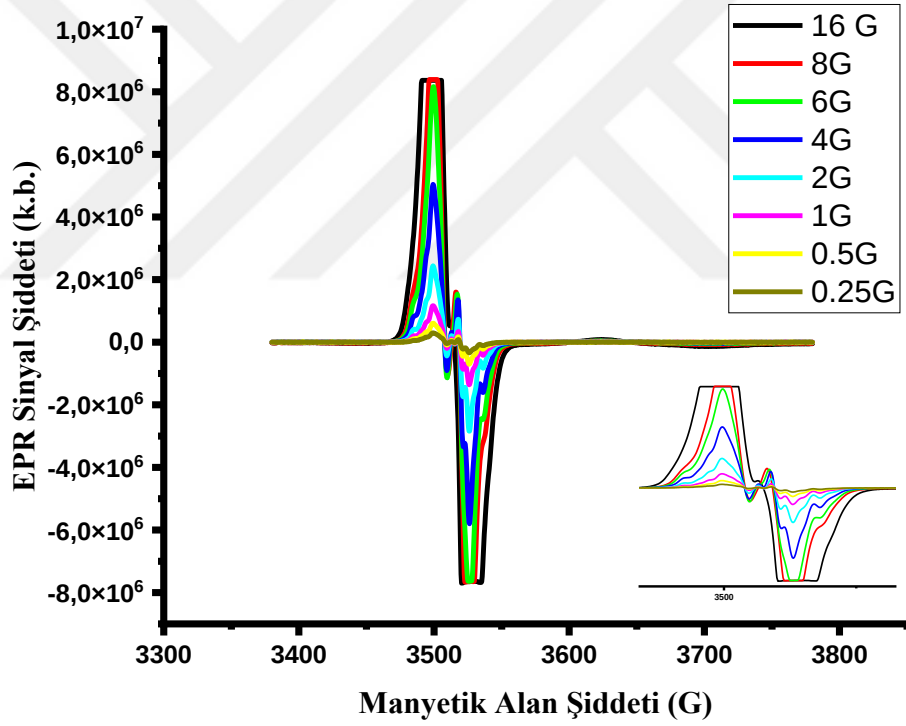
Çizelge 4.4 10 kGy ışınlanmış şekerin I_{pp} sönüm değerlerine ait Z skorları

Tarih	I_{pp} (10 kGy)	Z Skoru	Z Skor Sonucu
29.06.2020	21946500	0,71838	UYGUN
23.03.2021	16353000	-1,46309	UYGUN
28.06.2021	21525000	0,55400	UYGUN
5.08.2021	20593500	0,19071	UYGUN
Varyans(σ^2)	6,57455E+12		
Standard Sapma(σ)	2564089,02		

4.3 Genlik ve Güç Çalışması

Genlik çalışması:

3 kGy Işınlanmış şekerle öncelikle 0.25, 0.5, 1, 2, 4, 6, 8, 16 Gauss değerlerinde modülasyon genliği çalışması gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.6 'da elde edilen spektrumda genlik değeri 8 G ve 16 G olduğunda spektrumda sinyal kayıpları meydana gelmektedir. 4 G'nin altındaki değerlerde ise spektrumlar oldukça düşük olarak görülmektedir. Bu nedenlerle optimum genlik olarak 4 G değeri belirlenmiştir. Spektrumun büyütülmüş hali sağ altta net olarak gösterilmektedir.



Şekil 4.6 Modülasyon genliğinin belirlenmesi

Güç Çalışması:

3 kGy Işınlanmış şekere ait genlik çalışması sonucunda 4 G değeri belirlenmiştir. Çizelge 4.5'te verilen deneysel parametreler kullanılmıştır. Sinyalde saturasyon oluşmaması için güç çalışması yapılması gerekmektedir.

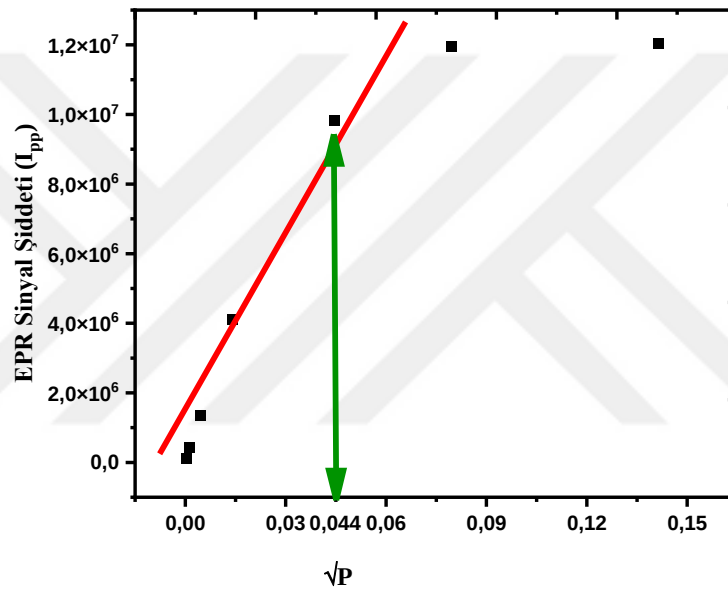
Çizelge 4.5 Genlik ve güç çalışması için kullanılan deneysel parametreler

Spektrometre Parametreleri	Spektrometre Parametre Değerleri
Mikrodalga Frekansı (v)	9,85GHz
Mikrodalga Gücü (P)	2,00 mW
Modülasyon Alanı Genliği	4,00 G
Merkezi Manyetik Alan (B_0)	3580G=358 mT
Tarama Aralığı	400 G
Tarama Zamanı	40,96 s
Kazanç	$4,48 \times 10^3$

Çizelge 4.6 Güç-dB çalışması

dB	P (watt)	$\sqrt{P}$	I_{pp}
10	0,02	0,141421	12044508
15	0,0063	0,079527	11937961
20	0,002	0,044721	9829046
30	0,0002	0,014142	4106566
40	0,00002	0,004472	1353618
50	0,000002	0,001414	417508
60	0,0000002	0,000447	108451

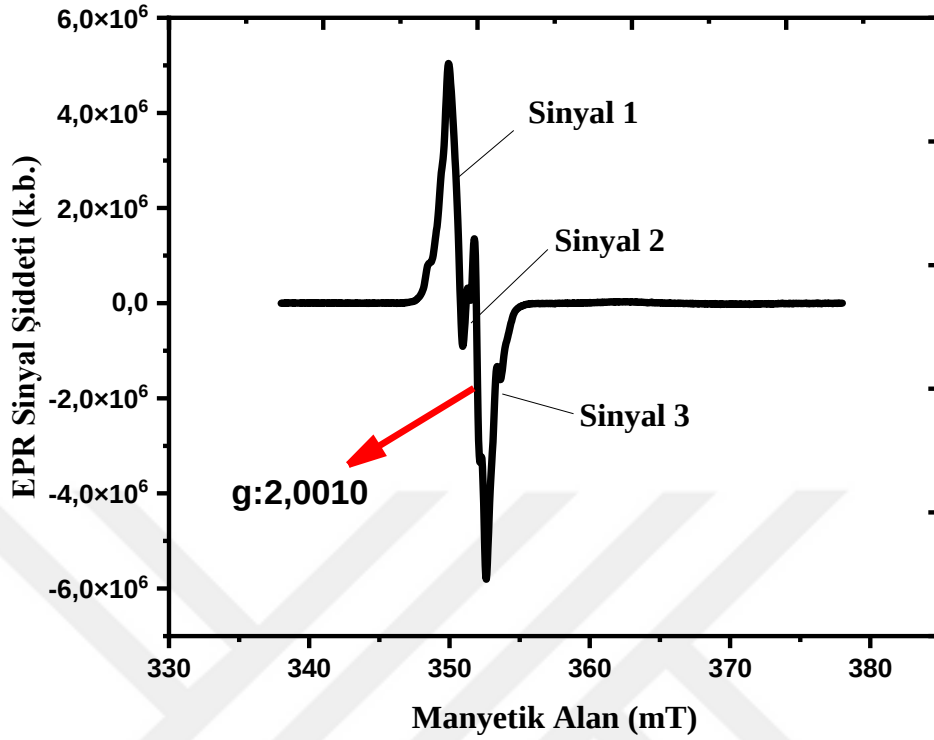
10, 15, 20, 30, 40, 50, 60 dB için denklem 4.3 kullanılarak elde edilen eksen değerleri Çizelge 4.6’da verilmiştir. EPR sinyal şiddetinin $\sqrt{P}$ değerine karşılık grafiği çizilerek lineer bölgenin ortasından $\sqrt{P}$ eksenini dik olarak kesildiğinde kesim noktasından optimum güç değeri elde edilmektedir. Elde edilen grafik Şekil 4.7’de verilmiştir. Lineer bölgeden belirlenen değer 20 dB değerine karşılık gelen $\sqrt{P}=0,44$ noktasıdır. Deneysel olarak elde edilen güç değeri 2mWatt’tır. Çizelge 4.6’da koyu renk karakterle gösterilmiştir.



Şekil 4.7 Optimum güç çalışması

$$P(\text{dB})=10\log_{10}(0.2/P(\text{Watt})) \quad (4.3)$$

Güç çalışmasında lineer bölgenin orta noktası 0,044 (20 dB) ‘dir. Denklem 4.3 kullanılarak 20 dB’ye karşılık 0,002 Watt (2 mW) değeri elde edilmektedir.



Şekil 4.8 Modülasyon genliği 4 G ve güç değeri 2 mW için elde edilen EPR spektrumu

Şekil 4.8’de 3 kGy ışınlanmış şekerin optimum çalışma parametreleri (Modülasyon genliği= 4G ve Mikrodalga gücü= 2 mW) belirlenmiş koşullar için elde edilmiş EPR spektrumu görülmektedir. Tek bir radikale değil kompleks spektruma ait g değeri şekil üzerinde gösterilmektedir ($g=2,0010$).

4.4 TRS 398 (IAEA 2000) Çalışmasında Doz Cevap Çalışması

28.07.2021 tarihinde Elekta marka Versa HD model Linac cihazında 6 MV X Işınıyla; 100, 200, 300, 500, 800, 1000, 1200 cGy olmak üzere 7 farklı doz değerinde ışınlama yapılmıştır. Şekil 4.9’da şeker paketinin RW3 fantomu üzerine yerleşimi görülmektedir. Her doz değeri için eşit kütleli 3 farklı numune paketi hazırlanmıştır. Her doz değerinde ışınlanan 3 ayrı paketin EPR ölçümü gerçekleştirilerek ortalamaları alınmış ve arkafon okumaları ortalamadan çıkarılarak elde edilen net sinyaller üzerinden değerlendirmeler gerçekleştirilmiştir. Alan büyüklüğü olarak 10x10 alan boyutu kullanılmıştır. Işınlama

için hazırlanmış olan Linak cihazı, RW3 fantomları arasında bulunan şeker paketleri ($d_{max}=1,5$ cm 'de), silindirik iyon odası Şekil 4.10'da gösterilmiştir.

6 MV X-ışınlarının kullanılma sebebi saçılan radyasyonun özellikle nötronun etkisini azaltmaktır. 10 MV veya 15 MV de nötron saçılımı artmaktadır. 6 MV o nedenle daha çok tercih edilmektedir.

Toz Şeker Kütle (m):301,35 mg

Işınlama koşulları olarak;

SSD:100 cm $d_{max}=1,5$ cm (6MV X ışınları için olan d_{max} derinliği)

$d=5$ cm (iyon odasının bulunduğu derinlik)

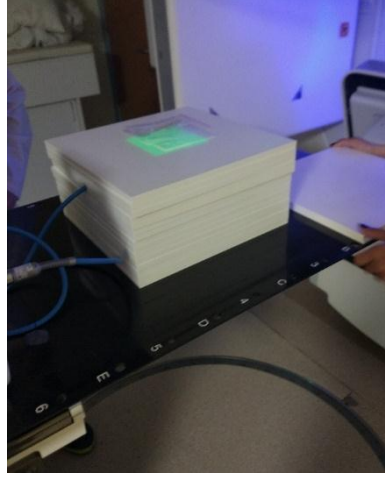
$h_{pl}=1,015$ (6 MV Xışını için 5cm'deki değer) (Sportdocbox 2022)

5 cm deki %DD= 86,9

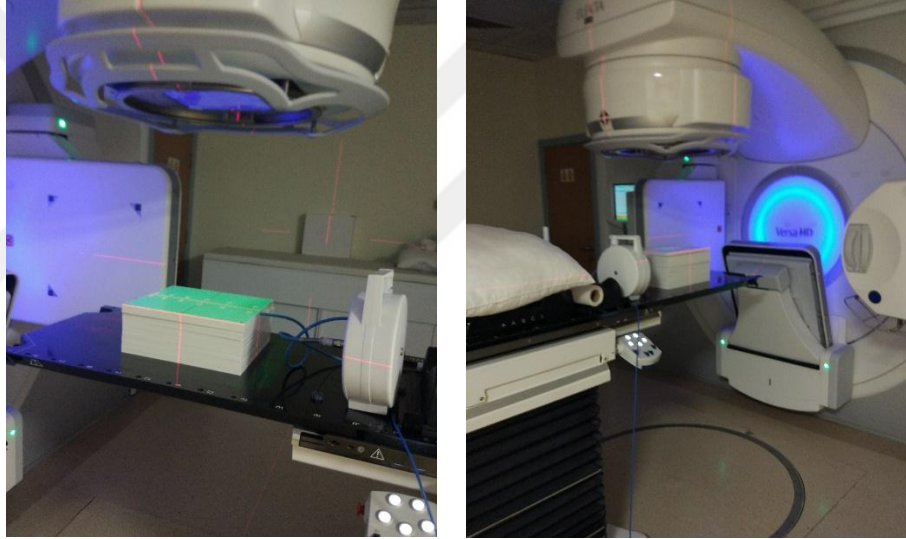
Çizelge 4.7 6 MV X ışınları için % DD dağılımları 10×10 cm² alan büyüklüğü için 5 cm derinlikteki %DD=86,9 (BIR 1972)

Derinlik (cm)	Alan Boyutu (cm ²)	SSD (cm)	%DD
5	10x10	100	86,90

%DD; “ d ” derinliğinde soğurulan dozun, “ d_o ” referans derinliğindeki soğurulan doza oranıdır. Yüksek enerjiler için referans derinliği en yüksek absorbe doz build-up noktasında ($d_o = d_{max}$) alınır. Maksimum doz noktasına build-up noktası denir. Çizelge 4.7'de 6 MV X ışınları için % DD dağılımlarına ait ilgili d değerindeki veriler alınmıştır. 10×10 alan büyüklüğü için 5 cm derinlikteki %DD=86,9'dır (BIR 1972).



Şekil 4.9 Şeker paketlerinin RW3 fantomu üzerine yerleştirilmesi



Şekil 4.10 Işınlama için hazırlanan sistem

Şekil 4.9’da şekerin RW3 fantomu $10 \times 10 \text{ cm}^2$ alan boyutu üzerine yerleştirilmesi gösterilmiştir. Sonrasında Şekil 4.10’da gösterildiği gibi şeker paketlerinin üzerine fantomlar yerleştirilerek ışınlamanın $d_{\max}$ derinliğinde gerçekleştirilmesi sağlanmıştır.

Kalite güvenirliği (QA) kapsamında LINAC cihazından verilen 100, 200, 300, 500, 800, 1000, 1200 cGy dozların iyon odası ile ölçülerek elektrometreden nC (nanocount) olarak karşılaştırılması yapılmış ve fantom tarafından soğurulan dozun hesabı yapılarak Çizelge 4.7 ‘de deneysel ve teorik olarak belirlenen doz değerleri listelenmiştir.

Deneysel doz değeri hesabı:

Cihaz da 1cGy=1MU kalibrasyonu yapılmıştır.

- 100 cGy için iyon odasının okuduğu nC değeri:

$M_1=14.35$ nC (Şeker 2. kez ışınlanmadığı için M_2 değeri kullanılmıyor)

Elde edililen değer in soğurulan doz olarak hesabı için Denklem 4.4 ve 4.5 kullanılmıştır.

Düzeltilmiş okuma değerlerinin ifadesi ($M_{corr,Q}$);

$$M_{corr,Q}=M_1 h_{pl} k_Q k_{TP} k_{elec} k_{pol} k_s \quad (4.4)$$

Referans kalitedeki bir ışı n, Q_0 ile ışı nlanan bir fantom içersinde ve referans noktadaki bir iyon odası ile suda absorlanan doz

$$D_{W,Q}=M_{corr,Q} N_{DW,Q_0} \quad (4.5)$$

k_{elec} , k_{pol} ve k_s 1 olarak alınmıştır. Kullanılan iyon odası ile elektrometre birlikte kalibre edildiği için ayrı bir k_{elec} yani elektrometre kalibrasyon faktörüne gerek yoktur. Bu yüzden $k_{elec}=1$ olarak alınmıştır.

$N_{D,W}=53.492$ mGy/nC=5.3492 cGy/nC (Kalibrasyon sertifikasından elde edilen değ er)

$k_{Q,Q_0}=0.99$ ($TPR_{10}^{20}=0,675$ (6MV X Işı nları için))

$P=911$ mbar (Ölçüm sı rasındaki basınç)

$P_0=1013$ mbar (İyon odasının kalibrasyon koş ullarındaki odanın bası ncı)

$T=22^\circ\text{C}$ (Ölçüm sı rasındaki sı caklık)

$T_0=20^\circ\text{C}$ (İyon odasının kalibrasyon koş ullarındaki odanın sı caklığı)

Sıcaklık basınç düzeltmeleri Denklem 4.6 kullanılarak k_{TP} katsayısı olarak hesaplanmıştır.

$$k_{TP} = \frac{273.16 + T}{273.16 + T_0} \cdot \frac{P_0}{P} \quad (4.6)$$

$$k_{TP} = \frac{273.16 + 22}{273.16 + 20} \cdot \frac{1013}{911} = 1,12$$

$$h_{pl} = 1,015$$

$$M_{corr,Q} = 14,35.1,015.0,99.1,12.1.1.1 = 16,15 \text{ nC} = 14,35.1,125$$

$$D(5\text{cm}) = 16,15 \text{ nC} \cdot 5,3492 \text{ cGy/nC} = 86,39 \text{ cGy}$$

$$5 \text{ cm'de } \%DD = \%86,9$$

Şeker örnekleri d_{max} 'da ($d_{max} = 1,5 \text{ cm}$) ışınlanmıştır. Ölçümler 5 cm'de alındığı için d_{max} dozunun hesaplanması gerekmektedir.

$$D(max) = 86,39 \text{ cGy} / 0,869 = 99,41 \text{ cGy (iyon odası ile alınan okuma sonucu)}$$

Sabit değerleri katsayı olarak belirleyerek tüm teorik doz değerleriyle çarpılıp elde edilen deneysel doz değerleri Çizelge 4.8'de verilmektedir.

$$\text{Sabit Katsayı: } (1,015.0,99.1,12. 5,3492 \text{ cGy/nC} = 6,020 / 0,869 = 6,93 \text{ cGy/nC})$$

- $200 \text{ cGy} \gg 28,75 \text{ nC}$

$$28,75 \text{ nC} \times 6,93 \text{ cGy/nC} = 199,24 \text{ cGy}$$

- $300 \text{ cGy} \gg 42,95 \text{ nC}$

$$42,95 \text{ nC} \times 6,93 \text{ cGy/nC} = 297,6$$

- $500 \text{ cGy} \gg 71,70 \text{ nC}$

$$71,70 \text{ nC} \times 6,93 \text{ cGy/nC} = 496,88$$

- 800 cGy » 114,60 nC

$$114,60 \text{ nC} \times 6,93 \text{ cGy/nC} = 794,18 \text{ cGy}$$

- 1000 cGy » 143,70 nC

$$143,70 \text{ nC} \times 6,93 \text{ cGy/nC} = 995,84 \text{ cGy}$$

- 1200 cGy » 172,40 nC

$$172,40 \text{ nC} \times 6,93 \text{ cGy/nC} = 1194,73 \text{ cGy}$$

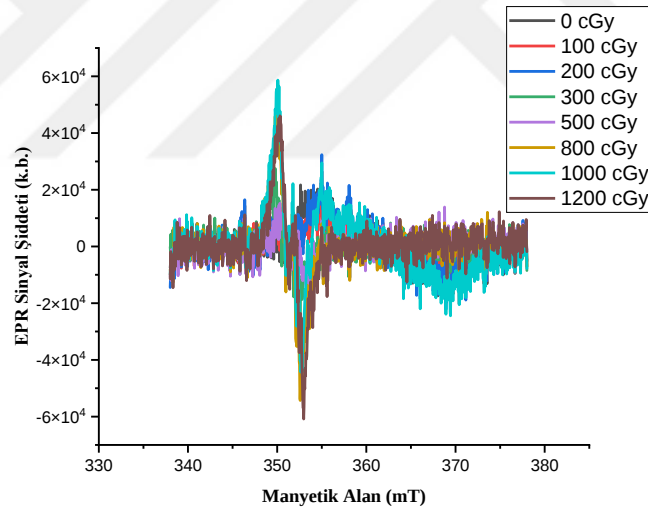
Çizelge 4.8 Teorik ve deneysel doz değerleri

Verilmek istenen Doz (cGy)	nC	Asıl verilen Doz (cGy)
0	0	0
100	14,35	99,41
200	28,75	199,24
300	42,95	297,60
500	71,70	496,88
800	114,60	794,18
1000	143,70	995,84
1200	172,40	1194,73

Işınlanan şeker örnekleri Çizelge 4.9 ‘daki standard parametreler kullanılarak ölçümler alınmıştır. Önceki aşamada belirlenen genlik ve güç değerleri kullanılmıştır. Şekil 4.11’de ışınlanmamış ve farklı dozlarda ışınlanmış şekerin EPR spektrumları görülmektedir. Şekil 4.12’de 1200 cGy ışınlanmış şekerin örnek spektrumu verilmektedir.

Çizelge 4.9 Doz cevap değerleri için kullanılan ölçüm parametreleri

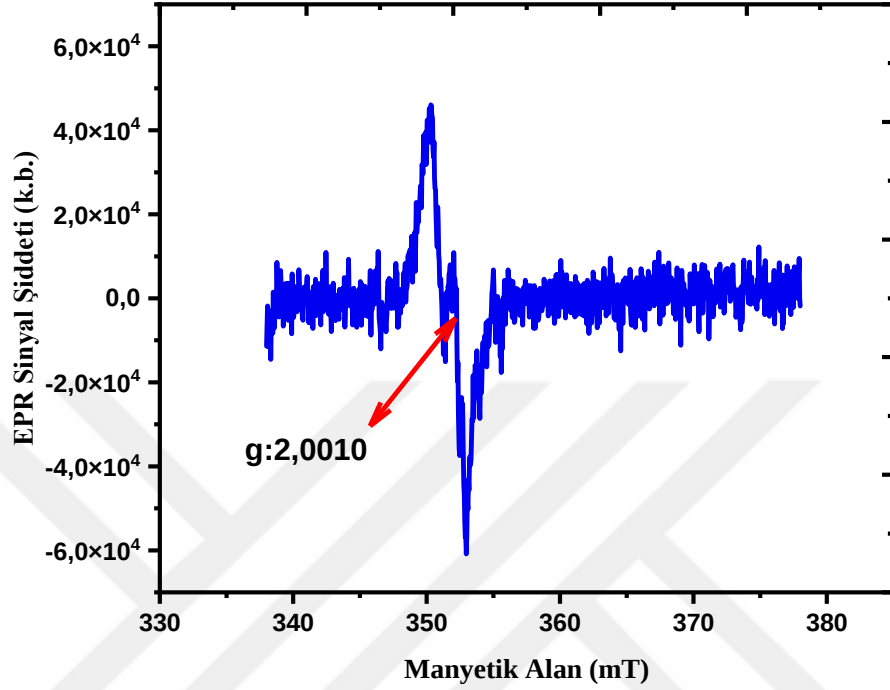
Spektrometre Parametreleri	Spektrometre Parametre Değerleri
Mikrodalga Frekansı (ν)	9,85GHz
Mikrodalga Gücü (P)	2,00 mW
Modülasyon Alanı Genliği	4,00 G
Merkezi Manyetik Alan (B_0)	3580G=358 mT
Tarama Aralığı	400 G
Tarama Zamanı	40,96 s
Kazanç	$4,48 \times 10^3$



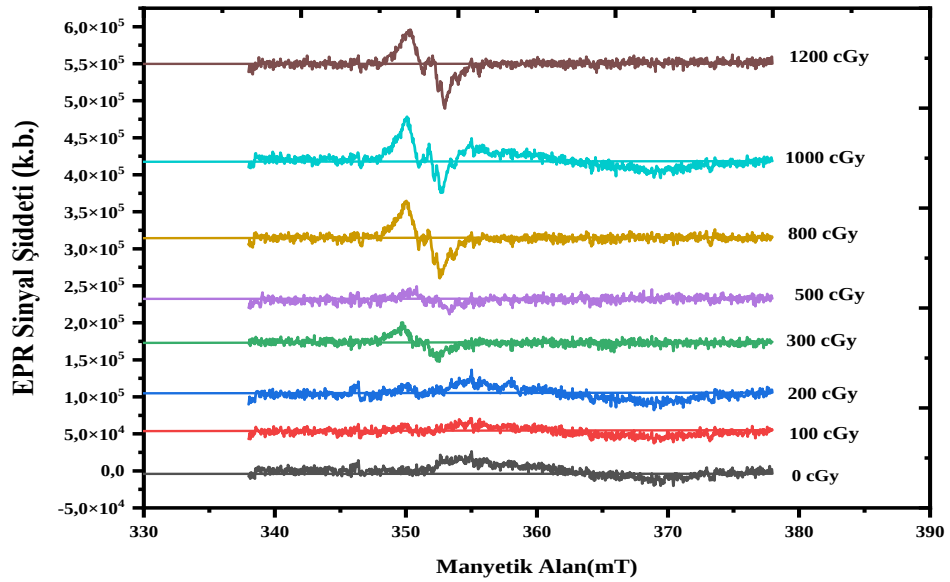
Şekil 4.11 Işınlanmamış ve ışınlanmış şekerin EPR spektrumları

Şekil 4.11’de ışınlanmamış (0 cGy) ve ışınlanmış (100 cGy, 200 cGy, 300 cGy, 500 cGy, 800 cGy, 1000 cGy, 1200 cGy) şekerin merkezi manyetik alanda nasıl kesiştikleri görülmektedir. Merkezi manyetik alan 358 mT olarak çizelge 4.9’daki deneyde kullanılan standart parametreler olarak verilmiştir. Spektrumun üst üste gelmesinden kaynaklı ışınlanmamış ve düşük dozlarda ışınlanmış şekerlere ait spektrum çok net olarak görünmemektedir. Şekil 4.12 ‘de 1200 cGy ışınlanmış şekerle ait spektrum

çizelge 4.9'daki standart parametreler kullanılarak elde edilmiştir. Bu nedenle Şekil 4.13'teki gibi ayrı ayrı spektrumlar gösterilerek sinyallerdeki artış incelenmiştir.

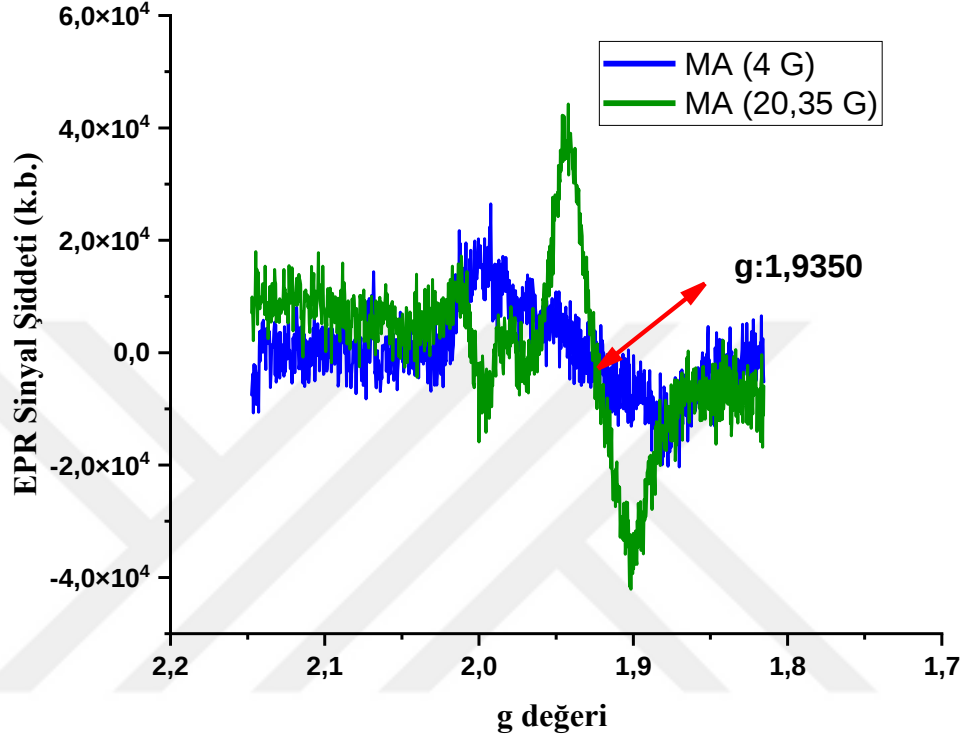


Şekil 4.12 1200 cGy ışınlanmış şekerin EPR spektrumu



Şekil 4.13 6MV X-ışınıyla ışınlanmış şeker örneğinin tüm dozları içeren EPR Spektrumu

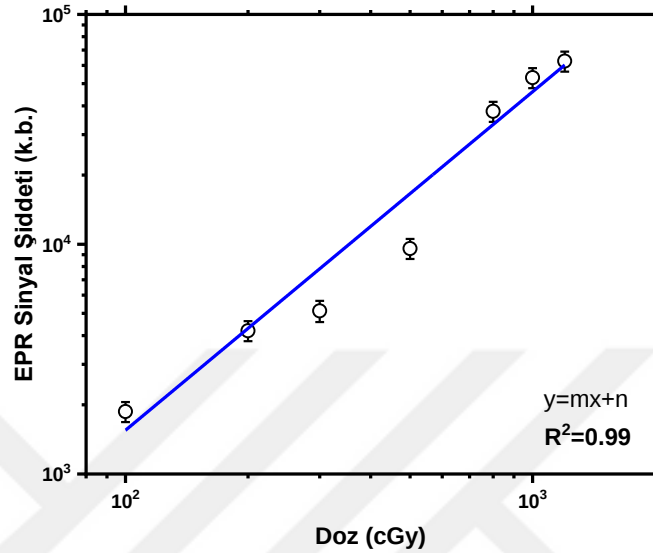
Şekil 4.13 de 6MV X-ışınlarıyla ışınlanmış şekerin doza karşı sinyal artışları görülmektedir. Işınlanmamış ve ışınlanmış şekerin EPR spektrumları net olarak karşılaştırılmıştır.



Şekil 4.14 Işınlanmamış şekerin farklı genlik ve g   değerlerindeki EPR spektrumları

Şekil 4.14'te; Şekil 4.13 ve Şekil 4.2'de farklı modülasyon genlikleri ve g   değerlerinde elde edilen ışınlanmamış şekere ait spektrumlar karşılaştırılmıştır. Şekilde de görüldüğü gibi 4G (güç; 2mW) modülasyon genliğindeki spektrum ile 20,35 G (güç;0,2 mW) genlikli spektrumların kesişim noktasında g:1,9350 olarak ışaretlenmiştir.

Şekil 4.15’de verilen doz cevap eğrisine göre en uygun matematiksel fonksiyonun lineer fonksiyon olduğu görülmüştür. Çizelge 4.10’da denkleme ait katsayılar verilmiştir.



Şekil 4.15 I_{pp} sinyal değerlerine ait doz cevap grafiği

Şekil 4.13’te verilen spektrumlara ait I_{pp} değerleri referans alınarak Şekil 4.15’de verilen doz cevap grafiği elde edilmiştir. Şekil 4.15; ışınlanmamış şekere ait I_{pp} değeri arkafon olarak ışınlanmış şekerlere ait I_{pp} değerlerinden çıkartılarak elde edilen net I_{pp} değerleri kullanılarak elde edilmiştir. Her iki grafikte de artan doza karşılık artan sinyal şiddeti olduğu görülmektedir. Işınlanmamış şekerin spektrumu artan dozla 300 cGy’den sonra gözle görülür olarak fark edilmektedir. I_{pp} değerine göre 100 cGy’de dahi sinyallerde artış olduğu Şekil 4.15’teki grafikte de görülmektedir. Doz cevap grafiği doğrusal bir denklemle ($mx+n$) uyumlu bulunmuştur. İlgili denkleme ait katsayılar Çizelge 4.10’da verilmiştir. Denklemden 300 cGy ve 500 cGy dozları doğrunun altında kalmıştır. Bu nedenle $R^2=0,99$ olarak hesaplanmıştır. %1’lik bir sapmanın olması %95 güven aralığında kaldığı için kabul edilebilirdir. Yine de bu sinyallerdeki düşüşün nedeni 300 cGy ve 500 cGy örneklerinin içinde bulunduğu vakumlu poşetin hava alarak bu numunelerin nem alması sonucu serbest radikallerinin sayısında azalma gerçekleşmiş olabilir.

Çizelge 4.10 Doz-cevap eğrisinin uyumlu olduğu matematiksel lineer fonksiyon katsayıları

Fonksiyon	Katsayılar	R ²
y = mx+n	m: 1,47288 ± 0,07107 n: 0,24474 ± 0,18856	0,99

4.5 Işınlanmış Gıda Çalışması

TS EN 13708 (2004) Kristal şeker içeren gıdaların ışınlanıp ışınlanmadığının ESR Spektroskopisi ile belirlenmesi standardıdır. Çizelge 4.11’de verilen spektrometre ayarları kullanılarak kuru incir, kuru mango, kuru papaya ve kuru üzüm üzerinde çalışmalar gerçekleştirilmiştir.

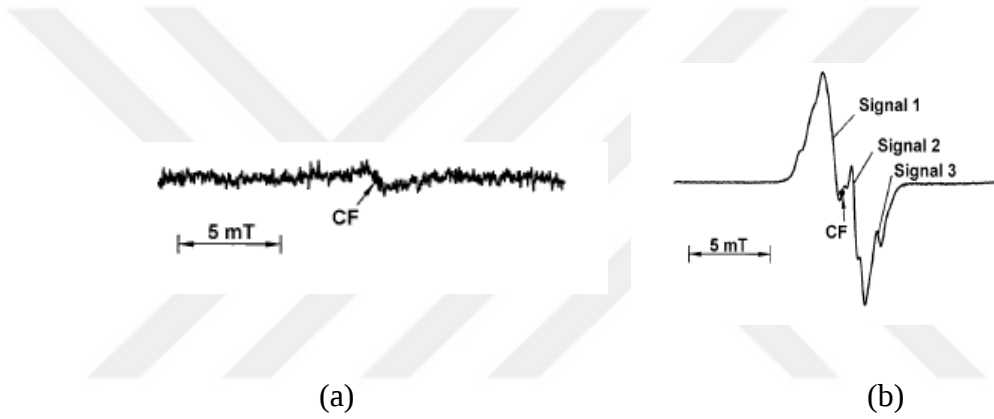
Çizelge 4.11 TS EN 13708 (2004) standartında önerilen ile tezde kullanılan spektrometre değerlerinin karşılaştırılması

TS EN 13708’de (2004) önerilen değerler	Parametre	Tez kapsamında kullanılan değerler
9,78 GHz,	Mikrodalga Frekansı (v)	9,85 GHz
5 mW	Mikrodalga Frekansı (v)	2 mW
348 mT	Merkezi Manyetik Alan (B ₀)	Manyetik alan: 358 mT
10,0 mT–20,0 mT	Tarama genişliği	400 G=40 mT
50 kHz veya 100 kHz	Frekans modülasyonu	100 kHz
0,15 mT - 0,4 mT,	Genlik modülasyonu	0,4mT=4 G
Ortam sıcaklığı	Sıcaklık	Ortam Sıcaklığı

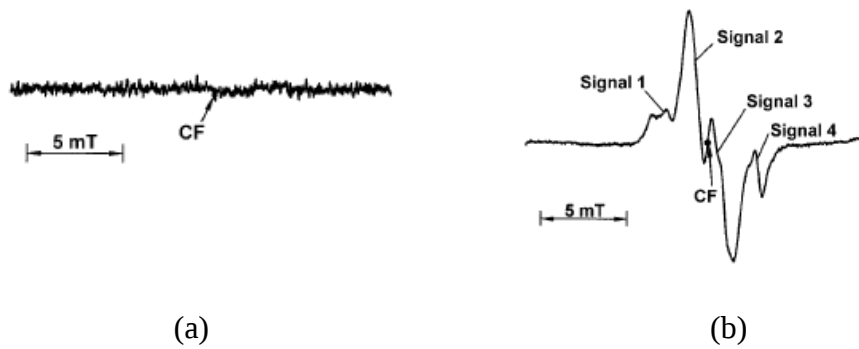
Çizelge 4.11’de TS EN 13708 (2004) standartında önerilen ile tezde kullanılan spektrometre ayarlarının karşılaştırılması verilmiştir. Standartta frekans ve genlik

modülasyonu değerleri aralık olarak önerildiği için tez kapsamında kullandığımız değerler bu aralıkta kalmaktadır. Mikrodalga frekansı yaklaşık olarak aynıdır (9,78GHz~9,85 GHz). Güç değeri 2 mW, önerilen 5 mW'tan daha düşüktür. Merkezî manyetik alan değeri 10 mT daha düşük kullanılmıştır. Tarama genişliği 2 kat daha fazla kullanılmıştır.

TS EN 13708 (2004) standartında gerçekleştirilen deneysel çalışmalarda Şekil 4.16'daki 3 kGy ışınlanmış ve ışınlanmamış mangonya ait EPR spektrumları ile Şekil 4.17'deki 3 kGy ışınlanmış ve ışınlanmamış kuru incire ait EPR spektrumları verilmiştir. CF; Merkez alan değerini temsil etmektedir.

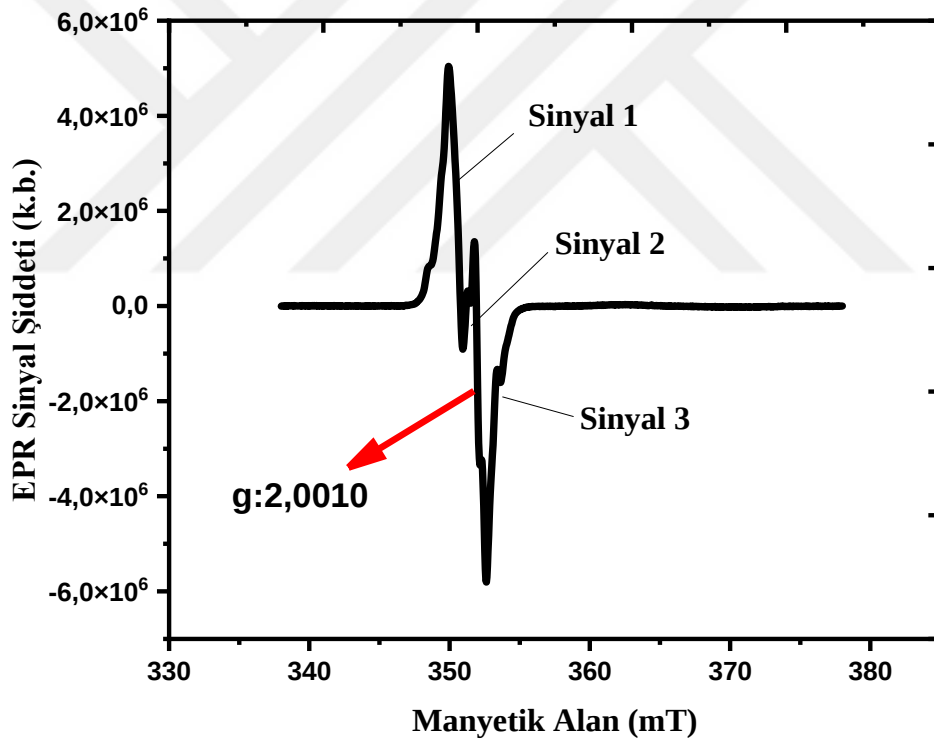


Şekil 4.16 (a) Işınlanmamış kuru mangonya ait tipik ESR spektrumu (TS EN 13708 2004)
(b) Işınlanmış kuru mangonya ait tipik ESR spektrumu (3,0 kGy) (TS EN 13708 2004)



Şekil 4.17 (a) Işınlanmamış kuru incire ait tipik ESR spektrumu (TS EN 13708 2004)
(b) Işınlanmış kuru incire ait tipik ESR spektrumu (3,0 kGy) (TS EN 13708 2004)

Şekil 4.16’te 3 kGy ışınlanmış kuru mangoya ait 3 adet sinyal, Şekil 4.17’de 3 kGy ışınlanmış kuru incire ait olarak da 4 adet sinyal görülmektedir. TS EN 13708 Standardında her iki gıdanın da g değeri= 2,0035 olarak verilmiştir. Şekil 4.17’de tez kapsamında 3 kGy ışınlanmış şekerin spektrumu ve g=2,0010 değeri verilmiştir. Sinyal sayısı ve şekli Şekil 4.16’da verilen kuru mangoya benzemektedir. Kuru mangonun ve sofr şekerinin g değerleri arasında içerik olarak aynı radikallere sahip olmadıkları için fark bulunmaktadır. Ayrıca; Çizelge 4.11’de verilen uygulanan deneysel parametrelerin de bazıları birbirinden farklıdır. Işınlanmamış kuru incir ve kuru mangoya ait spektrumlar ise Şekil 4.13’verilen ışınlanmamış şekerin spektrumuna oldukça benzemektedir. Şekil 4.14 de ise ışınlanmamış şekerlerin farklı genlik ve güç değerlerinde elde edilen spektrumlarından g değerlerinin kesişim noktaları görülmektedir.



Şekil 4.18 3 kGy ışınlanmış şeker örneği

5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Işınlamadan sonraki ilk saatlerde EPR spektrumunda kararsız radikallere ait sinyaller gözlenmiştir. Yordanov vd. (2002) tarafından gerçekleştirdikleri sofrâ şekeri çalışmasında ışınlamadan sonraki ilk 72 saatte sinyallerde hızlı bir azalma meydana geldiğini belirtilerek ölçüm için en az 72 saat beklenmesinin daha kararlı bir sinyal gözlenmesini sağlayacağı önerilmiştir. Bu nedenle ölçümler dozlamadan en az 72 saat sonra gerçekleştirilmiştir. Daha uzun bir zaman ölçeğinde, atmosferik sıcaklık değişse bile, doğal ortamda birkaç yıl içinde radikallerin sayısı pek değişmemektedir (Nakajima 1989). Kararlı sinyallerin birbirleriyle anlamlı olduğunu göstermek amacıyla, ölçülen değerler istatistiki bir test olan Z-skoru ile değerlendirilmiştir.

Şekil 4.3, 4.4, 4.5'te verilen sırasıyla 3 kGy, 5 kGy, 10 kGy ışınlanmış şekerin yaklaşık 14 ay boyunca uğradığı sönümler gözlenmiştir. Elde edilen I_{pp} verileri Z-skorları ile incelenmiş ve Z skoru 2'nin altında olduğu için istatistiksel olarak anlamlı bulunmuştur. Sinyallerde gerçek anlamda bir kayıp gözlenmediği için sonuçların literatürle uyumlu olduğu görülmüştür.

Şekil 4.13'te; verilen düşük dozlardaki (100, 200, 300, 500, 800, 1000, 1200 cGy) doz cevap grafiğinde elde edilen EPR spektrumları görülmektedir. Tez kapsamında, Radyoterapi Kalite Güvenilirliği (QA) için doz kontrolü aşamalarında düşük dozlarda yapılan ışınlamalar neticesinde gözlenen doz cevap sinyallerinde gürültü sinyal farkının 300 cGy'de belirmeye başladığı ve 800 cGy 'de net olarak gözlendiği görülmüştür. I_{pp} değerleri ile 100cGy'de de sinyalin arttığı Şekil 4.15'teki doz cevap grafiğinde de gözlenmektedir. Rapor edilen en düşük tespit limiti, sofrâ şekeri için yaklaşık 200 mGy (Fattibene vd. 1996) ve şeker peletleri için (Tchen vd. 1993) 100 mGy olarak bildirilmiştir. Şekil 4.15'teki doz cevap grafiğinin doğrusal olarak artış gösterdiği için $mx+n$ fonksiyonuna uygun bulunarak $R^2=0,99$ olarak hesaplanmıştır. Grafikteki 300 cGy ve 500 cGy noktalarında sinyal kaybı görülmüştür. Bunun nedeni olarak numunenin nem almış olma ihtimali üzerinde durulmaktadır. Çünkü; yüksek nem koşulları altında, güçlü bir sinyal kaybı (> %40) gerçekleşebilmektedir (Desrosiers ve

Wadley 2006). Doz-cevap eğrisinin, gama ışınları ışınlaması için 0,5-100 Gy doz aralığında lineer olduğu literatür araştırmalarında mevcuttur (Fattibene vd.1996; Nakajima 1995). Işınlanmamış şeker örneğinde bir EPR spektrumunun gözlenmesi dozimetri çalışmaları için istenmeyen bir durumdur. Bu sinyallerin nedeni şekerin imalat aşamasından kaynaklanabilmektedir. Şeker işleme sırasında (pudralama gibi) radikal oluşumu nedeniyle, ışınlanmamış bazı örnekler ışınlamadan önce bir arka plan sinyali gösterebilmektedir (Fattibene vd. 1996; Herve 2006b). Bu çalışmada da belirtilen nedenlerden kaynaklı olabileceği düşünülen ışınlanmamış şekerde ait arka plan sinyali gözlenmiştir.

Doz cevap sinyallerinin literatürle uyumlu olduğu gözlenmiştir. Lakin radyoterapi QA çalışmaları sırasında fantomlar arasındaki d_{max} derinliğine yerleştirilen şekerlerin kalibrasyonda kullanılması fantomlar arasında bir kalınlık oluşturduğu için çok pratik bulunmamıştır. 6 MV X ışınları ile ışınlanan şekerin artan doza cevabının doğrusal olarak artması nedeniyle radyoterapi tedavilerinde kullanılan film dozimetre veya TLD dozimetrelerin yanında dozimetrik olarak çalışılmasının ve olası bir kaza durumunda geriye dönük olarak radyasyon ölçümlerinin daha doğru tahmin edilmesinin sağlanması için uygun olabileceği düşünülmektedir.

Işınlanmış gıda çalışmalarında gıdanın raf ömrünün uzaması için şekerin kendisi, içeriğinde kristal şeker içeren çeşitli meyveler ışınlamakta ve ışınlamayı tespit etmek için de şekerin EPR spektrumu kullanılmaktadır. Işınlanmış ve ışınlanmamış şeker örneğinin EPR ile tespiti eğer sinyaller sönüme uğramamışsa tespit edilebilmektedir. Sinyaller sönüme uğramışsa termoluminesans tekniği ile bu tespit gerçekleştirilmektedir. Böylelikle, ticari olarak yanıltıcı beyanda bulunan sahte iş ve işlemlerin önlenmesi mümkün olmaktadır.

Gıda ışınlamaları için 10 kGy'e kadar radyasyonun gıdanın yapısında bir bozulmaya neden olmadığı görülmüş ve gıdaya bu dozların uygulanmasına izin verilmektedir. Gama ışınlarıyla gıdanın belirlenen dozda ışınlanmasının takibi için maliyetleri oldukça yüksek alanin dozimetreler kullanılabilmektedir. Şekerin dozimetrik özellikleri incelendiğinde yüksek dozlar için de kullanımının uygun olduğu görülmüştür.

TS EN 13708 (2004) standardına göre Şekil 4.16’te kuru mangoya ait EPR spektrumu ile Şekil 4. 18’deki şekerle ait EPR spektrumları 3 kGy gama radyasyonu ile ışınlanmış spektrumlardır. Mango içeriğindeki kristal şekerin ışınlanıp ışınlanmadığı üzerine gerçekleştirilen deneysel çalışmalar ile tez kapsamında şekerin dozimetrik özellikleri için gerçekleştirilen çalışmalar benzer EPR spektrumlarını işaret etmektedir. Bu benzerlik Şekil 4.16 ve Şekil 4.18’de açıkça görülmektedir. Sonuç olarak sadece evlerde bulunan beyaz toz şekerin değil aynı zamanda içerisinde kristal şeker içeren gıdaların da birer EPR dozimetre adayı olduğu ve ileri uygulamalarda kullanılabilir olduğu düşünülmektedir. Ayrıca sofr şeker ve diğer şeker türleri farklı bantlarda (L, S, Q, W) EPR spektrometreleriyle karşılaştırmalı olarak araştırılarak farklı doz aralıklarında bu çalışmanın genişletilebilir olduğu önerilmektedir.

KAYNAKLAR

- Başbayraktar, V. (2012). Işınlanmış Gıdaların Tespitinde Kullanılan Yöntemler. *Gıda/The Journal of FOOD*, 37(2).
- BIR, (1972) Central axis depth dose data for use in Radiotherapy, Brit. J. Radiol. Supplement no. 11, The British Institute of Radiology, London .
- Da Costa, Z. M., Pontuschka, W. M., & Campos, L. L. (2005). A comparative study based on dosimetric properties of different sugars. *Applied radiation and isotopes*, 62(2), 331-336.
- De Cooman, H., Vanhaelewyn, G., Pauwels, E., Sagstuen, E., Waroquier, M., & Callens, F. (2008). Radiation-induced radicals in glucose-1-phosphate. I. Electron paramagnetic resonance and electron nuclear double resonance analysis of in situ X-irradiated single crystals at 77 K. *The Journal of Physical Chemistry B*, 112(47), 15045-15053.
- Desrosiers, M., & Wadley, S. (2006). Time dependence of the radiation-induced EPR signal in sucrose. *Radiation protection dosimetry*, 118(4), 479-481.
- Dirican B. (2014) IAEA-TRS 398 Foton Dozimetrisi Eğitim Seminer Sunumu, Medikal Fizik Derneği 10 Nisan 2014- Ankara (<https://medikalfizik.org/news?id=14>)
- El-Ahdal, M. A. (2007). Effect of gamma radiation dose on sugar VIII Radiation Physics & Protection Conference, 13-15 November 2006, Beni Sueif, Egypt
- Fattibene, P., Duckworth, T. L., & Desrosiers, M. F. (1996). Critical evaluation of the sugar-EPR dosimetry system. *Applied radiation and isotopes*, 47(11-12), 1375-1379.
- Hervé, M. L., Trompier, F., Tikunov, D. D., Amouroux, V., & Clairand, I. (2006a). Study of materials for mixed field dosimetry by EPR spectroscopy. *Radiation protection dosimetry*, 120(1-4), 205-209.
- Herve, M. L. (2006b). *Dosimetry of an accident in mixed field (neutrons, photons) using the spectrometry by electronic paramagnetic resonance (EPR)* (No. FRNC-TH--6963). Paris-11 Univ.
- Huq, M. S. (2006). Absorbed dose determination in external beam radiotherapy: an international code of practice for dosimetry based on standards of absorbed dose to water.
- IAEA-TECDOC-1331 (2002). Use of Electron Paramagnetic Resonance Dosimetry with Tooth Enamel for Retrospective Dose Assessment. International Atomic Energy Agency, Vienna, Austria.

- Ikeya, M. (1993). *New applications of electron spin resonance: dating, dosimetry and microscopy*. World Scientific.
- IAEA, (1987) Absorbed dose determination in photon and electron beams: an international code of practice. Technical Reports Series No: 277. Vienna, Austria
- IAEA, (1997) The Use of Plane Parallel Ionization Chambers in High-Energy Electron and Photon Beams: An International Code of Practice for Dosimetry, Technical Reports Series No.381, IAEA, Vienna.
- IAEA, (2000). Absorbed Dose Determination in External Beam Radiotherapy: An international Code of Practice for Dosimetry Based Standards of Absorbed Dose to Water, Technical Reports Series No. 398, IAEA, Vienna
- Khan, F. M., & Gibbons, J. P. (2014). *Khan's the physics of radiation therapy*. Lippincott Williams & Wilkins.
- EMX User's Manual (1998), EleXsys User's. "Bruker Instruments." Inc.: Billerica, MA .
- Mikou, M., Benzina, S., Bischoff, P., Denis, J. M., & Gueulette, J. (2009). EPR analysis of the effects of accelerated carbon ion and fast neutron irradiations on table sugar. *Applied Radiation and Isotopes*, 67(9), 1738-1741.
- Mikou, M., Ghosne, N., El Baydaoui, R., Zirari, Z., & Kuntz, F. (2015). Performance characteristics of the EPR dosimetry system with table sugar in radiotherapy applications. *Applied Radiation and Isotopes*, 99, 1-4.
- Nakagawa, K., & Sato, Y. (2004). ESR investigation of sucrose radicals produced by particle irradiation. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 60(6), 1315-1318.
- Nakajima, T. (1989). Possibility of retrospective dosimetry for persons accidentally exposed to ionizing radiation using electron spin resonance of sugar and mother-of-pearl. *The British journal of radiology*, 62(734), 148-153.
- Nakajima, T. (1995). ESR of sugar as a personnel monitor for radiation emergencies. *Applied radiation and isotopes*, 46(8), 819-825.
- Sportdocbox (2022) https://sportdocbox.com/Scuba_Diving/100392374-User-manual-rw3-slab-phantom-t29672-and-t.html Erişim tarihi: 19.01.2022
- Son, P. K., Ok, C. I., & Kim, J. W. (2001). EPR study of sugar irradiated with X-rays. *Journal-Korean Physical Society*, 38(4), 315-317.
- Stuglik, Z. (2007). Alanine-EPR dosimetry system. Why we like it?.

- Şahiner, E. (2015) *Paleosismolojik çalışmalarda TL/OSL ve ESR yöntemlerinin kullanılması: Kütahya-Simav ve Kuzey Anadolu fay hattı* (Doktora Tezi Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, YÖK tez numarası: 392635)
- Tchen, A., Greenstock, C. L., & Trivedi, A. (1993). The use of sugar pellets in ESR dosimetry. *Radiation protection dosimetry*, 46(2), 119-121.
- Tepe Çam, S. (2005). *Işınlama sonucunda Beta-Laktam grubu bazı antibiyotiklerde oluşan ara ürünlerin ESR yöntemi ile incelenmesi* (Yüksek Lisans Tezi Hacettepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü YÖK tez numarası:197192)
- TS EN 13708 (2004) Gıda Maddeleri –Kristal Şeker İçeren Gıdaların Işınlanıp Işınlanmadığının ESR Spektroskopisi İle Belirlenmesi Turk Standardari Enstitüsü, Ankara
- Vanhaelewyn, G., Sadlo, J., Callens, F., Mondelaers, W., De Frenne, D., & Matthys, P. (2000). A decomposition study of the EPR spectrum of irradiated sucrose. *Applied Radiation and Isotopes*, 52(5), 1221-1227.
- Yordanov, N. D., Gancheva, V., & Georgieva, E. (2002). EPR and UV spectroscopic study of table sugar as a high-dose dosimeter. *Radiation Physics and Chemistry*, 65(3), 269-276.
- Zavoisky, E. (1945). Spin-magnetic resonance in paramagnetics. *J Phys USSR*, 9, 211-245.
- Wikihow (2022). Z Değeri Nasıl Hesaplanır? <http://www.wikihow.com.tr/Z-De%C4%9Feri-Nas%C4%B1l-Hesaplan%C4%B1r#aiinfo> Erişim tarihi:19.01.2022.
- Statisticshowto (2022). Z-Score: Definition, Formula And Calculation. <https://www.statisticshowto.com/probability-and-statistics/z-score/> Erişim tarihi:19.01.2022.