

**MAĞARA ÖRNEKLERİNİN ESR (ELEKTRON SPİN  
REZONANS) YÖNTEMİ İLE İNCELENMESİ VE TARİHLENMESİ**

**INVESTIGATION AND DATING OF CAVE DEPOSITS BY ESR  
(ELECTRON SPIN RESONANCE) METHOD**

**ENİS SERT**

**PROF. DR. ÜLKÜ ULUSOY**

**Tez Danışmanı**

Hacettepe Üniversitesi  
Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin  
Fizik Mühendisliği Anabilim Dalı için Öngördüğü  
YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak hazırlanmıştır.

2014

**ENİS SERT'** in hazırladığı "**Mağara Örneklerinin ESR (Elektron Spin Rezonans) Yöntemi ile İncelenmesi ve Tarihlenmesi**" adlı bu çalışma aşağıdaki jüri tarafından **FİZİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI'** nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Ülkü ULUSOY  
Başkan



.....

Prof. Dr. Maral SÜNNETÇİOĞLU  
Üye



.....

Prof. Dr. Celal Serdar BAYARI  
Üye



.....

Bu tez Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak onaylanmıştır.

Prof. Dr. Fatma SEVİN DÜZ  
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

## ETİK

Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada,

- tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun atıfta bulunduğumu,
- atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversitede veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

25 / 07 / 2014



EMİS SERT

## ÖZET

# MAĞARA ÖRNEKLERİNİN ESR (ELEKTRON SPİN REZONANS) YÖNTEMİ İLE İNCELENMESİ VE TARİHLENMESİ

**Enis SERT**

**Yüksek Lisans, Fizik Mühendisliği Bölümü**

**Tez Danışmanı: Prof. Dr. Ülkü ULUSOY**

**Temmuz 2014, 71 sayfa**

Bu tez çalışmasında Çatalhöyük Arkeolojik Bölgesi çevresinde bulunan mağaralardan alınan mağara çökellerinin ESR yöntemi kullanılarak yaş tayininin yapılması amaçlanmıştır. Bunun için İncesu, İncikini, Damlataş, Hatçeninini ve Obruk-Sızma mağaralarından alınan 8 örnek ve bu örnekler içerisinde belirlenen 33 farklı tabaka çalışılmıştır.

ESR deneylerinde kullanılan örnekler asitle yıkama işlemlerinden geçirildikten sonra, IC3 örneği için 10 kGy'e, diğerleri için ise 3 kGy'e kadar çeşitli basamaklarla ışınlanmışlardır. Kaydedilen ESR spektrumlarında gözlenen sinyallerden yalnızca C ( $g = 2,0007$ ) merkezine ait olan sinyalin değişimi tarihleme amacıyla çalışılmıştır. Bu sinyal için çizilen büyüme eğrilerinden eşdeğer doz ( $A_{\Sigma}$ ) değerleri hesaplanmıştır. Örneğin soğurduğu toplam doz hızı ( $D_{top}$ ) ya da yıllık dozun ( $D$ ) belirlenmesi amacıyla, iç doz hızı ve dış doz hızı ayrı ayrı belirlenmiştir. İncelenen örneklerdeki radyoaktif elementlerin ( $^{238}\text{U}$  ve  $^{232}\text{Th}$ ) yoğunlukları İndüktif Eşleşmiş Plazma-Kütle Spektrometrisi (ICP-MS) yöntemi ile belirlenmiş ve bu

değerler iç ve dış doz hızı hesaplamalarında kullanılmıştır. Dış doz hızının belirlenmesi için a) taşınabilir gama spektrometresi kullanılarak doğrudan mağara içinde ölçüm, b) mağara ana kayacına ilişkin radyoaktif çekirdek yoğunluğu ve kozmik dozdan kaynaklanan ışıma hızlarının toplamının hesaplanması olmak üzere iki farklı yöntem kullanılmıştır.

Belirlenen  $A_{\Sigma}$  değerleri D değerlerine bölünerek her bir örnek için yaş değerleri hesaplanmıştır. Yaş değerleri ölçüm yoluyla  $2,4 \pm 0,7 - 416,2 \pm 177,0$  ky aralığında değişirken, hesaplama yoluyla  $10,0 \pm 0,5 - 1003,7 \pm 213,2$  ky aralığında değişmiştir. Ölçüm yoluyla elde edilen değerler, İncesu mağarası için  $2,4 \pm 0,7 - 100,0 \pm 34,4$  ky, İncikini mağarası için  $31,1 \pm 10,8 - 416,2 \pm 177,0$  ky, Hatçeninini mağarası için  $9,0 \pm 2,1 - 25,8 \pm 6,4$  ky, Obruk-Sızma mağarası için  $18,2 \pm 5,4 - 162,1 \pm 54,8$  ky aralığında iken, Damlataş (Yollarbaşı) mağarası için  $102,3 \pm 35,9$  ky olarak bulunmuştur. Hesaplama yoluyla elde edilen değerler ise İncesu mağarası için  $10,0 \pm 0,5 - 374,6 \pm 92,3$  ky, İncikini mağarası için  $70,9 \pm 10,3 - 1003,7 \pm 213,2$  ky, Hatçeninini mağarası için  $18,4 \pm 3,0 - 52,2 \pm 3,3$  ky, Obruk-Sızma mağarası için  $40,1 \pm 3,2 - 287,3 \pm 40,0$  ky aralığında iken Damlataş (Yollarbaşı) mağarası için  $276,9 \pm 27,8$  ky olarak bulunmuştur.

**ANAHTAR KELİMELER:** ESR, tarihleme, dozimetri,  $\gamma$ -spektrometri, mağara çökelleri, kalsit, dikit

## **ABSTRACT**

# **INVESTIGATION AND DATING OF CAVE DEPOSITS BY ESR (ELECTRON SPIN RESONANCE) METHOD**

**Enis SERT**

**Master of Science, Department of Physics Engineering**

**Supervisor: Prof. Dr. Ülkü ULUSOY**

**July 2014, 71 pages**

In this thesis work, it is aimed to date the speleothems collected from the caves around Çatalhöyük Archeological Site by using ESR. For this aim, 8 main samples collected from İncesu, İncikini, Damлатаş, Hatçeninini and Obruk-Sızma caves and 33 identical layers determined within these samples were studied.

The samples to be used in ESR experiments were irradiated up to 10 kGy for IC3 group and up to 3 kGy for the others after being etched by weak acid solution. Among the observed signals in the measured ESR spectra, only the change of the signal C ( $g = 2,0007$ ) was studied in order for dating the samples. The equivalent dose ( $A_{\Sigma}$ ) values were calculated using the growth lines of this signal. In order to determine the total dose ( $D_{tot}$ ) or annual dose (D) absorbed by the sample, both the internal dose rate and the external dose rate were determined. The concentrations of the radioactive elements ( $^{238}\text{U}$  and  $^{232}\text{Th}$ ) within the samples were determined by Inductively Coupled Plasma – Mass Spectrometry method (ICP-MS) and results were used for calculating the internal and external dose rates.

To determine the external dose rate, two different methods were used: a) *in situ measurement in the cave using a portable gamma spectrometer*, b) *calculation and addition of the irradiation rates generated by the radioactive elements existing in the surrounding sediment of the cave and the by the cosmic dose*.

The  $A_{\Sigma}$  values were divided to the D values for each sample to calculate the ESR ages. The age results are between  $2.4 \pm 0.1 - 416.2 \pm 88.4$  ka for measurement method and between  $10.0 \pm 0.5 - 1003.7 \pm 213.2$  ka for calculation method. The age values obtained by in situ measurement are between  $2.4 \pm 0.1 - 100.0 \pm 24.6$  ka for İncesu, between  $31.1 \pm 4.5 - 416.2 \pm 88.4$  ka for İncikini, between  $9.0 \pm 1.3 - 25.8 \pm 1.6$  ka for Hatçeninini, and between  $18.2 \pm 1.5 - 162.1 \pm 22.6$  ka for Obruk-Sızma caves, while it is  $102.3 \pm 10.3$  ka for Damlataş (Yollarbaşı). On the other hand, the age values obtained by calculation are between  $10.0 \pm 0.5 - 374.6 \pm 92.3$  ka for İncesu, between  $70.9 \pm 10.3 - 1003.7 \pm 213.2$  ka for İncikini, between  $18.4 \pm 3.0 - 52.2 \pm 3.3$  ka for Hatçeninini, and between  $40.1 \pm 3.2 - 287.3 \pm 40.0$  ka for Obruk-Sızma caves while it is  $276.9 \pm 27.8$  ka for Damlataş (Yollarbaşı).

**KEYWORDS:** ESR, dating, dosimetry,  $\gamma$ -spectrometry, cave deposits, calcite, stalagmite

## TEŞEKKÜR

Tez çalışmam süresince üstün bilgi ve deneyimlerini benimle paylaşan tez danışmanım sayın Prof. Dr. Ülkü ULUSOY'a,

Çalışmamın bazı aşamalarında benden yardımını esirgemeyen Hacettepe Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü Öğretim Üyesi Prof. Dr. Serdar BAYARI'ya ve çeşitli aşamalarda laboratuvarlarını kullandığım Hacettepe Üniversitesi Yerbilimleri Uygulama ve Araştırma Merkezi (YUVAM) yetkililerine,

Işınlama konusunda yardımcı olan Tekirdağ, Çerkezköy'de bulunan Gamma-Pak firması ve Arabistan'ın Riyad şehrinde bulunan Atom Enerjisi Araştırma Enstitüsü (Atomic Energy Research Institute, King Abdulaziz City for Science and Technology) yetkililerine,

Portatif gama spektrometresinin kullanımı konusundaki katkıları için Ankara Üniversitesi Nükleer Bilimler Enstitüsü Öğretim Üyesi Prof. Dr. Haluk YÜCEL ve çalışanlarına,

Mağara ölçümleri için bölgeyi ziyaret etmemiz konusunda proje desteği için Hacettepe Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi'ne ve mağara ziyaretlerini birlikte gerçekleştirirken yaptığı katkılardan dolayı Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi Arkeoloji Bölümü Öğretim Üyesi Doç. Dr. Onur ÖZBEK'e,

Çalışmalarım boyunca her aşamada manevi desteğini hissettiğim sevgili annem ve sevgili babama, sabırla bana güç veren sevgili eşim Emel, kızlarım Dilşad ve Zehra'ya...

teşekkürlerimi sunarım.



# İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET .....	i
ABSTRACT .....	iii
TEŞEKKÜR .....	v
İÇİNDEKİLER.....	vi
ÇİZELGELER.....	viii
ŞEKİLLER .....	ix
SİMGELER VE KISALTMALAR .....	xii
1. GİRİŞ.....	1
2. TEMEL KAVRAMLAR .....	3
2.1. Elektron Spin Rezonans (ESR) Spektroskopisi.....	3
2.2. Spektrumlardan Elde Edilebilecek Parametreler.....	6
2.3. Işınım Etkisine Dayalı Yaş Tayini (Tarihleme) Yöntemleri .....	9
2.3.1. TL Yöntemi ile Yaş Tayini.....	9
2.3.2. ESR Yöntemi ile Yaş Tayini .....	10
2.3.3. Doz Ekleme Yöntemi .....	11
2.4. Mağaraların Oluşumu .....	12
3. DENEYSEL KISIM .....	17
3.1. İncelenen Örnekler .....	17
3.1.1. İncesu Mağarası.....	17
3.1.2. İncikini Mağarası.....	18
3.1.3. Damlataş Mağarası .....	19
3.1.4. Hatçeninini Mağarası.....	21
3.1.5. Obruk-Sızma Mağarası.....	21
3.1.6. Çatalhöyük.....	21
3.2. Kalsit Kristalinin Özellikleri ve Örneklerin Hazırlanması .....	22
3.2.1. Kalsit Kristalinin Özellikleri .....	22
3.2.2. Örneklerin ESR Deneyi için Hazırlanması ve Yapay Işınlanması.....	23
3.3. Kullanılan ESR Spektrometresi ve Çalışma Prensipleri.....	26

3.4. Doz Hızının Belirlenmesi .....	28
3.4.1. İç Doz Hızının Belirlenmesi .....	29
3.4.2. Dış Doz Hızının Belirlenmesi.....	32
4. DENEY SONUCU ELDE EDİLEN BULGULAR.....	36
4.1. Kalsit Örneklerinde ESR Spektrumları ve Tarihleme İçin Kullanılacak Sinyallerin Belirlenmesi.....	36
4.1.1. Kalsit Örneklerinde Işınlamaya Duyarlı Paramanyetik Merkezler .....	37
4.2. Büyüme Eğrileri ve $A_{\Sigma}$ Değerleri .....	43
4.3. Doz Hızı Değerleri.....	45
4.3.1. İç Doz Hızı .....	45
4.3.2. Dış Doz Hızı .....	47
4.4. Toplam Doz Hızı ve Örneklerin Yaşı.....	49
5. SONUÇ VE TARTIŞMA.....	52
KAYNAKLAR.....	56
ÖZGEÇMİŞ.....	59

## ÇİZELGELER

Sayfa

Çizelge 3.1. Spektrumların kaydı için benimsenen spektrometre çalışma koşulları.....	28
Çizelge 3.2. Örnek içerisindeki Uranyum ve Toryum bozunumundan kaynaklanan $\alpha$ -, $\beta$ - ve $\gamma$ - ışınlarının doz hızları 1 ppm safsızlık miktarı için elde edilmiştir..	31
Çizelge 4.1. Çalışılan örnekler için çizilen şiddet-doz büyüme eğrilerinden elde edilen $A_{\Sigma}$ değerleri.....	45
Çizelge 4.2. İncelenen örneklerin içerdiği radyoaktif çekirdeklerin yoğunluğuna ilişkin ICP-MS yöntemi ile bulunan sonuçlar.....	46
Çizelge 4.3. Örneklerin etkisinde kaldığı toplam iç doz hızları.....	47
Çizelge 4.4. Mağaralarda ölçüm yoluyla tespit edilen ortalama doz hızı değerleri.....	48
Çizelge 4.5. Mağara içleri için hesaplanan kozmik doz ve kayaç kaynaklı doz hızı değerleri.....	48
Çizelge 4.6. Örneğin bulunduğu katman için, ölçüm yoluyla ve hesaplama yoluyla elde edilen, içeri nüfuz eden dış doz hızı değerleri. Hesaplama yoluyla belirlenen değerler, hem en büyük radyoaktif çekirdek yoğunlukları, hem de ortalama yoğunluklar için gösterilmiştir.....	50
Çizelge 4.7. Ölçüm ve hesaplama yoluyla elde edilmiş toplam doz hızı ve örnek yaşı değerleri. Hesaplama yöntemine ait sonuçlardan yalnızca en büyük çekirdek yoğunluğu ile elde edilen sonuçlar verilmiştir.....	51

## ŞEKİLLER

### Sayfa

Şekil 2.1. Spin kuantum sayısı 1/2 olan bir sistem için enerji düzeylerinin manyetik alanla değişimi .....	5
Şekil 2.2. Tek çizgili bir ESR spektrumu için sinyal şiddetinin manyetik alana bağlı değişimi: (a) birinci türev eğrisi, (b) soğurma eğrisi.....	6
Şekil 2.3. Doz Ekleme Yöntemi yoluyla elde edilen ESR Sinyal Şiddetinin yapay ışınlama doz miktarına göre (a) doğrusal (b) üstel değişimi.....	12
Şekil 2.4. Yağış suyu, atmosfer ve topraktaki karbondioksitle karışarak, kireçtaşının çözünmesine yol açan karbonik asidi (H <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> ) oluşturur.....	14
Şekil 2.5. Sarkıt-dikit ve devamında sütun gelişimi.....	15
Şekil 2.6. İncesu (Karaman) Mağarasında görüntülenen sarkıt, dikit ve sütun oluşumu örnekleri .....	16
Şekil 3.1. Çatalhöyük arkeolojik bölgesini içeren 100 km yarıçaplı alanda yer alan mağaralar	17
Şekil 3.2. İncesu Mağarası'ndaki sarkıt, dikit ve traverten havuzu görüntüleri.....	18
Şekil 3.3. İncikini Mağarası'na ait giriş, sarkıt, dikit, sütun ve su birikintisi görüntüleri...	19
Şekil 3.4. Damlataş Mağarası'na ait giriş ve ölçüm görüntüleri .....	20
Şekil 3.5. Hatçeninini Mağarası'na ait görüntüler .....	20
Şekil 3.6. Örneklerin toplandığı mağaralar ve kesit görünümü: (a) İncesu Mağarası'ndan alınan IC örneği; (b) İncesu Mağarası'ndan alınan IC3 örneği; (c) İncikini Mağarası'ndan alınan IK örneği; (d) Hatçeninini Mağarası'ndan alınan Hai örneği; (e) Damlataş (Yollarbaşı) Mağarası'ndan alınan DY örneği; (f) Obruk-Sızma Mağarası'ndan alınan OS örneği; (g) Çatalhöyük Bölgesi'nden alınan CH1 ve CH2 ile aragonit olarak sınıflandırılan CH-B ve CH-K örnekleri.....	22
Şekil 3.7. (a) Farklı renklerde kalsit kristali (b) Kalsitin rombohedral kristal yapısı: beyaz = Ca <sup>2+</sup> , siyah =C <sup>4+</sup> , kırmızı = O <sup>2-</sup> .....	23
Şekil 3.8. (a) IC3 örneğinin ilk hali, (b) örneğin enine kesilme işlemi, (c) kesildikten sonraki kesit görünümü, (d) katmanların ve örnek bölümlerinin isimlendirilmesi.....	24
Şekil 3.9. (a) Kıl testere kullanılarak örneğin bölümlere ayrılması, (b) büyük kayaç bıçağı ile dış yüzey soyma işlemi, (c) örneklerin bölümlere ayrıldıktan sonra isimlendirilerek poşetlenmesi. ....	25

Şekil 3.10. Öğütme laboratuvarında yapılan işlemler: (a) Örneğin çekiçle kırılmış kaba parçalarının çanak içine konulması, (b) öğütme cihazına yerleştirme ve zaman ayarlaması, (c) öğütme sonrası örneğin çanak içindeki görünümü.....	25
Şekil 3.11. (a) % 0,5'lik asetik asit çözeltisi ile yıkama, (b) saf su ile durulama (c) süzgeç kağıdında süzülerek kurutma işlemleri.....	26
Şekil 3.12. X band ESR spektrometresinin blok diyagramı.....	27
Şekil 3.13. Radyoaktif ışınların madde içinde zayıflamasını gösteren grafikler: (a) Alfa ışınması, (b) gama ışınması, (c) beta ışınması. Şekil a ve c'de gösterilen zayıflama faktörü değerleri yüzde olarak kullanılırken, Şekil b'de gösterilen zayıflama faktörü değerleri doğrudan oranı vermektedir.....	31
Şekil 3.14. (a) Mağara içi doz hızı ölçümlerinde kullanılan gama spektrometresi; (b) Alıştırmaya yönelik yapılan ön çalışma; (c) Mağara içi ölçüm (İncesu Mağarası).....	32
Şekil 3.15. (a) Çeşitli mağara ve tünellerde ölçülmüş kozmik doz değerleriyle elde edilmiş, örtü kalınlığına göre kozmik doz soğurum eğrisi. (b) Farklı enlemler için, kozmik doz hızının rakıma bağlı olarak deniz seviyesindeki değerine oranı.....	35
Şekil 4.1. IC3-D2 örneğinin asitle yıkama işleminin ardından (a) 4000 G tarama alanında, (b) 400 G tarama alanında kaydedilen ESR spektrumu. ....	37
Şekil 4.2. Akiyoshi Mağarası'ndan (Japonya) alınan bir sarkıta ait (a) 0,4 G ve (b) 4 G modülasyon genliği ile kaydedilen ESR spektrumları. Işınlamaya duyarlı sinyaller A, B, C ve D olarak tanımlanmıştır.....	38
Şekil 4.3. MD doyum çalışması. 150 Gy yapay dozla ışınlanmış IC3-E1-1 örneği için 0,01 mW ile 20 mW değerleri arasında uygulanan MD gücüne karşı elde edilen 2,0007 sinyali için ESR şiddeti eğrisi .....	39
Şekil 4.4. (a) IC3-D2 örneğinin asitle yıkama işleminin ardından (doğal) 4000 G tarama alanında kaydedilen ESR spektrumu. (b) 300 Gy dozla yapay ışınlanmış örneğin aynı aralık ve koşullardaki spektrumu.....	40
Şekil 4.5. (a) IC3-D2 örneğinin asitle yıkama işleminin ardından (doğal) 400 G tarama alanında kaydedilen ESR spektrumu. (b) 300 Gy dozla yapay ışınlanmış örneğin aynı aralık ve koşullardaki spektrumu.....	40
Şekil 4.6. OS-A örneğinin 40 G tarama alanı kullanılarak kaydedilen ESR spektrumları: (a) Hiç işlem görmemiş (doğal) örnek. (b) Asitle yıkanmış doğal örnek. (c) 55,12 Gy doz ile ışınlanmış örnek. ....	41

Şekil 4.7. (I) IC3-B örneğinin 40 G tarama alanı kullanılarak kaydedilen ESR spektrumları:	
(a) Asitle yıkanmış doğal örnek. (b) 150 Gy doz ile ışınlanmış örnek. (c) 300 Gy doz ile ışınlanmış örnek. (d) 450 Gy doz ile ışınlanmış örnek. (e) 900 Gy doz ile ışınlanmış örnek.	
(II) IK-O örneğinin 40 G tarama alanı kullanılarak kaydedilen ESR spektrumları: (a) 55,12 Gy doz ile ışınlanmış örnek. (b) 206,7 Gy doz ile ışınlanmış örnek. (c) 826,8 Gy doz ile ışınlanmış örnek.....	42
Şekil 4.8. Yapay ışınlama dozu 2291 Gy olan IC3-B-8 örneğinin (a) 0,4 G, (b) 2 G (c) 4 G modülasyon genliği kullanılarak kaydedilen ESR spektrumları.....	43
Şekil 4.9. (a) IC3-A, (b) IC-B, (c) IC3-D1, (d) Hai-A, (e) IC3-G2, (f) DY-B örneklerinin 4G modülasyon genliği ile kaydedilmiş ESR spektrumlarından, C sinyalinin şiddet değişiminin okunması ile elde edilen şiddet-doz eğrileri. ....	44
Şekil 5.1. Örneklerin yer bilimi uzmanlarınca belirlenmiş gelişim yönleri.....	53
Şekil 5.2. Bazı örneklerin ölçüm yöntemiyle belirlenmiş, ky cinsinden ESR yaşları.....	54

## SİMGELER VE KISALTMALAR

### Simgeler

$\beta$	Bohr Magnetonu ( $9.27 \times 10^{-24} \text{ J.T}^{-1}$ )
$\gamma$	Jiromanyetik oran
$h$	Planck Sabiti ( $6.62 \times 10^{-34} \text{ J.s}$ )
$\nu$	Frekans
$g$	Spektroskopik yarıllma çarpanı
$A$	Aşırı ince yapı sabiti
$S$	Spin açısal momentumu
$\mu$	Manyetik moment
$\mathcal{H}$	Enerji Hamiltoniyeni

### Kısaltmalar

ESR	Elektron Spin Rezonans
EPR	Elektron Paramanyetik Rezonans
MD	Mikrodalga
JD	Jeolojik doz
$A_{\Sigma}$	Eşdeğer doz
D	Yıllık doz (Doz hızı)
$D_{\text{top}}$	Toplam doz hızı
$t_{\text{ESR}}$	Örneğin yaşı
ky	Bin yıl
$\text{CaCO}_3$	Kalsiyum karbonat
Gy	Gray
kGy	Kilo Gray
ppm	Toplam madde miktarının milyonda 1 birimlik maddesi

# 1. GİRİŞ

ESR (Elektron Spin Rezonans) spektroskopisi, bir madde içerisinde bulunan paramanyetik kusurların gözlemlenmesini sağlar. ESR ile tarihleme ise, jeolojik ya da arkeolojik bir maddenin çevresinde ya da kendi içerisinde yer alan radyoaktif çekirdeklerden yayılan alfa, beta ve gama ( $\alpha$ -,  $\beta$ - ve  $\gamma$ -) ışınları ve kozmik ışınlar nedeniyle oluşan paramanyetik kusurların zamanla birikimini incelemeye dayalı bir yöntemdir. ESR spektrum şiddeti, oluşan kusur sayısı ile orantılı olduğundan, örneğin etkisinde kaldığı ışın hızının sabit olduğu varsayımı altında, örneğin yaşının ESR spektrum şiddeti ile orantılı olduğu söylenebilir [1].

Jeolojik maddelerin ESR ile tarihlenebileceği fikri, her ne kadar incelenen örneklerin çok yaşlı olması nedeniyle çalışma sonuçsuz kalsa da, ilk kez 1967'de Zeller ve arkadaşları tarafından ortaya atıldı [2]. Yöntem, 1970'li yıllarda Ikeya tarafından kuvaterner döneme ait sarkıtlarda başarıyla uygulandı [3]. Bunun yanı sıra kemikler için Ikeya ve Miki tarafından başarılı çalışmalar yapılırken [4], sedimentlerdeki kabuklar [5] ve derin deniz sedimentlerindeki planktonik deniz hayvanları [6] için de ESR yöntemi ile tarihleme denemeleri yapılmıştır. Ayrıca, Ikeya vd. tarafından volkanik malzeme ve jeotermal örneklerin ESR yöntemiyle yaş tayini çalışmaları yapılmıştır [7].

Arkeolojik uygulama olarak 1978 yılında Robins ve arkadaşları tarafından yanmış çakmaktaşlarının ESR tarihlemesi yapıldı [1]. 1982 yılında Ikeya ve arkadaşları, yapısal jeoloji alanında, kuvars kristalleri kullanarak ESR ile fay tarihlemesi yaptı [8]. Ayrıca Ulusoy tarafından Kuzey Anadolu ve Nojima (Japonya) fayları incelendi [9]. Jeotermal kaynaklarının belirlenmesi amacıyla jeotermal silikatlar üzerinde çalışmalar yapıldı. Lav akıntıları nedeniyle yanmış sedimentler, volkanik kül ve kayalar üzerinde tarihleme çalışmaları yapıldı [10].

Bu alanda ülkemizde yapılan çalışmalar ise, Apaydın ve Ulusoy tarafından yapılan kuvars tarihlemesi çalışmaları [11], [1], [12], [13], Ulusoy ve Ikeya tarafından sepiyolitler üzerine yapılan ilk ESR çalışması [14], Ulusoy tarafından yapılan jips tarihleme çalışması [15], Kuzey Anadolu ve Nojima (Japonya) fay hatlarında yapılan fay tarihleme çalışması [9] ve son olarak Ulusoy vd. tarafından Aladağlar bölgesindeki mağara örnekleri üzerinde yapılan ESR tarihleme çalışmaları [16] şeklinde sıralanabilir.



Bu çalışmada, Çatalhöyük yerleşim alanı ve çevresindeki mağaralardan toplanan kalsit yapıdaki mağara çökelleri ESR yöntemiyle incelenerek yaş tayini yapıldı. Çalışmanın en önemli özelliği, örneğin etkisinde kaldığı doz hızı değerlerinin, portatif  $\gamma$ -spektrometresi kullanılarak doğrudan ölçüm ile saptanması ve sonuçlarının örnek çevresindeki radyoaktif element yoğunluğundan yararlanılarak hesaplanan doz hızı değerleri ile karşılaştırılmasıdır.

Tezin 2. bölümü olan “Temel Kavramlar” başlığı altında, ESR spektroskopisinin temel kavramları ve özelliklerinden bahsedilmiş, ayrıca tarihleme yöntemleri ve özellikle TL ve ESR yöntemleri anlatılmıştır. “Deneysel Kısım” başlıklı 3. Bölümde, incelenen örnekler, örneklerin alındığı mağaraların özellikleri, kalsit kristalinin özellikleri ve çalışmanın teorik ve deneysel aşamalarından bahsedilmiştir. 4. bölüm elde edilen bulguları içerirken, son bölümde, bulguların ortaya koyduğu sonuçlar ve bu sonuçların değerlendirmeleri yer almaktadır.

## 2. TEMEL KAVRAMLAR

### 2.1. Elektron Spin Rezonans (ESR) Spektroskopisi

ESR, mikrodalga (MD) bölgesindeki elektromanyetik dalgaların bir manyetik alan içerisinde bulunan çiftlenimsiz elektron spinleri tarafından soğurulmasının gözlemlenmesi ve bu yolla maddenin özelliklerinin incelenmesi için kullanılan fiziksel bir yöntemdir [17]. ESR, 1944 yılında Kazan Üniversitesi'nde Evgeny K. Zavoisky tarafından, tuz bileşikleri içerisindeki geçiş metali iyonlarının gözlenmesi ile keşfedilmiş ve II. Dünya Savaşından sonra MD teknolojileri ve katı hal elektronisindeki ilerlemelerle birlikte geliştirilmiştir. Purcell ve Bloch, 1946 yılında radyo dalgalarının çekirdek spinleri tarafından soğurulduğunu keşfetmiş ve benzer bir yöntem olan Nükleer Manyetik Rezonans (NMR) yöntemini geliştirmiştir. NMR, şimdilerde, kimya ve tıp alanlarında geniş çaplı olarak kullanılmaktadır. Bilgisayarlı Tomografi NMR (CT-NMR) ya da manyetik rezonans görüntüleme (MRG), X-ışınları kullanılarak yapılan bilgisayarlı tomografiye göre daha az zararlı olduğundan, görüntüleme merkezlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır [7].

Bir örneği, maddenin manyetik özelliklerinin belirlenmesinde önemli bir yeri olan ESR spektroskopisi ile inceleyebilmek için, o örneğin manyetik momente ya da serbest kökçelere, diğer bir deyişle paramanyetik merkezlere sahip olması gerekir. Serbest kökçe ise moleküler veya atomik orbitallerinde bir ya da daha çok çiftlenimsiz elektrona sahip yapılar olarak tanımlanmaktadır. Organik ve inorganik kökçeler, yarıiletkenler, iletkenlik elektronları, bazı geçiş elementi iyonları ve nadir toprak elementleri ESR tekniği ile incelenebilmektedir. Bu teknik, incelenen maddenin yapısında herhangi bir bozulmaya neden olmaması, duyarlılığının yüksek olması, az miktarda örneğin analiz için yeterli olması, algılama zamanının kısa olması ve sinyal şiddetinin örnek içerisindeki serbest kökçe sayısı ile doğru orantılı olması gibi üstünlükleri nedeniyle kimya, biyokimya, katı hal fiziği ve tıp vb. alanlarda geniş uygulama alanları bulmaktadır [17].

Net manyetik momente sahip yapı taşları arasındaki manyetik etkileşmelerin zayıf olduğu örnekler paramanyetik özellik gösterir. Bir dış manyetik alan yokken, paramanyetik bir örnekte bulunan manyetik momentler aynı enerjiye sahiptir ve gelişigüzel yönelim gösterirler. Dışarıdan bir manyetik alan uygulandığında ise bu manyetik momentler manyetik alanla aynı ya da zıt yönlü bir yönelimle iki farklı enerjiye sahip olurlar.

Spin açısai momentum vektörü  $\mathbf{S}$  olan bir serbest elektronun manyetik momenti,

$$\boldsymbol{\mu} = - g\beta\mathbf{S} \quad (2.1)$$

bağıntısı ile verilir. Burada  $\beta$ , elektronlar için Bohr magnetonu,  $g$  ise spektroskopik yarıılma çarpanıdır.  $g$  maddenin yapısal, elektriksel ve manyetik özelliklerini yansıtan bir niceliktir. Bir elektron  $\mathbf{H}$  durgun manyetik alanına konulursa, manyetik moment vektörünün manyetik alanla etkileşme enerjisi;

$$E = - \boldsymbol{\mu} \cdot \mathbf{H} = g\beta\mathbf{H} \cdot \mathbf{S} \quad (2.2)$$

şeklinde ifade edilir [18]. Uygulanan manyetik alanın yönü  $z$  eksenini olarak seçilirse, Zeemann enerjisi olarak bilinen bu enerji,

$$E = g\beta H S \quad (2.3)$$

değerini alır. Spin açısai momentumunun kuantumlanması alan doğrultusunda olduğundan,  $S$  serbest elektron için  $\pm 1/2$  değerlerini alır. Dolayısıyla, bir serbest elektron için bu iki duruma karşılık gelen enerji değerleri

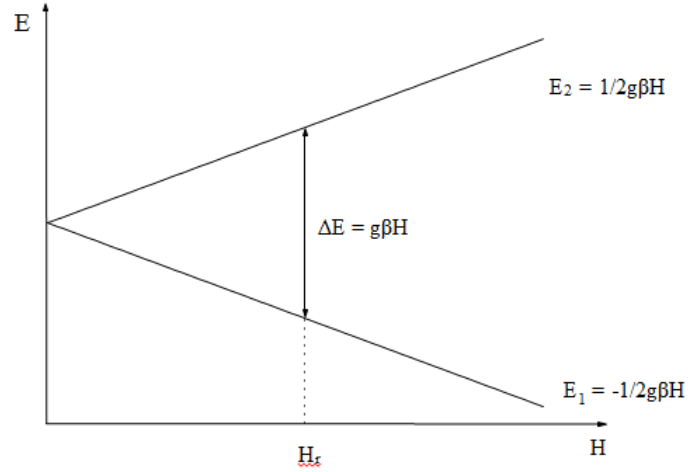
$$E_1 = - \frac{1}{2} g\beta H \quad (2.4)$$

$$E_2 = + \frac{1}{2} g\beta H \quad (2.5)$$

olur. Şekil 2.1'de bu enerjilerin manyetik alan büyüklüğüne göre değişimi gösterilmektedir. Şekilden anlaşılabilceği gibi bu enerji düzeyleri arasındaki fark, manyetik alan büyüklüğüne bağlı olarak;

$$E_2 - E_1 = \Delta E = g\beta H \quad (2.6)$$

şeklinde değişir.



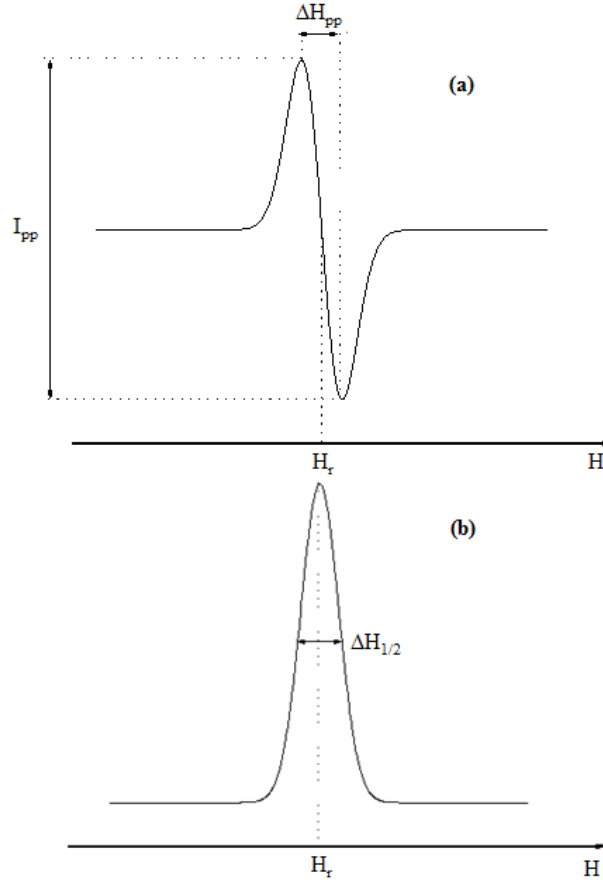
**Şekil 2.1.** Spin kuantum sayısı,  $s = 1/2$  olan bir sistem için enerji düzeylerinin manyetik alanla değişimi.

Manyetik alan içindeki bu elektrona,  $h\nu$  enerjili MD uygulandığında, elektron  $\Delta E = g\beta H$  kadar enerji soğurur.

$$h\nu = g\beta H \quad (2.7)$$

ile ifade edilen bu durumda “*rezonans koşulu*” sağlanmış olur. Burada,  $h$  ve  $\nu$ , sırasıyla, Planck değişmezi ve MD frekansıdır. Rezonans koşulu, manyetik alan ile MD frekansını birbirine bağlayan doğrusal bir bağıntı olduğundan, rezonans şartını sağlayana kadar ya manyetik alan sabit tutulup frekans değiştirilebilir ya da frekans sabit tutulup manyetik alan değiştirilebilir. Uygulama kolaylığı açısından daha çok MD frekansı sabit tutulup, manyetik alanın şiddeti değiştirilir.

İncelenen örnekteki rezonansa giren birimlerin sayısının manyetik alan şiddeti ile değişimini gösteren grafiğe o örneğin ESR soğurma spektrumu adı verilir. Elde edilen ESR spektrumları ya soğurma eğrisi olarak ya da bu eğrinin birinci türevi olarak çizdirilir [19]. Bu şekilde çizdirilen soğurma eğrilerinin altında kalan alan ya da birinci türev spektrumlarının tepeden tepeye yüksekliği, örnek içindeki çiftlenimsiz elektron sayısının bir ölçüsüdür. Serbest bir elektrona ilişkin soğurma ve birinci türev eğrilerine ilişkin parametrelerden  $H_r$ , incelenen örneğin rezonans alan değerini,  $\Delta H_{pp}$  tepeden-tepeye çizgi genişliğini,  $\Delta H_{1/2}$  yarı yükseklik çizgi genişliğini ve  $I_{pp}$  ise ESR sinyal şiddetini göstermektedir (Şekil 2.2). Soğurma eğrisinin altında kalan alan veya çizgi genişliğinin sabit olması durumunda, birinci türev eğrisinin tepeden tepeye yüksekliği, örneğin sahip olduğu manyetik birimlerin sayısı ile orantılıdır [20].



Şekil 2.2. Tek çizgili bir ESR spektrumu için sinyal şiddetinin manyetik alana bağlı değişimi: (a) birinci türev eğrisi, (b) soğurma eğrisi.

## 2.2. Spektrumlardan Elde Edilebilecek Parametreler

### a) Spektroskopik Yarılma Çarpanı (g)

Gözlenen ESR sinyalinin g spektroskopik yarılma çarpanı, incelenen örneğin elektriksel, manyetik ve yapısal özellikleri hakkında bilgi vermesi açısından önemlidir. Spin-yörünge etkileşmesinin g değerini belirlemede etkin olması nedeniyle g değeri farklı yapılar için karakteristik bir parametredir. Bazı manyetik iyonlarda ve serbest kökçelerde, g değeri serbest elektronun g değeri (2,0023)'nden farklıdır ve bu durum, manyetik iyon ya da kökçelere ilişkin manyetik momente yörüngesel hareketlerden bir katkı gelmesinden kaynaklanır. **S** spin açısal momentumu ve **L** yörünge açısal momentumu olmak üzere, atomun toplam açısal momentumu,

$$\mathbf{J} = \mathbf{L} + \mathbf{S} \quad (2.8)$$

olur. Bu durumda g spektroskopik Yarılma Çarpanı,

$$g = \frac{J(J+1) + S(S+1) - L(L+1)}{2J(J+1)} \quad (2.9)$$

bağıntısı ile verilir [17].  $H_0$  rezonans alanında gözlenen tek rezonans geçişinden kaynaklanan bir ESR sinyalinin g değeri,

$$g = hv / \beta H_0 \quad (2.10)$$

bağıntısı ile verilir.

Bilinmeyen bir sinyalin g değeri, bilinen bir g değerine sahip standart bir sinyal yardımıyla

$$g_0 = g_s H_s / H_0 \quad (2.11)$$

bağıntısı kullanılarak hesaplanır. Burada  $g_s$ , kullanılan standart maddeye ilişkin spektroskopik yarılma çarpanı,  $H_0$  ve  $H_s$  ise örneğin ve standart örneğin ESR spektrumlarının gözlemlendiği manyetik alan değerleridir. Standart örnek olarak genellikle  $g_s = 2,0036$  değerine sahip olan DPPH ( $\alpha$ ,  $\alpha$ -Diphenyl- $\beta$ -Picrylhydrazyl) maddesi kullanılır.

#### *b) Sinyal Şiddeti*

Bir ESR spektrum çizgisinin altında kalan alan çiftlenimsiz elektron (ya da serbest kökçe) sayısının bir ölçüsü olduğundan, spektrum çizgisinin sinyal şiddeti, incelenen örneğin kökçe yoğunluğu hakkında bilgi verir. Benzer şekilde birinci türev eğrisinin yüksekliği de kökçe sayısının bir ölçüsü olarak kullanılabilir [21]. Sinyal şiddeti, MD gücü arttıkça artar, ancak incelenen örneğe bağlı olarak, MD gücünün belirli bir değerinden sonra sinyal şiddetinin artmadığı, diğer bir deyişle doyuma ulaştığı görülür.

#### *c) Aşırı İnce Yapı Etkileşmesi*

Elektronik manyetik momentlerle komşu çekirdek manyetik momentleri arasındaki etkileşimlere “aşırı ince yapı etkileşmesi” denir ve elektronun manyetik momentinin çekirdeğin oluşturduğu manyetik alanın etkisinde kalması biçiminde tanımlanır. Çekirdeğin oluşturduğu yerel manyetik alan  $H_Y$  ve rezonans durumunda uygulanan dış manyetik alan  $H_0$  olmak üzere, çiftlenimsiz elektronun etkisi altında kaldığı toplam manyetik alan,  $H_T$ ,

$$H_T = H_0 + H_Y \quad (2.12)$$

ile verilebilir. Çekirdeğin manyetik kuantum sayısı ( $m_I$ ),  $-I$ 'dan  $+I$ 'ya değişerek toplam  $(2I+1)$  farklı değer aldığından yerel manyetik alan da  $(2I+1)$  tane değere sahip olur. Yerel manyetik alanın olmadığı durumda, dış manyetik alanın  $H_0$  değeri için rezonans koşulu gerçekleşirken, yerel manyetik alan varken manyetik alanın  $(2I+1)$  farklı değerinde rezonans koşulu sağlanır ve ESR spektrum çizgisi  $(2I+1)$  tane çizgiye yarılr. Enerji düzeylerinde bu şekilde oluşan yarılmalara “aşırı ince yapı yarılmaları” denir [17].

Spektroskopik yarılma çarpanı,  $g$ , rezonans çizgileri arasındaki uzaklığın bir ölçüsü olan aşırı ince yapı sabiti,  $A$ , elektronik ve çekirdek operatörlerinin alan doğrultusundaki bileşenleri sırasıyla  $\hat{S}_z$  ve  $\hat{I}_z$  olmak üzere toplam enerji hamiltoniyeni

$$\mathcal{H} = g\beta H \hat{S}_z + hA \hat{I}_z \cdot \hat{S}_z \quad (2.13)$$

eşitliği ile verilir. Aşırı ince yapının ortaya çıkması genellikle çiftlenimsiz elektronun komşuluğunda hidrojen atomlarının bulunması ile gerçekleşir [17]. (2.13) bağıntısı ile verilen hamiltoniyenin özenerjileri

$$E = g\beta H m_s + hA m_s m_I \quad (2.14)$$

ifadesine sahip olur. Burada  $m_s$  ve  $m_I$  sırasıyla elektronik ve çekirdek manyetik kuantum sayılarını göstermektedir ve bu enerji düzeyleri arasındaki izinli ESR geçişleri  $\Delta m_s = \pm 1$  ve  $\Delta m_I = 0$  koşullarının sağlanmasıyla gerçekleşir. Buradan anlaşılacağı gibi geçiş sırasında elektron spini yön değiştirirken çekirdek manyetik momenti aynı yönlü kalır. Çiftlenimsiz elektron, çekirdek spin kuantum sayısı  $I$  olan  $n$  sayıda özdeş çekirdekle etkileşirse, spektrum  $(2nI+1)$  tane rezonans çizgisinden oluşur. Çizgilerin ortaya çıktığı alan değerleri ise,

$$H_r = H_0 - \sum_i A_i M_i \quad (2.15)$$

eşitliğinden elde edilirken, çizgilerin sayı ve şiddet oranları Pascal üçgeninden yararlanılarak elde edilir [22].

### 2.3. Işınm Etkisine Dayalı Yaş Tayini (Tarihleme) Yöntemleri

Radyoaktif elementler, madde içerisinde atomik ve elektronik kusurlar meydana getiren alfa ( $\alpha$ ) parçacıkları, beta ( $\beta$ ) ışınları ve gama ( $\gamma$ ) ışınları yayar. Bu tip ışınların madde içerisinde meydana getirdiği toplam kusurların tespit edilmesiyle maddenin yaş tayini yapılabilir. Işıma etkisine dayalı yaş tayininde kullanılan başlıca yöntemler; Termolüminesans (TL), ESR, Fizyon İzi, Optik Uyarımalı Lüminesans (OSL) olarak sıralanabilir. Burada ESR tarihlemeyle benzer esasları olan TL yönteminden özellikle bahsedilecektir.

#### 2.3.1. TL Yöntemi ile Yaş Tayini

Tarihlemesi yapılacak bir maddenin içinde ya da çevresinde bulunan uranyum ( $^{238}\text{U}$  ve  $^{235}\text{U}$ ), toryum ( $^{232}\text{Th}$ ) ve potasyum ( $^{40}\text{K}$ ) radyoaktif çekirdekleri ile onlara ilişkin ürün çekirdekler ışına yaparlar. Madde içinde doğal ışınımlarla üretilmiş çiftlenmemiş elektron ve deşikler, yapı içinde zaten var olan kristal örgü kusurları tarafından ya da doğal ışınımlarla üretilen safsızlıklar ve örgü kusurları tarafından tuzaklanır. Laboratuvar ortamında ısıtma sonucu tuzaklardan kurtulan bu elektron ve deşikler, tekrar birleşir ve bu sırada ışına yaparlar. Bu süreç, “Termolüminesans (TL)” olarak isimlendirilir [23]. Işıma şiddeti, tuzaklanmış elektronların yoğunluğu, dolayısıyla da maddenin etkisinde kaldığı doğal ışına dozu ile değişir [1].

Bu yöntemde, örnekler vakum ya da soy gaz ortamında ısıtılmakta ve düşük şiddetli ışına, bir ışılçoğaltıcı (photomultiplier) tarafından elektrik akımına dönüştürülmektedir. Bu yolla ölçülen parametreler kullanılarak, TL ışık şiddeti zamanın ya da sıcaklığın bir fonksiyonu olarak kaydedilmektedir.

TL tarihleme yönteminde, ilk aşamada, incelenen örneğin bir kısmı için TL ışık şiddeti ölçülür ve örneğin ışına dozuna duyarlılığı saptanır. Daha sonra örneğin kalan kısımları yapay ışınlama işleminin ardından TL ile incelenir. Bu yöntem, “Doz Ekleme Yöntemi” olarak isimlendirilir. Toplam doğal ışına dozu (TD), genellikle arkeolojik doz (AD) ya da eşdeğer doz ( $A_{\Sigma}$ ) olarak isimlendirilmektedir. Bu değer, TL şiddetinin yapay ışınlama dozuna bağlı olarak değişiminden bulunabilir. Yaş, TD'nin yıllık doğal doza oranından bulunur.



### 2.3.2. ESR Yöntemi ile Yaş Tayini

Arkeolojik ve jeolojik maddelerin çevresinde veya içerisinde bulunan radyoaktif çekirdeklerden kaynaklanan doğal ışınlama nedeniyle madde içerisinde oluşan serbest (çiftlenimsiz) elektronlardan bir kısmı madde içerisindeki safsızlıklar tarafından veya maddenin doğasında bulunan kusurlar tarafından tuzaklanır. Bu çiftlenimsiz elektronlar ESR tarafından saptanabilir. ESR sinyal şiddeti, spin yoğunluğu ve dolayısıyla da örnek tarafından yutulan toplam dozla orantılıdır. Toplam doz ise ışınlama doz hızına ve örneğin oluşumundan bu yana geçen ya da spin yoğunluğunu sıfırlayan herhangi bir olay (ısıtma, yeniden kristallenme, asitik reaksiyon, beyazlanma gibi) sonrasında geçen süre ile orantılıdır [1], [7].

ESR  $\alpha$ -,  $\beta$ - ve  $\gamma$ -ışınları tarafından oluşturulmuş çiftlenimsiz elektronları herhangi bir ısıtma işlemi gerek duymadan saptayabilir. Oysa TL, tuzaklanmış elektronların (ya da deşiklerin) yüksek sıcaklıklarda tuzaktan kurtulmaları ve deşiklerle (ya da elektronlarla) yeniden birleşmeleri sonucunda gözlenir. Çiftlenimsiz elektronların yoğunluğu, MD soğurulması yoluyla ESR sinyali olarak gözlenebilir. Bir safsızlık tarafından tuzaklanan ya da bir deşikte kalan çiftlenimsiz elektronlar kısaca “kusur” olarak isimlendirilebilir. TL ve ESR ile yaş tayini arasındaki tek fark, TD’nin belirlenmesi için kullanılan kusur yoğunluğu tespit yöntemindedir [7].

ESR ile yaş tayininde  $A_{\Sigma}$  eşdeğer dozu, deneysel olarak belirlenir. Yapay ve doğal ışınlama, ışınların nitelikleri, ışınlama süreleri ve enerji spektrumu açısından birbirlerinden farklıdır ve kusur oluşum oranı ışınlamanın niteliğine bağlıdır. Yapay yolla ışınlamada  $\alpha$ -,  $\beta$ - ve  $\gamma$ -ışınlarının dozuna  $A_{\Sigma}$  eşdeğer doz denir. Dolayısıyla, yapay ışınlama ile elde edilen  $A_{\Sigma}$ , doğal ışınlamanın ortaya koyduğu TD değerine her zaman eşit olmayabilir [7].

TD, örneğin yaşına ve doğal ışınlamanın yıllık dozu (D)’na bağlı bir parametredir. ESR ve TL yaşlarının TD ya da  $A_{\Sigma}$  değerlerinden belirlenmesi için, ortalama D değerlerinin ayrı ayrı belirlenmesi gerekir. ESR yaşı ( $t_{ESR}$ ), TD ya da  $A_{\Sigma}$ ’nin D’ye bölünmesi ile bulunur:

$$t_{ESR} = TD / D \quad \text{ya da}$$
$$t_{ESR} = A_{\Sigma} / D \quad (2.16)$$

Sinyal şiddetleri TD ya da  $A_{\Sigma}$  ile orantılı olduğundan ESR yöntemi de TL yöntemi gibi ışına dozimetri için kullanılabilir. ESR ölçümleri, örneğin ısıtılmasına gerek olmadan ölçüm alınabilmesi açısından avantajlıdır. Bu sayede doku eşdeğeri organik malzemeler dozimetre örneği olarak kullanılabilir. Örneğin, biyolojik maddeler nükleer bir kaza nedeniyle soğrulan dozu ölçmekte kullanılabilir. Ayrıca bozulmadan saklanması amacıyla ışınlanmış gıda maddelerinin etkilendikleri ışınlama dozu miktarı da ESR yöntemi ile dolaylı olarak ölçülebilir [7].

ESR yöntemiyle ilk tarihleme çalışması, Ikeya (1975) tarafından Japonya'da bulunan Akiyoshi Mağarası'ndan alınan bir sarkıt için yapılmıştır [3].

### 2.3.3. Doz Ekleme Yöntemi

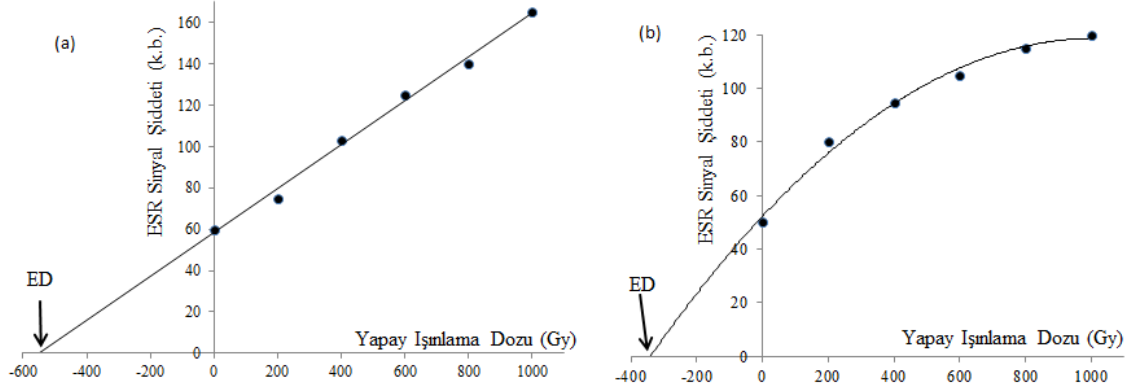
Bir ESR sinyal şiddetinden ışınlama doz miktarının ya da örneğin yaşının bulunabilmesi için, sinyal şiddetinin (dolaylı olarak kusur yoğunluğunun) doz ile kalibre edilmesi gerekir. Gelecek zamandaki kusur yoğunluğunun doza göre değişimi belirlenirse, şu anki yoğunluktan yararlanılarak incelenen örneğin oluşumundan bu yana soğurduğu doz ya da buna bağlı olarak geçen zaman bulunabilir. TL ve ESR tarihleme yöntemlerinin uygulamalarında genellikle bilinen dozlarda yapay ışınlama ile yeni kusurlar oluşturulur [23], [2]. Bu yeni kusurlar örnek içerisindeki kusur yoğunluğunun kalibre edilmesi ve kusur üretim veriminin belirlenmesi için kullanılır. Diğer bir deyişle, genellikle bir  $^{60}\text{Co}$  veya  $^{137}\text{Cs}$  kaynağı tarafından üretilen  $\gamma$ -ışınları ile yapay ışınlama, kusur yoğunluğunu gelecekteki duruma dönüştüren bir "zaman makinası" gibi kullanılır. Bu yöntem, "doz ekleme yöntemi" olarak adlandırılır. Yapay ışınlama dozunun (Q) artmasıyla ESR spektrumunun sinyal şiddeti de artar [7]. Bu artışın doğrusal olduğu varsayıldığında, örneğin belirli bir yapay ışınım dozundaki ESR sinyal şiddeti I ile doğal örneğin ESR sinyal şiddeti  $I_0$  arasında

$$I(Q) = I_0 (1+Q/ED) \quad (2.17)$$

ilişkisi kurulabilir [7].

Bu ilişki yoluyla, yapay ışınlama dozuna karşı ESR sinyal şiddeti grafiğindeki veri noktaları için doğrusal bir benzetişim yapılır ve bu grafiğin yatay eksenini kestiği noktanın mutlak değeri bize  $A_{\Sigma}$  değerini verir (Şekil 2.3 a).

Bir örnek içerisindeki tuzakların sayısı sabit olduğundan, tuzaklanmış elektron sayısının artmasıyla yeni bir elektronun tuzaklanma olasılığı azalır. Bu nedenle büyüme eğrisi (yapay ışınım dozuna karşı ESR sinyal şiddeti) tüm tuzakların dolu olduğu maksimum şiddet değerinde ( $I_{\max}$ ) doyuma ulaşır (Şekil 2.3 b) [24].



Şekil 2.3. Doz Ekleme Yöntemi yoluyla elde edilen ESR Sinyal Şiddetinin yapay ışınlama doz miktarına göre (a) doğrusal (b) üstel değişimi.

Doyum olduğu varsayımına göre, ESR sinyal şiddeti  $I$  ile doğal örneğin ESR sinyal şiddeti  $I_0$  arasında

$$I(Q) = I_{\max} (1 - e^{-k(Q - A_{\Sigma})}) \quad (2.18)$$

bağıntısı yazılabilir [7]. Bu konuda daha genç örneklerle yapılan çalışmalar, doğrusal bir fonksiyonun büyüme eğrisine benzetişiminin üstel bir doyum fonksiyonuna olandan daha doğru veriler ortaya koyduğunu göstermiştir. Bu durumda, tekrarlama yoluyla yaklaşım yapılarak maksimum şiddet değeri tespit edilmelidir ve güvenilir bir değere ulaşılabilmesi için örneklerin bu maksimum değerinin en az %75'ine kadar ulaşılacak şekilde ışınlanması gerekir [24]. Fakat yüksek dozda ışınlama sonucunda maksimum ESR şiddeti iki şekilde değişebilir: örgüde hasar oluşumu nedeniyle azalabilir ya da ek kusur oluşumu nedeniyle artabilir [23].

#### 2.4. Mağaraların Oluşumu

Genel olarak insanların girebileceği büyüklükteki doğal yeraltı boşlukları olarak tanımlanabilen mağaralarda uzunluk kilometrelerce, derinlik veya yükseklik ise birkaç metreden birkaç kilometreye kadar uzanmaktadır [25]. Oluşum şekilleri bakımından mağaralar, doğal ve yapay mağaralar olarak iki grupta incelenir. Kazma ve oyma yoluyla

insanlar tarafından yapılan kaya mezarları, yeraltı şehirleri, kaya evleri, tapınaklar vb. yapay mağaraları; karbonatlı, sülfat ve klorürlü ana kayaların oluşum sürecinde ya da sonrasındaki fiziko-kimyasal olaylar ve yeraltı suları tarafından aşındırılması sonucu oluşan mağaralar ise doğal mağaraları oluşturur.

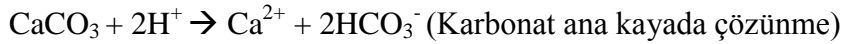
Mağaralar çoğunlukla karbonat vb. minerallerin yüzeyden ya da derinlerden kaynaklanan sulu çözeltilerce çözünmesiyle oluşur. Doğal mağara oluşumu en yaygın olarak, kimyasal bileşimi ve bol çatlaklı yapısı dolayısıyla kireçtaşı türü kayalarda gözlenir. Karbonatlı kayalar içindeki yeraltı boşlukları esas olarak bu kayaların suyun içerdiği karbonik asit ( $H_2CO_3$ ) tarafından çözünmesi sonucu oluşurlar. Karbonik asit, doğada suyla temas eden karbondioksit ( $CO_2$ ) gazının suda çözünmesi sonucunda oluşmaktadır. Karbonatlı kayaların üzerine düşen yağış suyu toprak zonundan geçerken biyojenik  $CO_2$  gazının suda çözünmesi ile  $H_2CO_3$  bakımından zenginleşir.



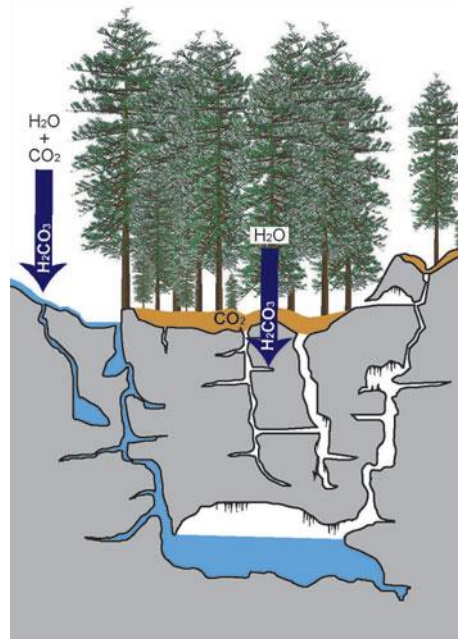
İki adımda ayrışan karbonik asit, kalsit mineralinin çözünmesini sağlar.



Çözünme sonucu oluşan  $H^+$  iyonları kalsit ile tepkimeye girerek mineralin ayrışmasını sağlar ve böylece karstik mağaralar oluşur [26].



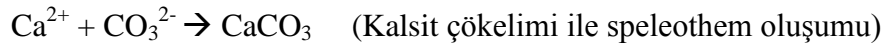
Olağan atmosferik koşullarda suda zor çözünen kireçtaşının erimesine yol açan asitli suların eritici özellikleri, atmosferden, toprak veya ana kayada yaşayan canlıların solunumu, bozunmuş canlı atıkları, sülfürlerin oksitleşmesi ve bitkilerin çürümesi sonucu ortaya çıkan  $CO_2$ 'den kaynaklanır (Şekil 2.4).



**Şekil 2.4.** Yağış suyu, atmosfer ve topraktaki karbondioksitle karışarak, kireçtaşının çözünmesine yol açan karbonik asidi ( $H_2CO_3$ ) oluşturur [27].

Mağaraların oluşum yönelimi (yatay, dikey, yarı yatay-yarı dikey), bölgenin yüksekliği, erimeye uygun olmayan ve su geçirmeyen kayaların konumları, çevrede bulunan akarsu, göl ya da deniz seviyesi yüksekliklerine bağlı olarak değişir. Örneğin, deniz düzeyinden çok yukarıda olan bölgelerde kuyu şekilli düden (dikey) mağaralar oluşur.

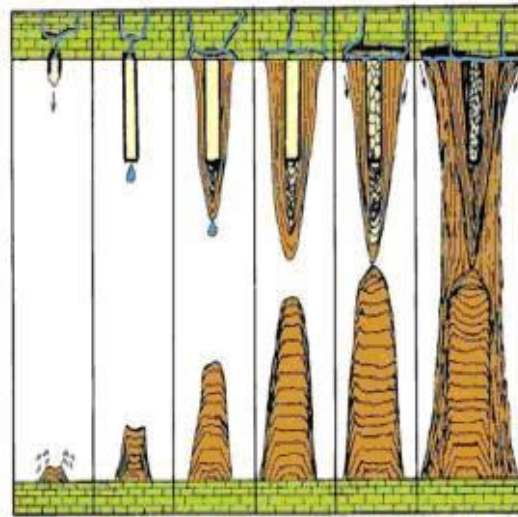
Mağara içleri, yerüstü ve yeraltı suları tarafından dışarıdan getirilmiş kil, mil, çakıl vb. ile yerinde oluşmuş damlataşlar ile kaplıdır. Mağara gelişimi, mağara içi çökeller ile devam eder. Mağara çökelleri, yüzeyden sızma yoluyla mağaraya ulaşan yeraltı suyunun bünyesindeki kalsiyum ( $Ca^{2+}$ ), bikarbonat ( $HCO_3^-$ ) ve karbonat ( $CO_3^{2-}$ ) iyonlarının birleşerek kalsit şeklinde çökmesi sonucunda oluşmaktadır [26].



Mağara çökelleri, mağaranın geliştiği ana kayanın kimyasal bileşimi, tabaka konumları, çatlak veya kırık yapıları ile yeraltı sularının fiziksel ve kimyasal özelliklerine göre farklı biçim, boyut ve renkte olabilirler. Sarkıt, dikit ve sütunlar, yeraltı sularının mağaraya damlama ve sızma yolu ile girmesi sonucu oluşan damlataşlardır. Mağara çökellerinin tamamına yakını kalsit minerallerinden oluşmakla birlikte ortam koşullarına bağlı olarak bazı durumlarda  $CaCO_3$ 'ün aragonit formu da oluşabilmektedir [26].

Sarkıt, mağaraya sızarak gelen suyun ilk oluşturduğu çökeldir. Çatlaklardan gelerek tavadan damlayan bu suyun bileşiminde bulunan karbondioksit serbest hale geçerken karbonat çökelişi olur. Bu düşey koni şeklindeki yapının orta boşluğundan damlayan sular bu yapıyı silindirik olarak büyütür. Böylece, “makarna sarkıt” adı verilen ve sarkıt oluşumunun başlangıcı kabul edilen kırılğan şekiller oluşur (Şekil 2.5). Yer çekimi dolayısıyla düşey aşağı yönde büyüyen bu yapı, içindeki kanalın tıkanması gibi nedenlerle suyun dış yüzeyden akmaya başlamasıyla yatayda da gelişmeye başlar (Şekil 2.6). Kalınlaşma ile birlikte havuç benzeri bir görünüme kavuşan sarkıtlar, damlama, çatlak yapısı ve mağara boyutlarına göre farklı şekillere de bürünebilir. Sarkıtların enine kesitleri incelendiğinde iç içe halkalar görülebilir.

Sarkıtları oluşturan kalsiyum karbonatça zengin sular mağara tavanından damlarken, tabana düştüklerinde buharlaşma ve karbondioksitin serbest hale geçmesi ile karbonat çökelişi meydana getirir ve “dikit” adı verilen birikimler oluşturur (Şekil 2.6). Kesintisiz damlayarak akan sular, taban ve üst kesimlerinin kalınlıkları birbirine eşit dikitleri oluştururken akışı az olan sızıntıların altında kalınlığı az, boyu büyük dikitler oluşur. Dikitlerin şekillerinde, büyümeleri sırasında iklim koşullarındaki farklılıklar nedeniyle değişiklik veya bozulmalar görülebilir.



Şekil 2.5. Sarkıt-dikit ve devamında sütun gelişimi [25].

Sarkıt ve dikitlerin gelişimi sonucu birleşmeler gerçekleşebilir. Böylece mağaranın tabanından tavanına uzanan ve sütun adı verilen yapılar oluşabilir. Sütunların merkezlerinin üst bölümleri sarkıt, alt bölümleri ise dikit yapısındadır.

Damlayan suların yer değiştirmesiyle oluşum yeni sarkıtların oluşumuna döner. Yeterince büyüyerek birleşen sütunlar, mağara boşluklarını salon veya odalar şeklinde böler (Şekil 2.6).

Ülkemiz coğrafyası yaklaşık % 40 oranında mağara oluşumuna uygun kayalardan meydana geldiğinden, çoğunluğu Batı ve Orta Toroslarda bulunan çok sayıda mağara barındırır [28]. 16 km uzunluğu ile ülkemizin bilinen en uzun mağarası olan Pınargözü Mağarası (Beyşehir) ve 1420 m derinliği ile ülkemizin bilinen en derin mağarası olan Peynirlik Düdeni (Anamur), yine bu bölgede yer almaktadır.



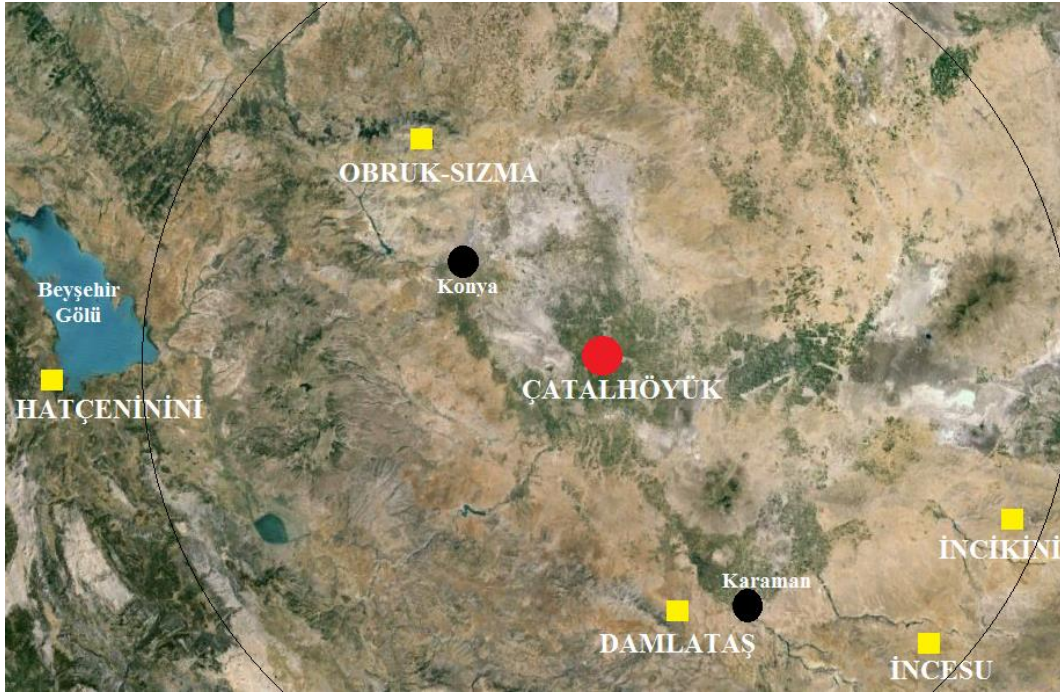
**Şekil 2.6.** İncesu (Karaman) Mağarasında görüntülenen sarkıt, dikit ve sütun oluşumu örnekleri.



### 3. DENEYSEL KISIM

#### 3.1. İncelenen Örnekler

Bu teze konu olan örnekler, 2009 – 2012 yılları arasında sürdürülmüş olan TÜBİTAK projesi [29] kapsamında toplanan sarkıt, dikit ve akmataşı örnekleridir. Bu örnekler, Çatalhöyük Arkeolojik Bölgesi ve yakın çevresindeki İncesu (Taşkale), İncikini (Üçharman), Damlataş (Yollarbaşı), Hatçeninini (Beyşehir), Obruk Sızma (Sızma) mağaralarına (Şekil 3.1) aittir [30].



Şekil 3.1. Çatalhöyük arkeolojik bölgesini içeren 100 km yarıçaplı alanda yer alan mağaralar.

##### 3.1.1. İncesu Mağarası

İncesu Mağarası, Karaman'ın 45 km güneydoğusunda, Taşkale Kasabası'nın 9 km güneyindeki İncesu Deresi'nin doğu yamacındadır. Tamamen yatay olarak gelişmiş olan 1615 m rakımlı mağara, 1356 m toplam uzunluğa sahiptir ve girişine göre en derin noktası 22 m'dedir [31]. Mağara içerisinde çok sayıda kırılmış sarkıt ve dikit çökelleri, sütunlar, traverten havuzları yer almaktadır (Şekil 3.2) [32]. Temmuz 2003'te alınan ölçümlere göre mağara girişindeki sıcaklık 14°C'dir [33]. Mağara içinde veya çevresinde tarih öncesine ait herhangi bir bulguya rastlanılmamıştır [30]. İncelenen mağaralar içinde yalnızca bu mağara turizme açılmıştır.





Şekil 3.2. İncesu Mağarası'ndaki sarkıt, dikit ve traverten havuzu görüntüleri

### 3.1.2. İncikini Mağarası

İncikini Mağarası, Karaman İli, Ayrancı İlçesi'nin 20 km güneydoğusunda, Güney Dağı'nın güney eteğindedir. Bölgenin en büyük akarsuyu olan Divle Deresi'nin bir kolu olan Çevlik Deresi'nin hemen kenarındadır. 1424 m rakımlı mağaranın genişliği 1,5 – 20 m; tavan yüksekliği ise 1 – 8 metre arasındadır. Yatay olarak gelişmiş olan İncikini Mağarası, 173 m toplam uzunluğa sahiptir ve girişine göre en derin noktası 11 m daha aşağıda bulunmaktadır. Mağaranın girişine yakın bölümlerinin tabanı toprak; çakıl ve bloklarla örtülüdür ve büyük bir bölümü sarkıt, dikit, sütun, makarna sarkıt ve damlataşları ile kaplıdır. Yağışlı dönemlerde tavandan damlayan suların birikmesi sonucu ana galerinin son bölümlerinde küçük gölcükler oluşmuştur [31].



Şekil 3.3. İncikini Mağarası'na ait giriş, sarkıt, dikit, sütun ve su birikintisi görüntüleri

### 3.1.3. Damlataş Mağarası

Damlataş Mağarası, Karaman'ın 15 km batısında, Konya yolu kenarında bulunan Yollarbaşı (Yeşiltepe) Kasabası'nın 4 km güneyinde bir etek düzlüğü üzerinde yer alır. Mağara Çatalhöyük bölgesine 50 – 55 km uzaklıktadır ve diğer 4 mağaraya göre Çatalhöyük'e en yakın konumdadır. Mağara girişi deniz seviyesinden 1156 m yukarıda bulunmaktadır. Yarı yatay-yarı dikey olarak gelişmiş düden konumlu olan Damlataş Mağarası, 130 m toplam uzunluğa sahiptir ve girişine göre en derin noktası 30 m'de bulunmaktadır. Mağaranın doğuya (Konya Ovası'na) bakan girişi yüzeyden itibaren 8 metrelik kuyu şeklindedir (Şekil 3.4). Bu nedenle mağara içine ulaşım, mağaracılıkta kullanılan özel donanım gerektirmektedir. Damlataş Mağarası; yüzeyden derinlikleri 20,5 m ve 20 – 30 m civarında olan ve birbirine bağlı iki bölümden oluşmuştur. Tabanı kum, çakıl ve bloklarla kaplı olan 20 m uzunluğundaki birinci bölümün genişliği 2 – 10 m, tavan yüksekliği ise 3 – 10 m arasında değişir. İkinci bölümde sarkıt, dikit, sütun, makarna sarkıt, damlataş havuzu, duvar ve örtü damlatışları yer alır. Mağara içerisinde büyük bir yaras kolonisi yaşamakta olduğundan tabanı kalın bir guano tabakası ile örtülüdür [31].





Şekil 3.4. Damlatas Mağarası'na ait giriş ve ölçüm görüntüleri



Şekil 3.5. Hatçeninini Mağarası'na ait görüntüler

### **3.1.4. Hatçeninini Mağarası**

Beyşehir Gölü'nün doğusundaki Sarpça Tepe'nin üzerinde yer alan Hatçeninini Mağarası'na, Beyşehir'e bağlı Yeşildağ'dan İskele yönüne giden stabilize yolun 5. km'sinden ayrılan dikey fakat mağaranın hemen önünden geçen patika bir yol ile ulaşılır. Çatalhöyük bölgesine 110 km uzaklıkta olup diğer 4 mağaraya göre daha uzaktadır. Karstlaşmaya son derece uygun türde kireçtaşlarında gelişmiştir. Mağara içerisinde bol miktarda sarkıt ve dikit oluşumu mevcuttur [30]. 1215 m rakımlı mağaranın derinliği 8 m, toplam uzunluğu 83 m'dir. Mağaranın genişliği 2 – 10 m, tavan yüksekliği ise 1,5 – 4 m arasında değişmektedir. Giriş bölümü hafif eğimli olmasına karşın orta ve son kesimleri bütünüyle yataydır [31].

### **3.1.5. Obruk-Sızma Mağarası**

Konya ili, Karatay ilçesine bağlı Sızma Kasabası'nın yakınında yer almaktadır. Çatalhöyük bölgesinin yaklaşık 60 km kuzeyinde yer alır. Yaklaşık 1600 m rakımlı mağara yaşlı kireçtaşları içerisinde gelişmiştir. Derinliği 111,9 m, uzunluğu 508,5 m olan dikey yapılı mağarada yer alan havuzların, bölgenin kurak yapısına karşı tedbir olarak yapıldığı anlaşılmaktadır [31].

### **3.1.6. Çatalhöyük**

Çatalhöyük, Orta Anadolu Bölgesi'nde yer alan Konya Ovasında, yaklaşık 14 hektarlık bir alan üzerinde bulunmaktadır. Konya il merkezinin 52 km güneydoğusunda, Çumra ilçesinin 11 km kuzeyinde yer alır. Yaklaşık 9000 yıl öncesine dayanan Çatalhöyük Neolitik Kenti, düzenli tarımın ilk örneklerine ait kanıtlar içermektedir. Ortadoğu ve Anadolu'da başka Neolitik alanlar bulunmuş olmasına rağmen, Çatalhöyük Neolitik Kenti, kalıntıların ve yerleşimcilerin özellikleri bakımından evrensel bir değer taşımaktadır [34].

Neolitik Çatalhöyük kazılarında ortaya çıkan en önemli bulgular arasında mağara oluşumu olarak da bilinen speleothemler yer almaktadır. İlk kez Mellaart tarafından, özenle dekore edilmiş bina buluntuları arasında kırık sarkıtlar olduğu belirtilmiştir [30], [35].

Çatalhöyük speleothemleri sarkıt, dikit, akmataşı ve köpekdişi sparlarından oluşmaktadır [30].



**Şekil 3.6.** Örneklerin toplandığı mağaralar ve kesit görünümüler: (a) İncesu Mağarası'ndan alınan IC örneği; (b) İncesu Mağarası'ndan alınan IC3 örneği; (c) İncikini Mağarası'ndan alınan IK örneği; (d) Hatçeninini Mağarası'ndan alınan Hai örneği; (e) Damlatas (Yollarbaş) Mağarası'ndan alınan DY örneği; (f) Obruk-Sızma Mağarası'ndan alınan OS örneği; (g) Çatalhöyük Bölgesi'nden alınan CH1 ve CH2 ile aragonit olarak sınıflandırılan CH-B ve CH-K örnekleri.

### 3.2. Kalsit Kristalinin Özellikleri ve Örneklerin Hazırlanması

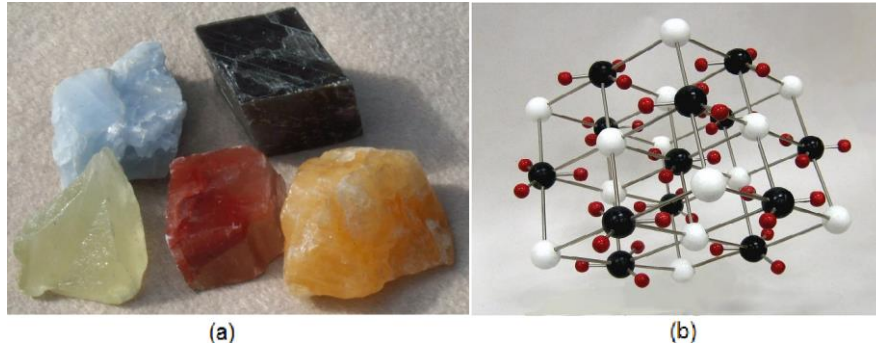
#### 3.2.1. Kalsit Kristalinin Özellikleri

Kireçtaşının yapıtaşı olan kalsitin kimyasal formülü  $\text{CaCO}_3$ 'dür. Altıgen sistemde kristallenen ve 200'den fazla kristal şekli bulunan kalsitin kristal tane boyu 1 mm – 10 cm



arasında değişir. Özkütlesi 20°C’de 2,7 g/cm<sup>3</sup>’tür. Asitte eriyerek CO<sub>2</sub> kabarcıkları çıkarır. Kalsitin diğer özellikleri ise; yazıları çift olarak gösterecek şekilde kırılma (çift kırılma), cam parıltılı olma, kolay kırılma, doğada yarı saydam ve mat olarak bulunma, saf olduğunda da Şekil 3.7 a’da gösterildiği gibi renksiz ya da beyaz, gri, sarı, yeşil, kahverengi gibi renklerde bulunma olarak sıralanabilir. Kalsit, doğada en bol bulunan minerallerdendir. İnsan vücudunda ve günlük hayatta kullanılan kâğıt, boya, lastik gibi pek çok maddenin bileşiminde bulunur. Karbonatlı sedimanter kayalar olarak bilinen kireçtaşlarının ve metamorfik kayalar olan mermerlerin ana bileşenidir. Kalsit, travertenlerin, sarkıt ve diktlerin ana bileşeni olarak bulunur [36] ve karbonat iyonu (CO<sub>3</sub>)<sup>2-</sup> ile iki değerlikli katyonların bir araya gelmesi sonucu oluşur. Saf kalsitin bileşiminde % 56 oranında CaO ve % 44 oranında CO<sub>2</sub> bulunur. Bununla birlikte bulunduğu kayaç ve minerallere bağlı olarak az da olsa Ba, Sr, Mg, Fe, Mn, Zn vb. içerebilir [37].

Kalsit kristali rombohedral yapıdadır. Kristal içerisinde kalsiyum (Ca<sup>2+</sup>) iyonları altı oksijen (O<sub>2</sub><sup>-</sup>) iyonu ile, oksijen iyonları da iki kalsiyum iyonu ve CO<sub>3</sub> grubu içerisindeki karbon (C<sup>4+</sup>) iyonu ile çevrelenmiştir (Şekil 3.7 b).



**Şekil 3.7.** (a) Farklı renklerde kalsit kristali [38] (b) Kalsitin rombohedral kristal yapısı: beyaz = Ca<sup>2+</sup>, siyah = C<sup>4+</sup>, kırmızı = O<sup>2-</sup> [39].

### 3.2.2. Örneklerin ESR Deneyi için Hazırlanması ve Yapay Işınlanması

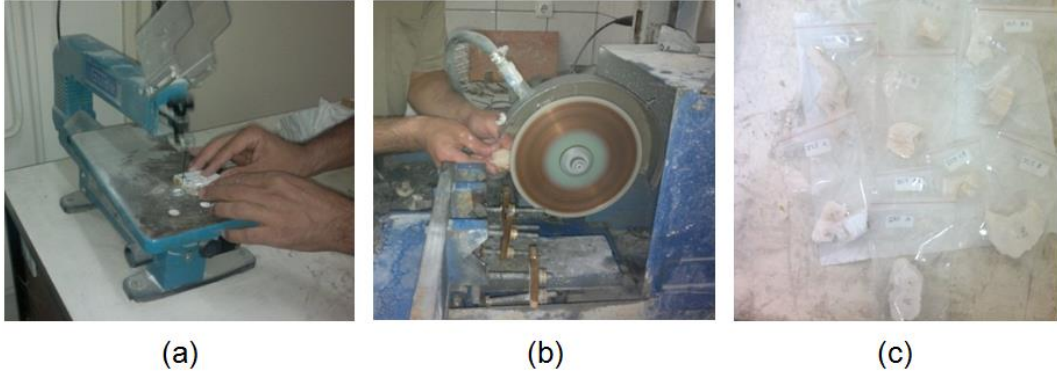
Tübitak projesi kapsamında İncesu Mağarasından toplanan örneklerden dikt kırığı olan IC3 kodlu örneğin (Şekil 3.8 a) ESR ile çalışılması aşamasına kadarki hazırlama süreci şöyle gelişmiştir:

**Öğütme:** IC3 örneği, Hacettepe Üniversitesi Yerbilimleri Uygulama ve Araştırma Merkezi (H.Ü. YUVAM) bünyesinde bulunan İnce Kesit-Parlatma Laboratuvarında enine iki parçaya ayrıldı ve bu parçalardan 1 cm kalınlığında bir dilim kesildi (Şekil 3.8 b-c). Bu kesit üzerinde örneğin oluşum aşamalarına işaret ettiği düşünülen katmanlar belirlenerek ara bölmeler işaretlendi ve örnek alt birim isimlendirilmesi yapıldı (Şekil 3.8 d).



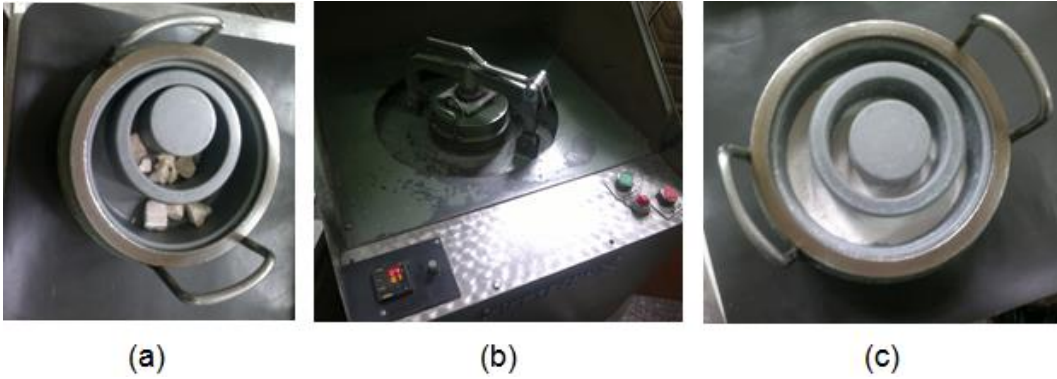
**Şekil 3.8.** (a) IC3 örneğinin ilk hali, (b) örneğin enine kesilme işlemi, (c) kesildikten sonraki kesit görünümü, (d) katmanların ve örnek bölümlerinin isimlendirilmesi.

Çoğu mağara çökeli 1000 yılda birkaç mm gibi çok yavaş bir büyüme hızına sahip olduğundan örneklerin büyüme katmanlarına paralel şekilde kesilmesine dikkat edildi [24] ve 1 cm kalınlığındaki örnek dilimi, işaretlenen yerlerden bölümlere ayrıldı (Şekil 3.9 a). Ayrıca örnek dışından gelen alfa ve beta ışınlarının etkisini barındıran 2 mm kalınlığındaki dış kısım işaretlenerek çıkarılıp atıldı (Şekil 3.9 b) [24]. Bunun için yine YUVAM bünyesindeki Kayaç Mekaniği Laboratuvarında bulunan kıl testere ve büyük kayaç bıçağı kullanıldı.



**Şekil 3.9.** (a) Kıl testere kullanılarak örneğin bölümlere ayrılması, (b) büyük kayaç bıçağı ile dış yüzey soyma işlemi, (c) örneklerin bölümlere ayrıldıktan sonra isimlendirilerek poşetlenmesi.

ESR deneyinde kullanılacak örneklerin türdeş olması ve spektrumların örnek yöneliminden etkilenmemesi için, örnekler YUVAM Öğütme Laboratuvarında kullanılan zaman ayarlı öğütme cihazında öğütüldü. Örneğin sertlik ve parçalanmışlık durumuna göre zaman ayarı 0,2 – 1,5 s aralığında tutuldu ve çeşitli gözenek boyutlarındaki eleklerle kontrol edilerek 100 – 400 µm büyüklüğünde tanecikler elde edilmeye çalışıldı (Şekil 3.10) [24].

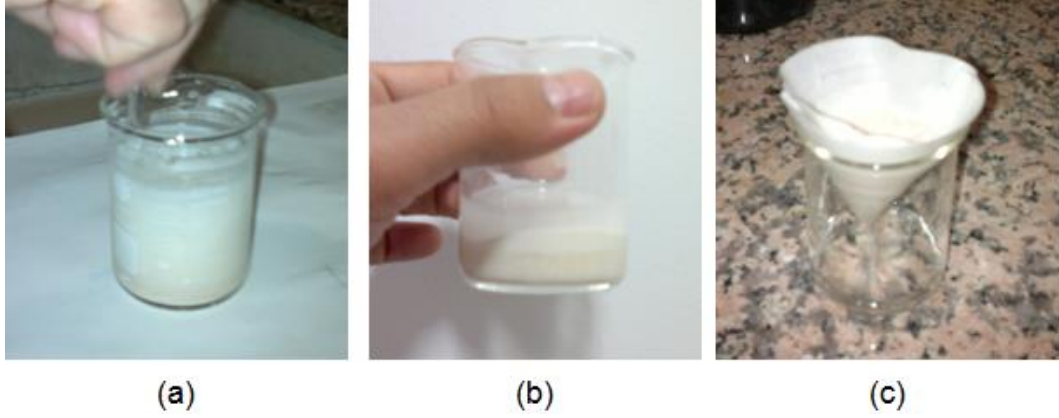


**Şekil 3.10.** Öğütme laboratuvarında yapılan işlemler: (a) Örneğin çekiçle kırılmış kaba parçalarının çanak içine konulması, (b) öğütme cihazına yerleştirme ve zaman ayarlaması, (c) öğütme sonrası örneğin çanak içindeki görünümü.

**Asitle Yıkama:** Öğütme işlemi,  $g = 2,0001$ 'de bir sinyal oluşmasına neden olan yüzey tuzaklarına yol açar. Bu sinyal, tarihleme için kullanılacak olan  $g = 2,0007$  sinyali ile örtüşerek JD değerlerinin hesaplamalarında hatalara sebep olur. Bu nedenle taneciklerin yüzeyi zayıf bir asitle yıkayarak yüzey kusurlarından arındırılmalıdır [24]. Bunun için % 0,5'lik asetik asit ( $CH_3COOH$ ) çözeltisi hazırlanarak (yaklaşık 0,01 N) örnekler 2 dakika boyunca asit çözeltisi içerisinde yıkandı. Her yıkama işlemi ardından saf su ile



birkaç defa çalkalanarak durulanan örnekler daha sonra süzgeç kağıdı üzerinde kurutuldu (Şekil 3.11).



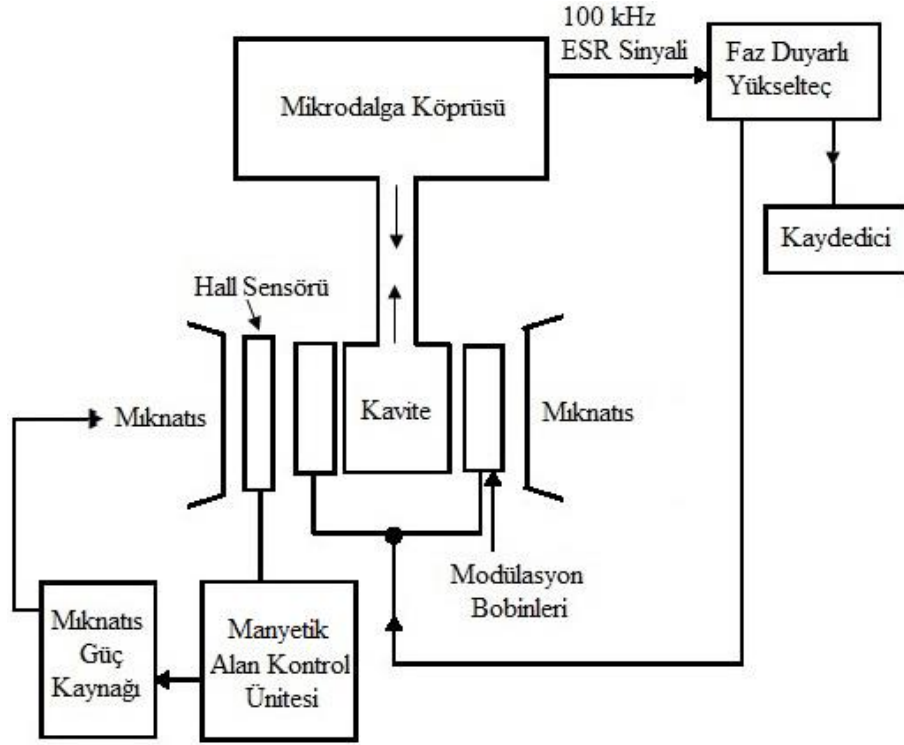
**Şekil 3.11.** (a) % 0,5'lik asetik asit çözeltisi ile yıkama, (b) saf su ile durulama (c) süzgeç kağıdında süzülerek kurutma işlemleri.

**Işınlama:** Kurutulan örnekler, farklı miktarlarda gama ışınlamasına tabi tutulması için miktarı en az 200 mg olan 16 pakete ayrıldı. Bu paketlerden biri doğal örnek olarak ayrılırken, diğerleri 150, 300, 450, 600, 900, 1200, 1500, 2291, 2670, 3151, 3637, 4191, 4580, 5305 ve 10.380 Gy doz için yapay gama ışınlamasına tabi tutuldu. 150-1500 Gy arası ışınlama işlemleri Atom Enerjisi Araştırma Enstitüsü (Riyad-Suudi Arabistan)'nde gerçekleştirildi. Işınlamada doz hızı 1,62 kGy/saat olan  $^{60}\text{Co}$  kaynağı (Gamma Cell-220) kullanıldı. 1500 Gy'den daha yüksek dozlar için Tekirdağ, Çerkezköy'de bulunan Gamma-Pak firmasına ait endüstriyel ışınlama sistemi kullanıldı.

Işınlanmış örnekler, hassas terazi kullanılarak belirlenen yaklaşık 100 mg miktarda (en çok 2 cm yükseklikte) kuvars tüplere konuldu ve ESR deneyi için hazır hale getirildi.

### **3.3. Kullanılan ESR Spektrometresi ve Çalışma Prensibi**

Deney tüplerine tartılarak konulan örneklerin spektrumları, Şekil 3.12'de blok diyagramı görülen Bruker EMX-131 model X-band ESR spektrometresi kullanılarak kaydedildi.



Şekil 3.12. X band ESR spektrometresinin blok diyagramı [22].

Manyetik rezonans deneyleri, şiddetli bir dış manyetik alan içine yerleştirilmiş manyetik alana duyarlı bir sistem üzerine uygulanan zayıf bir RF ya da MD alanı sonucu, sistemin enerji düzeyleri arasında gerçekleşen geçişleri gözlemek şeklinde yapılmaktadır [17]. Bir ESR spektrometresi temel olarak, farklı büyüklükte dış manyetik alan oluşturan bir elektromıknatıs; frekansı sabit fakat genliği değiştirilebilir MD oluşturabilen bir üreteç; MD'nin örnek üzerine gönderilmesini ve örnekten yansıyan dalganın kristal dedektöre ulaşmasını sağlayan dalga kılavuzu; örneğin yerleştirildiği ve MD'nin örnek üzerine uygulanmasını sağlayan kavite; MD'nin algılanması için kristal dedektör; bir çift modülasyon bobini; faz duyarlı dedektör ve yükselteç ile bir kaydediciden oluşur.

Spektrometrenin Bruker ER 073 W model olan ve 10" kutup yarıçapı ile 100 mm kutup aralığına sahip elektromıknatısından en yüksek  $1,6 \times 10^4$  G şiddetinde manyetik alan elde edilebilmektedir. Güç kaynağı 2,7 kW gücüne sahip ER 081 S modelidir ve 30 A'e kadar çıkış akımı verebilmektedir. Mikrodalga köprüsü olarak Bruker ER 041 XG modeli kullanılmaktadır. Bir klystron ile 8,8 – 9,6 GHz arası frekans ve 0 – 200 mW arası güce sahip MD üretilmektedir [22].

İncelenecek olan örnek, elektromanyetik dalgayı dalga kılavuzu yardımıyla örnek üzerine yoğunlaştıran kaviteye konulur. Rezonans koşullarının sağlanmadığı durumda dengeye getirilen köprü, dış manyetik alanın değeri rezonans koşulunu sağladığında örneğin mikrodalgadan enerji soğurmasıyla denge durumundan çıkar. Bunun sonucunda kristal detektör akımı değişir. Dedektör akımındaki değişim rezonans durumunda en büyük değerine ulaşır. Bu durumda manyetik alana karşı detektör akımı değerlerinin kaydedilmesiyle soğurma spektrumu oluşur. Manyetik alanı istenen değerde hassas bir şekilde kontrol etmek frekansı kontrol etmekten daha kolay olduğundan çoğu ESR spektrometresi mikrodalga frekansının sabit tutularak manyetik alanın taranması ilkesiyle çalışır. Dış manyetik alanın kavitenin iki yanına yerleştirilen modülasyon bobinleri ile modüle edilmesiyle spektrum enerji soğurma eğrisinin birinci türevi olarak çizilir [17].

Tez çalışması sırasında alınan tüm spektrum kayıtları Çizelge 3.2'de verilen deneysel koşullarda yapılmıştır.

**Çizelge 3.1.** Spektrumların kaydı için benimsenen spektrometre çalışma koşulları

Manyetik Alan	~3500 G
Manyetik Alan Tarama Genişliği	40 G
Mikrodalga Gücü	1 mW
Tarama Süresi	336 s
Modülasyon Genliği	0,4 G – 4 G
Modülasyon Frekansı	100 kHz
Mikrodalga Frekansı	~9,5 GHz
Kazanç	$5 \times 10^3 - 5 \times 10^4$

### 3.4. Doz Hızının Belirlenmesi

Bir örneğin yaşının belirlenmesi için, örneğin yuttuğu toplam JD'nin (uygulamada yapay doza karşı çizilen ESR şiddet eğrilerinden elde edilen ve JD'ye yakın bir değer alabilecek  $A_{\Sigma}$ 'nin)  $D_{top}$  toplam doz hızına (yıllık doz değerine) bölünmesi gerekir. O halde  $A_{\Sigma}$ 'nin yanı sıra  $D_{top}$  değerinin de belirlenmesi gerekir. Bu doz, madde içerisindeki ve dışarısındaki radyoaktif elementlerden ya da kozmik ışınlardan kaynaklanır.

Radyoaktif elementler, farklı karakteristik özelliklere sahip  $\alpha$ -,  $\beta$ - ve  $\gamma$ -ışınları yayarlar.  $\alpha$ -parçacıklarının (He çekirdeğinin) erişim uzaklığı çok kısadır. Örneğin, yoğunluğu  $2,5 \text{ g/cm}^3$  olan bir madde içerisinde  $\alpha$  parçacığının alabileceği yol yaklaşık  $20 \text{ } \mu\text{m}$ 'dir.  $\beta$ -parçacıklarının erişim uzaklığı ise aynı ortam için yaklaşık  $2 \text{ mm}$ 'dir. Dolayısıyla,

örneklerin 2 mm kalınlığındaki dış kısmının soyulup atılması ile dış kaynaklı  $\alpha$ - ve  $\beta$ -ışınlarının radyoaktif etkisi göz ardı edilebilir. Bu durumda, doz hızı hesaplamalarında örneğin dışındaki yapılardan gelen  $\gamma$ -ışınları ve kozmik ışınlar ile kendi içindeki radyoaktif elementlerden gelen  $\alpha$ -,  $\beta$ - ve  $\gamma$ -ışınları değerlendirilir.

$$D_{\text{top}} = D_{\text{iç}} (\alpha, \beta, \gamma) + D_{\text{dış}} (\gamma) + D_{\text{kozmetik}} \quad (3.1)$$

Burada,  $D_{\text{dış}} (\gamma)$  değeri belirlenirken gama ışınlarının örneğe ulaşana kadar zayıflaması göz önüne alınmalıdır. O halde, miktarları İndüktif Eşleşmiş Plazma - Kütle Spektrometrisi (ICP-MS) yöntemiyle hesaplanan radyoaktif elementlerin yoğunlukları kullanılarak ve onların yaydığı ışınların madde içindeki etkinlik ve zayıflaması dikkate alınmalıdır.

### 3.4.1. İç Doz Hızının Belirlenmesi

İç doz hızı, Eşitlik 3.2’de verildiği gibi, örnek içerisindeki  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$  ve  $^{40}\text{K}$  radyoaktif elementlerinin “milyonda bir - parts per million” (ppm) cinsinden verilen yoğunluğuna bağlıdır. Bunun için daha önce ilgili mağaralardan alınan örneklerden ICP-MS ile belirlenmiş yoğunluk değerleri kullanıldı [30]. ICP-MS yönteminde, iyonlaşma odasında oluşturulan hareketli iyonların hızlandırılarak gönderildikleri kütle ayırıcısında kütle/yük oranına göre birbirlerinden ayrılma özelliklerinden yararlanır [16].

İç doz hızı,

$$D_{\text{iç}} = C_{\text{U}} D_{\text{U}} + C_{\text{Th}} D_{\text{Th}} + C_{\text{K}} D_{\text{K}} + D_{\text{AIR}} \quad (3.2)$$

eşitliği ile hesaplanır. Burada  $C_{\text{U}}$ ,  $C_{\text{Th}}$ ,  $C_{\text{K}}$ , sırasıyla  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$  ve  $^{40}\text{K}$  radyoaktif elementlerinin örnek içerisindeki ppm cinsinden yoğunluğunu;  $D_{\text{U}}$ ,  $D_{\text{Th}}$ ,  $D_{\text{K}}$  ise, sırasıyla 1 ppm’lik  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$  ve  $^{40}\text{K}$ ’nın ortaya koyduğu doz hızını göstermektedir.  $C_{\text{K}}$ , bugüne kadar incelenen mağaraların kalsit yapılarında olduğu gibi, burada incelenen örneklerde de göz ardı edilebilecek bir değerde olduğundan Eşitlik 3.2’deki ilgili terim hesaba katılmadı.  $D_{\text{AIR}}$  (AIR: asitle çözünmeyen kalıntı) ise örnek içerisindeki hava boşluklarında yer alan ve asitle yıkama ile giderilemeyen mineral kalıntılarında kaynaklanan doz katkısıdır [24]. Bu katkı da, çok küçük olması nedeniyle ihmal edilmiştir.

Alfa parçacıkları, tuzaklanmış elektronlar oluşturmak açısından aynı enerjiye sahip  $\beta$ - ve  $\gamma$ -ışınlarına göre daha az verimlidirler. Bu nedenle, eşdeğer enerjiye sahip diğer ışınlar göre  $\alpha$ -dozuyla elde edilen ESR şiddeti daha küçüktür. Bu durum,  $\alpha$ -verimliliği, diğer bir

deyişle genellikle 0,1 ile 0,5 arasında değişen ve Eşitlik 3.4'te yer alan k-değeri ile ifade edilir [24].

İncelenen örneğin kendi içindeki radyoaktif parçacıkların ortaya koyduğu enerjinin yalnızca bir kısmı örnek tarafından soğurulur. Bu  $S_\alpha$ ,  $S_\beta$  ve  $S_\gamma$  öz-soğurma faktörleri,  $\alpha$ -,  $\beta$ - ve  $\gamma$ -ışınlarının örneğin büyüklüğüne bağlı olarak belirlenen  $G_\alpha$ ,  $G_\beta$  ve  $G_\gamma$  zayıflama faktörleri cinsinden

$$\begin{aligned} S_\alpha &= 1 - G_\alpha \\ S_\beta &= 1 - G_\beta \\ S_\gamma &= 1 - G_\gamma \end{aligned} \quad (3.3)$$

bağıntıları ile hesaplanır. Burada  $G_\alpha$ ,  $G_\beta$  ve  $G_\gamma$ , incelenen örneğin yoğunluğu ile ters orantılıdır. Bu değerler, Şekil 3.13'te verilen ve kalsit yoğunluğuna yakın yoğunluklar ( $2,7 \text{ g/cm}^3$ ) için çizilmiş olan grafikler kullanılarak hesaplanmıştır.

Buradan  $D_U$ ,  $D_{Th}$  doz hızları;

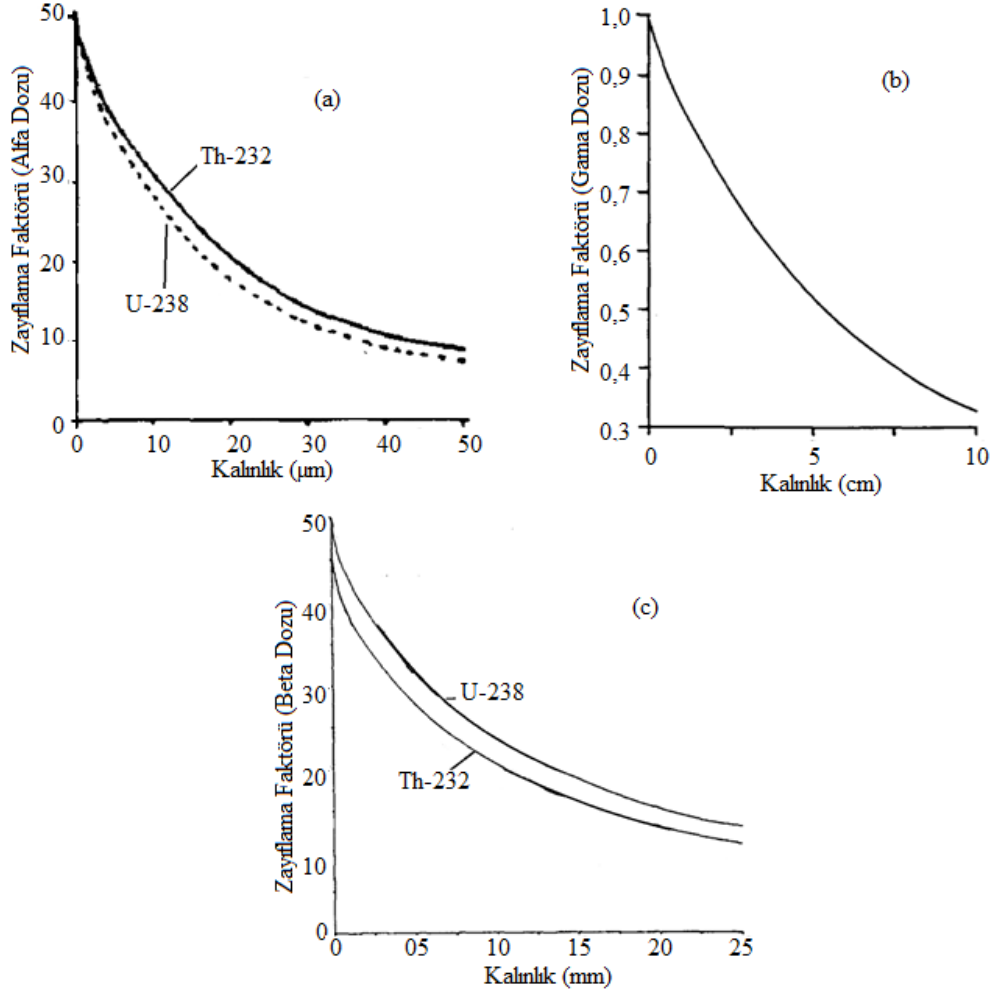
$$\begin{aligned} D_U &= k S_\alpha D_{U-238-\alpha} W(I)_\alpha + S_{238-\beta} D_{U-238-\beta} W(I)_\beta + S_\gamma D_{U-238-\gamma} W(I)_\gamma \\ &\quad + k S_\alpha D_{U-235-\alpha} W(I)_\alpha + S_{235-\beta} D_{U-235-\beta} W(I)_\beta + S_\gamma D_{U-235-\gamma} W(I)_\gamma \\ D_{Th} &= k S_\alpha D_{Th-232-\alpha} W(I)_\alpha + S_{232-\beta} D_{Th-232-\beta} W(I)_\beta + S_\gamma D_{Th-232-\gamma} W(I)_\gamma \end{aligned} \quad (3.4)$$

ile bulunur [24]. Bu eşitliklerde  $W(I)_{\alpha,\beta,\gamma}$  su içeriği düzeltme faktörüdür. Bu faktör, bugüne kadar incelenen örneklerde genellikle ihmal edilebilir düzeyde olduğu için "1" olarak alındı [24]. Ayrıca ICP-MS sonuçlarına göre  $^{235}\text{U}$  elementi yoğunluğunun da çok düşük çıkması nedeniyle, bu elemente ilişkin terimler ihmal edildi.  $D_{U-238-\alpha}$ ,  $D_{U-238-\beta}$ ,  $D_{U-238-\gamma}$  ve  $D_{Th-232-\alpha}$ ,  $D_{Th-232-\beta}$ ,  $D_{Th-232-\gamma}$  ise sırasıyla  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$  bozunum serileri için örnek içindeki 1 ppm radyoaktif safsızlık miktarına karşılık gelen  $\alpha$ -,  $\beta$ - ve  $\gamma$ - doz hızlarını mGy/yıl cinsinden ifade etmektedir. Sonuç olarak,  $D_U$  ve  $D_{Th}$ ,

$$\begin{aligned} D_U &= k S_\alpha D_{U-238-\alpha} + S_\beta D_{U-238-\beta} + S_\gamma U D_{U-238-\gamma} \\ D_{Th} &= k S_\alpha D_{Th-232-\alpha} + S_\beta D_{Th-232-\beta} + S_\gamma U D_{Th-232-\gamma} \end{aligned} \quad (3.5)$$

şeklinde bulunur. Çizelge 3.2'de  $D_{U-238-\alpha}$ ,  $D_{U-238-\beta}$ ,  $D_{U-238-\gamma}$  ve  $D_{Th-232-\alpha}$ ,  $D_{Th-232-\beta}$ ,  $D_{Th-232-\gamma}$  değerleri verilmiştir. Bu çizelgede yer alan değerler, Toryum bozunum serilerinde Toryum

kaybı olmadığı, Uranyum bozunum serilerinde ise Radon kaybı olmadığı varsayılarak elde edilmiştir.



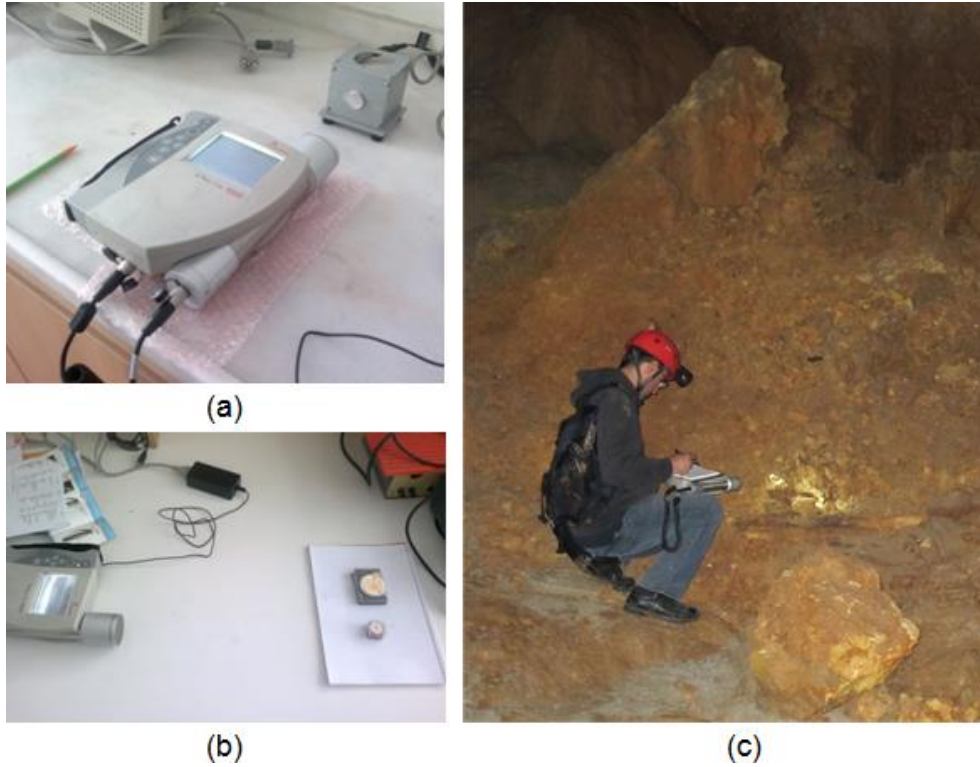
**Şekil 3.13.** Radyoaktif ışınların madde içinde zayıflamasını gösteren grafikler: (a) Alfa ışınması [23], [24], [7]; (b) gama ışınması [40], [24]; (c) beta ışınması [41], [24], [7]. Şekil a ve c’de gösterilen zayıflama faktörü değerleri yüzde olarak kullanılırken, Şekil b’de gösterilen zayıflama faktörü değerleri doğrudan oranı vermektedir.

**Çizelge 3.2.** Örnek içerisindeki Uranyum ve Toryum bozunumundan kaynaklanan  $\alpha$ -,  $\beta$ - ve  $\gamma$ -ışınlarının doz hızları 1 ppm safsızlık miktarı için elde edilmiştir [42].

	$D_{\alpha}$ (mGy/y)	$D_{\beta}$ (mGy/y)	$D_{\gamma}$ (mGy/y)
Uranyum bozunum serileri	2,795	0,1457	0,1116
Toryum bozunum serileri	0,7375	0,0277	0,0479

### 3.4.2. Dış Doz Hızının Belirlenmesi

Dış doz hızı, örneğin etkisinde kaldığı iç kaynaklı olmayan dozu belirlemek için gereklidir. Dış doz hızı, “örneğin çevresindeki ana kayaların içerdiği radyoaktif element içeriğine dayalı hesaplama”, “TL dozimetresi kullanılarak dolaylı ölçme” ya da “portatif gama spektrometresi ile yerinde doğrudan ölçme” gibi yollarla belirlenir [23]. Bu çalışmada, dış doz hızı iki yolla belirlendi. İlk olarak, toplam dış doz hızının yerinde ölçümü portatif bir spektrometre kullanılarak H.Ü. BAB tarafından desteklenen “Çatalhöyük çevresinde bulunan mağaraların doz hızlarının belirlenmesi” başlıklı proje kapsamında gerçekleştirildi [43]. Ölçümler “Inspector 1000” gama spektrometresi (Şekil 3.14 a) ile gerçekleştirildi [44]. Ölçümlere toprak üstü ve bina içi ortamlarda deneme amaçlı kontrol ve kalibrasyon çalışmaları ile başlandı (Şekil 3.14 b).



Şekil 3.14. (a) Mağara içi doz hızı ölçümlerinde kullanılan gama spektrometresi; (b) Alıştırmaya yönelik yapılan ön çalışma; (c) Mağara içi ölçüm (İncesu Mağarası).

**1. Yöntem - Portatif  $\gamma$ -Spektrometresi (Inspector 1000):** Inspector 1000, içerisinde Geiger Müller sayacı bulunan bir sintilasyon dedektörüdür. Sintilasyon dedektörüne gelen ışınlar dedektör içindeki atomları uyararak atomların görünür bölgede ışık yaymalarına yol açarlar. Işık foto duyarlı yüzeye çarparak her bir foton için bir fotoelektron salınmasına

neden olur. Bu ikincil elektronlar foto çoğaltıcı tüple çoğaltılır, hızlandırılır ve çıkış pulsları şekline dönüştürülür [45]. İyi bir dedektör için gerekli sintilasyon malzemesinin özellikleri; şeffaflık, büyük ebatlarda bulunabilme ve soğurulan gama ışını enerjisiyle orantılı olarak yüksek miktarda ışık üretebilme olarak sıralanabilir. Çok çeşitli plastik malzemenin yanı sıra Talyum katkılı NaI ve CsI kristalleri yaygın şekilde kullanılmaktadır. NaI,  $\gamma$ -ışını çözünürlüğü ve ekonomik olması bakımından kullanışlılığı nedeniyle gama dedektörlerinde yaygın bir biçimde kullanılır [46].

Inspector 1000, Na(Tl) kristaline sahip yüksek performanslı bir sintilasyon dedektörüdür. Ekranı renkli ve yüksek çözünürlüklüdür. Dolayısıyla taşınabilir olmanın yanı sıra her türlü hava şartlarında kolayca okunabilir bir ekrana sahiptir. Dedektörün çalışma sıcaklığı -20 ile +50 °C arasındadır. Düşme ve sıvı dökülmelerine karşı dayanıklı olmasının yanı sıra prob bağlantı kablosunun 3-4 metreye kadar uzayabilmesi sayesinde ulaşılması zor noktalara prob uzatılarak her türlü radyasyon tespit ve kaynak yer saptama konusunda rahatça kullanılabilir. Batarya ömrünün ortalama 9 saat olması arazide kullanımını kolaylaştırmaktadır. Ayrıca kullanıcı dostu ara yüzü sayesinde, kapsamlı bir eğitime ihtiyaç duyulmadan kullanılabilir. Inspector 1000 ile gerçek zamanlı izotop tanımlama ve sınıflama yapılabilir. “Gama Yer Belirleme Modu” ile kaynakların yeri hızlı bir şekilde tespit edilebilir. Inspector 1000, ayrıca nötron probu takılarak da kullanılabilir [45].

Böylece özellikleri verilen bu cihaz kullanılarak, mağara içlerinde örneklerin toplandığı noktalarda ve mağaranın değişik yerlerinde çoklu ölçümler alındı (Şekil 3.14 c). Yaş hesaplamalarında bu ölçümlerin ağırlıklı ortalaması kullanıldı. Gama spektrometresi ile yapılan ölçümlerin sonuçları, kozmik doz dâhil olmak üzere mağara içinde mevcut tüm dozu içerdiği varsayılarak hesaplamalara dâhil edildi.

**2. Yöntem – Radyoaktif Çekirdek Yoğunlukları Kullanılarak Hesaplama:** Doz hızını belirlemek için bir diğer yol ise mağaranın ana kayacı içerisindeki radyoaktif çekirdeklerden kaynaklanan doz hızını ( $D_{sed}$ ) ve mağara içine ulaşabilen kozmik ışınların doz hızını ( $D_{koz}$ ) hesaplayarak toplamaktır.

$$D_{dış} = D_{sed} + D_{koz} \quad (3.6)$$

Mağaranın ana kayacında bulunan ve dış doz kaynağı olan radyoaktif çekirdeklerin yoğunlukları, ilgili mağaralardan toplanmış örneklerin ICP-MS sonuçlarının ortalaması



alınarak hesaplandı. Su katkısının ihmal edilmesi, en az 2 mm kalınlığındaki dış kısmı soyulan örneğin içerisine  $\alpha$ - ve  $\beta$ -ışınlarının etki etmemesi ve kayaç içerisinde  $^{238}\text{U}$  ve  $^{232}\text{Th}$  dışındaki  $^{40}\text{K}$  radyoaktif çekirdeğinin ihmal edilebilir yoğunlukta olması nedeniyle, kayaç kaynaklı dış doz hızı;

$$D_{\text{sed}} = C_{\text{U}} G_{\gamma} D_{\text{U-238-}\gamma} + C_{\text{Th}} G_{\gamma} D_{\text{Th-232-}\gamma} \quad (3.7)$$

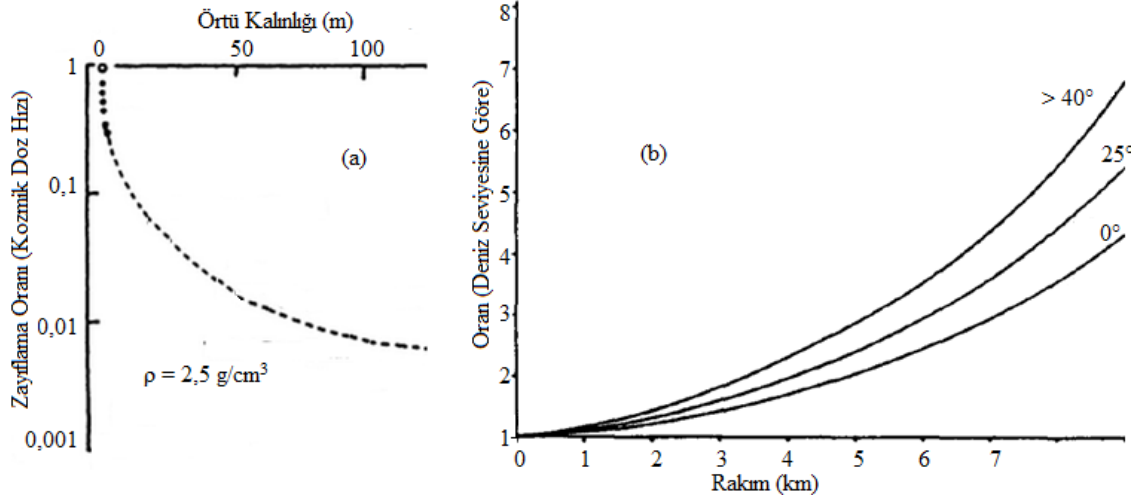
bağıntısı ile hesaplanır [24]. Kozmik doz hızı, mağara çökelleri içerisinde ilerledikçe azalır (Şekil 3.15 a). Ayrıca yerin manyetik alanı nedeniyle kozmik doz ekvatora doğru yaklaşık %7 oranında azalır. Bu değişim  $40^\circ$  enleminden sonra durur. Fakat, buna ek olarak yüksek rakımlı noktalarda enlem etkisi artar (Şekil 3.15 b) [24]. Mağara üzerindeki kozmik doz, mağaranın konumu dikkate alınarak, Şekil 3.15'de verilen grafiklerden yararlanılarak hesaplandı.

Deniz seviyesinde kozmik doz hızı 0,28 mGy/y'dır [24]. Örneklerin bulunduğu konumlarda kozmik doz hızı hesaplamalarında mağaraların rakımları kullanılırken tümünün yaklaşık  $40^\circ$  enleminde olduğu ve örtü kalınlıklarının 5-20 m olduğu dikkate alındı.

Bulunan örneğin bulunduğu katmanda dış doz hızının etkisinin belirlenmesi için

$$D_{av}(X_f) = \left( \frac{D_E}{\mu X_f} \right) (1 - e^{-\mu X_f}) \quad (3.8)$$

bağıntısı kullanıldı. Burada  $D_E$ , dicit yüzeyindeki doz (dış doz) hızını;  $X_f$ , katmanın dicitin yüzeyine göre derinliğini,  $\mu$ , kalsitin soğurma katsayısını ( $0,136 \text{ cm}^{-1}$ );  $D_{av}(X_f)$  ise  $X_f$  derinliğindeki katmanın etkisinde kaldığı doz hızını göstermektedir [48].



**Şekil 3.15.** (a) Çeşitli mağara ve tünellerde ölçülmüş kozmik doz değerleriyle elde edilmiş, örtü kalınlığına göre kozmik doz soğurum eğrisi [47], [7]. (b) Farklı enlemler için, kozmik doz hızının rakıma bağlı olarak deniz seviyesindeki değerine oranı [7], [24].

## 4. DENEY SONUCU ELDE EDİLEN BULGULAR

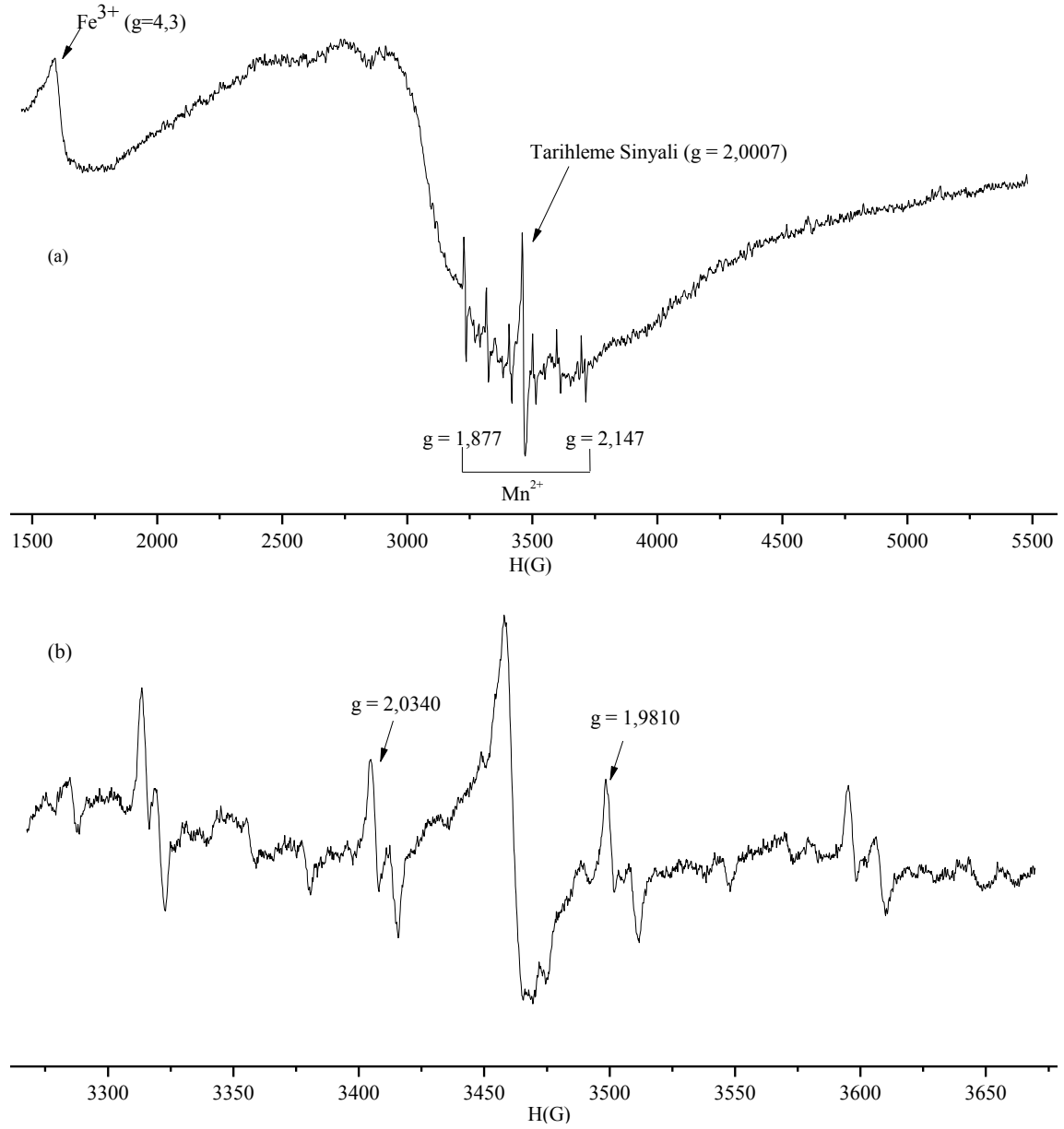
Bu tez çalışması kapsamında incelenen İncesu, İncikini, Hatçeninini, Damlataş ve Obruk-Sızma mağaralarından toplanan örneklerin, doğal ve yapay ışınlanmış halleri için ESR deneyleri yapıldı. Bu bölümde, kaydedilen ESR spektrumlarına ilişkin bilgiler, bu spektrumlarla elde edilen şiddet-doza eğrileri, bu eğrilerden yola çıkarak hesaplanan  $A_{\Sigma}$  değerleri, örnekler için yıllık doz (doz hızı) değerleri ve sonuç olarak hesaplanan yaş değerleri sunulmuştur.

### 4.1. Kalsit Örneklerinde ESR Spektrumları ve Tarihleme İçin Kullanılacak Sinyallerin Belirlenmesi

Asitle yıkanmamış (ham), asitle yıkanmış ve yapay yolla ışınlanmamış (doğal) ve asitle yıkama işleminden sonra yapay yolla ışınlanmış örnekler üzerinde yapılan ESR deneylerinde kaydedilen örnekler incelendi.

Örneklerin ESR spektrumları öncelikle 4000 G tarama alanında, Çizelge 3.2'de belirtilen deneysel koşullarda kaydedildi. Şekil 4.1 a, asitle yıkama işleminden geçirilmiş IC3-D2 örneğinin ESR spektrumunu göstermektedir. Burada da görülebileceği gibi, bu tip örnekler için ait spektrumlar,  $Fe^{3+}$ ,  $Mn^{2+}$  ve örneğin ışınlamaya duyarlı ve tarihleme için kullanılabilir merkezleri olmak üzere üç temel sinyal grubu içermektedir. Burada  $Fe^{3+}$  merkezinin g değeri 4,3'tür ve geniş bir çizgi genişliğine sahiptir. Bu merkez ışınlamaya duyarlı olmadığından tarihleme amacıyla kullanılmamaktadır.

Öte yandan, Şekil 4.1 a ve b'deki altı çizgiden oluşan  $Mn^{2+}$  merkezi kaynaklı sinyal grubu için g değeri 1,877 - 2,147 aralığındadır. Örneklerin içerisindeki  $Mn^{2+}$  iyonlarının oluşturduğu safsızlık, bu altı çizginin oluşmasına neden olmaktadır.  $Mn^{2+}$  iyonunun çekirdek spini  $I=5/2$ 'dir ve çiftlenimsiz elektronla aşırı ince yapı etkileşimi sonucunda  $2I+1 = 6$  çizgili bir spektrum ortaya çıkar.



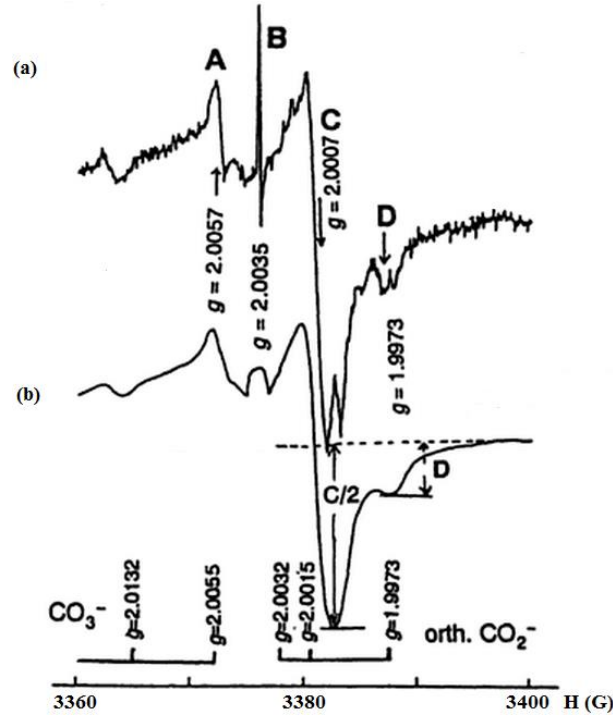
**Şekil 4.1.** IC3-D2 örneğinin asitle yıkama işleminin ardından (a) 4000 G tarama alanında, (b) 400 G tarama alanında kaydedilen ESR spektrumu.

#### 4.1.1. Kalsit Örneklerinde Işınlamaya Duyarlı Paramanyetik Merkezler

Bir doğal kalsit örneğine (mağara çökeli) ait ESR spektrumunda, ışınlama kaynaklı çok sayıda kusur arasından,  $CaCO_3$  kristali içerisindeki kusurlara ilişkin yapılan sistematik çalışmalar sonucunda tarihleme çalışmalarına uygun 4 tür sinyal grubu olduğu tespit edilmiş ve bu sinyallere sebep olan merkezler A, B, C ve D olarak isimlendirilmiştir [7], [49].

**A sinyali:**  $g_A = 2,0057$  değerinde görülür ve serbestçe dönen  $\text{SO}_2^-$  'den kaynaklanır. A sinyalinin şiddetinin gama ışınlaması ile açık bir şekilde artmadığı, hatta bazı durumlarda, özellikle yaşlı örneklerde azaldığı literatürde belirtilmiştir [7]. Bu durum çalışma konusu örneklerde de gözlenmiştir.

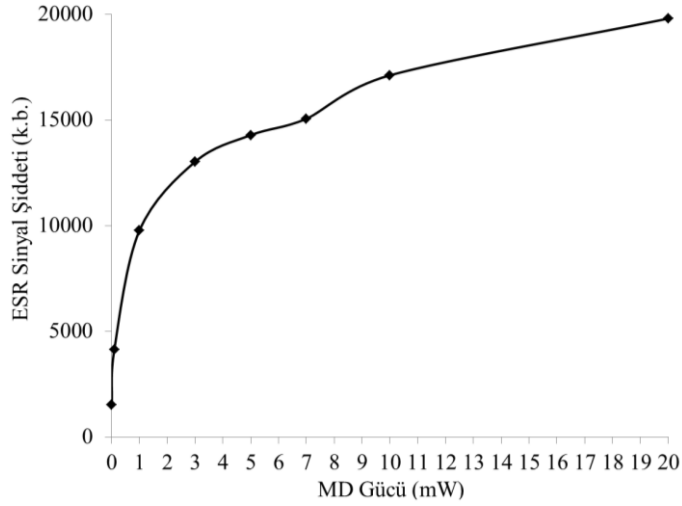
**B sinyali:**  $g_B = 2,0036$  değerinde görülür ve ekselel  $\text{SO}_3^-$  'den kaynaklanır. B sinyalinin şiddeti gama ışınlaması ile artar fakat MD gücünün 0,01 mW gibi düşük olduğu değerlerde çalışılması gerekir.



**Şekil 4.2.** Akiyoshi Mağarası'ndan (Japonya) alınan bir sarkıtta ait (a) 0,4 G ve (b) 4 G modülasyon genliği ile kaydedilen ESR spektrumları. Işınlamaya duyarlı sinyaller A, B, C ve D olarak tanımlanmıştır [7].

**C sinyali:** Yönsemez bir sinyaldir.  $g_C = 2,0007$  değerinde görülür ve serbestçe dönen  $\text{CO}_2^-$  'den kaynaklanır. Pratikte bu sinyal tarihleme sinyali olarak kullanılır çünkü bu sinyale ilişkin şiddet, örneğin yaşı ile doğru orantılıdır ve gama ışınlaması ile bu sinyalin şiddeti artar. Bu çalışmada da, tarihleme sinyali olarak C sinyali kullanılmıştır. Bu sinyalin, farklı sinyallerin üst üste binmesiyle oluşmasından dolayı, yüksek manyetik alan tarafındaki kısmının tepe değerinin alınabileceği belirtilmiştir [7]. Ancak burada incelenen örneklere ilişkin spektrumların değerlendirilmesi sonucunda, tepeden tepeye değer

alınmasıyla da aynı sonuca ulaşılabildiği görülmüştür. Ayrıca sıfır çizgisinin (baseline) belirlenmesindeki hatadan arınılması bakımından da bu seçimin daha uygun olduğu görülmüştür. Bu sinyalin ölçümünde farklı MD gücü değerleri önerilmiş olsa da, burada ayrıntılı bir MD gücü doyum çalışması yapıldı. Bu amaçla örneklerin ESR spektrumlarının hangi MD güç değerinde alınması gerektiğine karar vermek üzere, 150 Gy yapay dozla ışınlanmış IC3-E1-1 ve 900 Gy yapay dozla ışınlanmış IC3-D1-5 örnekleri için MD doyum çalışması yapıldı. Modülasyon genliğinin 0,4 G, 2 G ve 4 G değerlerinde 0,01'den 20 mW'a değişen MD güç değerleri için ESR spektrumları kaydedildi. ESR tarihlemede MD gücü arttıkça sinyal şiddetinin artması (ya da MD doyumundan uzak olunması) gerektiği için çalışmada kullanılacak MD gücü için bir değer belirlendi (Şekil 4.3). Bu değer literatürde karşılaşılan değerlere de uygun olması nedeniyle, ESR deneylerinde 1 mW olarak seçildi [7].

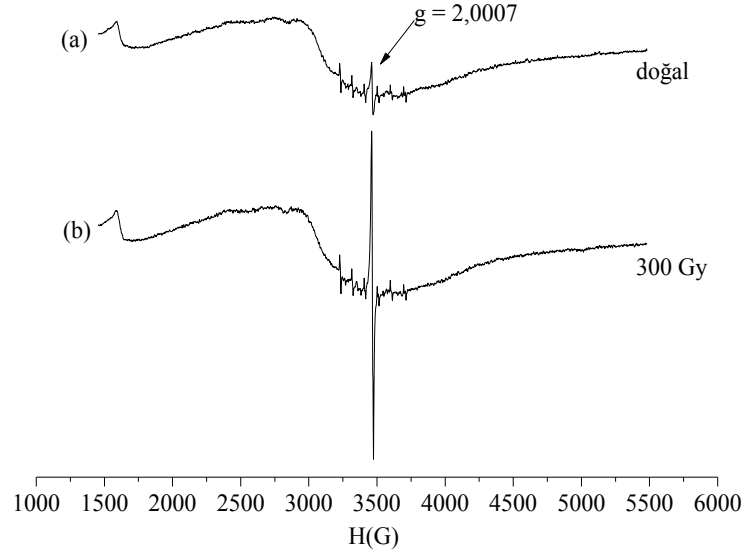


**Şekil 4.3.** MD doyum çalışması. 150 Gy yapay dozla ışınlanmış IC3-E1-1 örneği için 0,01 mW ile 20 mW değerleri arasında uygulanan MD gücüne karşı elde edilen 2,0007 sinyali için ESR şiddeti eğrisi

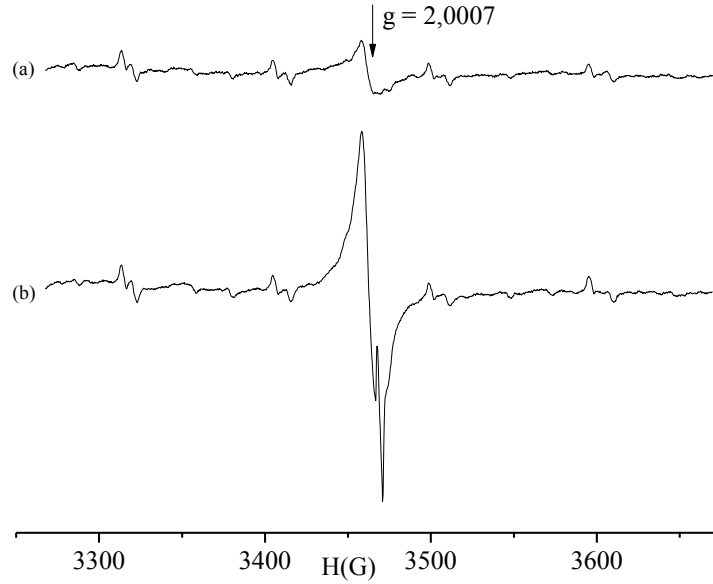
**D sinyali:**  $g_D = 1,9973$  değerinde görülür ve ortorombik ve eksenel  $CO_2^-$  'den kaynaklanır. Bu sinyal, doz ekleme yöntemi kullanılarak yapılan hesaplamalarda C sinyaline göre daha düşük  $A_\Sigma$  değerleri veren geniş ve kararsız bir bileşene sahiptir [50].

Şekil 4.4 a ve b, doğal ve 300 Gy ile ışınlanmış IC3-D2 örneğine ilişkin ESR spektrumlarını göstermektedir. Burada  $g = 2,0007$  civarındaki tarihleme sinyalinin şiddetinin ışınlama işlemiyle daha da arttığı görülmektedir. Şekil 4.5 a ve b ise aynı sinyali,

400 G tarama genişliğinde, daha belirgin bir biçimde ortaya koymaktadır. Öte yandan, Şekil 4.6, doğal ve ışınlanmış IC3-B ile IK-O örneklerine ilişkin spektrumları vermektedir.

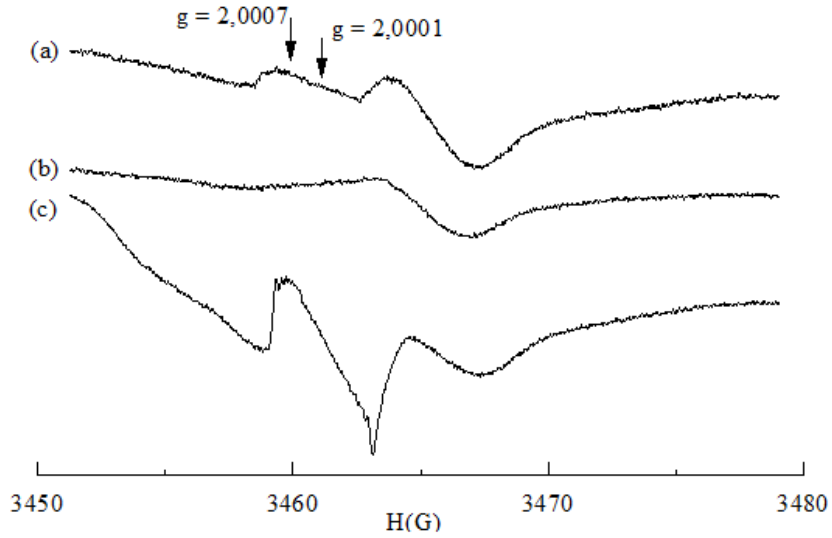


Şekil 4.4. (a) IC3-D2 örneğinin asitle yıkama işleminin ardından (doğal) 400 G tarama alanında kaydedilen ESR spektrumu. (b) 300 Gy dozla yapay ışınlanmış örneğin aynı aralık ve koşullardaki spektrumu.



Şekil 4.5. (a) IC3-D2 örneğinin asitle yıkama işleminin ardından (doğal) 400 G tarama alanında kaydedilen ESR spektrumu. (b) 300 Gy dozla yapay ışınlanmış örneğin aynı aralık ve koşullardaki spektrumu.

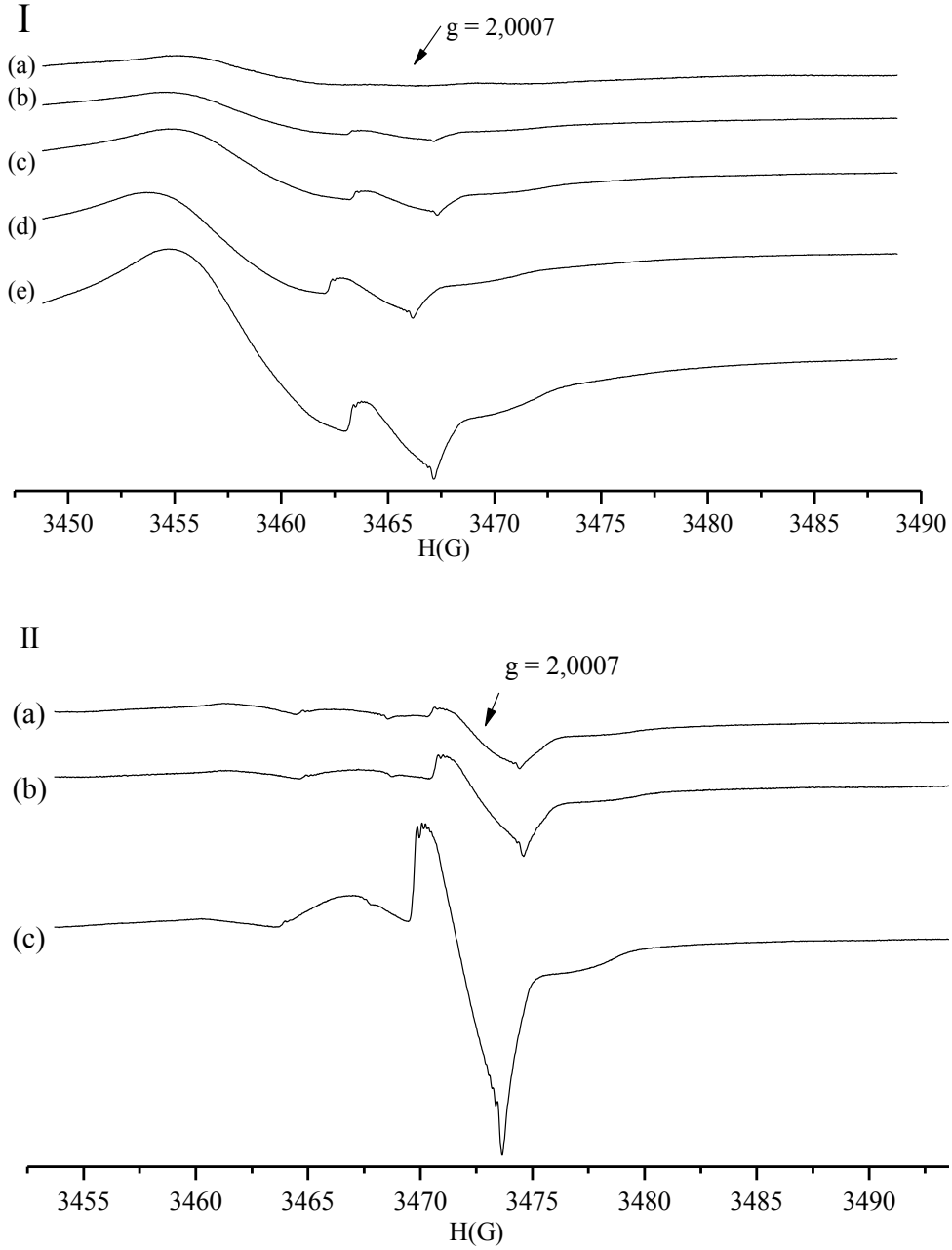
Mn<sup>2+</sup> iyonu kaynaklı 3. ve 4. çizgilerin arasında yer alan ve  $g = 2$  civarında olan ışınlamaya duyarlı sinyallerin, kalsitin kusur merkezlerinden kaynaklandığı bilinmektedir. Bu paramanyetik merkezlerden bazıları  $\text{CO}_3^-$ ,  $\text{CO}_3^{3-}$ ,  $\text{CO}_2^-$  'dir. Bu merkezlerin detaylı olarak incelenmesi ve şiddet-doza eğrilerinin çizilebilmesi amacıyla, Çizelge 3.2'de belirtilen koşullarla, 40 G tarama alanı kullanılarak tüm örneklerin ESR spektrumları kaydedildi. Asitle yıkanmış ve 55,12 Gy doz ile ışınlanmış OS-A örneğinin spektrumu, hiç işlem yapılmamış doğal olanları ile karşılaştırıldığında, ışınlama işleminin 2,0007 merkezinde belirgin bir artışa neden olduğu görülmektedir (Şekil 4.6). Öğütme işlemi sırasında oluşan kusurlara ilişkin  $g = 2,0001$  sinyalinin tarihlendirme sinyali olan  $g = 2,0007$  ile çakışmasına karşın (Şekil 4.6 a), bu sinyal asitle yıkama işlemiyle oldukça zayıfladığından gözlenemez (Şekil 4.6 b) [24].



**Şekil 4.6.** OS-A örneğinin 40 G tarama alanı kullanılarak kaydedilen ESR spektrumları: (a) Hiç işlem görmemiş (doğal) örnek. (b) Asitle yıkanmış doğal örnek. (c) 55,12 Gy doz ile ışınlanmış örnek.

Kristal yapının toz haline getirilmesi sonucunda yapı içerisinde ve kusur merkezlerinde gelişigüzel yönelimler elde edilir. Böylece elde edilen ESR spektrumları, çeşitli merkezlerden kaynaklanan sinyallerin toplamı olan sinyallerden oluşur.





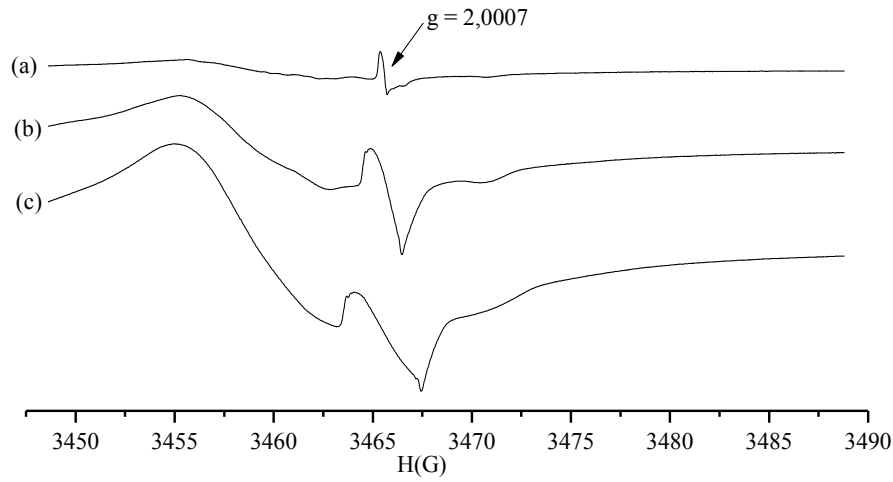
**Şekil 4.7. (I)** IC3-B örneğinin 40 G tarama alanı kullanılarak kaydedilen ESR spektrumları: **(a)** Asitle yıkanmış doğal örnek. **(b)** 150 Gy doz ile ışınlanmış örnek. **(c)** 300 Gy doz ile ışınlanmış örnek. **(d)** 450 Gy doz ile ışınlanmış örnek. **(e)** 900 Gy doz ile ışınlanmış örnek. **(II)** IK-O örneğinin 40 G tarama alanı kullanılarak kaydedilen ESR spektrumları: **(a)** 55,12 Gy doz ile ışınlanmış örnek. **(b)** 206,7 Gy doz ile ışınlanmış örnek. **(c)** 826,8 Gy doz ile ışınlanmış örnek.

Şekil 4.7 I'de, IC3-B örneğinin C sinyali olarak isimlendirilen  $g = 2,0007$ 'deki sinyalin farklı yapay dozlarla ışınlanması sonucu gelişimine ilişkin spektrum görüntüleri yer almaktadır. Şekil 4.7 II'de ise IK-O örneği için benzer bir görüntü yer almaktadır. Buradan

C sinyalinin çalışılan örnekler açısından tarihlemeye uygun tek sinyal olduğu görülmektedir.

#### 4.2. Büyüme Eğrileri ve $A_{\Sigma}$ Değerleri

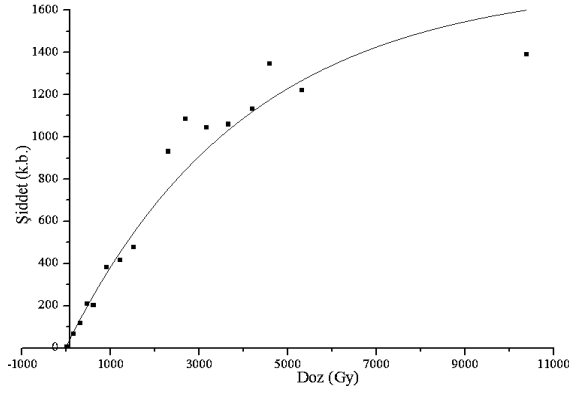
Şekil 4.8’de grldğu gibi, asitle yıkanmış doğal örnekten başlanarak, yapay yolla işınlanmış tüm örnekler için ESR spektrumları kaydedildi. Modülasyon genliği olarak 0,4, 2 ve 4 G için denemeler yapıldı. Literatürde nerilen bu değerlerden 2 G için alınan spektrumlarla 4 G için olanların görünüm ve ölçüm bakımından birbirlerine benzer oldukları saptandı.



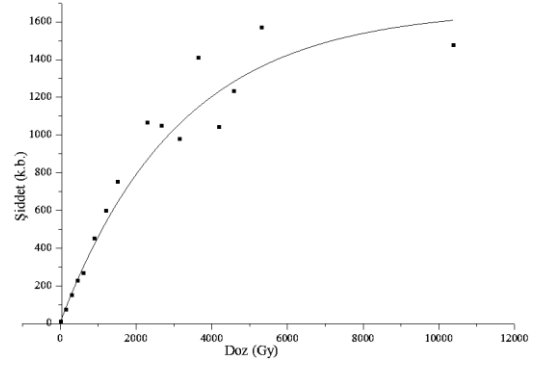
Şekil 4.8. Yapay işınlama dozu 2291 Gy olan IC3-B-8 örneğinin (a) 0,4 G, (b) 2 G (c) 4 G modülasyon genliği kullanılarak kaydedilen ESR spektrumları.

Öte yandan, 0,4 G için kaydedilen spektrumlarda, spektrumları değerlendirmeyi zorlaştıran 2,0001 sinyali görüldü. Böylece, modülasyon genliği olarak 4 G seçildi ve spektrumlar kaydedildi.

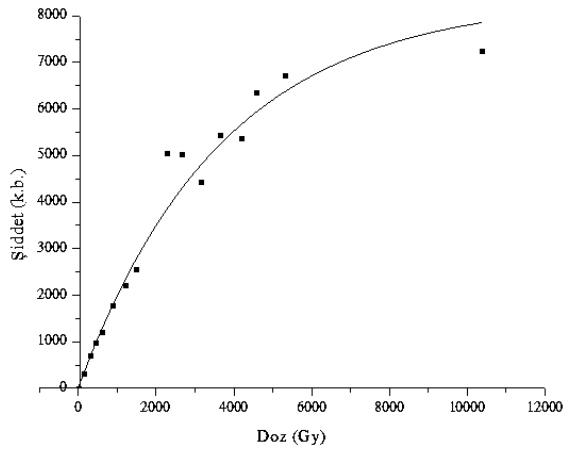
Spektrumlarda C sinyali olarak ele alınan sinyalin ( $g = 2,0007$ ) tepeden tepeye değerleri ölçülerek tüm örnekler için Şiddet – doz grafikleri elde edildi. Bu grafiklerdeki veri noktaları, sinyal Şiddetinin yapay dozun artışıyla değişimi doğrusal ise EŞitlik 2.17; bu değişim artan dozlarla doyuma gidiyorsa EŞitlik 2.18’de verilen bağıntılarla benzeştirilebilir. Işınlama dozunun özellikle 10 kGy gibi yüksek doz değerleri için büyüme eğrilerinde doyuma ulaşma eğilimi görüldü. Bu nedenle, bilgisayar yardımıyla yapılan benzetişimler ile büyüme eğrileri birer doyum eğrisi olarak oluşturuldu. Bu benzetişim eğrilerinden bazıları Şekil 4.9’da görülmektedir.



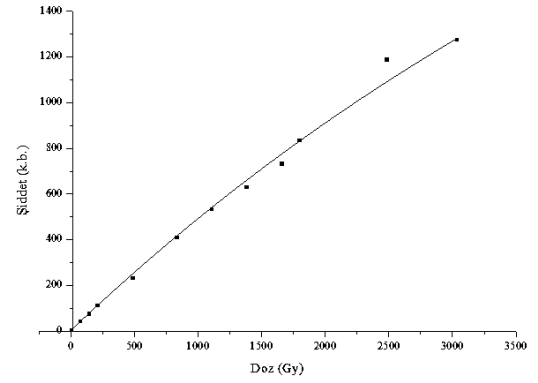
(a)



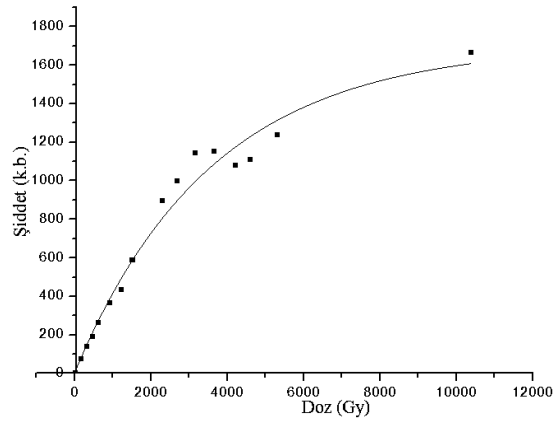
(b)



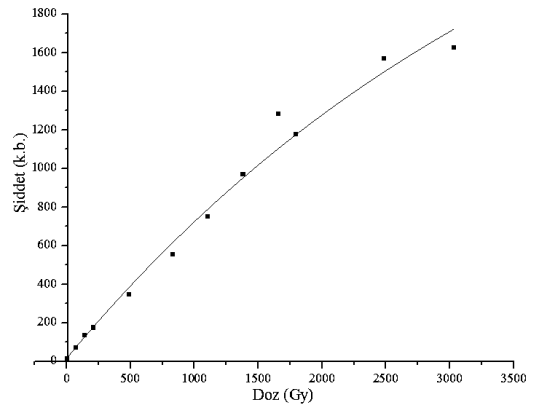
(c)



(d)



(e)



(f)

**Şekil 4.9.** (a) IC3-A, (b) IC3-B, (c) IC3-D1, (d) Hai-A, (e) IC3-G2, (f) DY-B örneklerinin 4G modülasyon genliği ile kaydedilmiş ESR spektrumlarından, C sinyalinin şiddet değişiminin okunması ile elde edilen şiddet-doza eğrileri.

Büyüme eğrilerinin yatay eksenini kestiği noktanın mutlak değeri  $A_{\Sigma}$  değerini verir. Bu değerlerin tümü Çizelge 4.1’de verilmektedir.

**Çizelge 4-1.** Çalışılan örnekler için çizilen şiddet-doza büyüme eğrilerinden elde edilen  $A_{\Sigma}$  değerleri.

Örnek Kodu	$A_{\Sigma}$ (Gy)	Örnek Kodu	$A_{\Sigma}$ (Gy)	Örnek Kodu	$A_{\Sigma}$ (Gy)
CH1	78,59 ± 14,00	IC-B	0,76 ± 0,04	IC3 A	22,90 ± 3,48
CH2	53,63 ± 4,20	IC-D	17,58 ± 1,19	IC3 B	19,84 ± 3,04
CH-B	22,80 ± 4,92	IC-E	16,44 ± 2,38	IC3 C	24,04 ± 3,48
CH-K	12,59 ± 4,48			IC3 D1	1,87 ± 0,20
		OS-A	14,18 ± 1,46	IC3 D2	9,48 ± 1,00
Hai-A	8,63 ± 0,54	OS-B	5,06 ± 0,41	IC3 E1	7,35 ± 1,08
Hai-B	3,25 ± 0,46	OS-C	6,25 ± 0,37	IC3 E2	13,89 ± 1,76
Hai-C	3,16 ± 0,51	OS-D	8,57 ± 0,92	IC3 ED	24,95 ± 4,10
		OS-E	41,89 ± 5,83	IC3 F1	30,34 ± 5,59
IK-D	7,17 ± 1,04	OS-F	21,28 ± 2,32	IC3 F2	33,86 ± 8,34
IK-S	91,76 ± 19,49			IC3 G1	7,57 ± 0,88
IK-O	77,07 ± 19,98	DY-B	20,62 ± 2,07	IC3 G2	11,80 ± 1,08
				IC3 H	20,53 ± 7,09

### 4.3. Doz Hızı Değerleri

Örneğin etkisinde kaldığı toplam doz hızı, Eşitlik 3.1 kullanılarak hesaplandı. Bunun için iç doz hızı ve örneğin dışından gelen dış doz hızı belirlendi. İç doz hızı ve dış doz hızının belirlenmesinde radyoaktif çekirdek yoğunlukları kullanılırken, dış doz hızı için ayrıca doğrudan (yerinde) ölçüm yöntemi kullanıldı.

#### 4.3.1. İç Doz Hızı

İç doz, örneğin içerdiği radyoaktif çekirdeklerin yoğunluğu ve  $\alpha$ -,  $\beta$ - ve  $\gamma$ - ışınlarının soğurulma karakterleri dikkate alınarak hesaplandı. ICP-MS yöntemiyle incelenmiş örneklerin içerdiği  $^{238}\text{U}$  ve  $^{232}\text{Th}$  radyoaktif çekirdeklerinin yoğunlukları Çizelge 4.2’de verilirken,  $^{40}\text{K}$ ’a ilişkin yoğunluklar ölçülemeyecek kadar düşük olduğundan göz önüne alınmamıştır.

**Çizelge 4.2.** İncelenen örneklerin içerdiği radyoaktif çekirdeklerin yoğunluğuna ilişkin ICP-MS yöntemi ile bulunan sonuçlar. (Cihazın verdiği bazı hata değerleri 1/10.000 mertebesinde daha küçük olduğundan bu değerlere ait hata 0 olarak görünmektedir.)

Örnek Kodu	$C_{U-238}$ (ppm)	$C_{Th-232}$ (ppm)
CH1	$0,3882 \pm 0,0001$	$0,0047 \pm 0,0000$
CH2	$0,2594 \pm 0,0001$	$0,0036 \pm 0,0000$
CH-B	$0,0250 \pm 0,0000$	$0,0021 \pm 0,0000$
CH-K	$0,0205 \pm 0,0000$	$0,0012 \pm 0,0000$
Hai-A	$0,2822 \pm 0,0001$	$0,0001 \pm 0,0000$
Hai-B	$0,3004 \pm 0,0001$	$0,0015 \pm 0,0000$
Hai-C	$0,2957 \pm 0,0001$	$0,0013 \pm 0,0000$
IK-D	$0,1623 \pm 0,0000$	$0,0095 \pm 0,0000$
IK-S	$0,1394 \pm 0,0001$	$0,0030 \pm 0,0000$
IK-O	$0,1078 \pm 0,0001$	$0,0024 \pm 0,0000$
IC-B	$0,1049 \pm 0,0001$	$0,0145 \pm 0,0000$
IC-D	$0,0958 \pm 0,0000$	$0,0402 \pm 0,0001$
IC-E	$0,1037 \pm 0,0001$	$0,0179 \pm 0,0001$
OS-A	$0,1468 \pm 0,0001$	$0,0083 \pm 0,0000$
OS-B	$0,1737 \pm 0,0001$	$0,0837 \pm 0,0002$
OS-C	$0,1745 \pm 0,0001$	$0,0349 \pm 0,0002$
OS-D	$0,1416 \pm 0,0001$	$0,0549 \pm 0,0002$
OS-E	$0,2477 \pm 0,0001$	$0,0051 \pm 0,0000$
OS-F	$0,1625 \pm 0,0001$	$0,0225 \pm 0,0000$
DY-B	$0,1098 \pm 0,0000$	$0,0064 \pm 0,0000$

Örneklerin Eşitlik 3.2 ile verilen iç doz hızları, Eşitlik 3.5'ten yararlanılarak hesaplandı. İlgili parametrelerden zayıflama faktörleri Şekil 3.13'ten, her bir radyoaktif çekirdek için doz hızı değerleri ( $D_{U-238}$  ve  $D_{Th-232}$ ) Çizelge 3.2'den bulunurken,  $C_{U-238}$  ve  $C_{Th-232}$  değerleri için Çizelge 4.2'den yararlanıldı. Hesaplama, farklı k değerleri için tekrarlandı. Elde edilen sonuçlar Çizelge 4.3'te gösterilmektedir.

**Çizelge 4.3.** Örneklerin etkisinde kaldığı toplam iç doz hızları.

Örnek Kodu	$D_{iç}$ (mGy/yıl)			
	$k = 0,05$	$k = 0,1$	$k = 0,3$	$k = 0,5$
CH1	0,097	0,147	0,351	0,554
CH2	0,065	0,099	0,235	0,370
CH-B	0,008	0,011	0,024	0,038
CH-K	0,006	0,008	0,019	0,030
Hai-A	0,086	0,123	0,271	0,418
Hai-B	0,086	0,125	0,282	0,439
Hai-C	0,088	0,126	0,281	0,436
IK-D	0,044	0,065	0,151	0,237
IK-S	0,037	0,056	0,129	0,202
IK-O	0,029	0,043	0,100	0,156
IC-B	0,032	0,046	0,103	0,160
IC-D	0,030	0,044	0,099	0,155
IC-E	0,032	0,046	0,103	0,159
OS-A	0,041	0,060	0,138	0,216
OS-B	0,058	0,083	0,185	0,287
OS-C	0,056	0,080	0,176	0,272
OS-D	0,049	0,070	0,151	0,232
OS-E	0,081	0,114	0,244	0,374
OS-F	0,040	0,062	0,150	0,237
DY-B	0,031	0,046	0,104	0,162

#### 4.3.2. Dış Doz Hızı

Dış doz hızının belirlenmesi için öncelikle gamma spektrometresi ile yerinde ölçüm yapıldı. Ölçüm yapılabilen mağaralarda, örnek çevresinde alınan ölçümlerden ağırlıklı ortalama ile elde edilen sonuçlar Çizelge 4.4'te görülmektedir.

**Çizelge 4.4.** Mağaralarda ölçüm yoluyla tespit edilen ortalama doz hızı değerleri.

Mağara	Ölçülen Doz Hızı (mGy/yıl)
İncesu	0,274 ± 0,088
İncikini	0,179 ± 0,088
Damlataş	0,318 ± 0,088
Hatçeninini	0,178 ± 0,088

Hava ve yol şartları nedeniyle ölçüm yapılamayan Obruk-Sızma mağarası için ise, diğer mağara doz hızı değerlerinin ortalaması alındı.

Daha sonra, 3.6 ve 3.7 eşitlikleri, ICP-MS yoluyla elde edilen radyoaktif çekirdek yoğunlukları ve Şekil 3.15'te verilen grafiklerdeki çarpanlardan yararlanılarak, kayaç kaynaklı ışınım ve mağara içine nüfuz eden kozmik dozun toplamı olarak dış doz hızı hesaplandı. Kayaç içi radyoaktif çekirdek yoğunluğu olarak, örneğin bulunduğu çevreden alınan tüm örneklerin ICP-MS yoluyla tespit edilmiş radyoaktif çekirdek yoğunluklarının ortalaması ve içlerindeki en büyük değer ayrı ayrı alındı. Mağara üstü örtü kalınlığı, İncesu Mağarası için 10 m (yatay mağara), diğer mağaralar için ise 20 m kabul edildi. Çizelge 4.5'te, mağara içine nüfuz eden kozmik doz hızları ve hesaplama sonucu elde edilen toplam dış doz hızı değerleri gösterilmektedir.

**Çizelge 4.5.** Mağara içleri için hesaplanan kozmik doz ve kayaç kaynaklı doz hızı değerleri. (Hesaplanan bazı hata değerleri 1/1000 mertebesinde daha küçük olduğundan, bu değerlere ait hata 0 olarak görünmektedir.)

Mağara	Rakım (m)	D <sub>koz</sub> (mGy/yıl)	D <sub>sed</sub> – Ort Yoğ. (mGy/yıl)	D <sub>sed</sub> – Max Yoğ. (mGy/yıl)	D <sub>dış</sub> – Ort (mGy/yıl)	D <sub>dış</sub> – Max (mGy/yıl)
İncesu	1615	0,0344	0,012	0,015	0,047 ± 0,000	0,049 ± 0,000
İncikini	1454	0,0203	0,015	0,019	0,036 ± 0,000	0,039 ± 0,000
Damlataş	1150	0,0200	0,013	0,013	0,033 ± 0,000	0,033 ± 0,000
Hatçeninini	1215	0,0196	0,033	0,035	0,052 ± 0,000	0,055 ± 0,000
Obruk-Sızma	1615	0,0207	0,020	0,032	0,041 ± 0,000	0,052 ± 0,000

Her iki yolla elde edilen toplam dış doz hızı değerlerinden, Eşitlik 3.8 kullanılarak örneğin bulunduğu noktaya nüfuz miktarları hesaplandı. Bu değerler ile örneğin etkisinde kaldığı iç dozun toplanması ile toplam doz hızı elde edildi (Eşitlik 3.1). Örneğin bulunduğu noktaya

nüfuz eden dış doz hızının ölçümüne ve hesaplanmasına dayalı olarak belirlenen değerler Çizelge 4.6'da gösterilmektedir.

#### **4.4. Toplam Doz Hızı ve Örneklerin Yaşı**

Elde edilen iç ve dış doz hızları toplanarak örneğin etkisinde kaldığı doz hızı hesaplandı. Daha sonra Eşitlik 2.16'da gösterildiği gibi, şiddet-yapay doz eğrilerinden elde edilen  $A_{\Sigma}$  değerleri toplam doz hızına bölünerek her bir örnek için farklı yollarla yaş tayini yapıldı. Çizelge 4.7'de, örneklere ait farklı yollarla (ölçüm ve hesaplama) elde edilmiş toplam doz hızı,  $A_{\Sigma}$  ve yine farklı yollarla elde edilmiş yaş değerleri gösterilmektedir.



**Çizelge 4.6.** Örneğin bulunduğu katman için, ölçüm yoluyla ve hesaplama yoluyla elde edilen, içeri nüfuz eden dış doz hızı değerleri. Hesaplama yoluyla belirlenen değerler, hem en büyük radyoaktif çekirdek yoğunlukları, hem de ortalama yoğunluklar için gösterilmiştir. (Hesaplanan bazı hata değerleri 1/1000 mertebesinde daha küçük olduğundan, bu değerlere ait hata 0 olarak görünmektedir.)

Örnek Kodu	Dış Dozun İçer Etkisi (mGy/yıl) - Ölçüm	Dış Dozun İçer Etkisi (mGy/yıl) - Hesaplama (max)	Dış Dozun İçer Etkisi (mGy/yıl) - Hesaplama (ort)
CH1	0,219 ± 0,081	0,059 ± 0,000	0,031 ± 0,000
CH2	0,219 ± 0,081	0,059 ± 0,000	0,031 ± 0,000
CH-B	0,181 ± 0,067	0,049 ± 0,000	0,025 ± 0,000
CH-K	0,216 ± 0,080	0,058 ± 0,000	0,030 ± 0,000
Hai-A	0,211 ± 0,068	0,042 ± 0,000	0,040 ± 0,000
Hai-B	0,238 ± 0,076	0,048 ± 0,000	0,045 ± 0,000
Hai-C	0,225 ± 0,072	0,045 ± 0,000	0,043 ± 0,000
IK-D	0,165 ± 0,081	0,036 ± 0,000	0,033 ± 0,000
IK-S	0,165 ± 0,081	0,036 ± 0,000	0,033 ± 0,000
IK-O	0,165 ± 0,081	0,036 ± 0,000	0,033 ± 0,000
IC-B	0,265 ± 0,073	0,041 ± 0,000	0,039 ± 0,000
IC-D	0,279 ± 0,077	0,043 ± 0,000	0,041 ± 0,000
IC-E	0,265 ± 0,073	0,041 ± 0,000	0,039 ± 0,000
OS-A	0,215 ± 0,080	0,047 ± 0,000	0,037 ± 0,000
OS-B	0,195 ± 0,072	0,043 ± 0,000	0,034 ± 0,000
OS-C	0,183 ± 0,068	0,040 ± 0,000	0,032 ± 0,000
OS-D	0,165 ± 0,061	0,036 ± 0,000	0,029 ± 0,000
OS-E	0,145 ± 0,054	0,032 ± 0,000	0,025 ± 0,000
OS-F	0,231 ± 0,086	0,051 ± 0,000	0,040 ± 0,000
DY-B	0,156 ± 0,077	0,028 ± 0,000	0,028 ± 0,000
IC3 A	0,265 ± 0,073	0,041 ± 0,000	0,039 ± 0,000
IC3 B	0,258 ± 0,071	0,040 ± 0,000	0,038 ± 0,000
IC3 C	0,265 ± 0,073	0,041 ± 0,000	0,039 ± 0,000
IC3 D1	0,286 ± 0,079	0,044 ± 0,000	0,042 ± 0,000
IC3 D2	0,286 ± 0,079	0,044 ± 0,000	0,042 ± 0,000
IC3 E1	0,286 ± 0,079	0,044 ± 0,000	0,042 ± 0,000
IC3 E2	0,286 ± 0,079	0,044 ± 0,000	0,042 ± 0,000
IC3 ED	0,258 ± 0,071	0,040 ± 0,000	0,038 ± 0,000
IC3 F1	0,294 ± 0,081	0,045 ± 0,000	0,043 ± 0,000
IC3 F2	0,294 ± 0,081	0,045 ± 0,000	0,043 ± 0,000
IC3 G1	0,294 ± 0,081	0,045 ± 0,000	0,043 ± 0,000
IC3 G2	0,294 ± 0,081	0,045 ± 0,000	0,043 ± 0,000
IC3 H	0,268 ± 0,074	0,041 ± 0,000	0,039 ± 0,000

**Çizelge 4.7.** Ölçüm ve hesaplama yoluyla elde edilmiş toplam doz hızı ve örnek yaşı değerleri. Hesaplama yöntemine ait sonuçlardan yalnızca en büyük çekirdek yoğunluğu ile elde edilen sonuçlar verilmiştir. (Hesaplanan bazı hata değerleri 1/1000 mertebesinde daha küçük olduğundan, bu değerlere ait hata 0 olarak görünmektedir.)

Örnek Kodu	$D_{top}$ (mGy/yıl) Ölçüm	$D_{top}$ (mGy/yıl) Hesaplama	$A_{\Sigma}$ (Gy)	$t_{ESR}$ (ky) Ölçüm	$t_{ESR}$ (ky) Hesaplama
CH1	0,366 ± 0,081	0,207 ± 0,000	78,59 ± 14,00	214,5 ± 61,0	380,5 ± 67,8
CH2	0,317 ± 0,081	0,158 ± 0,000	53,63 ± 4,20	168,9 ± 45,2	340,2 ± 26,6
CH-B	0,192 ± 0,067	0,060 ± 0,000	22,80 ± 4,92	118,8 ± 56,4	380,5 ± 82,1
CH-K	0,224 ± 0,080	0,067 ± 0,000	12,59 ± 4,48	56,1 ± 26,1	189,0 ± 67,2
Hai-A	0,335 ± 0,068	0,165 ± 0,000	8,63 ± 0,54	25,8 ± 6,4	52,2 ± 3,3
Hai-B	0,363 ± 0,076	0,173 ± 0,000	3,25 ± 0,46	9,0 ± 2,1	18,8 ± 2,7
Hai-C	0,351 ± 0,072	0,171 ± 0,000	3,16 ± 0,51	9,0 ± 2,4	18,4 ± 3,0
IK-D	0,230 ± 0,081	0,101 ± 0,000	7,17 ± 1,04	31,1 ± 10,8	70,9 ± 10,3
IK-S	0,220 ± 0,081	0,091 ± 0,000	91,76 ± 19,49	416,2 ± 177,0	1003,7 ± 213,2
IK-O	0,208 ± 0,081	0,079 ± 0,000	77,07 ± 19,98	370,8 ± 173,8	977,6 ± 253,4
IC-B	0,311 ± 0,073	0,076 ± 0,000	0,76 ± 0,04	2,4 ± 0,7	10,0 ± 0,5
IC-D	0,322 ± 0,077	0,075 ± 0,000	17,58 ± 1,19	54,6 ± 14,2	235,2 ± 15,9
IC-E	0,311 ± 0,073	0,075 ± 0,000	16,44 ± 2,38	52,9 ± 13,2	217,8 ± 31,5
OS-A	0,275 ± 0,080	0,107 ± 0,000	14,18 ± 1,46	51,6 ± 14,7	132,0 ± 13,6
OS-B	0,278 ± 0,072	0,126 ± 0,000	5,06 ± 0,41	18,2 ± 5,4	40,1 ± 3,2
OS-C	0,263 ± 0,068	0,120 ± 0,000	6,25 ± 0,37	23,8 ± 7,1	51,9 ± 3,1
OS-D	0,235 ± 0,061	0,106 ± 0,000	8,57 ± 0,92	36,5 ± 12,0	80,9 ± 8,7
OS-E	0,258 ± 0,054	0,146 ± 0,000	41,89 ± 5,83	162,1 ± 54,8	287,3 ± 40,0
OS-F	0,293 ± 0,086	0,113 ± 0,000	21,28 ± 2,32	72,7 ± 19,6	188,8 ± 20,6
DY-B	0,202 ± 0,077	0,074 ± 0,000	20,62 ± 2,07	102,3 ± 35,9	276,9 ± 27,8
IC3 A	0,311 ± 0,073	0,087 ± 0,000	22,90 ± 3,48	73,7 ± 20,7	263,0 ± 40,0
IC3 B	0,304 ± 0,071	0,086 ± 0,000	19,84 ± 3,04	65,2 ± 18,2	229,6 ± 35,2
IC3 C	0,311 ± 0,073	0,087 ± 0,000	24,04 ± 3,48	77,4 ± 21,4	276,1 ± 40,0
IC3 D1	0,330 ± 0,079	0,088 ± 0,000	1,87 ± 0,20	5,7 ± 1,5	21,2 ± 2,3
IC3 D2	0,330 ± 0,079	0,088 ± 0,000	9,48 ± 1,00	28,8 ± 7,5	107,6 ± 11,3
IC3 E1	0,330 ± 0,079	0,088 ± 0,000	7,35 ± 1,08	22,3 ± 6,3	83,4 ± 12,2
IC3 E2	0,330 ± 0,079	0,088 ± 0,000	13,89 ± 1,76	42,1 ± 11,4	157,6 ± 20,0
IC3 ED	0,304 ± 0,071	0,086 ± 0,000	24,95 ± 4,10	82,0 ± 23,5	288,7 ± 47,4
IC3 F1	0,338 ± 0,081	0,090 ± 0,000	30,34 ± 5,59	89,6 ± 27,1	335,6 ± 61,8
IC3 F2	0,338 ± 0,081	0,090 ± 0,000	33,86 ± 8,34	100,0 ± 34,4	374,6 ± 92,3
IC3 G1	0,336 ± 0,081	0,088 ± 0,000	7,57 ± 0,88	22,6 ± 6,0	86,3 ± 10,0
IC3 G2	0,336 ± 0,081	0,088 ± 0,000	11,80 ± 1,08	35,1 ± 9,1	134,6 ± 12,3
IC3 H	0,314 ± 0,081	0,087 ± 0,000	20,53 ± 7,09	65,4 ± 27,4	234,9 ± 81,1

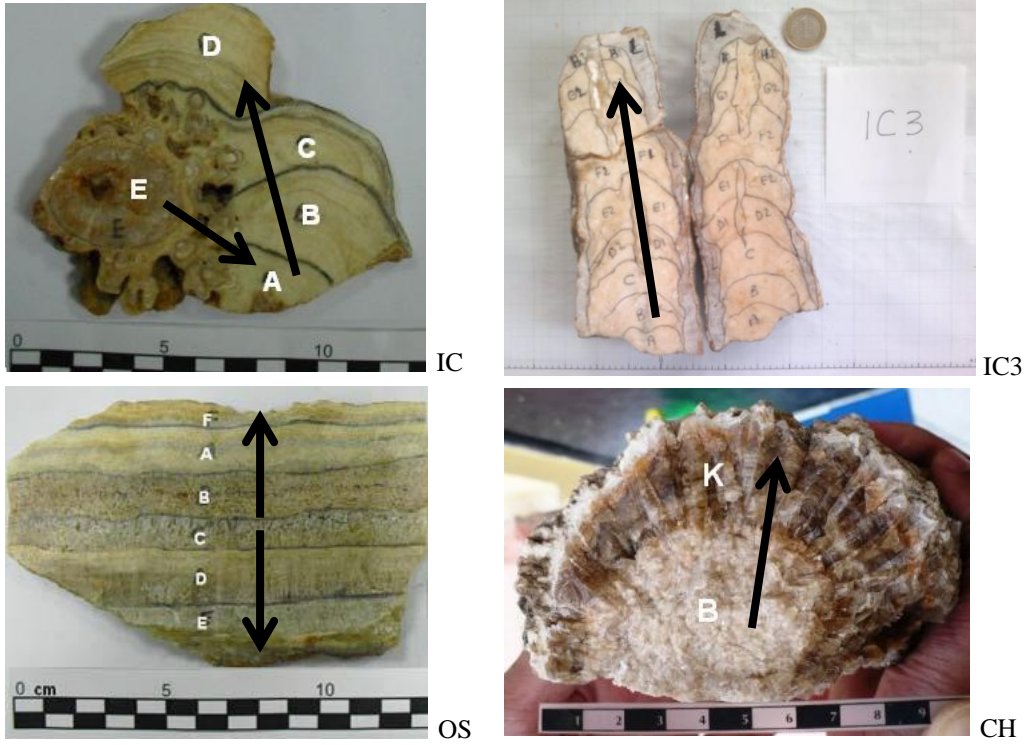
## 5. SONUÇ VE TARTIŞMA

Bu çalışmada, Çatalhöyük Arkeolojik Bölgesi'nde yer alan mağaralardan toplanan mağara çökellerinin (dikit ve akma taşları) ESR yöntemiyle tarihlenmesi yapılmıştır. Toplanan örnekler öncelikle belirli katmanlara ayrılmış, bu katmanlar ayrı ayrı öğütme ve temizlik işlemlerinden geçirildikten sonra gama ışınlaması uygulanmıştır. Bu ışınlama sonrası ESR ölçümleri yapılan örneklerin gama dozuna karşı ESR şiddetlerinin değişimleri incelenmiştir.

Manyetik alan tarama aralığının geniş tutulduğu ESR spektrumlarında,  $Fe^{3+}$  merkezine ilişkin bir çizgi ( $g = 4,3$ ),  $Mn^{2+}$  merkezinin aşırı ince yapı yarılmasına ilişkin 6 adet çizgi ( $g = 1,877 - 2,147$ ) ve bu merkezin 3. ve 4. çizgileri arasında ( $g = 2,034 - 1,981$ ) kalan çeşitli merkezler gözlenmiştir.  $g = 2,034 - 1,981$  arasında yer alan bu merkezler literatürde A ( $g = 2,0057$ ), B ( $g = 2,0031$ ), C ( $g = 2,0007$ ) ve D ( $g = 1,9973$ ) olarak isimlendirilmiştir. Paramanyetik merkezlerin tarihlenmeye uygun olup olmadığını, diğer bir deyişle gama ışınlamasına duyarlılığının anlaşılabilmesi için, aynı örneğe ait farklı dozlarda ışınlanmış birimlerin her birinin ESR ölçümü yapılmıştır. İncelenen ESR spektrumları, B sinyali için örneklerin yalnızca bir kısmında bu duyarlılığın olduğunu fakat C sinyali için bu duyarlılığın tüm örneklerde geçerli olduğunu ortaya koymuştur. Bu durum literatürce de desteklenmektedir. Bu nedenle, örneklerin tümü için, yine literatüre dayalı olarak denenmiş ve uygun görülmüş olan 4 G modülasyon genliği kullanılarak elde edilen spektrumlardan C sinyalinin şiddet değerlerine dayalı büyüme eğrileri elde edilmiştir. Büyüme eğrilerinin doyum eğrisi olduğu sonucundan hareketle bir üstel fonksiyonla benzetişim yapılarak, eğrinin yatay eksenini kestiği noktadan, örneğin geçmişte yuttuğu toplam doz, diğer bir deyişle eşdeğer doz ( $A_{\Sigma}$ ) belirlenmiştir.

Bir örneğin yaşı, eşdeğer dozun yıllık doza bölünmesiyle bulunur. Bu nedenle yıllık doz (doz hızı) değerleri, iç ve dış doz hızlarının toplanması yoluyla bulunmuştur. Dış doz hızı ise, gama spektrometresi kullanılarak doğrudan ölçüm ve radyoaktif çekirdek yoğunluklarından yararlanarak hesaplama şeklinde iki farklı yöntemle bulunmuştur. Yapılan ölçüm ve hesaplamalara göre, C merkezinin büyüme eğrilerinden elde edilen yaş değeri sonuçları: ölçüm yoluyla  $2,4 \pm 0,1 - 416,2 \pm 88,4$  ky aralığında iken hesaplama yoluyla  $10,0 \pm 0,5 - 1003,7 \pm 213,2$  ky aralığına düşmektedir. Buna göre, hesaplama

yoluyla elde edilen yaş değerleri daha büyüktür. Bunun sebebi ölçüm yoluyla elde edilen doz hızı (yıllık doz) değerlerinin daha büyük olmasıdır. Burada her iki yöntem için de ön plana çıkan iki hata kaynağı vardır: Hesaplama ile bulunan doz hızında, kullanılan radyoaktif çekirdek yoğunluklarının yalnızca belirli örneklerden alınan değerlerden oluşması ve dolayısıyla aslında bu örneklerden elde edilen ortalama yoğunluk değerlerinin tüm sedimentin radyoaktif çekirdek yoğunluğunu yansıtmayabileceğidir. Doğrudan ölçüm yönteminde ise, ölçüm yoluyla elde edilen yıllık doz değerinin aslında anlık bir değer olması ve muhtemel yaş değeri olan yüz bin yıl mertebesindeki bir sürecin tümünde geçerli olmayabileceğidir.



Şekil 5.1. Örneklerin yer bilimi uzmanlarınca belirlenmiş gelişim yönleri.

Örneklerin jeolojik görüş açısından yaşlanma yönleri Şekil 5.1’de, bu örneklerin ölçüm yoluyla elde edilen ESR yaşları ise Şekil 5.2’de gösterilmiştir. Şekil 5.2’deki bu sıralama hesaplama yoluyla elde edilen ESR yaşları için de geçerlidir. Verilen yaş değerleri öngörülen sıralamalarla karşılaştırıldığında, IC grubu için yaş sıralamasının büyükten küçüğe IC-E, IC-B, IC-D şeklinde olması gerekirken, her iki yöntemle de IC-D, IC-E, IC-B şeklinde bulunmuştur. IC3 grubu için, bu değişimin IC3 A → IC3 H şeklinde olması beklenirken, özellikle dikitin orta bölümünden parçalar içeren örneklerin bu değişimi

bozduğu görüldü. OS örneğinin sonuçları, gelişim yönünün aksine bir yaş değişimi gösterdi. En tutarlı sonuç ise CH-B ve CH-K örneklerinin sonuçlarında görüldü. Elde edilen sonuçlara göre CH-B örneğinin, CH-K örneğinin iki katı kadar yaşı olduğu belirlendi.



Şekil 5.2. Bazı örneklerin ölçüm yöntemiyle belirlenmiş, ky cinsinden ESR yaşları.

Elde edilen ESR yaşlarının sıralaması, tüm örnekler için, jeoloji bakış açısıyla öngörülen oluşum sıralamasına tam olarak uymamaktadır. Burada jeolojik süreçlerin tam olarak hangi etkilere bağlı olarak geliştiği bilinmemesine karşın, ESR yöntemi açısından bazı yorumlar yapılabilir. Örneğin, kalstik yapıların ESR yöntemi ile yaş tayininde kullanılan bazı varsayımların sonuçları etkileyebileceği söylenebilir. Örneğin, yapı içerisindeki paramanyetik merkezler doğada çok uzun yıllar içerisinde, radyoaktif çekirdeklerden

kaynaklanan  $\alpha$ -,  $\beta$ - ve  $\gamma$ - ışınlarına ek olarak kozmik ışınların etkisiyle oluşmuşken, bu merkezler yapay ışınlama ile yalnızca saatler içerisinde çok ani biçimde oluşmaktadır. O halde, doğadaki ve laboratuvardaki paramanyetik merkez oluşturma süreçlerinin birbirlerinden farklı olması beklenmelidir. Dolayısıyla  $A_{\Sigma}$  değerine eşit olduğu varsayılan JD değerinin oldukça farklı olabileceği söylenebilir.

Bunun yanı sıra, yıllık doz (D) ölçüm ve hesaplamaları sırasında bazı varsayımlara dayanılarak işlemler yapıldı. Ölçümle elde edilen değerler mağara içinde belirli bir anda geçerli olan değerler olduğu halde, bu değerlerin yüzbinlerce yıl boyunca geçerli olduğu varsayıldı. Her ne kadar ölçümler bahar ayında, yani ortalama iklim şartları varsayılarak yapılmış olsa da, mevsim şartlarının yüzyıllar içerisinde bile değişebildiği ve atmosferde büyük çaplı olaylar gerçekleştiği dönemlerde hava şartlarının, hava ve toprak neminin etkilendiği göz önüne alındığında bu varsayımın bir hata kaynağı olacağı açıktır. Ayrıca güneş patlamaları gibi önemli olaylar, kozmik ışınların yoğunluğunu etkilediğinden toplam doz hızını etkileyecektir. Hem iç hem de dış dozu belirlemek için hesaba katılan radyoaktif çekirdek yoğunluklarının da ölçüm zamanındakinden farklı olabileceği; bozunum zincirlerindeki değişimlerin de, literatürden yola çıkılarak hesaplanan doz katkısını değiştirebileceği de dikkate alınmalıdır.

ESR yöntemi ile yaş tayininin örnekten örneğe değişen güvenilirliğinin artması,  $A_{\Sigma}$  ve doz hızı değerlerinin belirlenmesi konusundaki hata kaynaklarının azalmasına bağlıdır. Bu durumda bu yöntemin diğer yaygın kullanılan tarihleme yöntemleri için önemli bir alternatif olma niteliği pekişecektir.

## KAYNAKLAR

- [1] Ulusoy, Ü., *Kuvars Minerallerinin ESR Yöntemi ile İncelenmesi ve Tarihlenmesi*, Doktora Tezi, Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, **1995**.
- [2] Zeller, E.J., Levy, P.W., and Mattern, P.L., Geologic dating by electron spin resonance; in, *Radioactive Dating and Methods of Low-Level Counting: Proceedings of symposium, International Atomic Energy Agency in Cooperation with joint Commission on Applied Radioactivity (ICSU)*, Monaco, 2-10 March, International Atomic Energy Agency, Vienna, 531-540, **1967**.
- [3] Ikeya, M., Dating a stalactite by electron paramagnetic resonance, *Nature*, 255, 48–50, **1975**.
- [4] Ikeya, M. and Miki, T., Electron spin resonance dating of animal and human bones, *Science*, vol. 207, no. 4434, 977–979, **1980**.
- [5] Ikeya, M. and Ohmura, K., Comparison of ESR ages of corals from marine terraces with  $^{14}\text{C}$  and  $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$  ages, *Earth and Planetary Science Letters*, vol. 65, no. 1, 34–38, **1983**.
- [6] Sato, T., ESR dating of planktonic foraminifera, *Nature*, vol. 300, no. 5892, 518–521, **1982**.
- [7] Ikeya, M., *New Applications Of Electron Spin Resonance: Dating, Dosimetry And Microscopy*, World Scientific, Singapore, **1993**.
- [8] Ikeya, M., Miki, T., and Tanaka, K., Dating of a Fault by Electron Spin Resonance on Intrafault Materials, *Science*, vol. 215, no. 4538, 1392–1393, **1982**.
- [9] Ulusoy, Ü., ESR dating of North Anatolian (Turkey) and Nojima (Japan) faults, *Quaternary Science Reviews*, vol. 23, no. 1–2, 161–174, **2004**.
- [10] Shimokawai K. and Imai, N., ESR dating of quartz in tuff and tephra, *ESR Dating and Dosimetry*, 181–185, **1985**.
- [11] Apaydın, F., Ulusoy, Ü., *Kapadokya Yöresi Jeolojik Minerallerinin Magnetik Özelliklerinin ESR Yöntemiyle Araştırılması ve Tarihlenmesi*, TÜBİTAK (TBAG), proje no: 1109, **1994**.
- [12] Ulusoy, Ü. and Apaydın, F., ESR studies and ESR dating of quartz, *Applied Radiation and Isotopes*, vol. 47, no. 11–12, 1405–1407, **1996**.
- [13] Ulusoy, Ü., ESR Studies of a Quartz Single Crystal from the Menderes Massif-Turkey, *Turkish Journal of Physics*, vol. 27, 263–269, **2003**.
- [14] Ulusoy, Ü. and Ikeya, M., ESR Studies of Sepiolites, *Applied Magnetic Resonance*, vol. 18, 537–548, **2000**.
- [15] Ulusoy, Ü., ESR studies of Anatolian gypsum, *Spectrochimica Acta Part A, Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, vol. 60, no. 6, 1359–1365, **2004**.
- [16] Ulusoy, Ü., Anbar, G., Bayarı, S., and Uysal, T., ESR and  $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$  dating of speleothems from Aladağlar Mountain Range (AMR) in Turkey, *Quaternary Research*, **2014**.

- [17] Apaydın, F., *Magnetik Rezonans*, H.Ü. Mühendislik Fakültesi Ders Kitapları, **1996**.
- [18] Poole, C.P. and Farach, H.A., *The Theory of Magnetic Resonance*, John Wiley, New York, **1972**.
- [19] Pilbrow, J.R., ESR fundamentals, *Applied Radiation and Isotopes*, vol. 47, no. 11/12, 1465–1470, **1996**.
- [20] Poole, C.P., *Electron Spin Resonance*, John Wiley, New York, **1967**.
- [21] Poole, C.P., *Electron spin resonance: a comprehensive treatise on experimental techniques*, Interscience Publishers, **1967**.
- [22] Coşkun, M., *Mn<sup>+2</sup> İyonu İçeren Bazı Gıda Proteinlerinin Kararlılıklarının ESR Yöntemi İle İncelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, **2004**.
- [23] Aitken, M.J., *Thermoluminescence Dating*, Academic Press, **1985**.
- [24] Grün, R., Electron spin resonance (esr) dating, *Quaternary International*, vol. 1, 65–109, **1989**.
- [25] MTA, Mağaralar ve MTA, <http://www.mta.gov.tr/v2.0/daire-baskanliklari/jed/index.php?id=tasari> (Aralık, **2013**).
- [26] Bayarı, C.S., Speleoloji ve Paleoklim, *Kuvaterner Bilimi* (Ed: Kazancı, N., Gürbüz, A.), Ankara Üniversitesi Yayınları, Ankara, (ISBN 978-605-136-056-0), 411-436, **2012**.
- [27] T. U. of T. at A. Environmental Science Institute, How do Caves Form?, <http://www.esi.utexas.edu/outreach/caves/pdf/HowCavesForm.pdf>, (Aralık, **2013**).
- [28] Anbar, G., Mağara Çökellerinin Elektron Spin Rezonans Yöntemi ile İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, **2006**.
- [29] Erdoğan, B., Ulusoy, Ü., O. Özbek, *Çatalhöyük Speleothem Projesi*, TÜBİTAK (SOBAG), proje no: 108K436, **2009-2012**.
- [30] Erdoğan, B., Uysal, I.T., Özbek, O. and Ulusoy, Ü., Speleothems of Çatalhöyük, Turkey, *Mediterranean Archaeology and Archaeometry*, vol. 13, no. 1, 21–30, **2013**.
- [31] TAY Ekibi, Türkiye Arkeolojik Yerleşmeleri Projesi, <http://tayproject.org/veritab.html>, (Aralık, **2013**).
- [32] Erkan, G., *Konya Kapalı Havzası (Orta Anadolu) Geç Pleyistosen-Holosen İkliminin Dikit Kayıtları ile Kurgulanması*, Doktora Tezi, Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, **2012**.
- [33] Nazik, L., Tuncer, K., Özel, E., Törk, K., Aksoy, B., Acar, C., İnan, H. and Savaş, F., *Karaman İli (Merkez, Ayrancı, Kazımkarabekir) doğal mağaraları*, MTA Raporu, Derleme No: 10780, **2005**.
- [34] M. Kültür Varlıkları ve Müzeler Genel Müdürlüğü, *Çatalhöyük Neolitik Kenti (Konya)*. <http://www.kulturvarliklari.gov.tr/TR,46251/catalhoyuk-neolitik-kenti-konya.html>, (Aralık, **2013**).



- [35] Mellaart, J., *Çatalhöyük: A Neolithic Town in Anatolia*, Thames and Hudson, London, **1967**.
- [36] MTA, *Kalsit*, <http://www.mta.gov.tr/v2.0/madenler/mineraller/index.php?id=kalsitterit>, (Aralık, **2013**).
- [37] Şahin, N., *Türkiye Kalsit Olanakları ve Kalsitin Endüstriyel Hammadde Olarak Hazırlanması*, Bitirme Tezi, Hacettepe Üniversitesi, **1978**.
- [38] Edkins, J., *Calcite*, <http://gwydir.demon.co.uk/jo/minerals/calcite.htm>, (Aralık, **2013**).
- [39] Weller, R. and Cochise College, *Calcite Photos* <http://skywalker.cochise.edu/wellerr/mineral/calcite/molecule1.htm>, (Aralık, **2013**).
- [40] Aitken, M.J., Alpha particle Effectiveness: numerical relationship between systems, *Ancient TL*, vol. 3, 22-25, **1985**.
- [41] Mejdahl, V., Thermoluminescence Dating: Beta-Dose Attenuation In Quartz Grains, *Archaeometry*, vol. 21, no. 1, 61–72, **1979**.
- [42] Guérin, G., Mercier, N. and Adamiec, G., Dose-rate conversion factors: update, vol. 29, no. 1, 5–8, **2011**.
- [43] Ulusoy, Ü., *Çatalhöyük çevresinde bulunan mağaraların doz hızlarının belirlenmesi*, [projede görev alanlar: Enis Sert, Doç. Dr. Onur Özbek] H.Ü. BAB6080 hızlı destek projesi, proje no: 013D0460200, **2013**.
- [44] Ulusoy, Ü., Bayarı, S., Anbar, G. and Özyurt, N. *Mağara çökellerinin ESR ile yaş tayini ve bu çökellerin mikro-jeokimyasal analiz ile incelenerek paleo-iklim koşullarının araştırılması*, TÜBİTAK (ÇAYDAG), proje no: 104Y203, **2004-2007**.
- [45] Kurnaz, S., *Gama Dedektörü ile Çevre Doz Hızını Bulma*, Mezuniyet Proje Raporu, Hacettepe Üniversitesi, **2012**.
- [46] Canberra, *Gamma and X-Ray Detection*, <http://www.canberra.com/literature/fundamental-principles/pdf/Gamma-Xray-detection.pdf>, (Nisan, **2014**).
- [47] Komura, K. and Sakanoue, M., Gamma ray spectroscopy for ESR dating, *ESR Dating and Dosimetry*, (Eds: Ikeya, M. and Miki, T.), Ionics Publishing, Tokyo, 9–18, **1985**.
- [48] Engin, B., Aydaş, C., Özkul, M., Zeyrek, C.T., Büyüm, M. and Gül, A., ESR dating of stalagmite from Keloğlan cave in the southwestern part of Turkey, *Radiation Effects and Defects in Solids: Incorporating Plasma Science and Plasma Technology*, vol. 165, no. 12, 37–41, **2010**.
- [49] Ikeya, M. and Ohmura, K., Dating of Fossil Shells with Electron Spin Resonance, *The Journal of Geology*, vol. 89, no. 2, 247–251, **1981**.
- [50] Takano, M. and Fukao, Y., ESR dating of Pleistocene fossil shells of the Atsumi group, Central Honshu, Japan: On the discrepancy in TD value among different ESR peaks, *Applied Radiation and Isotopes*, vol. 45, no. 1, 49–56, **1994**.

## ÖZGEÇMİŞ

### Kimlik Bilgileri

Adı Soyadı : Enis SERT

Doğum Yeri : Çankırı

Medeni Hali : Evli

E-posta : enissert@gmail.com

Adresi : Çankırı Karatekin Üniversitesi Fen Fakültesi Fizik Bölümü  
Uluyazı Kampüsü Merkez / ÇANKIRI

### Eğitim

Lise : Kayseri Fen Lisesi

Lisans : Boğaziçi Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü

Yüksek Lisans : Hacettepe Üniversitesi Fizik Mühendisliği Bölümü

### Yabancı Dil Düzeyi

İngilizce: 93,75 / 100 (ÜDS)

### İş Deneyimi

2001 – 2003, MEB, Çankırı Kızılırmak PİO ve Çankırı Lisesi, İngilizce Öğretmeni

2003 – 2006, Hacettepe Üniversitesi, Fizik Mühendisliği Bölümü, Araştırma Görevlisi

2006 – 2007, Sahil Güvenlik Komutanlığı, Mütercim (Yedek Subay)

2007 – 2008, Gelişim Dersanesi ve Yayınları, Fizik Öğretmeni / Fizik Yayınları Sorumlusu

2008 – 2010, Türk Telekom SEBİT, Fizik-Fen İçerik Editörü / Soru Takımı Sorumlusu

2010 – ... , Çankırı Karatekin Üniversitesi, Fizik Bölümü, Araştırma Görevlisi

### Deneyim Alanları

### Tezden Üretilmiş Projeler ve Bütçesi

### Tezden Üretilmiş Yayınlar

### Tezden Üretilmiş Tebliğ ve/veya Poster Sunumu ile Katıldığı Toplantılar