

Investigation of Dosimetric Properties of Table Sugar Irradiated With Gamma Rays Using EPR Technique

Gül Bayramiye ÖZMEN¹ , Eren ŞAHİNER² 

¹Gazi University, Non-Ionizing Radiation Protection Application and Research Center (GİRKUM) 06500, Yenimahalle/ Ankara, Türkiye

²Ankara University, Earth Sciences Application and Research Centre (YEBİM) 06830 Gölbaşı/ Ankara, Türkiye

Article Info

Research article

Received: 01/12/2023

Revision: 30/01/2024

Accepted: 30/01/2024

Keywords

Food Irradiation
Dosimeter
Fading
EN 13708
EPR
Z Score

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi

Başvuru: 01/12/2023

Düzeltilme: 30/01/2024

Kabul: 30/01/2024

Anahtar Kelimeler

Gıda İşinlama
Dozimetre
Sönümleme
EN 13708
EPR
Z Score

Graphical/Tabular Abstract (Grafik Özet)

Gama ışınları ile ışınlanan sofru şekerinin artan doza karşı artan EPR sinyal şiddeti şeklinde verilmektedir. (The increasing EPR signal intensity of table sugar irradiated with gamma rays against increasing dose is given in the figure.)

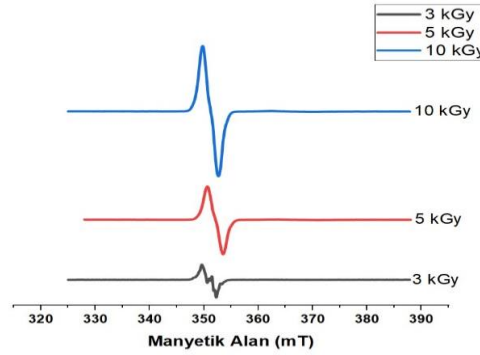


Figure A: EPR spectra of 3 kGy, 5 kGy and 10 kGy irradiated sugar samples /

Şekil A: 3 kGy, 5 kGy ve 10 kGy ışınlanmış şeker örneklerinin EPR spektrumları

Highlights (Önemli noktalar)

- Sofra şekerinin doz cevap davranışı EPR tekniği ile incelenmiştir. / The dose response behavior of table sugar was examined with the EPR technique.
- Sofra şekerinin 14 aya kadar EPR sinyallerinin sönüm davranışı Z skoru ile değerlendirilmiştir. / The fading behavior of EPR signals of table sugar up to 14 months was evaluated with Z score.
- TS EN 13708 standardı kapsamındaki kuru meyvelerin EPR spektrumları ile sofru şekerinin EPR spektrumu karşılaştırılmıştır. / The EPR spectra of dried fruits within the scope of TS EN 13708 standard were compared with the EPR spectrum of table sugar.

Aim (Amaç): The aim of this study is to investigate the usability of table sugar as a dosimeter using the EPR technique. / Bu çalışmanın amacı sofru şekerinin dozimetre olarak kullanılabilirliğinin EPR tekniği ile araştırılmasıdır.

Originality (Özgünlük): The fading behavior of EPR signals of table sugar was evaluated with the Z score. Additionally, dried fruits in the TS EN 13708 standard were compared with table sugar. It has been suggested that both table sugar and dried fruit sugars can be used as dosimeters. / Sofra şekerine ait EPR sinyallerinin sönüm davranışı Z skoru ile değerlendirilmiştir. Ayrıca TS EN 13708 standardındaki kuru meyvelerle sofru şekeri karşılaştırılmıştır. Hem sofru şekerinin hem de kuru meyve şekerlerinin dozimetre olarak kullanılabilceği önerilmiştir.

Results (Bulgular): It was observed that the EPR signals of table sugar had almost no fading for 14 months and the EPR spectrum of table sugar overlapped with the dried mango studied in TS EN 13708 standard. / 14 ay boyunca sofru şekerinin EPR sinyallerinin neredeyse hiç sönüme uğramadığı ve sofru şekerinin EPR spektrumunun TS EN 13708 standardında çalışılan kuru mango ile örtüştüğü gözlenmiştir.

Conclusion (Sonuç): It is suggested that table sugar can be used as a dosimeter in radiation accidents and irradiated food detection. / Sofra şekerinin radyasyon kazalarında ve ışınlanmış gıda tespitinde dozimetre olarak kullanılabilceği önerilmektedir.



Gama Işınları İle Işınlanmış Sofra Şekerinin Dozimetrik Özelliklerinin EPR Tekniği İle İncelenmesi

Gül Bayramiye ÖZMEN¹ , Eren ŞAHİNER²

¹Gazi University, Non-Ionizing Radiation Protection Application and Research Center (GİRKUM) 06500, Yenimahalle/ Ankara, Türkiye

²Ankara University, Earth Sciences Application and Research Centre (YEBİM) 06830 Gölbaşı/ Ankara, Türkiye

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 01/12/2023
Düzeltilme: 30/01/2024
Kabul: 30/01/2024

Anahtar Kelimeler

Gıda Işınlama
Dozimetre
Sönümlenme
EN 13708
EPR
Z Score

Öz

Gerçekleştirdiğimiz bu çalışmada gama ışınları ile 3 kGy, 5 kGy, 10 kGy olarak ışınlanan sofr şekerine ait EPR sinyallerinin artan dozla orantılı olarak arttığı gözlenmiştir. Sofra şekerinin EPR spektrumlarında tepe-tepe yükseklikleri dikkate alınarak (I_{pp}) sinyallerdeki sönümlenmeleri araştırılmıştır. Yüksek dozdaki gama ışınları (Co-60) ile ışınlanan şeker örneklerinde ışınlanmadan sonra başlangıç, 267 gün, 364 gün ve 402 gün sonra EPR ölçümleri gerçekleştirilerek radikallerin kararlılığı izlenmiştir. Sönümlenmenin belirlenmesi için istatistiksel bir test olan Z skoru ile uygunluk değerlendirmesi yapılmıştır. Şekere ait EPR sinyallerinde 14 ay boyunca neredeyse hiçbir kaybın olmadığı gözlenmiştir.

Ayrıca sofr şekerini; "TS EN 13708 Gıda maddeleri - Kristal şeker içeren gıda maddelerinin ışınlanıp ışınlanmadığının ESR spektroskopisi ile belirlenmesi" standardı içeriğinde kullanılan kuru incir, kuru mango, kuru papaya ve kuru üzüm meyvelerine ait EPR spektrumlarıyla karşılaştırılmıştır. 3 kGy ışınlanmış şekerin EPR spektrumu sadece 3 kGy ışınlanmış kuru mango ile benzerdir. Bu benzerlik sayesinde içerisindeki şekere bağlı olarak meyvelerin de dozimetre olarak kullanılabilceği önerilmiştir.

Investigation of Dosimetric Properties of Table Sugar Irradiated With Gamma Rays Using EPR Technique

Article Info

Research article
Received: 01/12/2023
Revision: 30/01/2024
Accepted: 30/01/2024

Keywords

Food Irradiation
Dosimeter
Fading
EN 13708
EPR
Z Score

Abstract

In this study, it was observed that the EPR signals of table sugar irradiated with gamma rays at 3 kGy, 5 kGy, 10 kGy increased in proportion to the increasing dose. The fading in the signals was investigated by taking into account the peak-to-peak heights (I_{pp}) in the EPR spectra of table sugar. The stability of radicals was monitored by performing EPR measurements at the beginning, 267 days, 364 days and 402 days after irradiation in sugar samples irradiated with high doses of gamma rays (Co-60). Suitability evaluation was made with Z score, which is a statistical test to determine fading. It was observed that there was almost no loss in the EPR signals of sugar for 14 months.

Also table sugar; TS EN 13708 Foodstuffs - It was compared with the EPR spectra of dried figs, dried mango, dried papaya and raisin fruits used in the standard for determining whether foodstuffs containing crystal sugars are irradiated by ESR spectroscopy. The EPR spectrum of 3 kGy irradiated sugar is similar to that of dried mango only 3 kGy irradiated. Thanks to this similarity, it has been suggested that fruits can also be used as dosimeters, depending on the sugar they contain.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Tıbbi görüntümeden radyoterapi uygulamalarına ve gıda sterilizasyonuna kadar birçok alanda kullanılan iyonlaştırıcı radyasyonun kullanım alanları her geçen gün artmaktadır. Dolayısıyla radyasyon maruziyetlerini takip altında tutmak son derece önemlidir. Bu amaçla maruz kalınan doz değerleri doku eşdeğeri dozimetrelerle Termolüminesans (TL) ve Elektron Paramanyetik Rezonans (EPR) gibi tekniklerle ölçülebilmektedir.

İyonlaştırıcı radyasyon; malzemedeki kimyasal bileşiklerle etkileştiğinde kristal kafes kusurları, serbest radikaller ve paramanyetik metal iyonları şeklinde eşleşmemiş elektron popülasyonu oluşturabilir [1, 2]. EPR spektroskopisi iyonlaştırıcı radyasyonun etkilerini araştırmak için yaygın olarak kullanılmaktadır.

Örneğin alanin ve benzeri EPR dozimetreleri gibi dozimetreler gıdaların ışınlanması sırasında ve sağlıkla ilgili sterilizasyon aşamalarında yüksek doz (1Gy-100 kGy'e kadar hassas oldukları için) maruziyetlerinin belirlenmesinde ve araştırılmasında kullanılmaktadır [3, 4]. Ancak bu tür yapay malzemeler yüksek maliyetli olup her an erişilebilir değildir. Kontrolümüz dışında gerçekleşen radyasyon kazalarında ise çevremizde bulunan her türlü malzemenin dozimetre olarak kullanılması araştırma konusu olmuştur. Radyasyon kazalarında oluşan maruziyetin biyodozimetrelerle de tespit edilmeye çalışıldığı pek çok çalışma mevcuttur [5]. Yapılan araştırmalar, gıdaların raf ömrünün uzaması için gerçekleştirilen ışınlamaların proteinler, karbonhidratlar ve yağlar gibi makrobesinlerin 10 kGy'e kadar kararlılıklarını etkilemediğini göstermiştir [6].

Gıda ışınlanması sırasında 10 kGy'e kadar yüksek dozlarda ışınlamalar yapılmakta olup farklı gıdaların ışınlanmalarıyla ilgili ülkelerin belirlediği standartlar bulunmaktadır ve gıdaların ışınlanıp ışınlanmadığının belirlenmesi ileri uzmanlık gerektiren konulardandır. Bu yüzden ne kadar doza maruz kalındığı bilgisinin kontrollü bir şekilde tespit edilmesi gerekmektedir. Şeker içeren gıdalar için "TS EN 13708 Gıda maddeleri - Kristal şeker içeren gıda maddelerinin ışınlanıp ışınlanmadığının ESR spektroskopisi ile belirlenmesi standardı"; selüloz içeren gıdalarda ise "TS EN 1787 Gıda Maddeleri - ESR spektroskopisi ile selüloz içeren ışınlanmış gıda maddelerinin tespiti standardı"; kemik içeren etli gıdalar için "TS EN 1786 Gıda maddeleri -Işınlanmış, kemik ihtiva eden gıdaların tespiti - ESR spektroskopi metodu standardı"; gıdanın içerisinde değil de üzerine bulaşmış tozlardan elde edilen silikat mineralinin elde

edilmesiyle de "TS EN 1788:2007 Gıda maddeleri - Silikat minerallerinin ayrılabilirliği gıdalarda ışınlanmanın belirlenmesi - termolüminesans yöntemi standardı" uygulanmaktadır [7]. Eğer sinyaller sönüme uğramamışsa ışınlanmış ve ışınlanmamış şeker örnekleri EPR ile tespit edilebilmektedir. Sinyaller sönüme uğramışsa termolüminesans tekniği ile bu tespit gerçekleştirilmektedir. Böylelikle, ticari olarak yanıltıcı beyanda bulunan sahte iş ve işlemlerin önlenmesi mümkün olmaktadır.

Literatürde özellikle kaza dozimetrisi araştırmalarında günlük ulaşılabilir malzemelerin dozimetre olarak kullanılabilirliği üzerine çalışmalar yapılmaktadır. Örneğin; diş, tırnak, kemik gibi biyodozimetreler [5, 8] ve şeker, yumurta kabukları [9] gibi çevremizdeki malzemelerin EPR tekniği ile dozimetrik özellikleri olduğu gösterilmiştir. Farklı örnekler de verilebilecek bu malzemeler içerisinde hemen her yerde yaygın bulunan sofr şekerinin ışınlamadan sonra EPR ölçümlerinde sinyallerinin arttığı görülmüştür [10].

Bulunması kolay, efektif atom numarası 6,92 [11] ile doku eşdeğerine oldukça yakın olan sakkaroz ya da (glikoz + fruktoz = sakkaroz +H₂O) sükroz olarak da bilinen sofr şeker, şeker pancarı ve şeker kamışından elde edilir [12, 13]. Bu çalışma kapsamında kullanılan şekerin dozimetrik özelliklerden fading (sönümlenme) özelliği istatistiksel olarak Z skoru kullanılarak değerlendirilmiştir.

Sönümlenme (fading) doz bilgisinin uzun süre boyunca kaybolmaması adına kritik bir dozimetrik özellik olup dikkatlice araştırılmalıdır. Benzer çalışmalarda sofr şekerinin EPR sinyallerinde birkaç yıla kadar sönüm olmadığı belirtilmektedir [14, 15].

İstatistiksel analizde Z skorunun kullanılması verilerin analiz edilmesinde önemli bir rol oynar. Verilerin standartlaştırılmasını ve bir ölçümün bir dağılımın ortalamasıyla nasıl karşılaştırıldığı belirlenmesine yardımcı olur. Z skoru hesaplanarak, bir veri kümesi içindeki bir veri noktasının göreceli konumunu değerlendirilerek ortalamadan sapması anlaşılabilir. [16]. Bu nedenlerle şekerin EPR sinyallerindeki sönümün araştırılmasında Z skoru kullanılmıştır.

Yapılan bu çalışmada sofr şekerinin EPR sinyalleri incelenerek;

- Farklı dozlarda EPR sinyalleri ve doz cevap davranışı kararlılığı ve şiddeti

- EPR sinyallerindeki sönüm davranışının 14 aya kadar incelenmesi ve Z skoru ile istatistiksel araştırılması
- TS EN 13708 standardı kapsamında kuru incir, kuru mango, kuru papaya ve kuru üzüm meyvelerine ait EPR spektrumlarıyla karşılaştırmalı değerlendirme

çalışmaları yapılmıştır.

2. MATERYAL VE METOD (MATERIALS AND METHODS)

Çalışmada kullanılan sofr şekerinin radyasyon ile etkisini araştırmak için Türkiye Enerji, Nükleer ve Maden Araştırma Kurumu, Nükleer Enerji Araştırma Enstitüsü, Gama Işınlama Tesisi'nde 3, 5 ve 10 kGy dozlarda radyasyona tabi tutulmuştur. Işınlanmış şekerin içinde oluşan radikallerin ölçümleri Ankara Üniversitesi Nükleer Bilimler Enstitüsü EPR Laboratuvarı'nda gerçekleştirilmiştir. EPR ölçümleri X-band mikrodalga frekans aralığı 9,2-9,9 GHz olan Bruker EMX plus 10/12 EPR cihazında yapılmıştır.

Elde edilen sinyal şiddetlerinin I_{pp} değerlerinin istatistiki olarak anlamlı olması için Z skoru hesaplama yöntemi kullanılmıştır.

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.);

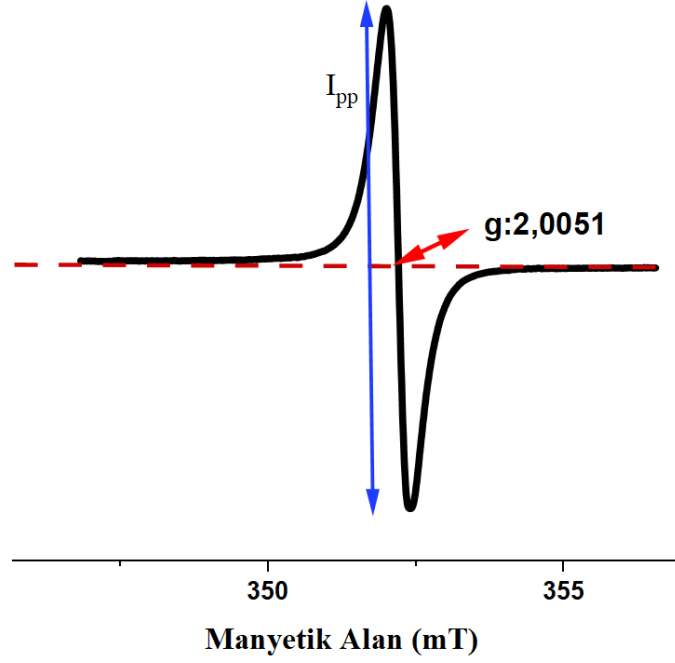
- $|Z| \geq 3,0$ analiz sonucu kabul edilemez (Nedenleri araştırılmalıdır.)

3. BULGULAR (RESULTS)

Gerçekleştirilen deneylerin sonuçlarının doğru olabilmesi için kalibrasyon ve ara doğrulama işlemleri ile cihazın doğru çalışıp çalışmadığı kontrol edilmelidir. EPR Spektrometresinin kalibrasyon işlemi için Strong Pitch ER-213-SPS Potasyum Klorür (KCl) referans örneği kullanılmıştır. Örneğe ait EPR spektrumu Şekil 1'de verilmiştir. Kullanılan referans malzemenin g değeri 2,0028'dir. Denklem 1 kullanılarak spektroskopik yarılma çarpanı (g) deneysel olarak hesaplanmıştır.

$$g = \frac{h\nu}{\mu_B B} \quad (1)$$

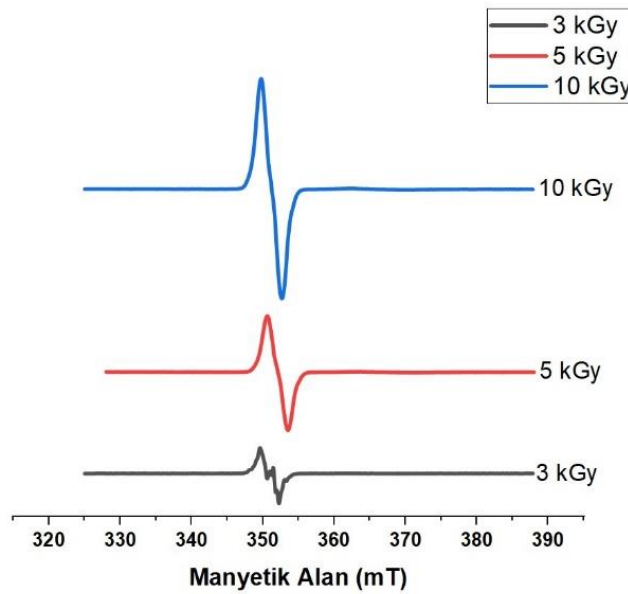
Potasyum Klorür numunesine ait bulmuş olduğumuz $g=2,0051$ değeri beklediğimiz $g=2,0028$ (referans) değeri (EMX User's Manual 1998) ile arasında % 0,115'lik bir hata olduğu görülmüştür. Bu hata oranının numune içerisindeki safsızlıklardan kaynaklandığı düşünülmektedir. Farklı referanslarla (DPPH gibi) kalibrasyon çalışmaları tekrarlanabilir. Bu çalışma için doz hesabı yapılmayacak olup sadece numunelerin sinyal şiddetlerinin zamanla değişimi inceleneceği için bu farklılığın sonuçları etkilemeyeceği düşünülmüş, hata oranı kabul sınırları içinde değerlendirilmiş ve ölçümlere devam edilmiştir.



Şekil 1. Potasyum Klorür referans malzemesinin EPR spektrumu (EPR spectrum of Potassium Chloride reference material)

Dozimetrik özelliklerden olan doz cevabı Şekil 2’de artan doza karşı artan EPR sinyal şiddeti olarak görülmektedir. Tüm spektrumların sinyal şiddetleri hesaplanması sırasında minimum ve maksimum noktaların mutlak toplamı (I_{pp} değerleri) dikkate alınmıştır. Sofra şekeri (sükroz) birden fazla radikal

türü içerdiğinden karmaşık yapıdadır [17]. 3 kGy doz değeri için elde edilen spektrumda 5 kGy ve 10 kGy için elde edilen spektrumlardakinden farklı oluşan sinyalin nedeni; artan doz değerleri sonucunda oluşan bazı sinyallerin doyuma (saturasyona) gitmesi söz konusuken bazı sinyallerin artış göstermesidir.



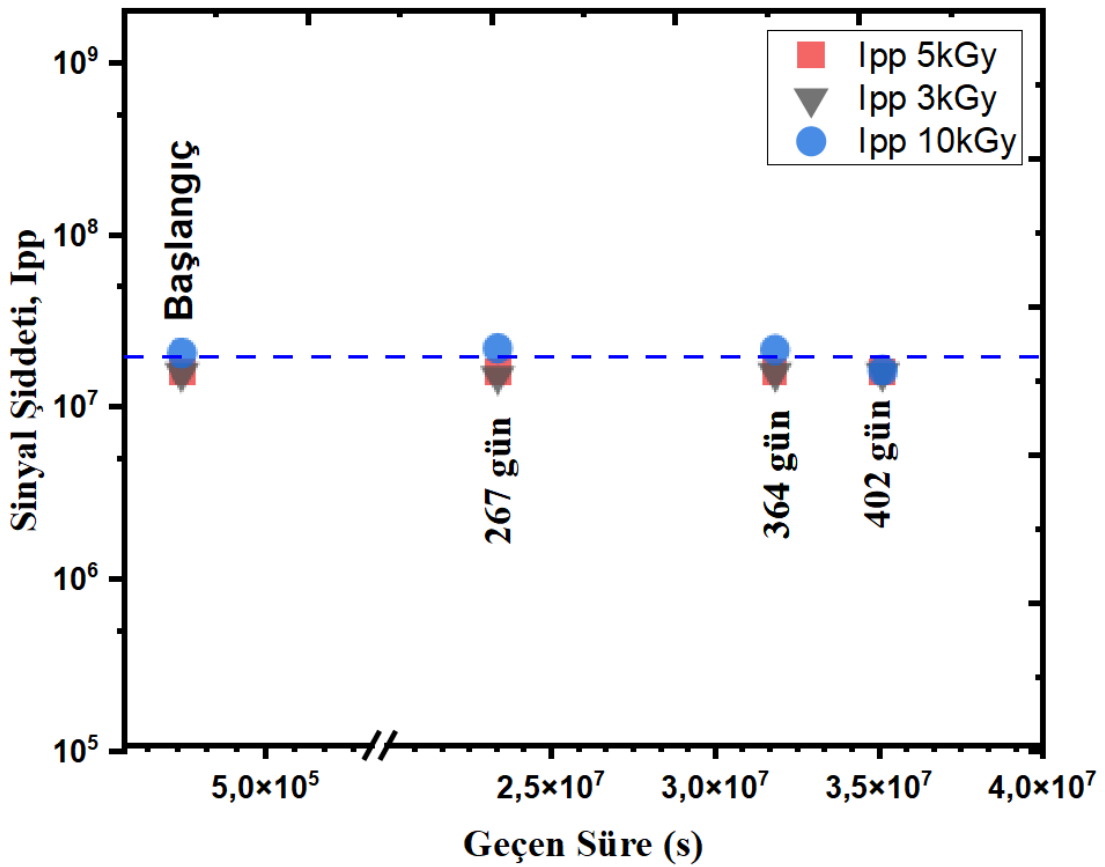
Şekil 2. 3 kGy, 5 kGy ve 10 kGy ışınlanmış şeker örneklerinin EPR spektrumları (EPR spectra of 3 kGy, 5 kGy and 10 kGy irradiated sugar samples)

Işınlanmış örneklerin içerisinde oluşan radikallerin yapılarında, sayılarında veya türlerinde gerçekleşebilecek olası değişimleri takip edebilmek amacıyla 3 kGy, 5 kGy, 10 kGy ışınlanmış 100 mg kütleli şeker örneklerinin yaklaşık 14 ay boyunca farklı aralıklarda EPR spektrumları incelemiş ve ölçüm sonuçları Çizelge 2’de verilmiştir. Işınlandığı tarih referans alınarak (25.06.2020) ölçüm gününe kadar geçen süre (29.06.2020, 23.03.2021, 28.06.2021, 05.08.2021) saniyeye çevrilerek Şekil 3’te gösterilmiştir.

bir azalma meydana geleceğinden ölçüm için en az 72 saat beklenmesinin daha kararlı bir sinyal gözlenmesini sağlayacağı önerilmiştir [18]. Bu nedenle ölçümler ışınlamadan en az 72 saat sonra gerçekleştirilmiştir. Nakajima tarafından yapılan çalışma ile de atmosferik sıcaklık değişse bile, doğal ortamda birkaç yıl içinde radikallerin sayısının pek değişmediği belirtilmiştir [14]. Kararlı sinyallerin birbirleriyle anlamlı olduğunu göstermek amacıyla, ölçülen değerler istatistiki bir test olan Z-skoru ile değerlendirilmiştir.

Yordanov tarafından gerçekleştirilen çalışmada ışınlamadan sonraki ilk 72 saatte sinyallerde hızlı

Bu çalışmada Z-skorları hem ortalama hem de standart sapma değerlerine göre hesaplanmaktadır.



Şekil 3. Işınlanmış şekerin I_{pp} sönüm grafiği (I_{pp} extinction graph of irradiated sugar)

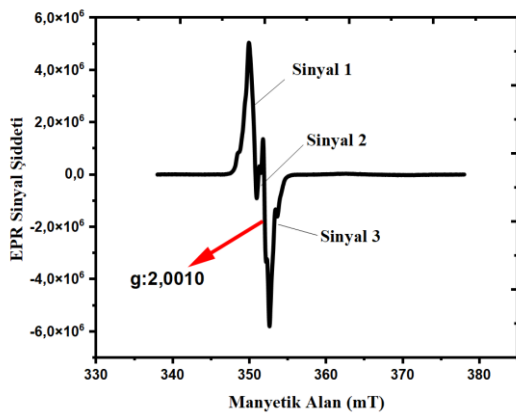
Çizelge 2. Işınlanmış şekerin I_{pp} sönüm değerlerine ait Z skorlar (Z scores of I_{pp} extinction values of irradiated sugar)

Geçen Süre	Z Skoru (3 kGy)	Z Skoru (5 kGy)	Z Skoru (10 kGy)	Z Skor Sonucu
Başlangıç	-1,49176	1,44271	0,71838	UYGUN
267 gün sonra	0,63134	-0,20962	-1,46309	UYGUN
364 gün sonra	0,48448	-0,85570	0,55400	UYGUN
402 gün sonra	0,37593	-0,37738	0,19071	UYGUN

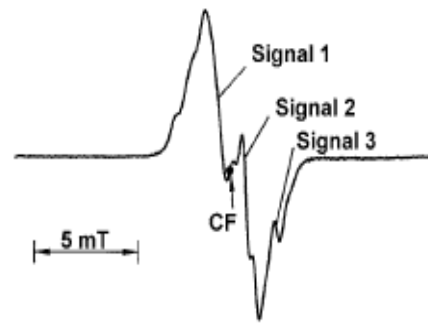
Çizelge 3. TS EN 13708 (2001) standartında önerilen ile bu çalışmada kullanılan spektrometre değerlerinin karşılaştırılması (Comparison of the spectrometer values used in this study with those recommended in the TS EN 13708 (2001) standard)

TS EN 13708'de (2004) önerilen değerler	Parametre	Çalışmada kullanılan değerler
5 mW	Mikrodalga Gücü (P)	2 mW
50 kHz veya 100 kHz	Frekans modülasyonu	100 kHz
0,15 mT - 0,4 mT,	Genlik modülasyonu	0,4mT
Ortam sıcaklığı	Sıcaklık	Ortam Sıcaklığı

a)



b)



Şekil 4. (a) 3 kGy Işınlanmış şeker örneğine ait EPR Spektrumu (EPR Spectrum of 3 kGy irradiated sugar sample)

(b) 3 kGy Işınlanmış kuru mangoya ait tipik EPR spektrumu (Typical EPR spectrum of 3 kGy irradiated dried mango) [19]

Şekil 4 kapsamında 2 grafik karşılaştırılmaktadır. a)'da gösterilen sinyal kapsamında 3 kGy ışınlanmış şekerin spektrumu ve $g=2,0010$ değeri bu çalışma kapsamında elde edilmiştir. b)'de gösterilen grafik ise TS EN 13708 Standardında kuru mangoya ait olarak verilen grafikdir. Standartta kuru mango için g değeri= 2,0035 olarak verilmiştir. Yani iki grafik birbirine benzemektedir fakat g değerleri farklı bulunmaktadır. Örnek farklılıklarından kaynaklı olarak içerdikleri farklı radikal türleri nedeniyle bu farklılık normaldir. Çizelge 3'te TS EN 13708 (2001) standartında verilen ve çalışma kapsamında kullanılan parametreler verilmiştir. Yine de kabaca değerlendirirsek a)'da verilen sofrta şekerine ait sinyal sayısı ve şekli Şekil 4 b)'de verilen kuru mango ile örtüşmektedir. Sofra şekeri yani sükröz; fruktoz ve glikozun birleşimidir. İçerikleri nedeniyle bu benzerlik normaldir. TS EN 13708 standardı amacı gereği sadece şeker içerikli ışınlanmış gıdaların tespitine yöneliktir ve kurutulmuş meyvelere uygulanan radyasyon sonuçları değerlendirilmektedir. Standartın içerisinde kuru incir, kuru mango, kuru papaya ve kuru üzüm çalışmaları yapılmıştır. Bu çalışmada ise şekerin dozimetrik özelliği incelenmiştir. Sonuç olarak meyvelerin içerisindeki şekerin de ayrıştırılarak bir kaza dozimetresi gibi kullanılması muhtemeldir.

Şekil 2'de şekerin doza karşı sinyal artışı gösterilmiştir. Şekil 3'te sırasıyla 3 kGy, 5 kGy, 10 kGy ışınlanmış şekerin yaklaşık 14 ay boyunca uğradığı sönümler gözlenmiştir. Çizelge 2'de elde edilen I_{pp} verileri Z-skorumları ile incelenmiş ve $Z < 2$ olduğu için istatistiksel olarak anlamlı bulunmuştur. Sinyallerde gerçek anlamda bir kayıp gözlenmemesi şekerin dozimetrik olarak kullanılabilceğini göstermektedir.

TS EN 13708 (2001) standardına göre Şekil 4 b)'de kuru mangoya ait EPR spektrumu ile Şekil 4 a)'daki şekerine ait EPR spektrumları 3 kGy gama radyasyonu ile ışınlanmış spektrumlarıdır. Mango içeriğindeki kristal şekerin ışınlanıp ışınlanmadığı üzerine gerçekleştirilen deneysel çalışmalar ile çalışma kapsamında şekerin dozimetrik özellikleri için gerçekleştirilen çalışmalar benzer EPR spektrumlarını işaret etmektedir. Bu benzerlik Şekil 4'te açıkça görülmektedir.

4. SONUÇ (CONCLUSIONS)

Bir malzemenin dozimetre olarak kullanılabilmesi için ışınlama sonrası oluşan belirgin sinyal artışı, doz-cevap ilişkisinin doğrusallığı, minimum saptama sınırı ve ışınlama sonrası sinyal kararlılığı gibi birçok parametre araştırılmalıdır.

Bu çalışma kapsamında sofrta şekerinin dozimetrik özelliklerinden doz-cevap ve ışınlama sonrası sinyallerinin kararlılığı incelenmiştir. EPR sinyallerinde doz sonrası artış gözlenmesi ve çalışma süresince sinyallerinde nerdeyse hiç sönüm gözlenmemesi gibi özellikler şekeri iyi bir dozimetre adayı yapmaktadır.

Şekerin dozimetrik çalışmaları çoğunlukla radyoterapi amaçlı düşük dozlarla ilgili dozimetrik çalışmalardır. 1-20 Gy aralığında şekerin lineer doz cevabı olduğu belirtilmiştir [20, 21]. 10 kGy'den daha yüksek dozlar için gerçekleştirilen çalışmalarda 20-80 kGy doz aralığında kendi kendine kalibre edilen sükröz örneği hazırlanarak lineer doz cevabı gözlenmiştir [22]. Daha detaylı doz cevap çalışmaları ile hem ara değerler için hem de L- ve Q-bantları gibi diğer mikrodalga frekanslarıyla da şekerin dozimetrik çalışmaları geliştirilebilir. Ayrıca ileri çalışma olarak şekerin içinde oluşan radikallerin kinetik çalışması, sıcaklık çalışması farklı dozimetrik özelliklerinin de araştırılması önerilmektedir.

EPR yöntemi tarihlendirme çalışmalarında da kullanılmaktadır. Yapılan bu çalışma kapsamında elde edilen sonuçlara göre; özellikle arkeolojik veya jeolojik araştırmalar sırasında olası şeker buluntularının aldıkları kümülatif radyasyon dozunu değerlendirerek yaşlarının belirlenmesi için EPR sinyallerinin sönüm süresi kısa olabilmektedir. Farklı karakterizasyon teknikleri (SEM, TEM, AFM, XRD) ile kullanılan şekerin kristal ve bağ yapısı incelenerek değerlendirilmeli ve tarihlendirme çalışmalarında kullanılıp kullanılmayacağı araştırılması önerilmektedir.

Sonuç olarak;

- Şekerin doku eşdeğerine yakın olması ve her yerde ulaşılabilir olması nedeniyle gerçekleşebilecek bir radyasyon kazasında maruziyetin belirlenebilmesi için kaza dozimetresi olarak kullanılabilceği,
- Yüksek gama dozlarında (3 kGy, 5 kGy, 10 kGy) sinyallerinin kararlı olması nedeniyle alanin dozimetreler gibi gıda

ışınlanması tespitinde 10 kGy'e kadar olan ışınlamalar için dozimetre olarak kullanılabilirliği;

- TS EN 13708 standardı kapsamında meyvelerin içerisinde bulunan şekerin ışınlanmanın tespiti için kullanıldığı görülmüştür. Şekerle benzer EPR sinyallerinin ortaya çıkması ile meyvelerin de içeriğinde bulunan şeker nedeniyle birer kaza dozimetresi olarak EPR dozimetre adayı olduğu ve ileri uygulamalarda kullanılabilir olduğu düşünülmektedir. Bu nedenle şekerli gıdaların ışınlanarak EPR spektrumlarının incelenmesi ve dozimetrik özelliklerinin araştırılması; önerilmektedir.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENTS)

Gama ışınları ile ışınlanmış şeker örneklerini temin eden sayın Doç. Dr. Ülkü Rabia YÜCE SEMİZ'e (TENMAK) çok teşekkür ederiz. Yapıcı eleştirilerinden dolayı GİRKUM Merkez Müdürü Prof. Dr. Haluk KORALAY'a teşekkürlerimizi sunarız.

ETİK STANDARTLARIN BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

The author of this article declares that the materials and methods they use in their work do not require ethical committee approval and/or legal-specific permission.

Bu makalenin yazarı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

YAZARLARIN KATKILARI (AUTHORS' CONTRIBUTIONS)

Bu makale Yüksek Lisans tez çalışmasından üretilmiştir. Yazarların katkısı ortaktır.

This article was produced from the Master's thesis. The authors' contribution is shared.

ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

There is no conflict of interest in this study.

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Ikeya, M., New applications of electron spin resonance: dating, dosimetry and microscopy. 1993: World Scientific.
- [2] Bougai, A., et al., Use of electron paramagnetic resonance dosimetry with tooth enamel for retrospective dose assessment. 2002.

- [3] Kuntz, F. and A. Strasser, The specifics of dosimetry for food irradiation applications. Radiation Physics and Chemistry, 2016. 129: p. 46-49.
- [4] Mosse, D., ESR/alanine dosimetry applied to radiation processing. International Journal of Radiation Applications and Instrumentation. Part C. Radiation Physics and Chemistry, 1988. 31(4-6): p. 413-417.
- [5] Fattibene, P. and F. Callens, EPR dosimetry with tooth enamel: A review. Applied Radiation and Isotopes, 2010. 68(11): p. 2033-2116.
- [6] Dionisio, A.P., R.T. Gomes, and M. Oetterer, Ionizing radiation effects on food vitamins: A review. Brazilian Archives of Biology and Technology, 2009. 52: p. 1267-1278.
- [7] Dr. Birol Engin, D.C.A., Dr. Ülkü Rabia Yüce, Talat Aydın, Semra Tepe Çam, Hayrunnisa Demirtaş, Dr. C. Tuğrul Zeyrek Elektron Spin Rezonans (ESR) ve Termoluminesans (TL) Teknikleri İle Gıdaların Gama Işınları İle Işınlanıp Işınlanmadıklarının Tespit Edilmesi. 2011.
- [8] Swartz, H.M. and A.B. Flood, EPR biodosimetry: challenges and opportunities. Radiation Protection Dosimetry, 2023. 199(14): p. 1441-1449.
- [9] Wieser, A., et al., Limits of retrospective accident dosimetry by EPR and TL with natural materials. Radiation measurements, 1994. 23(2-3): p. 509-514.
- [10] Mikou, M., et al., Analysis by EPR of the dosimetric properties of table sugar irradiated by X-rays, gamma rays and neutrons. Physica Medica, 2013. 29: p. e22.
- [11] El-Ahdal, M., Effect of gamma radiation dose on sugar. 2007.
- [12] Da Costa, Z., W. Pontuschka, and L. Campos, A comparative study based on dosimetric properties of different sugars. Applied radiation and isotopes, 2005. 62(2): p. 331-336.
- [13] Özmen, G.B., Dozimetri çalışmalarında EPR tekniğinin kullanılması ve sofr şekerinin dozimetrik özelliklerinin incelenmesi in Nükleer Bilimler Enstitüsü / Medikal Fizik Ana Bilim Dalı / Sağlık Fiziği Bilim Dalı. 2022, Ankara Üniversitesi p. 65.
- [14] Nakajima, T., 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, 1989. 62(734): p. 148-153.
- [15] Fattibene, P., T.L. Duckworth, and M.F. Desrosiers, Critical evaluation of the sugar-

- EPR dosimetry system. *Applied Radiation and Isotopes*, 1996. 47(11): p. 1375-1379.
- [16] Choi, T.M., S.W. Wallace, and Y. Wang, Big data analytics in operations management. *Production and Operations Management*, 2018. 27(10): p. 1868-1883.
- [17] Georgieva, E.R., et al., High-field/ high-frequency EPR study on stable free radicals formed in sucrose by gamma-irradiation. *Free Radical Research*, 2006. 40(6): p. 553-563.
- [18] Yordanov, N., V. Gancheva, and E. Georgieva, EPR and UV spectroscopic study of table sugar as a high-dose dosimeter. *Radiation Physics and Chemistry*, 2002. 65(3): p. 269-276.
- [19] 13708, E., Foodstuffs—detection of irradiated food containing crystalline sugar by ESR spectroscopy. 2001, European Committee of Standardization (CEN) Brussels.
- [20] Mikou, M., et al., Performance characteristics of the EPR dosimetry system with table sugar in radiotherapy applications. *Applied Radiation and Isotopes*, 2015. 99: p. 1-4.
- [21] El Baydaoui, R., et al., Analysis of dosimetric properties in the field of radiotherapy of glucose irradiated by megavoltage X photons, electrons and analyzed by EPR spectroscopy. *Perspectives in Science*, 2019. 12: p. 100396.
- [22] Karakirova, Y. and N. Yordanov, About nonlinear response of SS/EPR dosimetry in high dose region (20–80 kGy). *Radiation Physics and Chemistry*, 2019. 159: p. 12-16.