ÇUKUROVA ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Yapay Sinir Ağları ile Kuvars Mineraline Ait Lüminesans Eğrilerinin Tahmini

Fırat DENİZ

Fizik Anabilim Dalı

Ağustos, 2025

ÇUKUROVA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZ ONAYI

Yapay Sinir Ağları ile Kuvars Mineraline Ait Lüminesans Eğrilerinin Tahmini

---

Fırat DENİZ

Fizik Anabilim Dalı

Bu Yüksek Lisans Tezi 18.08/2025 Tarihinde Aşağıdaki Jüri Üyeleri Tarafından Değerlendirilmiş ve Oy Birliği / Oy Çokluğu ile Kabul Edilmiştir.

Jüri : Doç.Dr. Mehmet YÜKSEL (Danışman) ……

: Doç.Dr. Ziyafer Gizem PORTAKAL ……

: Dr.Öğr. Üyesi Emre ÜNSAL ……

Bu Tez Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Anabilim Dalında Hazırlanmıştır.

Tez No:

Prof. Dr. Sadık DİNÇER
Enstitü Müdürü

Bu çalışma Çukurova Üniversitesi BAP Birimi Tarafından Desteklenmiştir.
Proje No: FYL–2023–15814

Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaktan yapılan bildirişlerin, çizelge ve fotoğrafların kaynak gösterilmeden kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

İÇİNDEKİLER

ÖZ I
ABSTRACT II
TEŞEKKÜR III
ÇİZELGELER DİZİNİ IV
ŞEKİLLER DİZİNİ V
SİMGELER VE KISALTMALAR VII
1. GİRİŞ 1
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR 3
3. MATERYAL VE METOT 7
3.1. Materyal 7
3.1.1. Kuvars Minerali 7
3.1.2. Laboratuvar Araç ve Gereçleri 9
3.2. Metot 15
3.2.1. Lüminesans 15
3.2.2. Yapay Zekâ, Makine Öğrenmesi ve Derin Öğrenme 30
4. BULGULAR VE TARTIŞMA 37
4.1. X–Işını Kırınımı (XRD) Analizi ile İlgili Bulgular 37
4.2. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) –Enerji Dağılım Spektroskopisi (EDS) Analizleri ile İlgili Bulgular 38
4.3. Termolüminesans (TL) Ölçümleri ile İlgili Bulgular 40
4.3.1. Filtre Testi Deneyi ile İlgili Bulgular 40
4.3.2. Ön Isıtma Deneyi ile İlgili Bulgular 41
4.3.3. Doz Yanıt Deneyi ile İlgili Bulgular 42
4.3.4. Isıtma Hızı Deneyi ile İlgili Bulgular 48
4.3.5. Yeniden Kullanılabilirlik Deneyi ile İlgili Bulgular 50
4.4. Termolüminesans (TL) Işıma Eğrilerinin YSA ile Tahmini ile İlgili Bulgular 52
4.4.1. TL Işıma Eğrisi Tahmini İçin YSA Algoritmalarının Karşılaştırmalı Analizi 53
4.5. Optik Uyarmalı Lüminesans (OSL) Ölçümleri ile İlgili Bulgular 62
4.5.1. Doz Yanıt Deneyi ile İlgili Bulgular 62
4.5.2. Yeniden Kullanılabilirlik Deneyi ile İlgili Bulgular 69
4.6. Optik Uyarmalı Lüminesans (OSL) Bozunum Eğrilerinin YSA ile Tahmini ile İlgili Bulgular 71
4.6.1. OSL Bozunum Eğrisi Tahmini İçin YSA Algoritmalarının Karşılaştırmalı Analizi 72

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER 79
KAYNAKLAR 81
ÖZGEÇMİŞ 89

ÇUKUROVA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Yapay Sinir Ağları ile Kuvars Mineraline Ait Lüminesans Eğrilerinin Tahmini

Fırat DENİZ

Danışman: Doç. Dr. Mehmet YÜKSEL

Fizik Anabilim Dalı

ÖZ

Bu tez çalışmasında, Türkiye'nin Mersin ili, Erdemli ilçesinde bulunan halk plajından alınan deniz kumu örneklerinden ayrıştırılan kuvars mineralinin termolüminesans (TL) ve optik uyarımlı lüminesans (OSL) özellikleri kapsamlı olarak incelenmiş ve elde edilen verilerin yapay sinir ağları (YSA) kullanılarak modellenmesi gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmalarda, uygun optik filtre seçimi, ön ısıtma sıcaklığı optimizasyonu, doz–yanıt ilişkileri, ısıtma hızı etkileri ve yeniden kullanılabilirlik testleri gerçekleştirilmiştir. TL ölçümlerinde 1–100 Gy aralığında doğrusal, 100–360 Gy aralığında doğrusal altı, 360 Gy'den sonra ise doğrusal üstü bölgeler belirlenmiştir. OSL ölçümlerinde ise 0,1–20 Gy aralığında doğrusal, 20–520 Gy aralığında doğrusal altı ve 520 Gy'in üstündeki dozlarda da doyum davranışı gözlenmiştir. Modelleme aşamasında, MATLAB ortamında Neural Net Fitting (NNF) arayüzü kullanılarak üç farklı optimizasyon algoritması -Levenberg–Marquardt (LM), Bayesian Regularization (BR) ve Scaled Conjugate Gradient (SCG)- ile çok katmanlı yapay sinir ağı modelleri geliştirilmiştir. LM algoritması düşük ve orta doz bölgelerinde en yüksek korelasyon katsayısı (R = 0,999) ve en düşük hata (MSE) değerleri ile öne çıkarken, BR algoritması yüksek doz bölgelerinde aşırı öğrenmeyi önleyerek daha dengeli tahminler sağlamıştır. SCG algoritması ise düşük bellek kullanımı ve kısa eğitim süresi açısından avantaj sağlamasına rağmen özellikle düşük doz bölgelerinde aşırı öğrenme eğilimine sahip olup genelleme yapmakta zorlanmaktadır. Elde edilen sonuçlar, kuvars mineralinin TL ve OSL özelliklerinin dozimetri uygulamalarında yüksek potansiyel sunduğunu ve YSA tabanlı modelleme ile lüminesans eğrilerinin yüksek doğrulukla tahmin edilebileceğini ortaya koymaktadır. Bu yaklaşım, deneysel süreçlerin süresini kısaltarak ve veri üretim hızını artırarak, OSL tarihlendirme ve radyasyon dozimetri çalışmalarına önemli katkılar sağlaması düşünülmektedir.

Anahtar Kelimeler: Kuvars, Termolüminesans (TL), Optik Uyarımlı Lüminesans (OSL), Yapay Sinir Ağları (YSA), Dozimetri.

CUKUROVA UNIVERSITY

INSTITUTE OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

MSc THESIS

Prediction of Luminescence Curves of Quartz Mineral Using Artificial Neural Networks

---

Fırat DENİZ

Advisor: Assoc.Prof. Dr. Mehmet YÜKSEL

Department of Physics

ABSTRACT

In this thesis study, the thermoluminescence (TL) and optically stimulated luminescence (OSL) properties of quartz mineral, separated from marine sand samples collected from a public beach in Erdemli, Mersin (Turkey), were comprehensively investigated, and the obtained data were modeled using artificial neural networks (ANN). In the experimental phase, optical filter selection, preheat temperature optimization, dose–response relationships, heating rate effects, and reusability tests were performed. TL measurements revealed three distinct regions: a linear region between 1–100 Gy, a sublinear region between 100–360 Gy, and a supralinear region above 360 Gy. For OSL measurements, a linear region was observed between 0.1–20 Gy, a sublinear region between 20–520 Gy, and a saturation behavior beyond 520 Gy. In the modeling phase, multilayer feed-forward ANN models were developed in MATLAB using the Neural Net Fitting (NNF) interface with three different optimization algorithms: Levenberg–Marquardt (LM), Bayesian Regularization (BR), and Scaled Conjugate Gradient (SCG). The LM algorithm provided the highest correlation coefficient ($R = 0.999$) and the lowest mean squared error (MSE) values in low- and medium-dose ranges, while the BR algorithm effectively prevented overfitting at higher doses, resulting in more balanced predictions. The SCG algorithm, although advantageous in terms of low memory consumption and shorter training time, exhibited a tendency toward overfitting at lower doses and showed limited generalization capability. The overall results demonstrate that the TL and OSL properties of quartz mineral hold strong potential for dosimetric applications and that ANN-based modeling can predict luminescence curves with high accuracy. This approach is expected to shorten experimental procedures, increase data production efficiency, and contribute significantly to OSL dating and radiation dosimetry studies.

Keywords: Quartz, Thermoluminescence (TL), Optically Stimulated Luminescence (OSL), Artificial Neural Networks (ANN), Dosimetry.

TEŞEKKÜR

Tez çalışmam süresince bilgi, birikim ve engin tecrübeleriyle her zaman yanımda olan, akademik anlamda gelişimime büyük katkılar sunan, desteğini hiçbir zaman esirgemeyen değerli danışmanım Sayın Doç.Dr. Mehmet YÜKSEL'e en içten teşekkürlerimi sunuyorum. Her aşamada yol göstericiliği, sabrı ve motive edici yaklaşımı bu çalışmanın tamamlanmasında belirleyici olmuştur.

Zorlu süreçlerde sabrı, anlayışı ve desteğiyle her zaman yanımda olan sevgili eşim Özlem DENİZ ve varlıklarıyla yaşamıma anlam katan sevgili çocuklarım Çağın Ege DENİZ ve Çağdaş DENİZ sizlerin desteği olmadan bu süreci tamamlamam mümkün olmazdı.

Hayatım boyunca yanımda olan, maddi ve manevi desteklerini her zaman hissettiğim kıymetli annem Beyhan DENİZ'e ve babam Süleyman DENİZ'e, her zaman örnek aldığım sevgili kardeşlerim Fadime DENİZ, Mustafa DENİZ ve Sevgi DENİZ'e sonsuz teşekkür ederim.

Bu süreçte katkı sunan, adı geçen ya da geçmeyen herkese içtenlikle teşekkür ederim.

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 3.1. Lüminesans türleri ve uyarma yöntemleri 15
Çizelge 4.1. Kuvars mineraline ait kristalografik parametreler 37
Çizelge 4.2. Kuvars mineralinin SEM–EDS kantitatif element analizi 39

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 3.1. Sahil Kumu ve Ayrıştırılmış Kuvars Örnekleri Genel Görünümü …….……..8

Şekil 3.2. Lexsyg Smart TL / OSL Okuyucu Cihazı…….……12

Şekil 3.3. Lexsyg Smart TL/OSL Okuyucunun Temel Parçaları.……..…...12

Şekil 3.4. Katılarda Bant Modeli ……...…….…….17

Şekil 3.5. Yüzeysel Kusurlar …….……..18

Şekil 3.6. Hacimsel Kristal Kusurları……...…..……..19

Şekil 3.7. Tuzaklanmış Elektronların Boşalması……..……21

Şekil 3.8. Bir Seramik Parçasının Işıma Eğrileri; a) Doğal Işıma Eğrisi, b) Doğal + Laboratuvar Dozu Almış Örneğin Işıma Eğrisi, c) Kara Cisim Işıması……..…….22

Şekil 3.9. Yapay Zekâ, Makine Öğrenmesi ve Derin Öğrenme Arasındaki Hiyerarşik İlişki.....30

Şekil 3.10. Biyolojik Nöronlar ve Yapay Sinir Ağları (YSA) Modeli.....….……32

Şekil 4.1. Kuvars Mineraline ait Ölçülen ve ICDD Referans XRD Desenleri…….……37

Şekil 4.2. (a) 10 kx ve (b) 80 kx Büyütme Oranlarında Elde Edilen SEM Görüntüleri, (c) EDS Analizi İçin Taranan Alan ve (d) EDS Spektrumu……..……..39

Şekil 4.3. Farklı Filtre Kombinasyonlarındaki TL Işıma Eğrileri……..……...41

Şekil 4.4. Farklı Ön Isıtma Sıcaklıklarında Elde Edilen TL Işıma Eğrileri…….……..42

Şekil 4.5. 0,1–1 Gy Aralıklarındaki Farklı Dozlarda Elde Edilen TL Işıma Eğrileri…..……..43

Şekil 4.6. 1–15,5 Gy Aralıklarındaki Farklı Dozlarda Elde Edilen TL Işıma Eğrileri…….44

Şekil 4.7. 15,5–67,3 Gy Aralıklarındaki Farklı Dozlarda Elde Edilen TL Işıma Eğrileri……44

Şekil 4.8. 67,3–181,1 Gy Aralıklarındaki Farklı Dozlarda Elde Edilen TL Işıma Eğrileri…..45

Şekil 4.9. 181,1–1034,9 Gy Aralıklarındaki Farklı Dozlarda Elde Edilen TL Işıma Eğrileri..45

Şekil 4.10. 0,1–1034,9 Gy Doz Aralıklarında Işınlanmış Kuvars Örneklerine ait TL Işıma Eğrilerinin Altında Kalan Alanlardan Elde Edilen Doz–Yanıt Eğrisi…….…….47

Şekil 4.11. Farklı Isıtma Hızlarında Elde Edilen TL Işıma Eğrileri…….…...49

Şekil 4.12. Yeniden Kullanılabilirlik Deneyi ile Elde Edilen (a) TL Işıma Eğrileri ve (b) Ölçüm Tekrar Sayısına Karşılık Normalize Edilmiş TL Işıma Eğrisi Alanlarının Değişimleri…….……..51

Şekil 4.13. TL Işıma Eğrisi Tahminleri İçin Oluşturulan YSA Modeline ait Yapısal Tasarım..53

Şekil 4.14. LM Algoritması için YSA Simülasyon Sonuçları: (a) Performans Doğrulaması, (b) Hedef ve Çıktı Arasındaki Doğrusal Regresyon Analizi…….…….54

Şekil 4.15. BR Algoritması için YSA Simülasyon Sonuçları: (a) Performans Doğrulaması, (b) Hedef ve Çıktı Arasındaki Doğrusal Regresyon Analizi…….……56

Şekil 4.16. SCG Algoritması için YSA Simülasyon Sonuçları: (a) Performans Doğrulaması, (b) Hedef ve Çıktı Arasındaki Doğrusal Regresyon Analizi……..…….58
Şekil 4.17. (a) 1 Gy, (b) 72,4 Gy ve (c) 465,7 Gy Radyasyon Dozları için Deneysel, LM, BR ve SCG Algoritmaları ile Elde Edilen TL Işıma Eğrilerinin Karşılaştırması…….…...61
Şekil 4.18. 0,1–1 Gy Aralıklarındaki Farklı Dozlarda Elde Edilen OSL Bozunum Eğrileri…..63
Şekil 4.19. 1–15,5 Gy Aralıklarındaki Farklı Dozlarda Elde Edilen OSL Bozunum Eğrileri….64
Şekil 4.20. 15,5–67,3 Gy Aralıklarındaki Farklı Dozlarda Elde Edilen OSL Bozunum Eğrileri……..... 65
Şekil 4.21. 67,3–181,1 Gy Aralıklarındaki Farklı Dozlarda Elde Edilen OSL Bozunum Eğrileri……..…66
Şekil 4.22. 181,1–1034,9 Gy Aralıklarındaki Farklı Dozlarda Elde Edilen OSL Bozunum Eğrileri……..…67
Şekil 4.23. Kuvarsın Beta Radyasyonu Altında Başlangıç OSL Sinyaline ait Doz–Yanıt Eğrisi……..…….. 68
Şekil 4.24. 15 Tekrarlı Ölçüm Döngüsüne (D = 10 Gy) ait Kuvars Örneklerinin (a) OSL Bozunum Eğrileri ve (b) Yeniden Kullanılabilirliği…….……...…….70
Şekil 4.25. OSL Bozunum Eğrisi Tahminleri için Oluşturulan YSA Modeline ait Yapısal Tasarım……..…...72
Şekil 4.26. LM Algoritması için YSA Simülasyon Sonuçları: (a) Performans Doğrulaması, (b) Hedef ve Çıktı Arasındaki Doğrusal Regresyon Analizi…….73
Şekil 4.27. BR Algoritması için YSA Simülasyon Sonuçları: (a) Performans Doğrulaması, (b) Hedef ve Çıktı Arasındaki Doğrusal Regresyon Analizi…….74
Şekil 4.28. SCG Algoritması için YSA Simülasyon Sonuçları: (a) Performans Doğrulaması, (b) Hedef ve Çıktı Arasındaki Doğrusal Regresyon Analizi…….75
Şekil 4.29. (a) 1 Gy, (b) 72,4 Gy ve (c) 465,7 Gy Radyasyon Dozları için Deneysel, LM, BR ve SCG Algoritmaları ile Elde Edilen OSL Bozunum Eğrilerinin Karşılaştırması……...……..77

SİMGELER VE KISALTMALAR

TL	:	Termolüminesans
OSL	:	Optik Uyarımlı Lüminesans
XRD	:	X– Işını Kırınımı
SEM–EDS	:	Taramalı Elektron Mikroskobu–Enerji Dağılımlı XIşını Analizi
PL	:	Fotolüminesans
CL	:	Katodolüminesans
YSA	:	Yapay Sinir Ağı
TLD	:	Termolüminesans Dozimetri
YSA	:	Yapay Sinir Ağı
IRSL	:	Kızılötesi Uyarımlı Lüminesans
PMT	:	Foto Çoğaltıcı Tüp
Gy	:	Gray
ICDD	:	Uluslararası Kırınım Verileri Merkezi
ASCII	:	Bilgi Değişimi İçin Amerikan Standart Kodlama Sistemi
AI	:	Yapay Zekâ
ML	:	Makine öğrenmesi
ANN		Artificial Neural Networks

1. GİRİŞ

Radyasyon, enerji taşıyan parçacıklar veya elektromanyetik dalgalar şeklinde tanımlanmakta olup evrenin doğal bir bileşenidir (Aitken, 1998). Gözle görülmeyen, kokusuz ve tatsız olan bu enerji formu hem doğal hem de yapay kaynaklardan yayılmakta ve sağlık, endüstri, enerji üretimi, malzeme bilimi, arkeoloji, jeoloji ve uzay araştırmaları gibi birçok farklı alanda kullanılmaktadır (ICRP, 2007). Radyasyonun kontrollü kullanımı insanlık için sayısız fayda sağlamakla birlikte, aşırı maruziyet durumunda ciddi biyolojik etkilere neden olabileceğinden, radyasyon dozunun güvenilir ve periyodik olarak ölçülmesi büyük önem taşımaktadır.

Nükleer santraller, nükleer tıp ve radyoterapi merkezleri, radyoloji birimleri ve radyasyonun kullanıldığı diğer endüstriyel alanlarda çalışan personelin maruz kaldıkları dozun izlenmesi; ayrıca nükleer kazalar, çevresel radyoaktivite artışları, nükleer silah denemeleri veya kazaları gibi durumlarda çevreye yayılan radyasyonun tespit edilmesi gereklidir. Bunun yanı sıra, arkeolojik ve jeolojik tarihlendirme çalışmalarında fay hatlarından alınan örneklerin yaş tayininde de radyasyon dozunun ölçümü kritik bir rol oynamaktadır (Wintle, 2017).

Radyasyon dozlarının ölçülmesinde kullanılan katı hal dozimetreleri arasında termolüminesans (TL) ve optik uyarımlı lüminesans (OSL) teknikleri, yüksek hassasiyetleri, geniş dinamik ölçüm aralıkları ve uzun süreli kararlılık özellikleri sayesinde öne çıkmaktadır. Termolüminesans (TL), iyonlaştırıcı radyasyona maruz kalmış yalıtkan veya yarı iletken malzemelerdeki tuzak merkezlerinde hapsolmuş elektronların, malzeme ısıtıldığında yeniden birleşmesiyle foton yayması prensibine dayanır. TL sinyalinin şekli ve şiddeti, tuzak derinliği, frekans faktörü ve yeniden birleşme olasılığı gibi kinetik parametrelerle belirlenir (McKeever, 1985; Chen ve McKeever, 1997). TL yöntemi, basit deneysel düzenekler gerektirmesi ve geniş doz aralıklarında ölçüm yapabilmesi gibi avantajlara sahiptir; ancak yüksek sıcaklıkların gerekli olması ve ölçüm sırasında malzemenin bozunma riskinin bulunması gibi dezavantajları da mevcuttur (McKeever, 1985; Aitken, 1998).

Optik uyarımlı lüminesans (OSL) yöntemi, iyonlaştırıcı radyasyona maruz kalan malzemelerin belirli dalga boyunda ışık ile uyarıldığında hapsolmuş elektronların serbest kalması ve bu sırada foton yayılması esasına dayanır. TL'den farklı olarak OSL, yüksek sıcaklık gerektirmediği için ölçüm sırasında örnek zarar görmez ve tekrar tekrar ölçüm yapılmasına olanak tanır. Ayrıca OSL sinyalinin farklı bileşenleri (hızlı, orta, yavaş) minerallerin dozimetri ve tarihlendirme potansiyeli hakkında ayrıntılı bilgi sağlar (Wintle, 2008).

Her iki teknik de arkeolojik, jeolojik ve nükleer uygulamalarda yaygın olarak kullanılmakta olup, malzemelerin geçmişte maruz kaldığı radyasyon dozlarını hassas bir şekilde belirleme imkânı sağlamaktadır. Ayrıca hem TL hem OSL, dozimetri çalışmalarında kalibrasyon ve standardizasyon prosedürleri ile güvenilir sonuçlar vermektedir.

Kuvars minerali, feldspattan sonra yer kabuğunda en çok bulunan ikinci mineral olup, toplam kütlenin yaklaşık %12'sini oluşturur (Deer ve ark., 1992). Geniş coğrafi dağılımı, yüksek kimyasal

kararlılığı ve lüminesans sinyallerinin uzun süreli stabilitesi sayesinde, jeokronoloji ve radyasyon dozimetrisinde en yaygın kullanılan doğal malzemelerden biridir (Murray ve Wintle, 2000). Kuvarsın TL ve OSL özellikleri; uygun optik filtre seçimi, ön ısıtma sıcaklığı optimizasyonu, doz–yanıt davranışı, ısıtma hızının etkisi ve yeniden kullanılabilirlik gibi parametrelerle doğrudan ilişkilidir.

Geleneksel olarak TL ve OSL eğrileri, deneysel ölçümler yoluyla elde edilmekte ve analiz edilmektedir. Ancak bu süreç, farklı doz seviyeleri ve değişen deneysel koşullarda çok sayıda ölçüm yapılması yoluyla gerçekleştirildiğinden hem zaman hem de maliyet bakımından oldukça yoğun bir çalışma gerektirmektedir. Son yıllarda, yapay zekâ (YZ) ve özellikle yapay sinir ağları (YSA), lüminesans verilerinin modellenmesinde güçlü bir alternatif olarak öne çıkmıştır. YSA, insan beyninin öğrenme mekanizmasını taklit eden, giriş–çıkış ilişkilerini örüntü tanıma yoluyla kuran matematiksel modellerdir (Haykin, 1999). Çok katmanlı ileri beslemeli YSA'lar, doğrusal olmayan ilişkileri yüksek doğrulukla modelleyebilir ve yeterli eğitim verisi sağlandığında, bilinmeyen doz seviyeleri veya farklı deneysel koşullara ait TL/OSL eğrilerini tahmin etmede başarılı sonuçlar verir (Leal-Ayala ve ark., 2012; Singh ve ark., 2020).

YSA, lüminesans verilerinin farklı minerallerin karakterize edilmesinde ve deneysel verilerin doğruluğunun artırılmasında başarıyla kullanılmaktadır. Örneğin, Işık ve ark. (2021a) TL eğrilerinden solma süresini yapay sinir ağları ile tahmin etmiş; Toktamiş ve ark. (2022) doğal halit minerallerinin TL özelliklerini makine öğrenmesi algoritmaları ile sınıflandırmıştır. Yüksel ve Ünsal (2025) ise plajiyoklas minerali için TL özelliklerini YSA kullanarak modellemiş ve Levenberg–Marquardt (LM), Bayesian Regularization (BR), Scaled Conjugate Gradient (SCG) gibi farklı optimizasyon algoritmalarının performanslarını karşılaştırmışlardır. Bu çalışmalar, YSA'ların lüminesans tabanlı dozimetride deneysel süreci kısaltma ve tahmin doğruluğunu artırma potansiyelini ortaya koymaktadır.

Bu tez çalışmasında, Mersin ili Erdemli ilçesinde bulunan bir halk plajından alınan ve farklı ayrıştırma prosedürleri kullanılarak saflaştırılan kuvars mineralinin TL ve OSL özellikleri sistematik olarak araştırılmıştır. TL deneyleri kapsamında uygun optik filtre seçimi, optimum ön ısıtma sıcaklığı, doz–yanıt ilişkisi, farklı ısıtma hızlarının etkileri ve yeniden kullanılabilirlik değerlendirilmiştir. OSL deneylerinde ise yeniden kullanılabilirlik ve doz–yanıt karakteristikleri incelenmiştir. Ayrıca, farklı doz seviyelerinde ve deneysel koşullarda elde edilen TL ve OSL eğrileri YSA modelleri ile tahmin edilmiş; LM, BR ve SCG algoritmalarının tahmin performansları karşılaştırılmıştır.

Bu çalışmanın temel amacı, kuvars mineralinin bazı temel lüminesans (TL ve OSL) özelliklerinin detaylı olarak ortaya konulması ve YSA modelleme yöntemlerinin TL ve OSL eğrilerinin ve radyasyon dozlarının tahmin edilmesi gibi çalışmalara veri altlığı sağlayarak, deneysel süreçlerin kısaltılması, veri üretim hızının artırılması ve model tabanlı tahminlerin yaygınlaştırılmasına katkıda bulunmaktır.

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Kuvars minerali, sahip olduğu TL ve OSL özellikleri nedeniyle çevresel dozimetri, jeolojik tarihlendirme ve radyasyon ölçüm sistemlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu kapsamda literatürde pek çok araştırma, kuvarsın TL davranışını etkileyen faktörleri, tuzak parametrelerini ve sinyal optimizasyon yöntemlerini detaylı şekilde incelemiştir.

Wintle ve Adamiec (2017), kuvarsın OSL sinyallerini ele alan kapsamlı derleme çalışmalarında, farklı uyarım protokollerinin, spektral aralıkların ve ön ısıtma işlemlerinin sinyal bileşenleri üzerindeki etkilerini ayrıntılı biçimde değerlendirmiştir. Çalışmada, özellikle hızlı bileşenin ayrıştırılması, uyarım dalga boylarının seçimi, ölçüm sıcaklığı gibi parametrelerin kuvarsın OSL sinyal kalitesini doğrudan etkilediği vurgulanmıştır.

Chawla ve arkadaşları (1998) tarafından yürütülen deneysel çalışmada, doğal kuvars örnekleri üzerinde yüksek doz ışınlamanın TL duyarlılığı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Araştırmada, 250 Gy üzerindeki dozlarda duyarlılık artışı gözlemlenmiş ve bu durumun yeni merkez oluşumları ile ilişkili olduğu belirtilmiştir. Ayrıca, bu merkezlerin elektron spin rezonansı (ESR) ölçümleri ile doğrulandığı ifade edilmiştir. Çalışma, kuvars temelli TL tarihlemenin kapsamının genişletilmesine yönelik önemli bir katkı sunmaktadır.

Topaksu ve arkadaşları (2013), Türkiye'nin Hakkâri bölgesinden elde edilen doğal hidrotermal kuvars örneklerinin ışıma eğrisi karakteristiklerini incelemiştir. Farklı ısıtma hızlarında yapılan ölçümler, tuzak parametrelerinin belirlenmesinde ön ısıtma sıcaklığının ve ısıtma hızı değerlerinin kritik rol oynadığını göstermiştir. Çalışmada ışıma eğrilerinin ayrıştırılması (CGCD) teknikleriyle analiz edilmesi, bölgesel kuvars minerallerinin dozimetri potansiyelini anlamada önemli bilgiler sağlamaktadır.

Singh ve ark (2012), doğal kuvarsın yüksek gama dozlarına maruz bırakılması durumunda gözlenen TL davranışlarını değerlendirmiştir. Araştırmada, doz yanıt eğrilerinin doğrusal ve doğrusal üstü bölgeleri detaylandırılmış, örneklerin farklı ön ısıtma sıcaklıklarında yeniden ısıl işleme tabi tutulmasıyla sinyalin tekrarlanabilirliği test edilmiştir. Bu kapsamda, kuvarsın yeniden kullanım özellikleri de ortaya konmuştur. Thomas ve Chithambo (2018) ise tavlanmış doğal kuvars üzerinde genel TL özelliklerini kinetik açıdan analiz etmiş, ışıma eğrisi parametrelerinin hesaplanmasında farklı ön ısıtma protokollerinin ve ısıtma hızı faktörünün önemini vurgulamıştır. Çalışma, tuzak parametrelerinin kararlılığını optimize etmeye yönelik öneriler sunarak TL ölçümlerinin doğruluğunu artırmayı hedeflemiştir.

Pagonis ve ark (2011) tarafından geliştirilen analitik modeller, kuvars üzerinde zaman çözünürlüklü OSL (TR–OSL) deneylerinin açıklanmasına katkı sağlamaktadır. Bu modeller, sinyal ömrü, ısıl sönümleme ve yeniden birleşme süreçlerini matematiksel olarak açıklamakta ve MATLAB tabanlı yapay sinir ağı (YSA) uygulamaları için önemli bir temel oluşturmaktadır. Bu sayede ışıma eğrisi ayrıştırma ve parametre kestirimi yapay zekâ destekli olarak gerçekleştirilebilmektedir.

Soares ve ark (2023), doğal kuvars kristallerindeki OSL bileşenlerini ve duyarlılık değişimlerini araştırarak tekrarlanan ışınlama–okuma döngülerinin sinyal üzerindeki etkilerini incelemiştir. Çalışma, kuvars minerallerinin ardışık dozimetri senaryolarında performansını koruyup koruyamadığını belirlemek açısından önem taşımaktadır.

Schmidt ve Woda (2019) ise kuvarsın yüksek doz aralığındaki TL spektrumlarını detaylandırarak, farklı tuzak dolum seviyelerinde yeniden birleşme merkezlerinin spektral özelliklerini analiz etmiştir. Yaptıkları çalışmalar, kuvarsın endüstriyel radyasyon ölçümlerindeki dayanım sınırlarının belirlenmesine katkı sunmaktadır.

Bulur ve ark (2000) tarafından gerçekleştirilen doğrusal modülasyonlu OSL (LM–OSL) çalışmaları, kuvarsın optik sinyalinin bileşenlerine ayrılmasını sağlayarak kinetik parametrelerin doğru şekilde tahmin edilmesine imkân tanımıştır. Bu yöntemlerin YSA tabanlı sinyal analizlerinde veri hazırlığı açısından örnek teşkil ettiği belirtilmiştir.

Kumar ve Annalakshmi (2023), Hindistan sahillerinden elde edilen plaj kumu kökenli kuvars üzerinde ön ısıtma sıcaklığı, ısıtma hızı ve doz yanıt eğrileri gibi parametrelerin doğal dozimetriye uygunluğunu incelemiştir. Ayrıca, kuvars örneklerinin tekrarlı ışınlama–okuma döngülerindeki performans kayıpları değerlendirilerek yeniden kullanılabilirlik potansiyeli ortaya konmuştur.

TL analizi, arkeolojik ve jeolojik tarihlendirme, dozimetri uygulamaları ve iyonlaştırıcı radyasyon hasarının tespiti gibi birçok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır. Feldspat grubu minerallerden biri olan plajioklaz, doğal TL özellikleri nedeniyle dozimetrik çalışmalarda sıkça tercih edilen bir materyaldir. TL yönteminin hassasiyeti ve doğruluğu, malzemenin kinetik parametreleri, parlama eğrisi yapısı ve doz-tepki özellikleri ile yakından ilişkilidir. Yüksel ve Ünsal (2025), plajioklaz mineralinin farklı iyonlaştırıcı radyasyon dozları (0,1–550 Gy) altındaki TL davranışını incelemiş, 0,3–550 Gy aralığında güçlü bir doğrusal doz-yanıt ilişkisi gözlemlemişlerdir. Ayrıca bilgisayarlı ışıma eğrisi ayrıştırma (CGCD) yöntemiyle beş ayrı TL tepesinin varlığı belirlenmiş ve bu tepelerin aktivasyon enerjilerinin 0,842 eV ile 0,890 eV arasında değiştiği ortaya konmuştur. Bu değerlerin genel mertebe kinetik modeli ile uyumlu olduğu belirtilmiştir. Çalışma, TL verilerinin daha ileri düzeyde modellenmesi amacıyla (YSA kullanılarak gerçekleştirilmiş ve üç farklı optimizasyon algoritması LM, BR, SCG karşılaştırılmıştır. BR algoritması, doğruluk (%99,915), MAE ($2{,}34 \times 10^{-3}$) ve MSE ($3{,}82 \times 10^{-5}$) değerleri ile en başarılı sonuçları vermiştir. Bu bulgular, TL analizlerinin geleneksel yöntemlerle sınırlı kalmadan, ileri seviye yapay zekâ teknikleri ile desteklenerek daha güvenilir doz tahminlerinin ve malzeme karakterizasyonlarının yapılabileceğini göstermektedir. Böylece hem dozimetri hem de jeokronoloji alanlarında TL'nin uygulanabilirliği önemli ölçüde artmaktadır.

Doğan (2023) tarafından gerçekleştirilen bir çalışmada, TL ışıma eğrilerinin yapay sinir ağları ile tahmin edilmesine yönelik kapsamlı bir karşılaştırma yapılmıştır. Çalışmada, 10 ile 900 Gy arasında değişen on bir farklı doz değerine ait TL verileri eğitim seti olarak kullanılmış ve 40, 276, 320 ve 800 Gy dozlarında elde edilen veriler test seti olarak değerlendirilmiştir. Elde edilen deneysel

veriler ile yapay sinir ağı tahminleri, ortalama karesel hata (RMSE), regresyon katsayısı (R^2), kök karesel hata (RSE) ve ortalama mutlak hata (MAE) gibi istatistiksel ölçütler üzerinden karşılaştırılmıştır. Bu doğrultuda, farklı mimari yapıya sahip yedi sinir ağı modeli incelenmiştir: uyarlanabilir ağ tabanlı bulanık çıkarım sistemi (ANFIS), genel regresyon sinir ağı (GRNN), radyal tabanlı sinir ağı (RBNN), kademeli ileri geri yayılımlı sinir ağı (CFBNN), Elman tipi geri yayılımlı sinir ağı (EBNN), ileri beslemeli geri yayılımlı sinir ağı (FFBNN) ve katman yinelemeli sinir ağı (LRNN). Analiz sonuçlarına göre, Elman tipi geri yayılımlı sinir ağı en yüksek performansı göstermiştir. Bu modelde eğitim başarısı %80,8, test başarısı ise %87,95 olarak tespit edilmiştir. Elde edilen bulgular, TL eğrilerinin yalnızca klasik yöntemlerle değil, aynı zamanda yapay zekâ destekli modellerle de başarılı şekilde analiz edilebildiğini ve bu sayede deneysel veriler üzerinde güvenilir tahminlerin elde edilebildiğini göstermektedir.

TL özelliklerinin modellenmesi, özellikle dozimetrik malzemelerin karakterizasyonunda önemli bir araştırma alanıdır. Bu kapsamda, Işık (2022) tarafından yapılan çalışmada, doğadan elde edilen kalsit örneklerinin TL ışıma eğrileri incelenmiş ve bu eğrilerin analizinde Gauss Proses Regresyonu (GPR) yöntemi kullanılmıştır. Çalışmada, TL eğrisinin yaklaşık 90 °C ve 240 °C'de iki belirgin tepe içerdiği ve bu bölgelerin dozimetrik uygulamalar açısından kritik öneme sahip olduğu belirlenmiştir. GPR modeliyle gerçekleştirilen dört farklı regresyon analizi sonucunda, 3 °C/s ısıtma hızında elde edilen verilerin en düşük kalıntı değerine sahip olduğu gösterilmiştir. Bu durum, makine öğrenmesi yaklaşımlarının TL verilerinin istatistiksel değerlendirilmesinde güçlü bir alternatif sunabileceğini ortaya koymuştur. Ayrıca çalışmada, TL sinyalinin modelleme başarısının sadece fiziksel parametrelerle değil, aynı zamanda uygun algoritma seçimiyle de ilişkili olduğu vurgulanmıştır. Bu bulgular, doğal kuvars gibi diğer minerallerin TL karakterizasyon çalışmalarına metodolojik bir referans sağlamaktadır.

Makine öğrenmesi algoritmalarının TL verilerinin işlenmesinde etkin biçimde kullanılabileceğini gösteren bir diğer çalışma Toktamış ve ark (2022) tarafından gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada, Türkiye'nin Konya ili sınırları içerisinde yer alan Meke krater gölünden elde edilen doğal halit (kaya tuzu) kristallerinin TL özellikleri incelenmiş ve TL verilerinin sınıflandırılmasında çeşitli makine öğrenmesi algoritmaları (Destek Vektör Makinesi [SVM], Yapay Sinir Ağı [YSA] ve K-En Yakın Komşu [K-NN]) kullanılmıştır. Elde edilen ışıma eğrisinde, 100 °C ve 270 °C civarında iki belirgin TL tepesi gözlemlenmiş ve bu bölgelerin dozimetrik açıdan anlamlı olduğu belirlenmiştir. Üç farklı sınıflandırma algoritması arasında SVM'nin en yüksek doğruluk, hassasiyet ve kesinlik ve duyarlılık değerlerini harmonik ortalaması olan F-skoru değerlerine ulaştığı vurgulanmıştır. Ayrıca, yüksek eğitim oranına sahip, normalleştirilmiş verilerle yapılan analizlerin sınıflandırma başarımını artırdığı belirtilmiştir. Bu bulgular, TL sinyallerinin yalnızca analitik yöntemlerle değil, aynı zamanda veri odaklı yaklaşımlarla da yüksek doğrulukla işlenebileceğini göstermekte ve doğal minerallerin radyasyon dozimetrisinde kullanım potansiyelini güçlendirmektedir.

Makine öğrenmesi tabanlı modelleme yaklaşımlarının TL sinyallerinin çözümlemesinde kullanıldığı bir başka önemli çalışma, Işık ve ark (2021) tarafından gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada, kuvars kristallerinin TL ışıma eğrilerinden sönümlenme süresinin tahmini amacıyla YSAmodeli uygulanmıştır. Deneysel olarak 70 Gy'lik β kaynağıyla ışınlanmış ve 64 saat oda sıcaklığında bekletilmiş kuvars örneklerinden elde edilen TL verileri, ileri beslemeli geri yayılım algoritması (feed-forward backpropagation) ile eğitilmiş; transfer fonksiyonu olarak Tansig, optimizasyon algoritması olarak ise LM yöntemi kullanılmıştır. Modelin doğruluğu belirleme katsayısı (R^2) ve ortalama karesel hata (MSE) değerleriyle değerlendirilmiş ve elde edilen sonuçların, kuvarsın TL sinyalinin zamanla nasıl sönümlendiğini yüksek hassasiyetle öngörebildiği gösterilmiştir. Bu çalışma, TL verilerinin zamana bağlı olarak modellenmesi açısından makine öğrenmesinin güçlü potansiyelini ortaya koymakta ve özellikle kuvars gibi doğal minerallerin uzun süreli dozimetrelerde kullanımı açısından önemli bir katkı sunmaktadır.

YSA temelli modelleme, TL verilerinin analizinde giderek artan bir şekilde tercih edilmektedir. Bu bağlamda, Işık ve ark (2021) tarafından yürütülen çalışmada, diş protezlerinde kullanılan cam seramiğin TL özellikleri değerlendirilmiş ve ışınlama dozu ile solma süresinin tahmini için bir YSA modeli geliştirilmiştir. Modelin giriş bileşenleri olarak sıcaklık, doz ve solma süresi; çıkış bileşeni olarak ise TL şiddeti kullanılmıştır. MATLAB ortamında geliştirilen modelde 18 nöronlu bir gizli katman yapısı kullanılmış ve model eğitimi sonucunda elde edilen simülasyon verilerinin deneysel sonuçlarla %99 oranında benzerlik gösterdiği rapor edilmiştir. Bu çalışma, YSA yöntemlerinin sadece doğal mineraller değil, aynı zamanda biyomedikal ve dental seramik malzemelerin dozimetrik potansiyelinin değerlendirilmesinde de yüksek başarı sağladığını ortaya koymaktadır.

Sonuç olarak, literatürdeki bulgular, kuvars mineralinin lüminesans temelli dozimetri uygulamalarında -özellikle TL ve OSL ölçümlerinde- optimum ön ısıtma sıcaklığının, ısıtma hızının, doz-yanıt eğrilerinin ve yeniden kullanılabilirlik testlerinin titizlikle belirlenmesinin, ölçümlerin doğruluk ve hassasiyetini artırmada kritik öneme sahip olduğunu ortaya koymaktadır. Ayrıca, yapay sinir ağı (YSA) tabanlı modelleme yaklaşımlarının bu süreçlere entegre edilmesiyle, veri analizinde hem doğruluk hem de öngörü gücünün anlamlı düzeyde geliştirilebileceği vurgulanmaktadır.

Bu bağlamda, mevcut çalışmanın temel amacı, literatürde sınırlı olarak ele alınan OSL bozunum eğrilerinin tahmin edilmesi ve OSL bozunum eğrilerinden radyasyon dozunun belirlenmesi yaklaşımlarını, modern optimizasyon algoritmaları ve yapay sinir ağı tabanlı modelleme teknikleri ile birleştirerek kuvarsın dozimetri uygulamalarındaki etkinliğini artırmaktır. Böylece, kuvars esaslı dozimetri sistemlerinin performansının hem deneysel hem de hesaplamalı yöntemlerle optimize edilmesi hedeflenmektedir.

3. MATERYAL VE METOT

3.1. Materyal

3.1.1. Kuvars Minerali

Kuvars (SiO_2), silikat mineralleri grubuna dâhil, dünyada en yaygın bulunan minerallerden biridir ve feldspattan sonra yer kabuğunda en bol bulunan ikinci mineral olup, kabuk kütlesinin yaklaşık %12'sini oluşturur (ChemEurope, 2025). Yapısında SiO_4 tetrahedronları üç boyutlu bir ağ oluşturacak şekilde bağlanır ve bu nedenle framework silicate olarak sınıflandırılır (CAMEO, 2022). Kristal sistemi trigonal (hekzagonal) simetri gösterir ve çoğunlukla altıgen prizma şeklinde kristaller hâlinde bulunur (ChemEurope, 2025). Saf kuvars, ağırlıkça yaklaşık %46,7 Si ve %53,3 O içerir (MTA, t.y.).

Fiziksel özellikleri bakımından kuvars, Mohs sertlik ölçeğinde 7 değerine sahiptir ve cam ile birçok metalden daha serttir. Yoğunluğu ortalama 2,65 g/cm³ olup, belirgin bir yarılma (cleavage) göstermez; bunun yerine konkoidal kırılma (conchoidal fracture) sergiler (ScienceDirect, 2022). Saf α-kuvars yaklaşık 1710–1785 °C sıcaklık aralığında erir (IEEE-UFFC, 2022). Kimyasal olarak çoğu aside karşı inerttir; yalnızca hidroflorik asitte (HF) çözünür. Doğal kuvars minerallerinde safsızlık olarak katı eriyikLi, Na, Al, Ti ve Mg gibi elementler bulunabilir.

Optik özellikleri arasında cam parlaklığı (vitreous luster), saydam veya yarı saydam görünüm ve çoğunlukla renksizlik yer alır. Ancak gaz, sıvı veya katı kapanımlar kuvarsa renk kazandırabilir. Bu kapanımlar arasında CO_2, H_2O, hidrokarbonlar, NaCl, $CaCO_3$ ve rutil gibi mineraller yer alır (MTA, t.y.). Kuvars ayrıca piezoelektrik, piroelektrik ve lüminesans özellikleri sergiler; bu özellikler, mekanik stres altında elektrik üretmesini ve çeşitli optoelektronik uygulamalarda kullanılmasını sağlar (CAMEO, 2022).

Jeolojik olarak kuvars, magmatik, metamorfik ve sedimanter kayaçlarda yaygın olarak bulunur. Kumtaşı, granit ve gnays gibi kayaçlarda önemli miktarlarda yer alır. Yüksek kimyasal kararlılığı sayesinde, tortul ortamlarda uzun süre bozulmadan kalabilir (ChemEurope, 2025). Bu özellikleri, kuvarsı hem endüstriyel hem de bilimsel araştırmalarda vazgeçilmez kılar.

Kuvars, özellikle termolüminesans (TL) ve optik uyarımlı lüminesans (OSL) özellikleri nedeniyle jeokronoloji ve radyasyon dozimetrisinde en yaygın kullanılan minerallerden biridir (DTU Orbit, 2023). TL ve OSL tekniklerinde, kuvarsın kristal yapısındaki kusurlar -örneğin non-bridging oxygen hole centers- lüminesans sinyalinin kararlılığı ve yoğunluğu üzerinde belirleyici rol oynar (Skuja ve ark., 2021). Bu özellik, kuvarsın ışık enerjisini depolayabilme ve uygun koşullarda bu enerjiyi yeniden salabilme kapasitesi ile doğrudan ilişkilidir. Dolayısıyla, kuvarsın maruz kaldığı son ışık veya ısıl işlem zamanı belirlenerek arkeolojik ve jeolojik örneklerin yaş tayini yapılabilir.

Endüstride kuvars; yüksek sıcaklığa dayanıklı cam ve seramik üretiminde, optik sistemlerde, laboratuvar gereçlerinde, elektronik devrelerde, iletişim teknolojilerinde ve yüksek frekanslı

kristallerin üretiminde yaygın olarak kullanılmaktadır. Saflaştırılmış kuvarsın eritilmesiyle elde edilen kuvars, yüksek sıcaklık dayanımı ve optik geçirgenliği nedeniyle özellikle kimya laboratuvarlarında ve optik cihazlarda tercih edilmektedir.

Bu çalışmada kullanılan kuvars minerali, Türkiye'nin Mersin ili Erdemli ilçesinde yer alan, halka açık bir plajdan (36°36′30.6″ K, 34°19′25.8″ D) alınan kum örneklerinin kimyasal ve fiziksel bir takım ayrıştırma yöntemleri kullanılarak saflaştırılması sonucunda elde edilmiştir (Şekil 3.1).



Şekil 3.1. Sahil Kumu ve Ayrıştırılmış Kuvars Örnekleri Genel Görünümü

Halka açık plajdan toplanan plaj kumu örneklerinden kuvars taneleri, standart kuvars örnek hazırlama prosedürleri (Aitken, 1998) izlenerek birçok araştırmacı tarafından da yaygın olarak kullanılan yönteme benzer bir protokol takip edilerek ayrıştırılmıştır. Kum örnekleri, kuvars, feldspat, florit, organik bileşikler ve karbonat gibi çeşitli malzemelerin karışımını içermektedir. Bu nedenle saf kuvars elde etmek amacıyla, aşağıda sıralanan fiziksel ve kimyasal işlemler ardışık olarak uygulanmıştır.

Kum örnekleri ilk aşamada, 90–140 μm aralıklı eleklerle ıslak eleme yapılarak kaba ayırma işlemine tabi tutulmuş elek altında kalan karışım örnekler kurutulduktan sonra agat havanda öğütülerek tekrar elenmiştir. İkinci aşamada, lüminesans ölçümlerinde istenmeyen sinyal yayan karbonatları uzaklaştırmak amacıyla örnekler 1 saat süreyle %10'luk hidroklorik asit (HCl) çözeltisinde bekletilmiş ve her 15 dakikada bir karıştırılarak tepkime sağlanmıştır. Üçüncü aşamada, örneklerin içerisinde yer alan organik maddeleri uzaklaştırmak amacıyla 24 saat süreyle %30'luk hidrojen peroksit (H_2O_2) çözeltisinde bekletilmiştir. Dördüncü aşamada, kuvars elde etme çalışmalarında en büyük sorunlardan biri olan feldspat minerallerini uzaklaştırmak amacıyla örnekler %38'lik hidroflorik asit (HF) ile 1 saat süreyle aşındırılmıştır. Beşinci aşamada, karışım içerisinde yer alan florit minerallerini uzaklaştırmak amacıyla da örnekler %10'luk hidroklorik asit (HCl) ile 1 saat süreyle tekrar aşındırılmıştır. Örneklere uygulanan bu beş aşamanın her birinde asit işlemleri tamamlandıktan sonra örnekler deiyonize su ile asit artıkları kalmayacak şekilde yıkanmıştır. Altıncı aşamada, örneklerin içerisinde yer alan demiri uzaklaştırmak için mıknatıs kullanılarak manyetik ayrıştırma yapılmıştır.

Feldspatın daha etkili şekilde uzaklaştırılması ve kuvars saflığının artırılması amacıyla, yoğunluğu yaklaşık 2,62 g/cm³'e ayarlanmış sodyum poliyen-tungstat (SPT) kullanılarak ek bir ağır sıvı ayrıştırma işlemi yapılmıştır. Bu yoğunluktan daha düşük yoğunluğa sahip feldspat taneleri yüzeye çıkarken, daha yoğun kuvars taneleri dibe çökmüştür. Kuvars örnekleri dikkatlice toplanmış, ağır sıvı kalıntılarının tamamen uzaklaştırılması için deiyonize su ve etanol ile iyice durulanmış ve düşük sıcaklıkta kurutulmuştur.

OSL ölçümleri için, tane boyutu 90–140 μm aralığında ve kütleleri 8,0 ± 0,2 mg olan kuvars tozları, silikon yağı kullanılarak kenarlı disklerin üzerine yapıştırılmış ve beş alikot hazırlanmıştır. β-ışınlaması, aktivitesi 1,85 GBq (50 mCi) olan, 0,10 Gy/s doz hızında ve maksimum 2,2 MeV enerjiye sahip dahili bir stronsiyum radyoizotop (^{90}Sr-^{90}Y) beta kaynağı ile gerçekleştirilmiştir. Tüm lüminesans ölçümleri (TL ve OSL), Almanya menşeli Freiberg Instruments GmbH tarafından üretilen Lexsyg smart TL/OSL okuyucu cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiş olup kaydedilen TL ve OSL eğrilerine ait sinyallerin analiz işlemleri LexStudio2 yazılımı (sürüm 2.8.2) ile yapılmıştır.

Deneysel çalışmalar sonucunda kuvars örneklerinin soğurduğu radyasyon dozları ve elde edilen TL ışıma ve OSL bozunum eğrileri MATLAB yazılımındaki Neural Net Fitting (NNF) araç kutusu ile LM, BR ve SCG optimizasyon algoritmaları kullanılarak yapay sinir ağları (YSA) ile eğitilmiştir.

3.1.2. Laboratuvar Araç ve Gereçleri

Hassas Terazi

Bu çalışmada kullanılan tüm örneklerin tartım işlemleri, laboratuvar standartlarına uygun, maksimum 220 g kapasiteye ve 0,0001 g (0,1 mg) hassasiyete sahip bir hassas tartım terazisi ile gerçekleştirilmiştir. Otomatik dahili kalibrasyon mekanizması sayesinde çevresel değişimlere karşı sabit doğruluk sağlanmış ve yüksek doğruluk gerektiren analizlerde güvenilir sonuçlar elde edilmiştir. Tartım işlemleri sırasında kuvars örneklerinin kütlesi kesin olarak ölçülmüş, her tartım öncesinde cihaz temizlenmiş ve kalibrasyon kontrolü yapılmıştır. Böylece, kuvarsların belirli bir hassasiyetle ölçülmesi ve deney sonuçlarının güvenilirliği temin edilmiştir.

Agat Havan

Bu çalışmada, doğal kuvarsın tanecik boyutunun küçültülmesi ve homojen bir yapı elde edilmesi amacıyla agat havan kullanılmıştır. Agat havanın tercih edilmesinde, doğal agat taşından üretilmiş olması temel etken olmuştur. Mohs sertlik skalasında 7 değerine sahip yüksek sertliği ile kırılma ve çizilmeye karşı dayanıklılık göstermesi, öğütme işlemi sırasında kontaminasyon (bulaşı) riskini minimuma indirmiştir.

Örneklerin hazırlanmasında, kullanım öncesinde havan ve havaneli %70'lik etanol ile temizlenmiş ve işlem sonrası kalıntılardan tamamen arındırılmıştır. Bu temizlik işlemi, analiz sırasında ortaya çıkabilecek olası kimyasal veya fiziksel kontaminasyonu (bulaşı) önlemek amacıyla titizlikle gerçekleştirilmiştir.

Her kullanımın ardından havan, kalıntı bırakmayacak şekilde temizlenmiş ve kurutulmuştur. Bu uygulama, sonraki kullanımlarda örneklerin saflığının korunması açısından önemli bir adım olmuştur. Agat havanın yüksek sertlik ve kimyasal direnç gibi özellikleri sayesinde, organik ve inorganik analizlerde güvenilir sonuçlar elde edilmiş pürüzsüz ve sert yapısı, öğütme sırasında örneklerin fiziksel bütünlüğünü koruyarak saflığın sağlanmasına katkıda bulunmuştur.

Kenarlıklı Diskler

Bu çalışmada, örneklerin hazırlanması ve ölçüm işlemleri sırasında kullanılan 10 mm çapında kenarlıklı diskler, numune bütünlüğünü korumak ve homojen ölçüm yüzeyi sağlamak amacıyla tercih edilmiştir. Paslanmaz çelikten üretilen bu diskler, yüksek ısıl iletkenlikleri sayesinde analiz sırasında sıcaklık dağılımının eşit olmasına katkıda bulunmuştur.

Kenarlıklı tasarım, numune materyalinin disk yüzeyinde sabitlenmesini kolaylaştırmış ve ölçüm esnasında dağılma veya kayma riskini azaltmıştır. Numune yerleştirilmeden önce disk yüzeyi, %70'lik etanol ile temizlenerek olası kontaminasyon (bulaşı) riskleri ortadan kaldırılmıştır. Temizlik sonrası diskler, havada kurutulmuş ve doğrudan kullanıma hazır hale getirilmiştir.

Numune yükleme işlemi sırasında, kenarlıklı yapının sağladığı fiziksel sınır sayesinde her örnek, belirlenen miktarda malzeme ile ve eşit kalınlıkta hazırlanmıştır. Bu durum, özellikle TL ölçümlerinde tekrarlanabilirlik ve veri güvenilirliği açısından kritik bir rol oynamıştır.

Kullanım sonrası diskler, kalıntı bırakmayacak şekilde temizlenmiş ve düzenli olarak kontrol edilmiştir. Böylece sonraki ölçümlerde hem mekanik hem de kimyasal saflık korunmuştur. Kenarlıklı disklerin bu özellikleri, çalışmanın deneysel güvenilirliğini artırmış ve ölçüm sonuçlarının standartlaşmasına katkı sağlamıştır.

Kimyasallar

Kum örneklerinden karbonatları ve florit mineralini uzaklaştırmak için %10'luk hidroklorik asit (HCl) çözeltisi, organik materyalleri uzaklaştırmak için %30'luk hidrojen peroksit (H_2O_2) çözeltisi, feldspat minerallerini uzaklaştırmak için %38'lik hidroflorik asit (HF) çözeltisi ve kuvarsı tam anlamıyla saflaştırmak için yapılan fiziksel ayrıştırma işleminde de yoğunluğu yaklaşık olarak 2,62 g/cm³'e ayarlanmış sodyum poliyen-tungstat (SPT) ağır sıvısı kullanılmıştır. Asit işlemlerinden sonra asit artıklarını örneklerden temizlemek için de deiyonize su ve etanol kullanılmıştır.

Pensler

Örneklerin hazırlanması, taşınması ve ölçüm alanına yerleştirilmesi süreçlerinde yüksek hassasiyet ve kontrol sağlamak amacıyla kullanılmıştır. Genellikle paslanmaz çelik veya krom kaplama malzemeden üretilen penslerin uçları, örnek yüzeylerine zarar vermemek için ince, pürüzsüz ve özel olarak tasarlanmıştır. Bu sayede numunelerin mekanik deformasyon, çizik veya çatlama gibi olumsuz etkilerden korunması mümkün olmuştur. Pensler, özellikle küçük ve hassas örneklerin güvenli şekilde taşınması ve disk veya diğer cihazlara doğru pozisyonda yerleştirilmesi aşamasında kritik bir rol üstlenmiştir. Her kullanım öncesinde ve sonrasında penslerin yüzeyleri, olası kimyasal ve fiziksel kalıntıların örneklere geçmesini önlemek amacıyla uygun temizleyicilerle titizlikle temizlenmiş ve tamamen kurutulmuştur.

Silikon Yağı

Örneklerin sabitlenmesi ve temas yüzeylerinin korunması amacıyla ara katman olarak kullanılmıştır. Yüksek kimyasal kararlılığı ve termal direnç özelliği sayesinde silikon yağı, örneklerin cihaz yüzeylerine yapışmasını önlemiş ve temas sırasında oluşabilecek mekanik stresi azaltmıştır. Ayrıca, silikon yağının düşük viskozitesi, numunelerin homojen bir şekilde yerleşmesine ve ölçüm yüzeyinde hava kabarcıklarının oluşmasının engellenmesine olanak sağlamıştır. Kullanılan silikon yağının saflığı ve kimyasal inertliği, analizlerin sonuçlarını olumsuz etkileyecek herhangi bir kontaminasyon (bulaşı) riskini en aza indirmiştir. Örneklerin silikon yağı ile sabitlenmesi, ölçüm esnasında örneklerin fiziksel bütünlüğünün korunmasına ve termal iletimin dengeli olmasına katkıda bulunmuştur. Silikon yağının uygulanması öncesinde, temas yüzeyleri uygun çözeltilerle temizlenerek olası kalıntılar giderilmiş ve böylece deneylerin doğruluğu ve tekrarlanabilirliği artırılmıştır. Bu uygulama, özellikle TL ve diğer spektroskopik analizlerde örnek ile cihaz arasındaki etkileşimin kontrol altına alınmasını sağlamış ve deneysel güvenilirliğe önemli bir katkı sunmuştur.

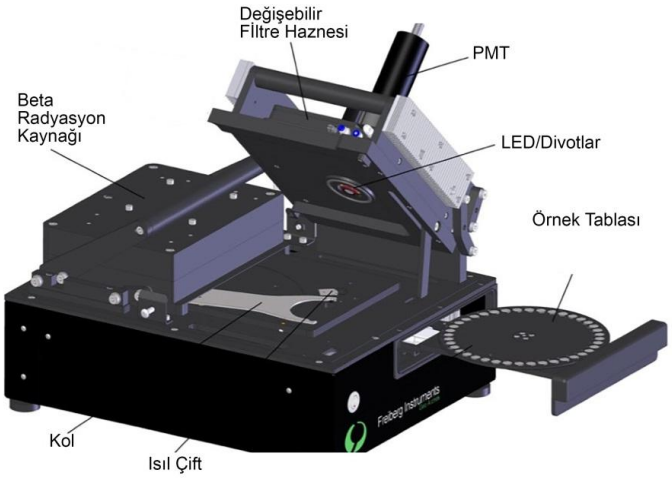
Lexsyg Smart TL/OSL Okuyucu

Bu tez çalışmasında kuvars örneklerinin ışınlanması, TL ışıma ve OSL bozunum eğrilerinin kaydedilmesi ve deneysel verilerin elde edilmesi aşamalarında Çukurova Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü Termolüminesans (TL) / Optik Uyarımlı Lüminesans (OSL) Dozimetri ve Tarihlendirme Laboratuvarında bulunan "Lexsyg Smart TL/OSL Okuyucu" cihazı kullanılmıştır (Şekil 3.2).



Şekil 3.2. Lexsyg Smart TL / OSL Okuyucu Cihazı

Freiberg Instruments tarafından geliştirilen Lexsyg Smart TL/OSL Okuyucusu hem TL hem de OSL ölçümlerine imkan sağlayan, bilgisayar kontrollü bir cihazdır. Lexsyg Smart TL/OSL okuyucu sistemi Lexstudio yazılımı ile kontrol edilmekte ve tüm deneysel aşamalar bu program kontrolünde planlanabilmektedir. Cihaz, örneklerin cihaza yerleştirilmesi ve çıkarılması dışındayazılımla kontrol edilmektedir (Richter ve Kumar, 2014). Sistemin grafiksel kullanıcı arayüzü, kullanıcının yeni bir ölçüm yazmasını veya mevcut ölçüm dizilerini düzenlemesine imkân sağlayacak şekilde tasarlanmıştır. TL/OSL okuyucu, bin, binx, xsyg ve ASCII uzantılı farklı formatlarda veri çıktıları alınmasına imkân verecek şekilde dizayn edilmiştir. Cihazın temel parçaları, örnek tablası (karosel), beta radyasyon kaynağı, ısıtma sistemi (ısıl çift), foto çoğaltıcı tüp (PMT), filtre haznesi, mavi ve kızılötesi (IR) LED'lerden oluşmaktadır. Bu temel parçalar Şekil 3.3'te gösterilmiştir.



Şekil 3.3. Lexsyg Smart TL/OSL Okuyucun Temel Parçaları (Richter ve ark., 2015)

Lexsyg Smart TL/OSL okuyucuda bulunan örnek tablası, tek seferde 40 adet örneği barındırabilecek şekilde tasarlanmış olup, her biri 10 mm çapında, 0,5 mm kalınlığında ve maksimum 2,5 mm yüksekliğinde kenarlıklı diskler (planşet) için yuvalar içermektedir. Ölçüm için hazırlanan örnekler bu kenarlıklı disklere yerleştirilerek döner tabladaki ilgili yuvalara konulur. Ardından, tabla

bir asansör mekanizması yardımıyla yukarı doğru hareket ettirilerek ısıtıcı ünitenin hizasına getirilir. Bu noktada, yardımcı bir kol aracılığıyla örneğin ısıl çift (thermocouple) üzerine tam olarak konumlanması sağlanır. Benzer şekilde, örnek gerektiğinde radyasyon kaynağı bölümüne de yönlendirilir.

Cihazda radyasyon kaynağı olarak beta ($^{90}Sr/^{90}Y$) kullanılır. Bu kaynağın yarı ömrü yaklaşık 30 yıl olup, maksimum 2,27 MeV enerjili β parçacıkları yaymaktadır. Kaynak, örneğe saniyede 0,1 Gy'lik bir doz hızı sağlamaktadır ve özel bir kurşun blok içerisine yerleştirilerek güvenlik önlemleri alınmıştır.

Lexsyg Smart TL/OSL okuyucu, optik uyarımı sağlamak amacıyla kızılötesi (IR), görünür ve ultraviyole (UV) lazer diyot/LED üniteleri ile donatılmıştır. Isıtıcı ünitesi, 0,1 °C/s ile 20 °C/s arasında ayarlanabilir doğrusal bir ısıtma hızına sahip olup, oda sıcaklığından 710 °C'ye kadar ısıtma gerçekleştirebilmektedir. Isıtma sonrasında, cihaz içerisindeki azot gazı akışı sayesinde örnek hızlı bir şekilde soğutulur. Isıtıcı bölüm, metal kaplı seramikten üretilmiş olup, örneği homojen bir şekilde ve tekrarlanabilir hassasiyetle ısıtma kapasitesine sahiptir (Lomax ve ark., 2014).

Isıtma işlemi sırasında malzemeden yayılan fotonlar, Hamamatsu (H7360-02) fotoçoğaltıcı tüp (PMT) tarafından algılanarak elektrik sinyallerine dönüştürülür. Lüminesans yayınımı farklı dalga boylarına sahip olabileceğinden ve bu dalga boyları farklı fiziksel süreçlere karşılık gelebileceğinden, ölçümlerde istenmeyen spektral bileşenleri sınırlamak için optik filtreler kullanılmaktadır (Rendell ve ark., 1993; Townsend, 1994; Krbetschek ve ark., 1997; Huntley ve ark., 1988). Bu nedenle, PMT ile örnek arasına uygun optik filtreler yerleştirilerek sadece istenilen dalga boyu aralığındaki lüminesans sinyallerinin tespiti sağlanmaktadır.

X-Işını Kırınımı (XRD) Cihazı

Bu tez çalışmasında kuvars örneklerinin kristal yapı analizleri için deneysel verilerin elde edilmesi aşamalarında Çukurova Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarı (ÇÜMERLAB)'nda bulunan PANalytical Empyrean X-Işını Difraktometre (XRD) cihazı kullanılmıştır. Cihaz Cu-Kα X-ışını tüpü kullanmakta olup çalışma voltajı 20–50 kV, çalışma akımı ise 5–60 mA aralığında ayarlanabilmektedir. Ölçüm sisteminin merkezinde yer alan 480 mm çapındaki dikey gonyometre, teta–teta ve alfa-1 geometrilerinde çalışabilme yeteneğine sahiptir.

Gonyometre, 0,00010° (θ/2θ) seviyesinde minimum adım büyüklüğü ile yüksek çözünürlüklü tarama yapabilmekte ve tarama hızı 0,0001°/dak ile 70°/dak arasında değiştirilebilmektedir. Açıdan açıya geçiş hızı maksimum 500°/dak değerine ulaşabilmekte, ölçüm açıları ise $-111° < 2\theta < 168°$ aralığında değiştirilebilmektedir.

Cihaz, piksel tabanlı hızlı bir dedektör ile donatılmıştır ve bu dedektör, dijital mikroişlemci kontrollü olup maksimum 1×10^6 sinyal/saniye sayım kapasitesine sahiptir. Dedektörün minimum piksel alanı 70 µm × 70 µm olup yatayda en az 4° (2θ) açısal alanda sabit (snapshot) modunda hareket

ettirilmeden ölçüm yapılabilmektedir. Ayrıca cihazda 2D haritalama özelliği, Bragg–Brentano optik modülü ve Cross Slit Collimator mevcuttur.

Belirtilen bu teknik özellikler sayesinde XRD cihazı, kristal yapıların yüksek çözünürlükte ve güvenilir şekilde analiz edilmesine olanak sağlamış; çalışmada yer alan örneklerin faz tanımlamaları, yüksek doğruluk ve tekrarlanabilirlik ile gerçekleştirilmiştir.

Taramalı Elektron Mikroskobun (SEM) -Enerji Dağılım Spektroskopisi (EDS) Cihazı

Kuvars örneklerinin morfolojik olarak incelenmesi çalışmalarında taramalı elektron mikroskobu (SEM)–enerji dağılım spektroskopisi (EDS) analizleri (SEM–EDS analizleri) ÇÜMERLAB bünyesinde bulunan FEI Quanta 650 Field Emission taramalı elektron mikroskobu kullanılarak yapılmıştır.

SEM, sıvı olmayan ve sıvı özellik göstermeyen, iletken veya iletken olmayan her türlü katı örneğin yüksek çözünürlükte incelenmesine olanak tanımaktadır. Bu kapsamda metaller, tekstiller, fiberler, plastikler, polimerler, mineral taneleri (örneğin kum ve çakıl) ile sıvı içermeyen biyolojik örnekler gibi geniş bir materyal yelpazesi üzerinde analizler yapılabilmektedir. İletken olmayan örnekler, inceleme öncesinde yaklaşık 2 Å/saniye kaplama hızında iletken malzeme (örneğin altın veya karbon) ile kaplanarak ölçüme hazır duruma getirilmiştir.

Cihazın teknik özellikleri aşağıdaki şekilde özetlenebilir: Yüksek vakum modunda 30 kV hızlandırma voltajında çözünürlük 1,2 nm (SE – Secondary Electron) seviyesindedir. 1 kV hızlandırma voltajında ise çözünürlük, elektron yavaşlatma uygulanmadığında 3,0 nm (SE), elektron yavaşlatma uygulandığında ise 2,3 nm (SE) olarak elde edilmektedir. Düşük vakum modunda, 30 kV hızlandırma voltajında çözünürlük 2,0 nm (SE) olarak ölçülmüştür.

Mikroskopta yüksek vakum modunda çalışan hem SE (Secondary Electron) hem de geri çağrılabilir dört segmentli geri saçılmış elektron (BSE – Backscattered Electron) dedektörleri bulunmaktadır. Ayrıca yüksek vakum modunda InColumn tipi SE ve BSE dedektörleri ile birlikte Enerji Dağılım X-Işını Spektrometresi (EDXS) mevcuttur. Cihaz, farklı analiz gereksinimleri için çevresel SEM (ESEM) modunda GSED (Gaseous Secondary Electron Detector), geri çağrılabilir taramalı transmisyon elektron mikroskobu (STEM) dedektörü ve düşük vakum modunda çalışan BSE dedektörü ile donatılmıştır.

Hızlandırma voltajı 100 V ile 30 kV arasında ayarlanabilmekte olup, prob akımı maksimum 100 nA seviyesine ulaşabilmektedir. Büyütme aralığı 6× ile 1.000.000× arasında değişmektedir. Numune konumlandırma ve alan seçimi, cihaz bünyesinde yer alan entegre navigasyon kamerası yardımıyla yapılmaktadır.

Belirtilen teknik özellikler doğrultusunda, FEI Quanta 650 Field Emission SEM ile gerçekleştirilen görüntüleme ve element analizleri, incelenen örneklerin yüzey morfolojisi ile bileşen dağılımının yüksek çözünürlükte ve yüksek hassasiyetle belirlenmesini sağlamıştır.

3.2. Metot

3.2.1. Lüminesans

Lüminesans, bir maddenin aldığı enerjiyi, ısıl denge sıcaklığının altında, görünür ya da görülemeyen elektromanyetik ışık olarak yayması olayıdır. Bu özellik, malzemenin kristal yapısındaki kusurlar ve tuzaklar sayesinde mümkün olur. Lüminesans genel anlamda fosforesans ve floresans gibi doğal ışık yayımı olaylarını da kapsar (McKeever, 2001). Doğal minerallerde, özellikle kuvars ve feldspat gibi silikat minerallerinde sıkça gözlenen lüminesans, malzemenin geçmişte aldığı iyonlaştırıcı radyasyon dozunu enerji olarak depolaması nedeniyle dozimetri ve tarihleme çalışmaları için büyük önem taşımaktadır (Wintle ve Adamiec, 2017).

Lüminesans genel olarak uyarım kaynağına ve ışık yayımı mekanizmasına göre sınıflandırılır. Bu bağlamda başlıca lüminesans türleri Çizelge 3.1'de açıklanmıştır.

Çizelge 3.1. Lüminesans türleri ve uyarma yöntemleri

LÜMİNESANS OLAYLARI	UYARMA YÖNTEMLERİ
Biyolüminesans (BL)	Biyokimyasal Enerji
Katodolüminesans (CL)	Katot ışınları
Kimyasal lüminesans (ChemL)	Kimyasal Enerji
Elektrolüminesans (EL)	Elektrik Alan
Fotolüminesans (PL)	UV, görünür, kızılötesi ışık
Piezolüminesans (PzL)	Basınç (10 ton m^{-2})
Tribolüminesans (TrL)	Sürtünme
Radyolüminesans (RL)	İyonlaştırıcı radyasyon
Sonolüminesans (SL)	Ses dalgaları
Floresans (FL)	İyonlaştırıcı radyasyon, UV, görünür ışık
Fosforesans (PH)	İyonlaştırıcı radyasyon, UV, görünür ışık
Termolüminesans (TL)	İyonlaştırıcı radyasyon, UV, görünür ışık
Optik Uyarımlı Lüminesans (OSL)	İyonlaştırıcı radyasyon, görünür yakın kızılötesi ışık

Biyolüminesans (BL), canlı organizmalarda genellikle kimyasal reaksiyonlar sonucu meydana gelen ışık yayılmasıdır; ateşböcekleri ve derin deniz organizmaları bunun tipik örnekleridir. Katodolüminesans (CL), bir malzemenin yüksek enerjili elektronlarla bombardımanı sonucu ışık yaymasıdır ve genellikle taramalı elektron mikroskobu analizlerinde kullanılır. Kimyasal lüminesans (ChemL), kimyasal reaksiyonlar sırasında açığa çıkan enerjinin ışık olarak yayılmasıdır; laboratuvar analizlerinde yaygın olarak görülür. Elektrolüminesans (EL), elektrik alan uygulanmasıyla malzemelerin ışık yaymasıdır; LED teknolojisi bu prensibe dayanır. Fotolüminesans (PL), bir malzemenin ışık veya elektromanyetik radyasyon soğurduktan sonra ışık yaymasıdır; yarı iletken karakterizasyonlarında kullanılır. Piezolüminesans (PzL), mekanik basınç veya gerilme etkisiyle ışık oluşumudur. Tribolüminesans (TrL), malzemenin sürtünme, kırılma veya ezilmesi sırasında ışık oluşmasıdır. Radyolüminesans (RL), iyonlaştırıcı radyasyonun etkisiyle malzemelerin ışık

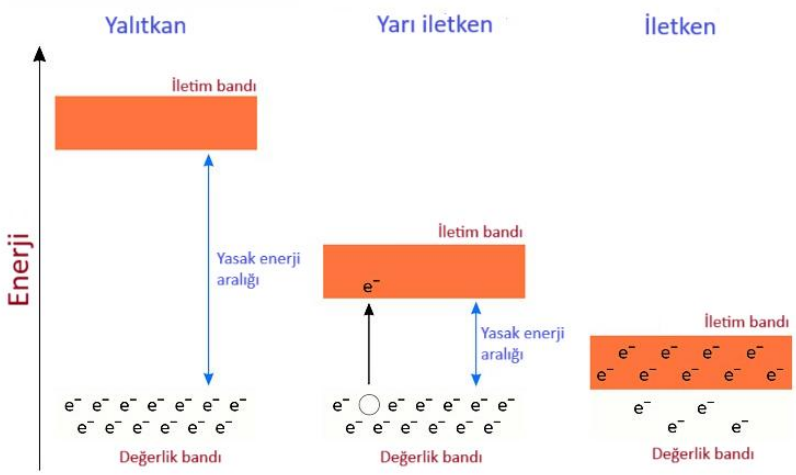
yaymasıdır; örneğin radyum boyalarında görülür. Sonolüminesans (SL), sıvı içindeki kabarcıkların ses dalgalarıyla çökmesi sonucu çok kısa süreli ışık yayılmasıdır. Floresans (FL), uyarma ışığı kesildiğinde hemen sönen kısa ömürlü fotolüminesans türüdür; biyolojik görüntüleme ve algılayıcılarda kullanılır. Fosforesans (PH), uyarma ışığı kesildikten sonra uzun süre devam eden fotolüminesans türüdür; fosforlu saat kadranları buna örnektir. Termolüminesans (TL), bir mineral veya malzemenin iyonlaştırıcı radyasyonla soğurduğu enerjiyi, kontrollü bir şekilde ısıtıldığında ışık olarak geri yaymasıdır. Kuvars minerali, geniş bant aralığı ve stabil trap yapısı nedeniyle TL çalışmalarında yaygın olarak kullanılmaktadır (Thomas ve Chithambo, 2018). Isıtma işlemi sırasında tuzaklarda biriken elektronlar serbest kalır ve yeniden birleşme merkezlerinde ışık yayımı oluşturur. TL yöntemi, arkeolojik ve jeolojik materyallerin tarihlendirilmesinde ve dozimetride kullanılan temel yöntemlerden biridir (Wintle ve Adamiec, 2017).

Optik uyarımlı lüminesans (OSL), malzemenin içindeki tuzaklarda biriken yüklü parçacıkların, optik bir ışık kaynağıyla (genellikle mavi veya yeşil lazer) uyarılarak serbest bırakılması ve bunun sonucunda oluşan ışık yayımıdır (Pagonis ve ark., 2011). OSL tekniği, özellikle son yıllarda TL'ye alternatif olarak çevresel dozimetri ve jeokronoloji alanlarında yaygın olarak tercih edilmektedir. OSL yönteminin önemli bir avantajı, örnek üzerinde tahribatsız ölçüm yapılabilmesi ve sinyalin tekrarlanabilir olmasıdır (Bulur ve ark., 2000).

Lüminesans teknikleri, modern analiz yaklaşımları ve matematiksel modelleme yöntemleriyle sürekli gelişmektedir. Özellikle MATLAB ortamında geliştirilen yapay sinir ağı (YSA) modelleri, ışıma eğrisi analizlerinin daha hassas yapılmasına katkı sağlamaktadır (Pagonis ve ark., 2011). Bu sayede, tuzak parametrelerinin kestirimi, optimum ön ısıtma sıcaklıklarının belirlenmesi ve ışıma eğrisi ayrıştırmaları daha güvenilir olmaktadır. Sonuç olarak, lüminesans olgusu ve çeşitleri modern dozimetri ve tarihlendirme alanlarında geniş bir uygulama alanına sahiptir.

Katılarda Bant Modeli

Katıların elektriksel ve optik özellikleri, içerdikleri enerji bantları ve bu bantlar arasındaki yasak enerji aralığı (band gap) ile yakından ilişkilidir. Katılarda bulunan enerji seviyeleri; değerlik bandı, iletim bandı ve bu ikisi arasında yer alan yasak banttan oluşur. Değerlik bandı genellikle elektronlarla doludur, iletim bandı ise boş olup, bir elektronun iletken hale geçebilmesi için bu banda ulaşması gerekir. Şekil 3.4' te görüldüğü gibi eğer değerlik ve iletim bantları arasında geniş bir yasak enerji aralığı varsa, bu tür katılar yalıtkan; eğer bu bant aralığı dar ise yarı iletken; bantlar üst üste biniyorsa iletken olarak sınıflandırılır (Chen ve McKeever, 1997). Bu bant yapıları yalnızca elektriksel iletkenlik açısından değil, aynı zamanda lüminesans özellikleri bakımından da kritik öneme sahiptir.



Şekil 3.4. Katılarda Bant Modeli (ScienceFacts.net, 2023 Kasım)

TL olayı, özellikle yalıtkan ve yarı iletken yapıdaki katılarda, iyonlaştırıcı radyasyonla uyarılan elektronların değerlik bandından iletim bandına geçmesi, ardından kristal örgüsünde yer alan tuzaklara yakalanması ve sonrasında ısıtma ile serbest bırakılarak foton yayılmasıyla gerçekleşir. Bu bağlamda, yasak enerji aralığı, elektronların uyarılması ve tuzaklara yakalanma süreçlerinde belirleyici bir rol oynar (McKeever, 1985). TL'nin etkili bir şekilde gerçekleşebilmesi için enerji bantlarının uygun yerleşimde ve enerji seviyelerinin kararlı duruma getirilmiş olması gerekir. Ayrıca, yeni safsızlıklar eklenerek malzemenin TL duyarlılığı artırılabilir (Bøtter–Jensen, McKeever ve Wintle, 2003).

Kristal Kusurları

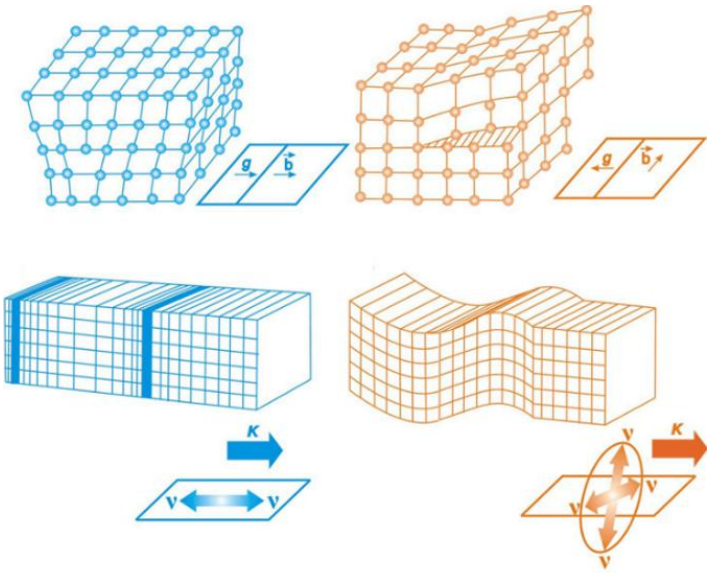
Kristal kusurları, kristal örgüsünde ideal dizilimden sapmalar olarak tanımlanmakta olup, kristalin fiziksel özellikleri ile ışımaya dayalı fenomenler -özellikle TL- üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Bu kusurlar, genel olarak noktasal, çizgisel, yüzeysel ve hacimsel kusurlar olmak üzere dört ana grupta sınıflandırılmaktadır.

Noktasal kusurlar, atom eksiklikleri, ara konumlara yerleşmiş atomlar ve yer değiştirmeler gibi mikroskobik ölçekteki bozulmaları ifade eder. Özellikle Schottky ve Frenkel tipindeki noktasal kusurlar, TL tuzaklarının oluşumunda kritik rol oynayabilmektedir. Bu kusurlar, kristal örgüsünde yük taşıyıcılarının (örneğin elektronlar ve boşluklar) serbest kalmadan önce hapsolduğu lokal enerji seviyelerinin oluşmasına neden olur (McKeever, 1985).

Çizgisel kusurlar (dislokasyonlar), kristal yapıda bir boyutlu bozulmaları temsil eder. Dislokasyonlar, yük taşıyıcılarının tuzaklanabileceği hat boyunca elektriksel potansiyel düzensizlikleri meydana getirerek, TL sinyalinin şekli ve yoğunluğu üzerinde etkili olabilir (Chen ve McKeever, 1997).

Yüzeysel kusurlar, kristal tanelerinin sınırlarında ortaya çıkan ve genellikle tanecikler arası yönelme farklılıklarından kaynaklanan düzensizliklerdir (Şekil 3.5). Çok kristalli yapılar için bu

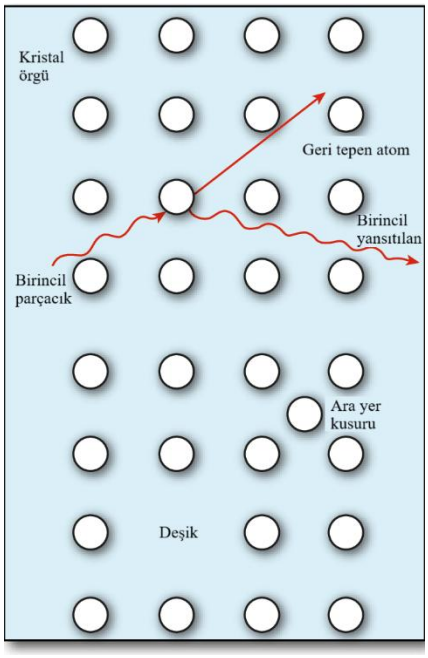
kusurlar özellikle önemlidir; zira bu bölgelerde TL sinyalinin soğurulması, zayıflaması veya yeniden dağılımı söz konusu olabilmektedir.



Şekil 3.5. Yüzeysel Kusurlar (Li ve Zhang, 2017)

Hacimsel kusurlar, kristal içerisinde geniş hacimleri etkileyen boşluklar, çatlaklar veya yoğunluk farkları gibi üç boyutlu yapısal düzensizlikleri kapsamaktadır. Bu tür kusurlar, TL performansını doğrudan etkileyebilecek büyüklükte enerji tuzaklarının oluşumuna neden olabilir. Özellikle yüksek sıcaklıkta gerçekleştirilen tavlama işlemleri sonrasında meydana gelebilecek yeniden kristallenme yapıları, hacimsel kusurların oluşumunu tetikleyebilir. Bu durum, TL sinyallerinin tekrarlanabilirliği ve ölçüm doğruluğu üzerinde olumsuz etkilere yol açabilmektedir (Bøtter–Jensenve ve ark., 2003).

Kristal kusurlarının türü ve yoğunluğu, TL sinyallerinin kinetik davranışı ve şiddeti açısından doğrudan belirleyici parametrelerdir. Bu nedenle, TL esaslı dozimetrelerin geliştirilmesi sürecinde kristal kusurlarının sistematik olarak incelenmesi, malzeme performansının optimize edilmesi açısından kritik önem taşımaktadır.



Şekil 3.6. Hacimsel Kristal Kusurları (Maurer ve ark.,2008)

Şekil 3.6'daki görsel, hacimsel kristal kusurları kapsamında değerlendirilebilecek atomik yer değiştirme hasarlarının şematik temsilini sunar. Özellikle boşluklar, interstisyaller ve atom dislokasyonlarının geniş hacimlerde nasıl enerji tuzakları oluşturabileceğini gösterir.

Termolüminesans (TL) Yöntemi

TL, kristal yapıya sahip bazı malzemelerin, daha önce maruz kalarak soğurdukları iyonlaştırıcı radyasyon enerjisini ısıtıldıklarında ışık olarak serbest bırakması olayıdır (Aitken, 1998; Chen ve McKeever, 1997). Bu süreçte radyasyon ile uyarılan malzeme içerisinde elektron–deşik çiftleri oluşur ve bu çiftler kristal örgüde yer alan enerji tuzaklarında tutulur. Isıtma işlemi sırasında elektronlar bu tuzaklardan serbest kalarak yeniden birleşme merkezlerine döner ve bu esnada foton yayılımı gerçekleşir. Açığa çıkan bu ışık, malzemenin TL sinyalini oluşturur ve sinyalin şiddeti, malzemenin maruz kaldığı toplam radyasyon dozuyla orantılıdır (Murray ve Wintle, 2000; Pagonis ve ark., 2006).

TL yöntemi, özellikle arkeolojik ve jeolojik materyallerin tarihlendirilmesinde güvenilir ve yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu yöntemde doğal ortamda depolanan enerji, ısıl uyarma ile serbest bırakılarak malzemenin yaşı hakkında bilgi elde edilir (Wintle, 2008). Son yıllarda geliştirilen yeni protokoller, TL tarihleme yönteminin hassasiyetini artırmakta ve farklı malzeme türlerinde uygulanabilirliğini genişletmektedir (Buylaert ve ark., 2012; Thomsen ve ark., 2015). TL sinyalinin karakteristikleri; malzemenin kristal yapısı, tuzakların derinliği ve yoğunluğu ile enerji transfer mekanizmalarına bağlıdır. Bu faktörler, TL eğrilerinin şeklini, maksimum sıcaklık konumunu ve termal stabilitesini doğrudan etkiler (Bos ve ark., 2019). Modern TL araştırmaları, bu parametrelerin

modellenmesi ve simülasyonu üzerine yoğunlaşmakta; malzeme performansının optimize edilmesi amacıyla çalışılmaktadır (Pagonis ve ark., 2019).

TL dozimetri, tıp ve nükleer endüstride radyasyon maruziyetinin ölçülmesinde standart bir teknik haline gelmiştir. Termolüminesans dozimetreler (TLD), yüksek hassasiyetleri ve küçük boyutları sayesinde kişisel doz takibinde ve çevresel radyasyon ölçümlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır (Horowitz, 2015; Twardak ve ark., 2019). Son yıllarda geliştirilen yeni nesil TL malzemeleri, nanoteknoloji ve optik mühendislik alanındaki ilerlemeler sayesinde daha yüksek duyarlılık ve geniş dinamik aralık özellikleri kazanmıştır (Chen ve ark., 2018; Singh ve ark., 2021). Ayrıca organik–inorganik hibrit malzemeler ve kuantum noktaları, TL uygulamalarında yenilikçi çözümler sunmakta; biyomedikal görüntüleme, çevresel izleme ve güvenlik alanlarında yüksek verimlilik ve kararlılık göstermektedir (Sun ve ark., 2020; Zhang ve ark., 2019). Bunun yanı sıra, yapay zekâ ve makine öğrenmesi tekniklerinin TL verilerinin analizinde kullanılması, sinyal ayrıştırma ve hata azaltma açısından önemli ilerlemeler sağlamaktadır (Wang ve ark., 2022).

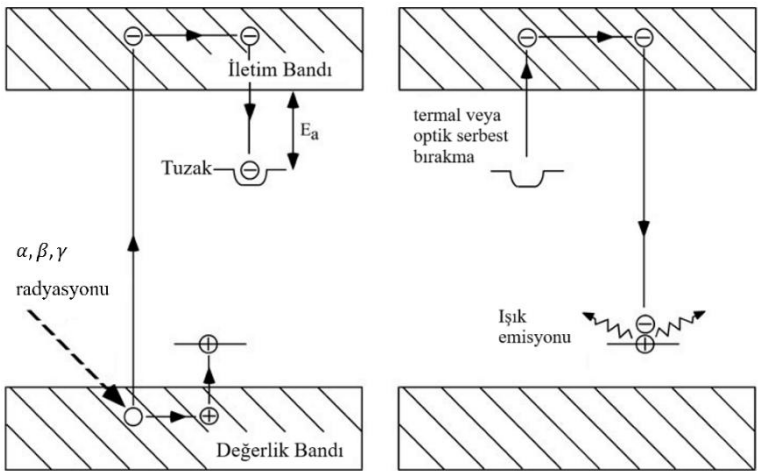
Bazı yalıtkan ve yarı iletken malzemeler, iyonlaştırıcı radyasyona maruz kaldıklarında radyasyon enerjisini soğurur. Soğurulan bu enerji, ultraviyole, görünür veya kızılötesi ışık olarak serbest bırakıldığında bu olaya lüminesans adı verilir. Enerji serbest bırakılması ısıl uyarma ile gerçekleşiyorsa süreç TL, ışıkla uyarma ile gerçekleşiyorsa optik uyarımlı lüminesans (OSL) olarak adlandırılır. Isıl uyarma ile ışıma anlamına gelen TL olgusu ilk olarak 17. yüzyılda Robert Boyle (1664) tarafından gözlenmiş; Boyle, elması dokunarak ısıttığında parlaklığının karanlık bir odada kolayca görülebilecek şekilde arttığını rapor etmiştir. Günümüzdeki uygulamalı fizik çerçevesinde TL etkisinin kullanımı ise, Wisconsin Üniversitesi'nde Daniels ve ark (1953) çalışma arkadaşlarının yaptığı araştırmalar ile başlamıştır. TL ve OSL yöntemleri 1965 yılından itibaren hızla gelişmiş ve özellikle dozimetrik ölçüm ile arkeolojik yaş tayini çalışmalarında başarılı sonuçlar vermiştir.

TL ve OSL, jeolojik kökenli lavlar, meteoritler, volkanik tüfler, obsidyen, çakmaktaşı, doğal kalsit gibi çok sayıda mineral ve kayaca uygulanabilmekte ve bu çalışmalar sayesinde önemli bilgiler elde edilmektedir. Lüminesans olayları genellikle düzenli kristal yapılı malzemelerde gözlenmekle birlikte, cam gibi amorf yapıya sahip materyallerde de görülebilir. Nadir olmakla birlikte bazı araştırmacılar, kemik (kılçık), diş, ıspanak ve domates çekirdeği gibi biyolojik örneklerde de TL sinyali gözlemleyerek bu sonuçları raporlamışlardır (Fleming, 1966).

Her iki yöntem de, radyoaktif izotopların bozunmasıyla ortaya çıkan alfa (α) ve beta (β) parçacıkları ile gama (γ) ışınlarının taşıdığı enerjinin malzeme içerisinde birikmesi prensibine dayanır. Ölçüm için bu biriken enerjinin miktarı ve birikme hızı belirlenmelidir. Radyasyon, madde içerisinden geçerken atomlarla çarpışarak elektronlara enerji kazandırır ve bu elektronlar daha yüksek enerji seviyelerine çıkar. Elektronların bir kısmı enerjilerini hemen geri vererek eski seviyelerine dönerken, bir kısmı kristal örgüde bulunan ve "tuzak" olarak adlandırılan kusurlara hapsolur. Bu elektronlar, radyasyondan aldıkları enerjiyi bu tuzaklarda depolar. Tuzaklarda kalma süreleri çevre koşullarına ve tuzak derinliğine bağlıdır; kısa ömürlü "sığ" tuzaklardan, milyonlarca

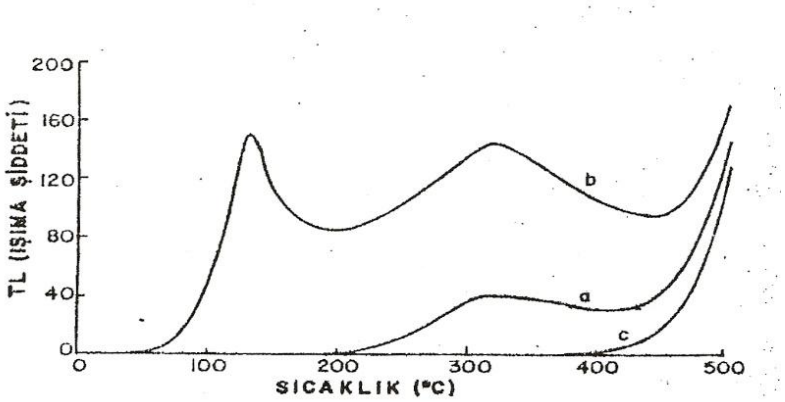
yıl boyunca boşalmayan “derin” tuzaklara kadar farklı türler vardır. Tarihlendirme ve dozimetri çalışmalarında genellikle uzun ömürlü tuzaklar esas alınır (Yüksel, 2013).

Tuzaklardaki elektronların serbest bırakılması, TL ölçümlerinde ısıtma, OSL ölçümlerinde ise belirli dalga boyunda ışıkla yapılır. Isıl veya optik uyarma sonucunda serbest kalan elektronlar yeniden birleşme merkezlerine dönerek foton yayar ve böylece malzemede depolanan enerji ışık olarak geri salınır (Şekil 3.7). Oluşan ışık miktarı, malzemenin depoladığı enerji miktarı ile doğru orantılıdır. Kristal yapıda genellikle farklı derinliklerde çok sayıda tuzak bulunur. Her tuzak grubunun kendine özgü bir boşalma sıcaklığı veya zamanı vardır. Örneğin TL ölçümünde malzeme sabit bir hızla ısıtıldığında tuzaklar, sığ olanlardan derin olanlara doğru sırasıyla boşalır. Boşalma sıcaklığına yaklaştıkça ışıma artar, belirli bir maksimuma ulaştıktan sonra azalır ve bir sonraki tuzak grubunun boşalma sıcaklığına kadar bu azalma devam eder. Daha sonra yeniden artış görülür. Işımanın sıcaklığa karşı değişiminin gösterildiği grafik “ışıma eğrisi” (glow curve) olarak adlandırılır. Işıma eğrisindeki tepe noktaları, farklı derinliklerdeki tuzak gruplarının boşalma sıcaklıklarını temsil eder.



Şekil 3.7. Tuzaklanmış Elektronların Boşalması (Aitken, 1985)

Tuzak gruplarının derinlikleri birbirinden çok farklı olduğunda, ışıma tepeleri belirgin bir şekilde ayırt edilebilir. Ancak tuzak derinlikleri birbirine yakın olduğunda, bu tepeler benzer sıcaklıklarda ortaya çıkar ve birbirlerini etkileyerek tek tek görülemez hâle gelir; bunun yerine geniş ve birleşmiş bir eğri şeklinde gözlenir. Bu durumda, eğrinin kaç tepeden oluştuğunu ilk bakışta belirlemek güçtür. Nitekim Şekil 3.8’de yer alan eğriler, birden fazla tepenin üst üste binmesinden oluşmaktadır (Aitken, 1985).



Şekil 3.8. Bir Seramik Parçasının Işıma Eğrileri (Aitken, 1985); a) Doğal Işıma Eğrisi, b) Doğal + Laboratuvar Dozu Almış Örneğin Işıma Eğrisi, c) Kara Cisim Işıması

TL ölçümünde örnek ısıtılarak, OSL ölçümünde ise çalışmanın amacına bağlı olarak farklı dalga boylarında (mavi, yeşil, kızılötesi vb.) ışıkla uyarılarak tuzaklar boşaltılır. Bu süreçte serbest kalan bazı elektronlar lüminesans merkezlerine ulaşır ve foton yayılımı gerçekleşir. Oluşan bu ışık, yeterli hassasiyete sahip bir fotoçoğaltıcı tüp ile ölçülür. Ölçülen TL veya OSL sinyal şiddeti, tuzaklarda birikmiş elektron sayısı ile orantılıdır. Maddenin yayımladığı TL veya OSL sinyali ile maruz kaldığı radyasyon dozu arasındaki ilişkinin belirlenmesi gerekir. Başka bir ifadeyle, birim radyasyon miktarına karşılık elde edilen TL veya OSL miktarı ve radyasyon dozundaki değişime bağlı olarak bu miktarın nasıl değiştiği, matematiksel bir bağıntı ile tanımlanır (Botter-Jensen, 1997).

Termolüminesans (TL) Kinetikleri

TL kinetikleri, kristal yapı içerisindeki tuzak merkezleri ve yeniden birleşme merkezleri arasında hapsolmuş yük taşıyıcılarının (elektronlar ve deşikler) davranışlarını inceleyen bir alan olarak tanımlanır. Kristal, iyonlaştırıcı radyasyona maruz kaldığında, değerlik bandındaki elektronlar iletim bandına uyarılır ve burada serbest kalan elektronlar, kafes kusurları veya yabancı iyonlar gibi kusur bölgelerinde yer alan tuzak merkezlerine hapsolur. Benzer şekilde, değerlik bandında oluşan boşluklar (deşikler) da farklı türde tuzak merkezlerinde tutulabilir.

Örnek kontrollü bir şekilde ısıtıldığında, bu yük taşıyıcıları termal enerji kazanarak tuzaklardan serbest kalır ve yeniden birleşme merkezleri olarak adlandırılan, foton yayımına elverişli bölgelerde yeniden birleşirler. Bu süreçte yayılan fotonlar, TL sinyalini oluşturur ve sinyalin sıcaklığa bağlı olarak değişim şekli; tuzak derinliği (E), frekans faktörü (s), kinetik derece (b) ve yeniden birleşme olasılığı gibi temel parametrelerle belirlenir (Aitken, 1985; McKeever, 1985; Chen ve McKeever, 1997). TL eğrisinde gözlenen her tepe, genellikle belirli bir tuzak grubunun boşalmasını temsil eder. Tepe sıcaklığı, ilgili tuzağın derinliği ile doğrudan ilişkili olup, daha derin tuzaklar daha yüksek sıcaklıklarda boşalır. Frekans faktörü ise, bir yük taşıyıcısının birim zamanda tuzaktan serbest kalma olasılığını belirler ve genellikle kristal titreşim frekansları ile ilişkilidir.

Isıtma sırasında yük taşıyıcılarının boşalma hızı Arrhenius tipi bir bağıntı ile ifade edilir ve bu bağıntı, TL kinetiklerinin matematiksel modellemesinde temel bir rol oynar. TL analizlerinde elde edilen bu kinetik parametreler hem malzemenin tuzak yapısının anlaşılması hem de dozimetrik ve tarihlendirme uygulamalarında ölçümlerin güvenilirliğinin artırılması açısından kritik öneme sahiptir.

Tuzak derinliği (E), bir elektronun tuzaktan serbest kalması için gerekli aktivasyon enerjisini ifade eder. Bu enerji, TL tepe sıcaklığı (T_m) ile doğrudan ilişkilidir ve farklı model varsayımlarına göre değişen bağıntılarla hesaplanabilir. Frekans faktörü (s), tuzaklanmış elektronun birim zamanda serbest kalma olasılığını belirten parametre olup, kristal titreşim frekansları ile ilişkilidir ve genellikle 10^7–10^{14} s^{-1} aralığında bulunur (McKeever, 1985).

Isıtma sırasında tuzakların boşalma hızı, Arrhenius tipi aşağıdaki bağıntı ile tanımlanır:

$$\frac{dn}{dt} = -s \cdot n \cdot e^{-\frac{E}{kT}} \tag{3.1}$$

Burada n tuzakta kalan elektron sayısını, k Boltzmann sabitini, T mutlak sıcaklığı ve t zamanı temsil eder.

TL kinetikleri genellikle üç temel düzenle tanımlanır: birinci derece, ikinci derece ve genel (genelleştirilmiş, karma) derece kinetikler (Randall ve Wilkins, 1945; Chen, 1969).

TL analizinde, birinci derece kinetik, tuzaklardaki yük taşıyıcılarının (elektron veya deşik) boşalmasının, yeniden tuzaklanma olasılığının ihmal edilebilecek kadar düşük olduğu durumları ifade eder. Bu modelde, bir yük taşıyıcısı tuzaktan serbest kaldığında doğrudan bir yeniden birleşme merkezine ulaşır ve foton yayımıyla sonuçlanır. Dolayısıyla, boşalan tuzak tekrar doldurulmaz. Matematiksel olarak, birinci derece kinetikte yük taşıyıcılarının boşalma hızı şu şekilde ifade edilir (Randall ve Wilkins, 1945; Chen ve McKeever, 1997):

$$\frac{dn}{dt} = -s \cdot n \cdot e^{-\frac{E}{kT}} \tag{3.2}$$

Burada:

n: Belirli bir anda tuzakta bulunan yük taşıyıcı sayısı

s: Frekans faktörü (s^{-1})

E: Tuzak derinliği (eV)

k: Boltzmann sabiti (8,617 x 10^{-5} $eV \cdot K^{-1}$)

T: Mutlak sıcaklık (K)

t: Zaman (s)

Isıtma işlemi sabit bir ısıtma hızı ($\beta = dT/dt$) ile yapıldığında, sıcaklık-zaman ilişkisi denkleme dahil edilir ve ışık şiddeti $\big(I(T)\big)$ şu şekilde elde edilir:

$$I(T) = n_0 \cdot s \cdot e^{-E/kT} \cdot exp\left[-\frac{s}{\beta}\int_{T_0}^{T} e^{-E/kT'}dT'\right] \quad (3.3)$$

Burada n_0 ısıtma başlamadan önce tuzakta bulunan yük taşıyıcılarının sayısını ifade eder.

Birinci derece kinetikte elde edilen TL tepeleri genellikle dar ve simetriktir. Bu durum, tuzaktan serbest kalan elektronların tamamının doğrudan yeniden birleşme merkezine ulaşması ve tekrar tuzaklanmaması ile ilişkilidir. Bu model, genellikle yüksek sıcaklık tepe bileşenlerini ve hızlı boşalan tuzakları tanımlamada uygundur (Aitken, 1985; McKeever, 1985).

Başlangıç sıcaklığı yöntemi (*initial rise method*), tepe şekil indeksi (*shape factor*) ve eğri benzetim (fit) teknikleri, birinci derece kinetiğin parametrelerini (*E* ve *s*) belirlemek için yaygın olarak kullanılır. Özellikle Chen'in tepe parametreleri yöntemi (Chen, 1969), ışıma tepesinin maksimum sıcaklığı (T_m), yarı genişlik değerleri (ω, δ) gibi ölçümlerden yararlanarak tuzak parametrelerinin hesaplanmasını sağlar.

Bu model, TL dozimetri uygulamalarında tek tuzak-tek yeniden birleşme merkezi (OTOR) sistemi varsayımı altında sıklıkla kullanılır ve çoğu mineral için düşük doz TL yanıtlarının değerlendirilmesinde güvenilir sonuçlar vermektedir (Pagonis ve ark., 2006).

İkinci derece kinetik, yük taşıyıcılarının tuzaktan serbest kalmasının ardından yeniden tuzaklanma olasılığının yüksek olduğu ve bu sürecin yeniden birleşme ile yarıştığı durumları tanımlar. Bu modelde, serbest kalan yük taşıyıcısı doğrudan yeniden birleşme merkezine ulaşmak yerine başka bir tuzakta yeniden hapsolabilir. Bu nedenle boşalan tuzaklar tekrar dolabilir ve bu durum TL tepesinin şeklinin birinci dereceye kıyasla daha geniş olmasına yol açar (Randall ve Wilkins, 1945; Chen ve McKeever, 1997).

İkinci derece kinetikte yük taşıyıcılarının boşalma hızı şu şekilde tanımlanır:

$$\frac{dn}{dt} = -n^2 \cdot s \cdot e^{-E/kT} \quad (3.5)$$

Burada terimdeki n^2 bağımlılığı, yeniden tuzaklanma olasılığının yük taşıyıcı yoğunluğuyla orantılı olduğunu ifade eder.

Sabit ısıtma hızı (β) altında ışık şiddeti ifadesi:

$$I(T) = \frac{n_0^2 \cdot s \cdot e^{-E/kT}}{\left[1+\frac{n_0 \cdot s}{\beta}\int_{T_0}^{T} e^{-E/kT'}dT'\right]^2} \quad (3.6)$$

İkinci derece kinetikte, TL ışıma tepesi asimetrik olup sağ kuyruğu daha uzun olur. Bu durum, yeniden tuzaklanma süreçlerinden kaynaklanır. Ayrıca, ikinci derece TL tepelerinin

maksimum sıcaklığı (T_m) dozla hafifçe artabilir. Bu model, çoğunlukla feldspat ve bazı kuvars türlerinde gözlenen TL bileşenlerinin açıklanmasında uygundur (Pagonis ve ark., 2006).

Chen'in tepe parametreleri yöntemi ile ikinci derece kinetik parametreleri de belirlenebilir. Bu yöntemde şekil faktörü $\mu_g = \frac{\delta}{\omega}$ değeri yaklaşık 0,52 olup birinci derece kinetikteki 0,42 değerinden belirgin şekilde farklıdır (Chen, 1969).

Genel mertebe kinetik, birinci ve ikinci derece kinetikler arasında kalan ara durumları tanımlar. Gerçekte, TL sinyalleri çoğunlukla saf birinci ya da ikinci derece kinetik özellik göstermez; bunun yerine mertebe parametresi (b) 1 ile 2 arasında değişen genel derece davranışı sergiler (Kitis ve Manam, 1998; Chen ve McKeever, 1997).
Genel derece kinetik denklemi:

$$\frac{dn}{dt} = -n^b s \cdot e^{-\frac{E}{kT}} \tag{3.7}$$

Sabit ısıtma hızı altında ışık şiddeti:

$$I(T) = n_0^b \cdot s \cdot e^{-E/kT} \cdot \left[1 + \frac{(b-1)\cdot n_0^{b-1} \cdot s}{\beta} \int_{T_0}^{T} e^{-E/kT'} dT'\right]^{\frac{1}{1-b}} \tag{3.8}$$

Bu eşitlikte, b = 1 olduğunda birinci derece, b = 2 olduğunda ikinci derece kinetik elde edilir.

Genel derece kinetik, özellikle karmaşık minerallerde (ör. polimineral toprak örnekleri, feldspat-kuvars karışımları) gözlenen TL sinyallerini modellemede daha esnek bir yaklaşım sunar. Tepe şekli ve parametreleri, b derecesine bağlı olarak değişir. Bu modelin parametre tahmini için eğri benzetim (fit) yöntemleri, ayrıştırma teknikleri ve Chen'in tepe parametreleri yöntemi yaygın olarak kullanılır (Kitis ve Manam, 1998; Pagonis ve ark., 2006).

Termolüminesans (TL) Özelliklerinin Belirlenmesinde Kullanılan Metotlar

Bu çalışmada araştırmaya konu olan kuvars minerali için TL ölçümlerine bağlı olarak uygun filtre seçimi, ön ısıtma, doz–yanıt, farklı ısıtma hızları ve tekrar kullanılabilirlik deneyleri yapılmıştır.

Uygun Filtre Seçimi

TL ölçümlerinde yayılan ışımanın doğru bir şekilde algılanabilmesi için uygun optik filtrelerin seçilmesi kritik öneme sahiptir. Farklı fosfor malzemeleri, ışınım sonrası çeşitli dalga boylarında lüminesans yaydığından, sinyal–gürültü oranını optimize etmek amacıyla seçilecek filtre, ölçüm doğruluğunu doğrudan etkiler (Yukihara ve McKeever, 2011).

Ön Isıtma (Preheat)

TL ölçümlerinde ön ısıtma (preheat), düşük sıcaklıktaki kararsız tuzaklardan gelen istenmeyen sinyallerin elimine edilmesi amacıyla uygulanan önemli bir adımdır. Ön ısıtma işlemi, ölçüm öncesinde örneğin kısa süreli veya yüzeysel olarak tuzaklanmış yük taşıyıcılarını serbest bırakarak yalnızca stabil TL sinyalinin ölçülmesini sağlar (Pagonis ve ark., 2006). Ön ısıtma testi ile termal olarak kararsız (sığ) tuzaklardan gelen sinyallerin temizlenmesi, doğru ışıma eğrisi elde etmek için ölçüm öncesi "sıfırlama" etkisi yaratılması, tekrarlanabilir ve güvenilir TL tepelerinin elde edilmesi amaçlanır. Ön ısıtma deneyi sırasında örnekler, ölçüm sıcaklığından daha düşük bir değerde (örneğin 100–200 °C arasında), belirli bir süre (genellikle 5–10 dakika) ısıtılır. Bu işlem sırasında stabil olmayan sinyaller serbest kalır ve yapılan ölçümde kararlı tuzaklara bağlı sinyaller elde edilir.

Doz—Yanıt (Dose—response)

Doz-yanıt deneyleri, bir malzemenin farklı radyasyon dozlarına verdiği lüminesans tepkiyi incelemek amacıyla gerçekleştirilen temel bir yöntemdir (Chen ve McKeever, 1997). Doz yanıt deneyleri ile malzemenin radyasyon dozuna karşı verdiği yanıtı belirlemek, doz ışıma şiddeti ilişkisini analiz etmek, doğrusal (lineer), doğrusal üstü (supralineer), doğrusal altı (sublineer) ve doygunluk bölgelerini (saturasyon) tespit etmek ve ayrıca doz kalibrasyon eğrisi oluşturmak amaçlanır. Doz yanıt deneyi yapılırken aynı türde birden fazla örnek hazırlanır, bu örnekler belirli radyasyon dozlarına maruz bırakılır, her dozdan sonra TL veya OSL ölçümü alınarak ilgili sinyal (ışık şiddeti) kaydedilir ve son olarak sinyale karşılık doz grafiği çizilir. Doz yanıt eğrisi genellikle üç bölgeden oluşur. Bunlar sinyalin dozla orantılı olarak arttığı ($S \propto D$) doğrusal bölge, sinyalin dozun karesi gibi daha hızlı arttığı ($S \propto D^n$, $n > 1$) doğrusal üstü (supralineer) bölge ve tuzaklar dolduğunda sinyal artışının yavaşlayıp durağanlaştığı doyma bölgesidir.

Dozimetride doz yanıt deneyleri uygulanarak malzemenin hangi doz aralıklarında daha güvenilir ölçümler sunduğu belirlenir. Tarihlemede ise ölçülen doğal sinyalin karşılık geldiği dozu bulmak için laboratuvar doz yanıt eğrileri ile karşılaştırma yapılır

Farklı Isıtma Hızları (Heating Rate)

TL ölçümlerinde ısıtma hızı (β, °C/s), ışıma eğrisinin şekli ve TL tepe sıcaklıkları üzerinde doğrudan etkili bir parametredir. Isıtma hızı deneyleri, farklı ısıtma hızlarında alınan TL eğrileri karşılaştırılarak, aktivasyon enerjisi (E) ve frekans faktörü (s) gibi kinetik parametrelerin belirlenmesinde yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir (Chen ve McKeever, 1997). Isıtma hızı deneyleriyle ışıma eğrisinin ısıtma hızına bağlı değişimini incelemek, TL kinetik parametrelerini (özellikle aktivasyon enerjisi) hesaplamak, optimal ısıtma hızını belirlemek (çözünürlük ve sinyal–gürültü dengesi açısından) amaçlanır. Isıtma hızı arttıkça TL tepeleri daha yüksek sıcaklıklara kayar,

yüksek ısıtma hızlarında sinyal genliği artabilir, ancak tepeler üst üste binme eğilimindedir, düşük ısıtma hızlarında ise daha iyi tepe ayrımı (rezolüsyon) sağlanır.

Tekrar Kullanılabilirlik (Reusibility)

Tekrar kullanılabilirlik (reusability), bir TL malzemenin çoklu tavlama–ışınlama–okuma döngüleri sonrasında tutarlı ve tekrarlanabilir TL sinyali üretme yeteneğini ifade eder. Bu özellik, özellikle kişisel ve çevresel dozimetri uygulamalarında teknik açıdan büyük önem taşır (Yukihara ve McKeever, 2011). TL malzemenin uzun vadeli kararlılığını test etmek, okuma ve sıfırlama işlemlerinin malzeme performansına etkisini değerlendirmek, kalibrasyon katsayılarının zamanla değişip değişmediğini görmek amacı ile tekrar kullanılabilirlik deneyleri uygulanır. Bu deneyler yapılırken öncelikle malzeme belirli bir dozla ışınlanır TL ölçümü alınır ve sinyal kaydedilir ardından malzeme uygun sıcaklıkta tamamen sıfırlanacak şekilde tavlanır, aynı doz ve ölçüm prosedürü belirli sayıda döngü boyunca tekrarlanır (genellikle 10–15 döngü), her ölçümden elde edilen TL sinyali normalize edilerek karşılaştırılır. Deney sonrası değerlendirmede eğer % RSD (relative standard deviation) değeri düşükse, malzemenin tekrar kullanılabilirliği yüksektir ve genellikle ±%5 sapma kabul edilebilir sınırlar içerisindedir. LiF:Mg,Ti, Al_2O_3:C, BeO gibi fosforlar tekrar kullanılabilirliği yüksek malzemelerdir. Bu deneylerde, TL ölçüm cihazının kalibrasyonunun sabit tutulması, her döngüde aynı ışınlama ve ısıl işlem protokolünün uygulanması, malzemenin fiziksel bütünlüğünün (kırılma, renk değişimi vs.) gözlemlenmesi dikkat edilmesi gereken önemli noktalardır.

X–Işını Kırınımı (X Ray Diffraction, XRD) Yöntemi

Mineraller gibi kristal yapıya sahip olan amorf olmayan katı malzemelerin üç boyutlu düzeni, kristal örgüsündeki atomların düzenli ve tekrarlayan düzlemleri ile tanımlanır. Odaklanmış bir X-ışını demeti, bu düzenli atom düzlemleriyle etkileşime girdiğinde, ışının bir kısmı soğurulur, bir kısmı saçılır ve bir bölümü de kırınıma uğrayarak yön değiştirir. Kristalli bir katının X-ışınları ile kırınıma uğraması, yağmur damlalarının güneş ışığını kırarak gökkuşağı oluşturmasına benzetilebilir. Her mineralin kendine özgü kristal yapısı ve atom dizilimi, gelen X-ışını demetinin kırınım desenini belirleyen temel faktörlerdir.

X-ışınları, vakumlu bir tüp içerisinde üretilir. Tüp içerisinde bulunan sıcak filament üzerine akım verildiğinde, televizyon tüplerine benzer şekilde yoğun bir elektron akışı meydana gelir. Genellikle 15–60 kV aralığında uygulanan yüksek gerilim ile hızlandırılan bu elektronlar, çoğunlukla bakırdan imal edilmiş bir hedefe yönlendirilir. Hedef yüzeye çarpan yüksek hızlı elektronlar, hedef malzemenin karakteristik özelliklerine bağlı olarak X-ışını üretir. Üretilen X-ışınları toplanarak ince toz hâline getirilmiş (taneler <10 μm) örnek üzerine gönderilir ve kırınım desenleri dedektör yardımıyla kaydedilir.

Materyallerin mineralojik özelliklerini ortaya çıkarmak amacıyla çok sayıda analitik yöntem kullanılmaktadır. Bu yöntemlerden biri olan XRD yöntemi, minerallerin tespit ve tanımlanmasında

oldukça etkili, yaygın ve güvenilir bir yöntemdir. XRD, araştırmacılara hızlı ve doğru sonuçlar sunarak minerallerin ayrıntılı bir şekilde karakterize edilmesine imkân tanır. Özellikle ince taneli minerallerin ve karmaşık mineral karışımlarının belirlenmesinde büyük avantaj sağlar. Ayrıca XRD, yalnızca temel mineral tanımlamasıyla sınırlı kalmayıp, mineral karışımlarındaki farklı bileşenlerin miktar oranlarının belirlenmesine, kristallik derecelerinin ve yapısal özelliklerinin analizine de olanak vermektedir.

Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM)–Enerji Dağılımlı X–Işını Analizi (EDS)

EDX, EDS veya EDAX olarak da adlandırılan enerji dağıtıcı X–ışını spektroskopisi, SEM analiz işlemi sırasında yüzey malzemesinin daha iyi anlaşılmasını sağlayan bir tekniktir. EDX analizi, bir numunenin elementel bileşimini elde etmek için kullanılırken SEM analizi ile sağlanan sonuca göre daha nicel bir sonuç sağlamaktadır. SEM, odaklanmış elektron demetinin bir örnek yüzeyini tarayıp, o yüzeyden görüntü elde edilmesini sağlayan bir elektron mikroskop çeşididir. Elektronlar örnek atomlarıyla etkileşerek değişik sinyaller üretirler. Bu sinyaller dedektörler tarafından algılanarak bize, örnek yüzey topografisi ve kompozisyonu hakkında bilgi verir. SEM'lerin ayırım gücü 1 nm ve daha iyi çözünürlük derecelerine ulaşabilir. Örnekler SEM'de; yüksek vakumda, düşük vakumda, ıslak koşullarda ve düşük (cryogenic) veya yüksek sıcaklıklarda incelenebilir (Köksal, 2010).

Optik Uyarımlı Lüminesans (OSL) Yöntemi

OSL, iyonlaştırıcı radyasyona maruz kalmış yalıtkan veya yarı iletken malzemelerin, belirli dalga boyundaki ışıkla uyarılması sırasında yayılan ışınım olarak tanımlanır. OSL sinyalinin şiddeti, örnek tarafından soğurulan radyasyon dozunun bir fonksiyonudur ve bu özellik, yöntemin radyasyon dozimetresinde kullanılmasının temelini oluşturur. Süreç, değerlik bandındaki elektronların iyonlaşarak iletim bandına geçmesi ve böylece elektron–deşik çiftlerinin oluşmasıyla başlar. Malzeme içinde önceden var olan kristal kusurları, "tuzak" görevi görerek serbest elektronları ve deşikleri ışımasız geçişlerle hapseder. Bir malzeme, uygun dalga boyundaki ışıkla uyarıldığında bu tuzaklardaki elektronlar serbest kalarak iletim bandına geçer. Serbestleşen elektronların lokalize olmuş deşiklerle yeniden birleşmesi sonucunda foton yayılımı gerçekleşir ve bu yayılım OSL sinyalini oluşturur. Elde edilen sinyalin şiddeti, malzemenin soğurduğu toplam radyasyon dozu ile doğru orantılıdır. OSL sinyalleri, literatürde sıklıkla fotoiletkenlik olayı ile ilişkilendirilir. Fotoiletkenlik, bir malzemenin morötesi ışık veya dalga boylarına göre sınıflandırılan diğer elektromanyetik ışınımları soğurması sonucunda elektrik iletkenliğinde meydana gelen değişim olarak tanımlanır. Elektromanyetik spektrumda dalga boyu uzunluktan kısaya doğru radyo dalgaları, mikrodalgalar, kızılötesi, görünür ışık, morötesi, X-ışınları ve gama ışınları yer almaktadır. Dalga boyu arttıkça, foton enerjisinin azaldığı bilinmektedir. Fotoiletkenlik, gama ışınları veya görünür ışık gibi elektromanyetik ışınımların malzeme tarafından soğurulmasıyla elektrik iletkenliğinde ortaya

çıkan değişim olarak ifade edilir. Bir yarı iletkenin fotoiletken özellik göstermesi, serbest elektron ve deşiklerin varlığına bağlıdır. Işığın yarı iletken tarafından soğurulması, bu yük taşıyıcılarının yoğunluk ve dağılımında değişime yol açar ve bunun sonucunda elektrik iletkenliği artar. OSL, fotolüminesans (PL) olgusu ile karıştırılmamalıdır. OSL sinyalinin şiddeti, örnek tarafından soğurulan iyonlaştırıcı radyasyon dozu ile doğru orantılıdır. Buna karşın, PL genellikle iyonlaştırıcı radyasyona maruz kalma ile doğrudan ilişkili değildir. Fotolüminesans, örnek içerisindeki kristal kusurlarında bulunan elektronların ışık soğurması ile taban seviyesinden uyarılmış enerji seviyelerine yükselmesi sonucunda meydana gelir. Elektronların taban seviyesine geri dönmesi sırasında yayılan ışınımın şiddeti, uyarılmış durumda bulunan kusurların yoğunluğu ile orantılıdır. Bu süreçte elektronun kusurdan iyonlaşması nadiren gerçekleştiğinden fotoiletkenlik gözlenmez. Ayrıca, bu mekanizma sonucunda yayılan ışığın dalga boyu, uyarıcı ışığın dalga boyundan daha uzun olur; bu durum Stokes kayması olarak adlandırılır.

OSL, arkeolojik ve jeolojik materyallerde soğurulan toplam radyasyon dozunun belirlenmesinde yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. Bu yöntemde hedef örnekler, genellikle doğal kuvars taneleri veya feldspat mineralleri, uygun dalga boyu ve yoğunluğa sahip bir ışık kaynağı ile uyarılır. Son yıllarda OSL tarihlendirme yöntemi hem sediment örneklerine hem de ısıtılmış kuvarslara başarıyla uygulanmıştır. İyonlaştırıcı radyasyona maruz kalmış kuvars tanelerine mavi veya yeşil ışıkla uyarma yapıldığında ortaya çıkan OSL sinyalinin miktarı, örneğin son ışık görme veya çökelme tarihinden itibaren doğal radyoaktiviteden aldığı radyasyon dozunun belirlenmesinde kullanılır. Bu doz, laboratuvar ortamında bilinen radyasyon dozlarıyla üretilen OSL sinyallerinin, örneğin doğal OSL sinyali ile karşılaştırılması yoluyla hesaplanır. Bununla birlikte, çok yaşlı sedimentlerde sinyal doygunluğa ulaşabileceğinden, hızlı bileşenlere dayalı OSL tarihlendirmesi bazı zorluklar içerebilmektedir.

Optik Uyarım Çeşitleri

OSL uygulamalarında, belirli dalga boylarındaki ışık kullanılarak çeşitli uyarım türleri gerçekleştirilmektedir: (i) sürekli dalga uyarımı ile OSL (CW-OSL), (ii) doğrusal olarak modüle edilmiş OSL (LM-OSL) ve (iii) atımlı uyarımlı OSL (POSL). Bu optik uyarım modları, deneyin amacına ve ölçüm koşullarına bağlı olarak tercih edilir ve her biri, örnek içerisindeki farklı tuzak bileşenlerinin ayrıştırılmasını kolaylaştıran kendine özgü sinyal karakteristikleri sunar (Bøtter-Jensenve ark., 2003; Akselrod, 2011).

CW-OSL en yaygın kullanılan yöntemdir. Bu modda, örnek sabit dalga boyu ve sabit yoğunlukta sürekli bir ışık kaynağı ile uyarılır ve zamanla sinyalin azalımı eksponansiyel biçimde gözlemlenir. Basit uygulama yapısı nedeniyle, CW-OSL genellikle arkeolojik ve jeolojik tarihlendirme çalışmalarında temel OSL metodunu oluşturur (Bøtter-Jensen ve ark., 2003).

LM-OSL metodunda ise uyarıcı ışık yoğunluğu ölçüm süresince doğrusal olarak artırılır. Bu sayede, farklı fotoiyonizasyon kesitlerine sahip tuzak bileşenlerinin boşalması, tepe yapıları halinde

ayrılabilir. LM-OSL, CW-OSL'nin aksine, bileşenlerin ayırt edilmesini kolaylaştıran karakteristik tepeli eğriler üretir (Bulur, 2000; Maraba, 2017).

POSL (Pulsed OSL) yönteminde ise örnek kısa ışık darbeleri ile uyarılır ve emisyon bu darbelerden sonra ölçülür. Bu yaklaşım, uyarım ve ölçümü zamansal olarak ayırarak sinyal-gürültü oranını artırır ve düşük seviyeli sinyallerin tespiti için avantaj sağlar. Ayrıca, luminesans süreçlerinin zaman çözünürlüğü ile incelenmesine de olanak tanır (Yeltik, 2009).

Bunlara ek olarak, literatürde LM-OSL'a benzer şekilde "pseudo-LM-OSL" teknikleri tanımlanmıştır. Bu yöntem, CW-OSL eğrilerinin belirli matematiksel dönüşümlerle LM-OSL benzeri tepeli formlara çevrilmesine dayanır ve sinyal bileşenlerinin ayrıştırılmasını kolaylaştırır (Bulur, 2000; Bos ve Wallinga, 2009).

3.2.2. Yapay Zekâ, Makine Öğrenmesi ve Derin Öğrenme

Yapay zekâ (YZ), insan zekâsının bilişsel işlevlerini taklit edebilen, çevresinden aldığı verileri işleyerek çıkarımlar yapabilen ve deneyimlerinden öğrenerek performansını artırabilen sistemler veya makineler olarak tanımlanmaktadır (Russell ve Norvig, 2021). Alan Turing'in 1950 yılında yayımladığı *Computing Machinery and Intelligence* başlıklı çalışmasında ortaya koyduğu "Makineler düşünebilir mi?" sorusu, YZ'nin bilimsel temellerini atmış ve bu bağlamda Turing Testi geliştirilmiştir (Turing, 1950). Günümüzde YZ; doğal dil işleme, bilgisayarla görü, robotik, özerk sistemler, tıp ve karar destek sistemleri gibi pek çok alanda yaygın olarak kullanılmakta, gelişen donanım kapasitesi ve algoritma optimizasyonları ile birlikte uygulama alanları her geçen gün genişlemektedir (LeCun ve ark., 2015).

Yapay zekâ, makine öğrenmesi ve derin öğrenme arasındaki hiyerarşik ilişki Şekil 3.9'dagösterilmiştir.



Şekil 3.9. Yapay Zekâ, Makine Öğrenmesi ve Derin Öğrenme Arasındaki Hiyerarşik İlişki

Makine öğrenmesi (MÖ), YZ'nin bir alt alanı olup, bilgisayarların açıkça programlanmadan, geçmiş verilerden öğrenerek gelecekteki durumları tahmin edebilmesini sağlayan algoritmaları ifade etmektedir (Mitchell, 1997). MÖ, genel olarak iki ana kategoriye ayrılır: gözetimli öğrenme (supervised learning) ve gözetimsiz öğrenme (unsupervised learning).

Gözetimli öğrenmede, model etiketlenmiş veriler üzerinde eğitilir. Bu veri setlerinde hem girdi (özellikler) hem de beklenen çıktı (hedef) bilgisi bulunur. Algoritma, girdi-çıktı ilişkisini öğrenerek yeni veriler için doğru tahminler yapmayı hedefler. Doğrusal regresyon, lojistik regresyon, destek vektör makineleri (SVM) ve YSA bu yaklaşımda sıkça kullanılan yöntemlerdir (Bishop, 2006). Modelin başarısı, genellikle doğruluk, hassasiyet veya hata metriği gibi performans ölçütleriyle değerlendirilir.

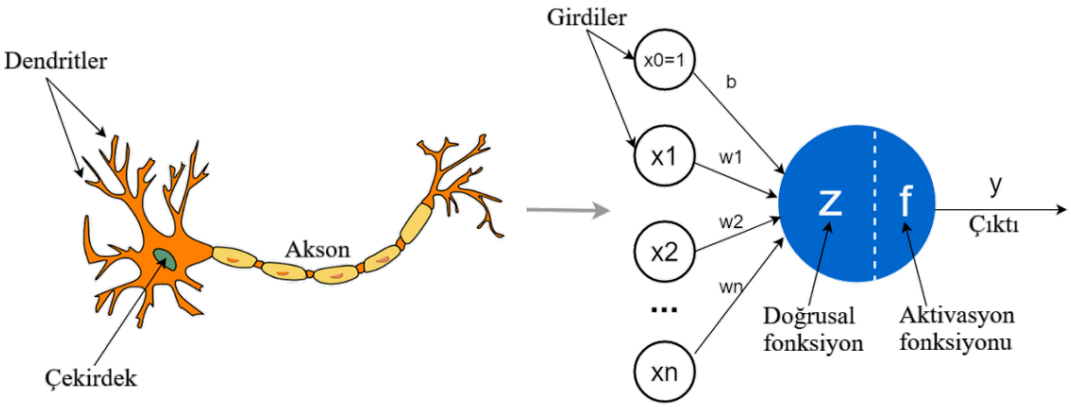
Gözetimsiz öğrenmede ise veri setlerinde etiket bilgisi bulunmaz. Algoritma, yalnızca girdiler arasındaki benzerlikleri, farklılıkları veya dağılımları analiz ederek veriyi yapılandırmaya çalışır. Kümeleme (clustering) algoritmaları (ör. k-means, hiyerarşik kümeleme) ve boyut indirgeme yöntemleri bu grupta yer alır (Jain ve ark., 1999). Gözetimsiz öğrenme, özellikle veri madenciliği, anomali tespiti ve keşifsel veri analizi gibi alanlarda önemlidir.

Derin öğrenme (DÖ), makine öğrenmesinin bir alt dalı olup, çok katmanlı YSA kullanarak verilerden otomatik olarak özellik çıkarımı yapabilen gelişmiş bir yöntemdir (LeCun ve ark., 2015). 1980'lerde geliştirilen temel sinir ağı modelleri, 2000'li yıllardan sonra artan işlem gücü, büyük veri kümelerinin erişilebilirliği ve optimizasyon tekniklerindeki ilerlemeler sayesinde büyük bir ivme kazanmıştır. DÖ modelleri, düşük seviyeli katmanlarda temel özellikleri, yüksek seviyeli katmanlarda ise karmaşık ve soyut temsilleri öğrenir. Bu özellikleri sayesinde, görüntü işleme, konuşma tanıma, doğal dil işleme, biyoinformatik ve otonom araç sistemleri gibi karmaşık problemlerde yüksek başarı göstermektedir (Goodfellow ve ark., 2016; Schmidhuber, 2015).

Yapay Sinir Ağlarının (YSA) Biyolojik Temeli ve Matematiksel Modeli

Yapay Sinir Ağları (YSA), biyolojik sinir sisteminden esinlenerek geliştirilmiş bilgi işleme sistemleridir. Temel amacı, insan beyninin öğrenme ve karar verme yeteneklerini matematiksel modeller aracılığıyla taklit etmektir (Haykin, 1999). Biyolojik sinir sistemi, milyarlarca nörondan oluşur ve her bir nöron, dendritler aracılığıyla aldığı elektriksel sinyalleri gövdesinde (soma) işler, ardından aksonlar aracılığıyla diğer nöronlara iletir (Kandel ve ark., 2013).

Biyolojik bir nöron; dendritler (girdileri alan yapılar), hücre gövdesi veya soma (gelen sinyalleri işleyen kısım), akson (çıktı sinyallerini ileten yapı) ve sinapslar (nöronlar arası bağlantı noktaları) olmak üzere dört ana bileşenden oluşur. Gelen sinyaller, hücre gövdesinde toplanır ve belirli bir eşik değeri aştığında akson boyunca elektriksel bir impuls olarak iletilir. Bu yapı, bilgiyi hem elektriksel hem de kimyasal yollarla ileten karmaşık bir ağ oluşturur (Bear ve ark., 2016). Biyolojik nöronlar ile yapay nöronlar arasındaki benzerlik Şekil 3.10'da özetlenmiştir.



Şekil 3.10. Biyolojik Nöronlar ve Yapay Sinir Ağları (YSA) Modeli (Shah, 2020)

Biyolojik nöronlarda sinyaller dendritlerden soma'ya, oradan akson üzerinden diğer nöronlarla iletilirken; yapay nöronlarda girişler $(x_1, x_2, \dots, x_n)$ belirli ağırlıklar $(w_1, w_2, \dots, x_n)$ ile çarpılır, ardından bu değerler toplanarak net girdi (z) elde edilir. Bu net girdi, bir aktivasyon fonksiyonu (f) aracılığıyla işlenerek çıktı (y) üretilir (McCulloch ve Pitts, 1943).

Matematiksel olarak bir yapay nöronun çıktısı şu şekilde ifade edilir:

$$z = \sum_{i=1}^{n} w_i x_i + b \tag{3.9}$$

$$y = f(z) \tag{3.10}$$

Burada b bias terimini, f ise sigmoid, ReLU, tanh gibi doğrusal olmayan aktivasyon fonksiyonlarını temsil eder (Goodfellow ve ark., 2016). Aktivasyon fonksiyonları, modelin karmaşık ve doğrusal olmayan ilişkileri öğrenmesini sağlar.

YSA'lar; giriş katmanı, bir veya daha fazla gizli katman ve çıkış katmanından oluşur. Katman sayısı arttıkça model derinleşir ve karmaşık örüntüler öğrenebilir. Öğrenme süreci, modelin çıktısı ile hedef çıktı arasındaki hatayı minimize edecek şekilde ağırlıkların güncellenmesine dayanır. Bu amaçla genellikle geri yayılım (backpropagation) algoritması ve gradyan inişi (gradient descent) optimizasyon yöntemleri kullanılır (Rumelhart ve ark., 1986).

Biyolojik temelden türetilmiş bu model hem sinyal işleme hem de bilimsel veri analizi gibi geniş bir uygulama alanına sahiptir. Özellikle MATLAB yazılımı ve Neural Net Fitting (NNF) toolbox gibi araçlar, kullanıcıya sinir ağı modellerini kolayca oluşturma, eğitme ve test etme imkânı tanır. YSA eğitimi, ağırlık ve bias değerlerinin güncellenmesi sürecini içerir. Bu süreçte amaç, modelin çıktısı ile hedef çıktılar arasındaki farkı minimize etmektir. Geri yayılım (backpropagation)

algoritması ile hata, çıkış katmanından giriş katmanına doğru iletilir ve her bir bağlantının ağırlıkları, seçilen optimizasyon algoritmasına göre güncellenir (Rumelhart ve ark., 1986).

Bu çalışmada kullanılan üç farklı optimizasyon algoritması Levenberg–Marquardt (LM), Bayesian Regularization (BR) ve Scaled Conjugate Gradient (SCG) olup, her biri farklı veri seti boyutları, gürültü düzeyleri ve genelleme ihtiyaçları için avantajlar sunmaktadır.

Levenberg–Marquardt (LM) algoritması, doğrusal olmayan en küçük kareler problemleri için geliştirilmiş hibrit bir optimizasyon yöntemidir ve hem Gauss–Newton hem de gradyan inişi (gradient descent) yöntemlerinin özelliklerini birleştirir (Hagan ve Menhaj, 1994). LM algoritması, hata fonksiyonunun ikinci dereceden türevlerine dayanan Hesse matrisi yaklaşımını kullanır. Hesse matrisinin yaklaşık formu şu şekildedir:

$$H \approx J^T J \tag{3.11}$$

Burada J, hata fonksiyonunun Jacobian matrisi, J^T Jacobian matrisin transpozu, H ise Hesse matrisidir. Ağırlık güncelleme formülü ise:

$$w_{k+1} = w_k - [J^T J + \mu I]^{-1} J^T e \tag{3.12}$$

Burada:

w_{k+1} : Bir sonraki döngüdeki güncellenmiş ağırlık vektörü

w_k : k. döngüdeki ağın ağırlık vektörü

I : Birim matrisi

e : Hata vektörü

şeklinde ifade edilir. Burada μ, adım büyüklüğünü kontrol eden uyarlamalı bir parametredir; μ küçük olduğunda algoritma Gauss–Newton yöntemine yaklaşırken, büyük olduğunda gradyan inişi yöntemine yaklaşır.

LM algoritmasının, küçük ve orta ölçekli veri setlerinde son derece hızlı yakınsama sağlaması ve nonlineer problemler için yüksek doğrulukta çözümler üretmesi gibi avantajlarının yanı sıra büyük veri setlerinde bellek kullanımının yüksek olması ve hesaplama maliyetinin yüksek boyutlu problemlerde artabilmesi gibi dezavantajları da bulunmaktadır.

Bayesian Regularization (BR), yapay sinir ağlarının genelleme yeteneğini artırmak ve aşırı öğrenmeyi (overfitting) önlemek amacıyla geliştirilen bir optimizasyon yöntemidir (MacKay, 1992). Bu yaklaşımda hata fonksiyonuna, ağ ağırlıklarının büyüklüğünü kontrol eden ek bir ceza terimi eklenir.

Klasik hata fonksiyonu:

$$E_D = \sum_{i=1}^{n}(y_i - t_i)^2 \tag{3.13}$$

BR hata fonksiyonu:

$$E = \beta E_D + \alpha E_w \tag{3.14}$$

Burada:

E_D: Veri uyum hatası, $E_w = \sum w_i^2$: Ağırlıkların büyüklüğü

$y_{i:}$ Modelin i. örnek için ürettiği çıktı t_i: i. örnek için hedef

$\alpha\ ve\ \beta$: Bayes teoremi ile güncellenen düzenleme parametreleri

Bu yöntem, ağ karmaşıklığını otomatik olarak kontrol eder. Böylece, gereksiz yüksek ağırlıklar bastırılarak modelin aşırı karmaşık hale gelmesi önlenir ve genelleme yeteneği artar.

BR algoritmasının, gürültülü veri setlerinde yüksek genelleme başarısı sağlaması ve aşırı öğrenme riskini azaltması gibi avantajlarının yanı sıra hesaplama süresinin LM'ye göre daha uzun olması ve çok büyük veri setlerinde optimizasyon süresinin artması gibi dezavantajları da bulunmaktadır.

Scaled Conjugate Gradient (SCG) algoritması, klasik Conjugate Gradient (CG) yönteminin, doğrusal arama (line search) gereksinimini ortadan kaldıracak şekilde optimize edilmiş bir türevidir (Møller, 1993). İkinci türev bilgisine gerek duymadan, Newton benzeri bir hızla yakınsar.

SCG, ağırlık güncelleme sırasında hem yön bilgisini hem de adım büyüklüğünü otomatik olarak ayarlar.

Güncelleme formülü:

$$w_{k+1} = w_k + \lambda_k p_k \tag{3.15}$$

Burada:

p_k: Arama yönü

λ_k: Optimal adım büyüklüğü

SCG, klasik CG'ye kıyasla daha az bellek kullanır ve doğrusal arama işlemlerini kaldırdığı için işlem süresini kısaltır.

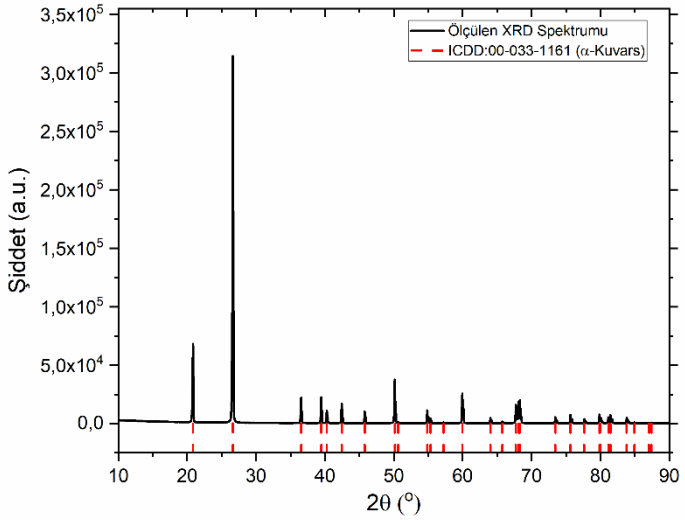
SCG algoritmasının, büyük veri setlerinde düşük bellek kullanımı ile hızlı öğrenme sağlaması ve doğrusal arama adımına ihtiyaç duymadan optimizasyon yapması gibi avantajlarının

yanı sıra küçük veri setlerinde LM kadar hızlı yakınsama gösterememesi ve başlangıç parametrelerine duyarlı olması gibi dezavantajları da bulunmaktadır. Bu algoritmaların seçimi, veri setinin büyüklüğüne, gürültü seviyesine ve hedeflenen hata toleransına bağlı olarak değişir. LM, küçük ve orta ölçekli veri setlerinde yüksek doğruluk sağlarken; BR, özellikle gürültülü verilerde ve genelleme gerektiren uygulamalarda avantajlıdır. SCG ise bellek kullanımı açısından verimli olup, büyük veri setlerinde tercih edilir.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1. X–Işını Kırınımı (XRD) Analizi ile İlgili Bulgular

Kuvars mineralinin 45–90 µm aralığında eleklerle elenmesiyle elde edilen toz örneklerine ait XRD desenleri, Çukurova Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarı (ÇÜMERLAB)'nda bulunan PANalytical Empyrean XRD cihazı kullanılarak 10°–90° aralığında taranarak kaydedilmiş; elde edilen desenler ile Uluslararası Kırınım Verileri Merkezi (ICDD)'nden alınan kuvars referans desenleri Şekil 4.1'de, XRD analizleri sonucunda hesaplanan kristalografik parametreler ise Çizelge 4.1'de sunulmuştur.



Şekil 4.1. Kuvars Mineraline Ait Ölçülen ve ICDD Referans XRD Desenleri

Çizelge 4.1. Kuvars mineraline ait kristalografik parametreler

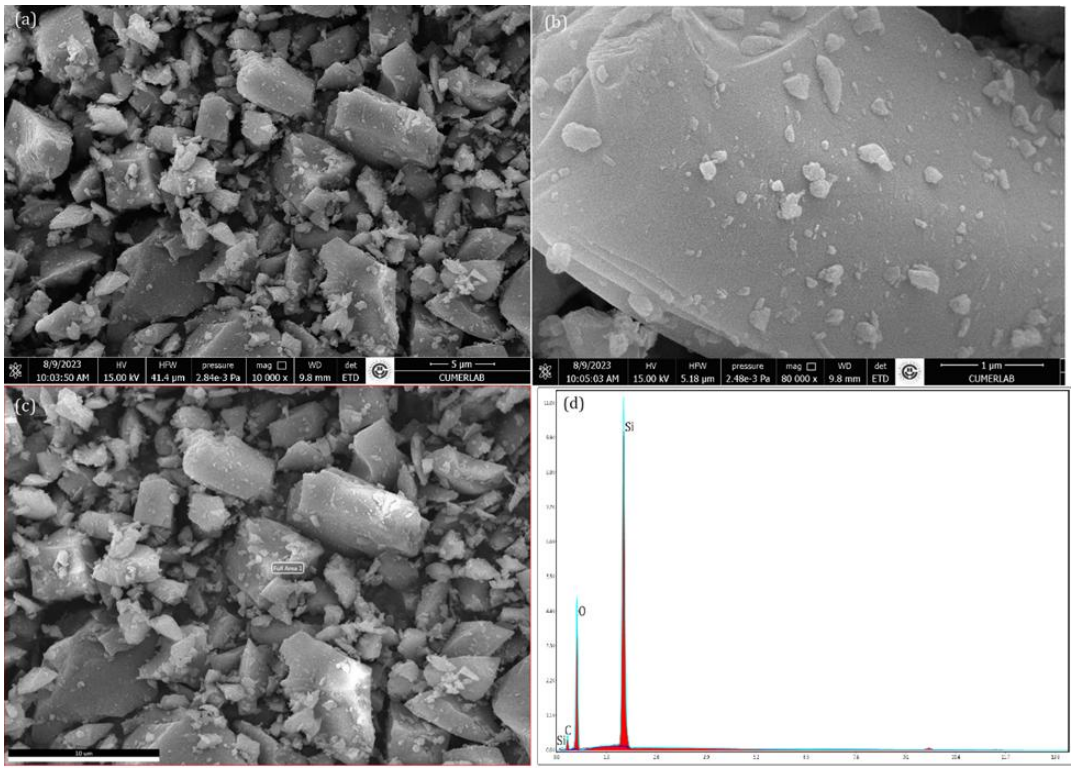
Bileşik		**Kristal Yapı**	**Birim hücre parametreleri**						**Hacim**	**Z***
İsim	**Formül**		**a**	**b**	**c**	**α**	**β**	**γ**		
Kuvars	α–SiO_2	Kristal: Hekzagonal Kristal örgü: Trigonal	4,915	4,915	5,406	90	90	120	113,10	3,0
Hesaplanan yoğunluk (g/cm^3)			2,65							
Ölçülen yoğunluk (g/cm^3)			2,66							
Uzay grubu			P3(1)21							

Şekil 4.1'deki siyah çizgi, örneklerden elde edilen XRD verisini göstermektedir. Kırmızı çizgiler, ICDD 00–033–1161 veri kartına ait α–kuvars fazına karşılık gelen referans tepelerini ifade etmektedir. Grafik 4.1 ile Çizelge 4.1 birlikte incelendiğinde, ölçülen tepelerin konum ve yoğunluklarının referans kartındaki α–kuvars tepeleriyle örtüştüğü görülmektedir. Bu uyum, ölçülen

örneklerin kuvars mineralinden oluştuğunu ispatlar niteliktedir. Temel kristal parametrelerinin α–kuvars kristal sistemiyle uyumlu olduğu görülmektedir. Ölçüm sonuçlarına göre örneklerin hekzagonal kristal sisteme ve P 3(1)21 uzay grubuna ait olduğu söylenebilir. Kafes parametreleri a = b = 4,9150 Å ve c = 5,4060 Å olarak hesaplanmıştır. Bu değerlerin literatürdeki standart α–kuvars parametreleriyle örtüştüğü görülmektedir. Yaklaşık 20° ile 90° 2θ aralığında kuvars fazına ait belirgin tepeler tespit edilmiştir. En yüksek şiddetli tepe yaklaşık 26° 2θ değerindedir ve (0 1 1) düzlemine karşılık gelmektedir. Diğer tepelerin de bilinen Miller indislerine uygun olduğu belirlenmiştir. Ek bir faz tepesine rastlanmamıştır. Bu durum, örneğin saf kuvars içerdiğini kanıtlamaktadır. Tepelerin dar ve belirgin olması, kristal yapının düzenli ve kusur oranının düşük olduğunu göstermektedir. Ölçülen yoğunluk değeri 2,66 g/cm³ olarak bulunmuştur. Bu değer, teorik 2,65 g/cm³ değeriyle uyumludur. Sonuç olarak, elde edilen XRD verisinin α–kuvars fazına ait olduğu doğrulanmıştır. Örneğin yüksek saflıkta ve iyi kristalize olmuş bir yapı içerdiği belirlenmiştir.

4.2. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) –Enerji Dağılım Spektroskopisi (EDS) Analizleri ile İlgili Bulgular

Kuvars örneklerine uygulanan SEM–EDS analizleri ile örneklerin yüzey morfolojisi detaylı şekilde incelenmiştir. 45–90 μm boyut aralığında parçacık büyüklüğüne sahip toz kuvars minerali için, ÇÜMERLAB bünyesinde yer alan FEI Quanta 650 Field Emission taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılarak görüntüleme yapılmıştır. Bu kapsamda, 10 kx büyütme oranı ile elde edilen SEM görüntüsü Şekil 4.2(a)'da 80 kx büyütme oranı ile alınan detaylı SEM görüntüsü ise Şekil 4.2(b)'de sunulmuştur. Ayrıca Şekil 4.2(c)'de, kuvars örneklerine ait tüm alanın taranmasıyla elde edilen genel SEM görüntüsü verilmiş, Şekil 4.2(d)'de ise analiz edilen örneklere ait EDS spektrumu gösterilmiştir. EDS analizleri sonucunda elde edilen kantitatif element analiz verileri ise Çizelge 4.2'de sunulmuştur.



Şekil 4.2. (a) 10 kx ve (b) 80 kx Büyütme Oranlarında Elde Edilen SEM Görüntüleri, (c) EDS Analizi İçin Taranan Alan ve (d) EDS Spektrumu

Çizelge 4.2. Kuvars Mineralinin SEM–EDS Kantitatif Element Analizi

Element	**Ağırlık %**	**Atom**	**Net Şiddet**
Karbon (C)	15,05	22,45	139,61
Oksijen (O)	48,42	54,24	1727,37
Silisyum (Si)	36,53	23,31	5837,55

Şekil 4.2(a) ve 4.2(b)'de sunulan SEM görüntüleri beraber değerlendirildiğinde, kuvars örnekleri içerisinde homojen bir parçacık boyutu dağılımı olmadığı ve örneklerin mikro metre (µm) derecesinde ve yaklaşık olarak 0,25 µm ile 10 µm aralığında yer alan farklı parçacık boyutlarından oluştuğunu göstermektedir.

Şekil 4.2(a)'da sunulan SEM görüntüleri, toz kuvars örneklerine ait parçacıkların düzensiz ve kırık yapıda olduğunu ve bu yapıda köşeli kristal şekillerin baskın olduğunu göstermektedir. Şekil 4.2(b)'deki görüntüler ise kristal yüzeylerin düzgün ve tabakalı olduğunu göstermekte olup yüzeylerdeki ince parçacıkların kuvars tanelerine yapışan ve örneklerin öğütülmesi veya hazırlık aşamasında ortaya çıkan kuvars kırıntı veya toz birikimlerinin yüzeye tutunduğunu düşündürmektedir.

Şekil 4.2(d)'deki EDS spektrumu, bu spektrumdan elde edilen ve Çizelge 4.2'de sunulan kantitatif analiz sonuçları birlikte değerlendirildiğinde, silisyum (Si) ve oksijen (O) elementlerine ait

sinyallerin yoğun olduğu ve ağırlıkça %36,53 Si ve %36,53 O'dan oluştuğu belirlenmiştir. Bu bulgu, örneklerin kuvars bileşimiyle uyumlu olup bu değerlerin kuvarsın teorik bileşimine yakın olduğu görülmüştür. Ayrıca yapıda ağırlıkça %15,05 oranında karbon tespit edilmiş olup bu karbon sinyalinin, tarama sırasında kullanılan karbon bant ve kaplamadan kaynaklandığı söylenebilir. Bu durumun, mikroyapı analizlerinde yaygın olduğu ve örneklerin gerçek bileşimini etkilemediği kabul edilmektedir.

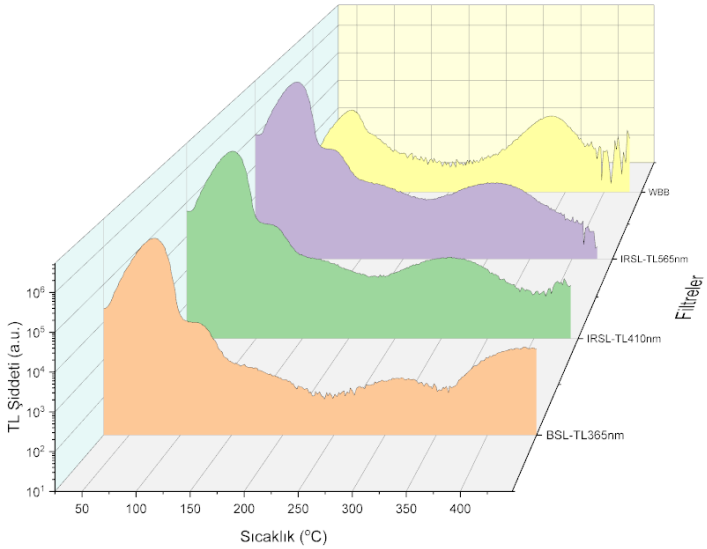
Sonuç olarak, SEM ve EDS verileri birlikte değerlendirildiğinde örneklerin kuvars mineralinden oluştuğu, kristal morfolojisinin düzenli ve köşeli olduğu, yüzeylerin ise düzgün ve keskin hatlara sahip olduğu belirlenmiştir. Bu yapı, XRD verileriyle uyumlu olup elde edilen tüm bulgular, XRD analizinde tespit edilen α–kuvars fazının morfolojik ve kimyasal olarak da desteklendiğini ortaya koymuştur.

4.3. Termolüminesans (TL) Ölçümleri ile İlgili Bulgular

4.3.1. Filtre Testi Deneyi ile İlgili Bulgular

Kuvars örneklerinin lüminesans (TL ve OSL) özelliklerini test etmek için deneylerde kullanılacak en uygun filtre seçeneğini belirlemek amacıyla, Lexsyg smart TL/OSL cihazına yerleştirilen her filtre ile sabit bir test dozu kullanılarak TL okumaları yapılmıştır. TL analizlerinde, daha geniş bir doz aralığını inceleyebilmek, ölçüme karışan gürültüyü en aza indirmek ve özellikle incelenecek elektron tuzaklarından gelen lüminesansı en üst düzeye çıkaran ve incelenmesi planlanmayan tuzaklardan gelen lüminesansı en aza indirmek için spektral seçicilik büyük önem taşımaktadır. Bu kapsamda, uygun filtre seçimi ile ölçümde spektral seçicilik sağlanarak istenmeyen parazit sinyaller bastırılmakta ve incelenen sinyalin netliği artırılmaktadır (McKeever, 1985; Aitken, 1985). Uygun filtre seçimi ile incelenecek bölgedeki elektron tuzakları, cihaz üzerindeki foto çoğaltıcı tüpün ölçebileceği üst lüminesans ışık şiddetini aşmadan daha geniş bir doz aralığında çalışılabilir.

Uygun filtre seçeneğini belirlemek için sabit 10 Gy beta radyasyonu ile ışınlanan kuvars örneklerinin (5 alikot) TL ölçümleri oda sıcaklığından 450 ºC'ye kadar 1 ºC/s ısıtma hızı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Dört farklı filtre seçeneği kullanılarak yapılan ölçümler sonucunda elde edilen sıcaklığa karşı TL şiddeti grafikleri Şekil 4.3'te gösterilmiştir.



Şekil 4.3. Farklı Filtre Kombinasyonlarındaki TL Işıma Eğrileri

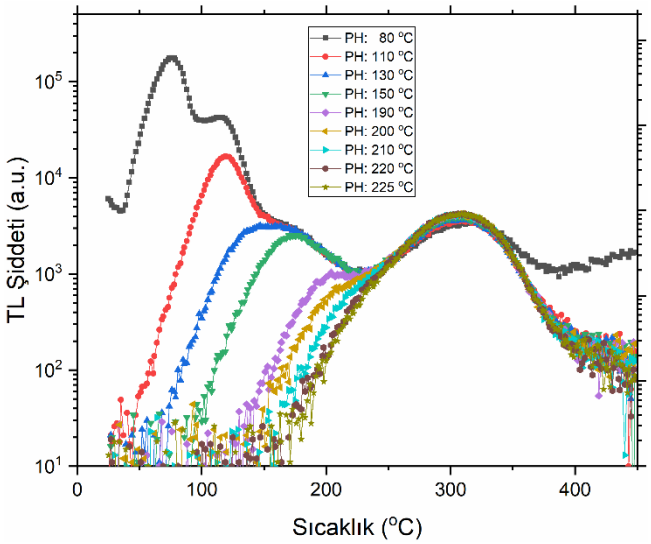
Şekil 4.3'te sunulan grafiklerden de anlaşılacağı üzere, IRSL–TL 565 nm olarak adlandırılan Schott–BG 39–Glass–3 mm; AHF–BrightLine HC 575/25–Interference–5 mm filtre ile elde edilen TL ışıma eğrisi, diğer filtre seçeneklerine göre daha yüksek şiddet göstermiştir. Bu filtre, daha uzun dalga boyunda ölçüm yapılmasını sağlayarak özellikle derin ve termal olarak kararlı tuzaklardan gelen lüminesansın ön plana çıkarılmasına imkân tanımaktadır. Böylece, ölçüm sırasında kısa dalga boylu parazit sinyallerin ölçüme karışması en aza indirilmiş, gürültü azaltılarak sinyal–gürültü oranı artırılmıştır.

Grafikte, 565 nm bandında belirgin ana tepelerin 100–150 °C ve 200–350 °C aralıklarında yoğunlaştığı gözlemlenmiştir. Bu durum, kuvars örneklerinde daha stabil tuzak seviyelerinin etkin biçimde tespit edilebildiğini ortaya koymaktadır. Ayrıca, IRSL–TL 565 nm filtre kullanılarak incelenmek istenen elektron tuzaklarından gelen lüminesans sinyallerinin en üst düzeye çıkarılabileceği, incelenmesi planlanmayan tuzaklardan gelen lüminesans ise minimuma indirilebileceği düşünülmektedir. Böylece cihazın foto çoğaltıcı tüpünün ölçebileceği üst sınır olan saniyede $6x10^6$ sayım değeri aşılmadan, daha geniş bir doz aralığında güvenilir ölçüm yapılması sağlanabilecektir. Bu nedenle TL ve gerekli durumlarda da OSL ölçümleri (ön ısıtma için) ile ilgili deneylerde IRSL–TL 565 nm (Schott–BG 39–Glass–3 mm; AHF–BrightLine HC 575/25–Interference–5 mm) filtre kombinasyonunun kullanılmasına karar verilmiştir.

4.3.2. Ön Isıtma Deneyi ile İlgili Bulgular

Sığ elektron tuzaklarına yakalanan elektronlardan kaynaklanan düşük sıcaklık tepelerinin oda sıcaklığında bile termal söndürmeye maruz kalabileceği iyi bilinmektedir (Aitken, 1985; McKeever, 1985). Bu nedenle bu aşamada, daha kararlı olan ve elektronları daha uzun süre tutabilen derin tuzaklardan gelen TL ışıma tepelerinin incelenebilmesi için uygun ön ısıtma sıcaklığının

belirlenmesi amaçlanmıştır. Ölçümlerde derin elektron tuzaklarının ışıma tepelerini kaydetmenin bir yolu, ön ısıtma ile düşük sıcaklık tepelerini silmektir. 10 Gy beta radyasyonu ile ışınlanan kuvars örnekleri için, 80 °C'den 225 °C'ye 5 °C'lik artışlarla bir ön ısıtma–duraklatma (10 s)–TL ölçüm döngüsü gerçekleştirilmiş ve oda sıcaklığından 450 °C'ye kadar olan sıcaklık aralığında TL ışıma eğrileri kaydedilmiştir. Kaydedilen TL ışıma eğrileri Şekil 4.4'te sunulmuştur.



Şekil 4.4. Farklı Ön Isıtma Sıcaklıklarında Elde Edilen TL Işıma Eğrileri

Şekil 4.4'te ilk bakışta ve üst üste binen TL tepeleri dikkate alınmadan, kuvars mineralinin yaklaşık 75 °C, 120 °C, 175 °C, 325 °C ve 425 °C civarında 5 farklı görünür TL ışıma tepesinden oluştuğu söylenebilir.

Şekil 4.4'teki ışıma eğrileri incelendiğinde, düşük ön ısıtma sıcaklıklarında (örneğin 80 °C) belirgin bir düşük sıcaklık tepesinin varlığı dikkat çekmektedir. Ön ısıtma sıcaklığı arttıkça, bu düşük sıcaklık tepelerinin giderek azaldığı ve yerini 200–300 °C aralığında konumlanan daha geniş ve kararlı tepelere bıraktığı gözlenmektedir. Bu durum, düşük sıcaklık bölgelerinde yer alan sığ tuzakların termal uyarılma ile boşaltıldığını ve derin tuzaklardan gelen TL sinyallerinin ölçümde daha belirgin hale geldiğini göstermektedir.

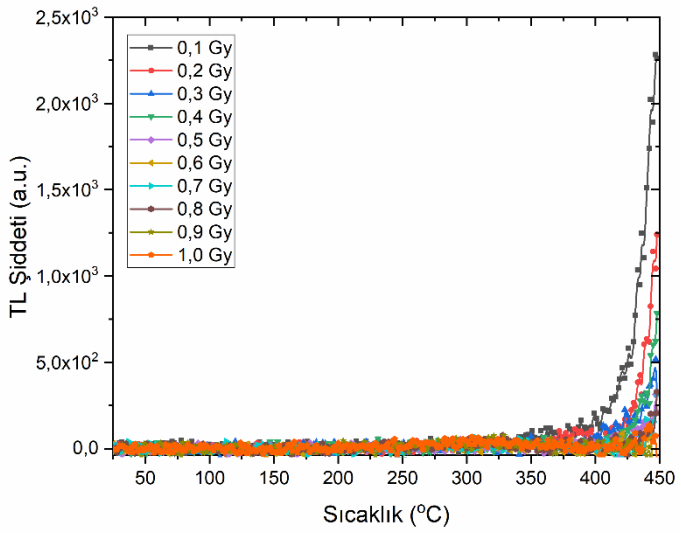
Şekil 4.4'teki TL ışıma eğrileri, 220 °C'de 10 saniye ön ısıtmanın sığ tuzakları tamamen silmek ve 200 °C–450 °C sıcaklık aralığında TL ışıma eğrilerini kaydetmek için yeterli olduğunu göstermiştir. 220 °C'de 10 saniyelik ön ısıtma, sığ tuzakları etkili şekilde temizlerken derin tuzak sinyalini büyük ölçüde korumaktadır. Bu nedenle yapılacak olan lüminesans ölçümlerinde, 220 °C'de 10 saniyelik ön ısıtma parametresinin kullanılmasına karar verilmiştir.

4.3.3. Doz Yanıt Deneyi ile İlgili Bulgular

Kuvars mineralinden 8 ± 0,2 mg kütleli (90–140 µm aralığında parçacık boyutlu) toz örnekler tartılarak Lexsyg smart TL/OSL okuyucu içerisinde bulunan stronsiyum–90 β kaynağı ile

0,1 Gy'den 1034,9 Gy'e kadar farklı dozlarda ışınlanmıştır. Kuvars örneklerine ait TL ışıma eğrileri, her bir doz için örneklerin 220 °C'lik sıcaklığa kadar ısıtılıp bu sıcaklıkta 10 s bekletildikten sonra 1 °C/s'lik ısıtma hızıyla oda sıcaklığından 450 °C'ye kadar ısıtılması ile kaydedilmiştir. Doz–yanıt deneylerinde ışınlama–ön ısıtma–TL ölçümü–TL fon ölçümü döngüsü kullanılmıştır.

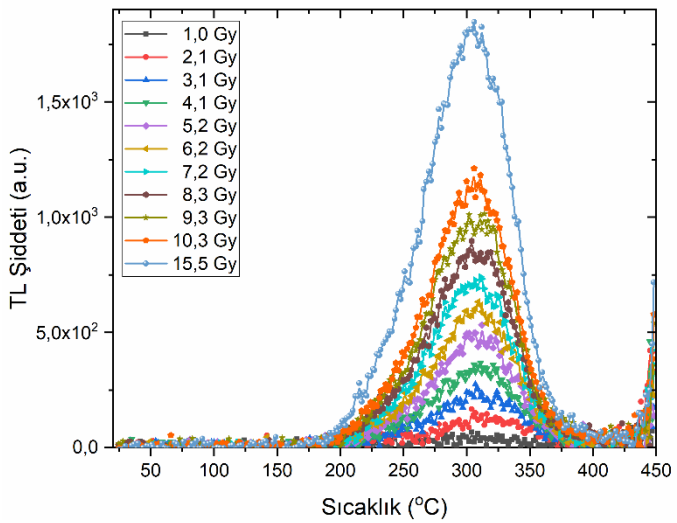
0,1–1 Gy doz aralıklarında ışınlanmış olan örneklerden elde edilen TL ışıma eğrilerine ait grafikler Şekil 4.5'te görülmektedir.



Şekil 4.5. 0,1–1 Gy Aralıklarındaki Farklı Dozlarda Elde Edilen TL Işıma Eğrileri

Şekil 4.5'te 0,1–1 Gy doz aralığında elde edilen TL sinyalleri görülmektedir. Uygulanan 220 °C'de 10 s ön ısıtma, düşük sıcaklık tepelerine ait sinyalleri etkin biçimde silerek sığ tuzakları boşaltmış, böylece sadece derin tuzaklardan kaynaklanan sinyallerin gözlemlenmesini sağlamıştır. 250–450 °C aralığında elde edilen düşük sinyaller, doğrudan bu derin tuzaklara atfedilebilir. Bu gözlem, kuvars içinde düşük dozlarda bile derin tuzak yanıtı alınabileceğini belirten ilgili literatürle uyumluluk göstermektedir (McKeever, 1985; Murray ve Wintle, 1999).

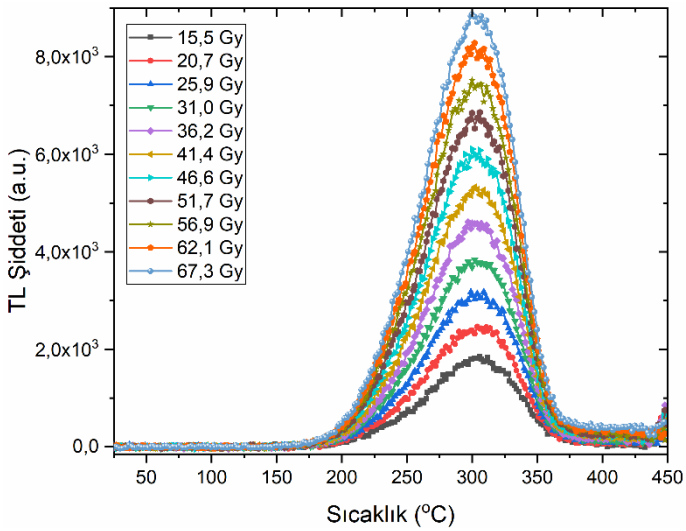
1–15,5 Gy doz aralıklarında ışınlanmış olan örneklerden elde edilen TL ışıma eğrilerine ait grafikler Şekil 4.6'da görülmektedir.



Şekil 4.6. 1–15,5 Gy Aralıklarındaki Farklı Dozlarda Elde Edilen TL Işıma Eğrileri

Şekil 4.6'da 1–15,5 Gy arasındaki dozlarda ölçülen TL ışıma eğrileri görülmektedir. 220 °C'de 10 s ön ısıtma ile düşük sıcaklık tepeleri bastırılmış, 200–400 °C aralığındaki ana tepe (ya da üst üste binmiş tepeler) net olarak öne çıkmıştır. Tepe şiddeti dozla doğrusal bir ilişki göstermektedir. Bu sonuç, kuvarsın dozimetri uygulamalarında güvenilir doğrusal (lineer) doz yanıtı sunduğunu doğrulayan önceki çalışmalarla birebir uyumludur (Furetta ve Weng, 2018).

15,5–67,3 Gy doz aralıklarında ışınlanmış olan örneklerden elde edilen TL ışıma eğrilerine ait grafikler Şekil 4.7'de görülmektedir.

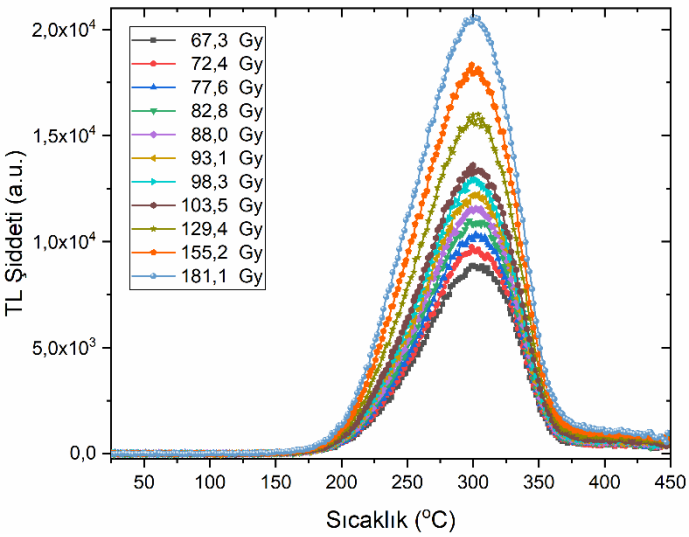


Şekil 4.7. 15,5–67,3 Gy Aralıklarındaki Farklı Dozlarda Elde Edilen TL Işıma Eğrileri

Şekil 4.7'de kuvarsa ait 15,5–67,3 Gy doz aralığındaki TL sinyalleri sunulmuştur. Ön ısıtma sonrasında düşük sıcaklık tepesi tamamen ortadan kalkmış, 300 °C civarındaki ana tepe dozla düzenli

olarak artmıştır. Bu durum, derin tuzakların termal kararlılığının ve doza karşı güvenilir ölçüm verebilme yeteneğinin bir göstergesidir (Elhaddad ve ark., 2021).

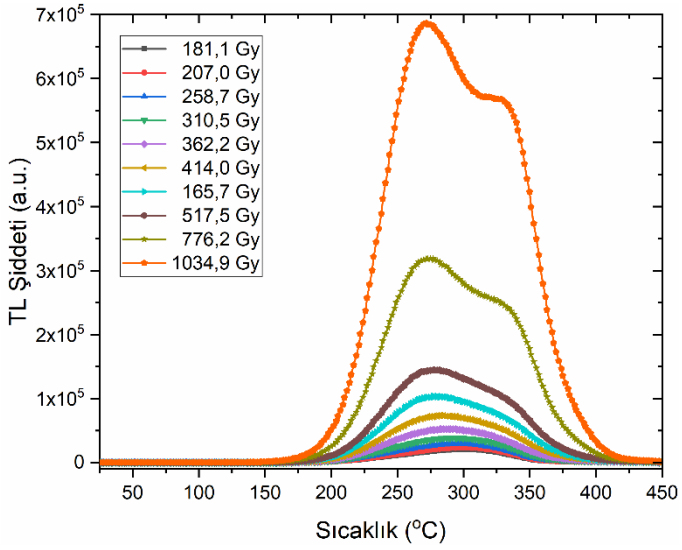
67,3–181,1 Gy doz aralıklarında ışınlanmış olan örneklerden elde edilen TL ışıma eğrilerine ait grafikler Şekil 4.8'de görülmektedir.



Şekil 4.8. 67,3–181,1 Gy Aralıklarındaki Farklı Dozlarda Elde Edilen TL Işıma Eğrileri

Şekil 4.8'e göreana ışıma tepesine ait sinyal yoğunluğunun radyasyon dozuyla artmaya devam ettiği ancak bu artışla birlikte sinyalin doz doygunluğuna henüz ulaşamadığı söylenebilir. Derin tuzaklardan gelen sinyalin bu dozlarda bile net şekilde kaydedilebilmesi, kuvarsın geniş doz aralığında dozimetride uygulanabilirliğini desteklemektedir.

181,1–1034,9 Gy doz aralıklarında ışınlanmış olan örneklerden elde edilen TL ışıma eğrilerine ait grafikler Şekil 4.9'da görülmektedir.



Şekil 4.9. 181,1–1034,9 Gy Aralıklarındaki Farklı Dozlarda Elde Edilen TL Işıma Eğrileri

Şekil 4.9'da kuvarsa uygulanan en yüksek doz aralığına (181,1–1034,9 Gy) ait TL ışıma eğrileri görülmektedir. Tepe şiddeti önemli ölçüde artmakla birlikte, doza bağlı orantılı artışın yüksek dozlarda daha hızlı olması nedeniyle doygunluğa yaklaşım belirtileri gözlemlenmektedir. Bu da derin tuzakların bir kısmının doza bağlı olarak sınırlarına ulaştığını göstermektedir. Literatürdeki birçok çalışma da benzer şekilde kuvarsın yüksek dozlara doğru doygun sinyal davranışı sergilediğini göstermektedir (Murray ve Wintle, 1999).

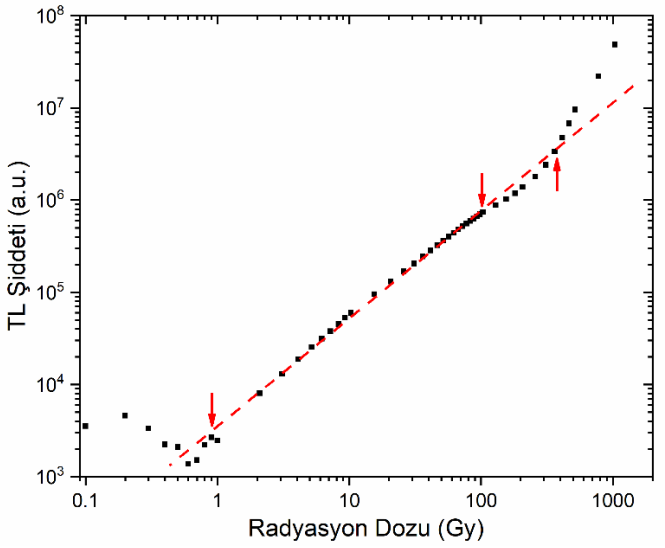
Lüminesans kristallerin düşük dozlardan yüksek dozlara doğru ışınlanması sonucunda TL ışıma eğrilerinde gözlenen sinyal artışının, radyasyonla uyarılmış serbest taşıyıcıların kristal içerisindeki tuzaklarda daha yüksek oranda tutulmasından kaynaklandığı bilinmektedir. Radyasyon etkisiyle serbest hâle gelen elektronların, kristal yapıdaki kusur bölgelerinde ya da enerji bantları arasında yer alan metastabil tuzaklarda (yarı kararlı enerji seviyeleri) hapsolduğu kabul edilmektedir. Uygulanan doz miktarı arttıkça, bu tuzaklarda biriken elektron sayısının da arttığı, ölçüm sırasında ısıtma yoluyla serbest kalan bu elektronların yeniden birleşme merkezlerine ulaşarak daha yoğun TL emisyonu oluşturduğu gözlemlenmiştir. Bu nedenle, TL sinyalinin dozla birlikte monoton biçimde arttığı literatürde sıklıkla rapor edilmiştir (Aitken, 1985; McKeever, 1985).

Bu davranış, özellikle kuvars gibi geniş bant aralığına sahip dielektrik kristallerde belirgindir. Çünkü bu tür malzemelerde derin tuzakların varlığı, serbest kalan taşıyıcıların daha kararlı biçimde tutulmasını sağlar. Yüksek dozlarda, bazı tuzakların doluluğa ulaşmasıyla sinyal artışı doygunluğa yaklaşsa da belirli bir aralığa kadar TL şiddetinde doğrusal (lineer) veya doğrusal üstü (supralineeer) artış gözlenebilir (Chen ve McKeever, 1997). Ayrıca, derin tuzaklardan gelen TL sinyalinin baskın hâle gelmesi, düşük sıcaklıkta boşalan sığ tuzakların ön ısıtma ile boşaltılması sonucu daha belirgin hâle getirilerek doz yanıt eğrisinin daha kararlı ve tekrarlanabilir olmasını sağlar (Bulur ve Göksu, 1998).

Şekiller incelendiğinde dikkat çeken bir diğer unsur, doz arttıkça tepe maksimum sıcaklığının önemli ölçüde kayma göstermemesi ve ışıma tepesinin genel formunun korunmasıdır. Bu, tuzak derinliğinin ve enerji seviyelerinin dozdan bağımsız olarak sabit kaldığını ve dozla birlikte yeni bir tuzak veya yeniden tuzaklanma mekanizmasının devreye girmediğini düşündürmektedir. Ancak yüksek dozlarda, örneğin 776,2 Gy ve 1034,9 Gy eğrilerinde, TL sinyalinin doygunluğa yaklaştığı veya bazı sinyallerin üst üste binerek hafifçe genişlediği fark edilmekte olup bu durum, örneklere ait tuzakların bir kısmının dolarak daha fazla elektron depolayamaması sonucu ortaya çıkan doygunluk (saturasyon) etkisinin bir işareti olarak değerlendirilebilir.

Ayrıca yüksek dozlarda TL sinyallerinin ışıma tepesi eteklerinde daha belirgin hale gelmesi, yani düşük sıcaklıklarda zayıf bir omuz oluşması, bazı yüzeysel ya da sığ tuzakların da katkıda bulunmaya başladığının bir göstergesi sayılabilir. Bu detay, örneklerin tek bir baskın tuzak yapısına sahip olmadığını, daha kompleks bir enerji seviyesi dağılımına sahip olabileceğini düşündürmektedir.

0,1–1034,9 Gy aralığındaki farklı dozlarda elde edilen TL ışıma eğrilerinin altında kalan alanlar her bir doz değeri için 168 °C ile 430 °C sıcaklık aralığında hesaplanarak radyasyon dozuna karşılık TL şiddetlerinin grafiği logaritmik eksenler kullanılarak çizilmiş ve Şekil 4.10'daki grafik elde edilmiştir.



Şekil 4.10. 0,1–1034,9 Gy Doz Aralıklarında Işınlanmış Kuvars Örneklerine ait TL Işıma Eğrilerinin Altında Kalan Alanlardan Elde Edilen Doz–Yanıt Eğrisi

Şekil 4.10 kuvars mineraline uygulanan farklı radyasyon dozlarına karşılık elde edilen TL sinyal şiddetlerini log–log eksenlerde göstermektedir. Grafik üzerinde gözlenen eğilim, TL yanıtının farklı doz aralıklarında farklı davranışlar sergilediğini ortaya koymaktadır. Bu bağlamda, doz–yanıt eğrisi üç temel bölgeye ayrılabilir: doğrusal (lineer), doğrusal üstü (supralineer) ve doğrusal altı (sublineer).

Doğrusal bölge (lineer), yaklaşık olarak 1 Gy ile 100 Gy arasındaki doz aralığında gözlemlenmektedir. Bu aralıkta, uygulanan radyasyon dozuyla elde edilen TL sinyal şiddeti arasında doğrudan orantılı ve doğrusal bir ilişki bulunmaktadır. Bu durum, kuvars içindeki tuzakların henüz doygunluk (saturasyon) seviyesine ulaşmadan etkin bir şekilde dolduğu ve her birim doz artışının TL sinyalinde eşit miktarda artışa neden olduğu anlamına gelmektedir (McKeever, 1985; Aitken, 1985).

Doğrusal altı (sublineer) bölge ise yaklaşık olarak 100 Gy'in üzerindeki dozlarda başlamakta olup 360 Gy civarındaki dozlarda son bulmaktadır. Bu aralıkta, TL sinyali artmaya devam etse de sinyal artışının dozdaki artışa kıyasla daha yavaş gerçekleştiği gözlenmektedir. Bu doğrusal altı (sublineer) davranış, kuvars içindeki tuzakların yeniden dolmasının zorlaşması ve yeniden birleşme süreçlerinin verimliliğinin azalması gibi nedenlerle açıklanabilir. Ayrıca yüksek dozlarda tuzaklar arası etkileşimlerin artması ve yeni tuzakların oluşması da bu davranışı etkileyebilir (Bos ve Wallinga, 2012).

Doğrusal üstü bölge, yaklaşık 360 Gy'in üstündeki dozlarda ortaya çıkmaktadır. Bu bölgede TL sinyalinin, verilen radyasyon dozuna kıyasla beklenenden daha hızlı artış gösterdiği ve doğrusal davranıştan sapma meydana geldiği görülmektedir. Yüksek doz aralıklarında gözlenen doğrusal üstü davranış, sinyalin beklenen doğrusal artışın üzerinde yükselmesi ile karakterize edilmiştir. Bu durum, kuvars kristalinde yeni ve daha derin enerji tuzaklarının dolması, yeniden birleşme merkezlerinin etkinliğinin artması veya farklı tuzaklar arasında ortaya çıkan rekabet süreçlerinden kaynaklanabilmektedir (McKeever, 1985; Chen ve McKeever, 1997; Aitken, 1998). Dozimetri açısından bu davranış, özellikle yüksek doz bölgelerinde ölçümlerin doğruluğunu sınırlamakta ve belirsizlikleri artırmaktadır. Bu nedenle, doğrusal üstü bölgenin etkilerinin dikkate alınması, hem matematiksel düzeltme fonksiyonları hem de yapay zekâ tabanlı modelleme yöntemleriyle verilerin yeniden işlenmesi, doz hesaplamalarının güvenilirliğini artırmak açısından kritik önem taşımaktadır. Doğrusal üstü (supralineer) davranış, düşük dozlarda ise duyarlılığın az olduğu anlamına gelir ve bu da dozimetri uygulamalarında kalibrasyonun dikkatli yapılmasını gerektirir (Bailiff, 2001).

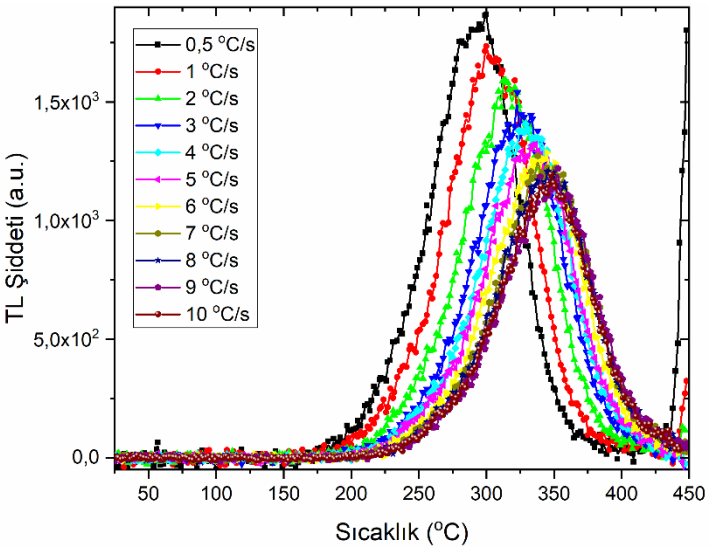
Sonuç olarak, radyasyon dozlarına karşılık elde edilen TL şiddeti yanıtları kuvarsın TL doz–yanıt karakteristiklerini ortaya koymakta ve dozimetri açısından uygun çalışma aralığının belirlenmesinde yol gösterici olmaktadır. Özellikle 1–100 Gy aralığındaki doğrusal (lineer) bölge, kuvarsın güvenilir dozimetri uygulamaları için kullanılabileceği aralığı temsil etmektedir.

4.3.4. Isıtma Hızı Deneyi ile İlgili Bulgular

Isıtma hızının TL malzemelerin ışıma eğrilerini analiz etmek için önemli bir faktör olduğu iyi bilinmektedir. TL ölçümleri sırasında TL ışıma tepeleri ısıtma hızından etkilendiğinden, ısıtma hızı değerinin değişimi TL ışıma eğrilerini kaydetmek için gereken süreye karar vermede kritik bir rol oynar. TL dozimetreler kullanılarak personel izlemesi yapıldığında binlerce dozimetrenin kısa sürede işlenmesi gerekir. Bu aynı zamanda önemlidir çünkü daha yüksek ısıtma hızı sadece ışıma tepe yüksekliğini artırmakla kalmaz, aynı zamanda ışıma eğrilerini daha hızlı kaydeder ve bu da büyük ölçekli personel izlemede TL dozimetrinin temelini oluşturur.

Kuvars mineralinden 8,0 ± 0,2 mg kütleli (90–140 μm aralığında parçacık boyutlu) toz örnekler kenarlıklı disklere silikon yağı ile yapıştırılarak örnek diskleri hazırlanmıştır. Hazırlanan örnekler stronsiyum–90 β kaynağı ile 10 Gy ışınlamaya tabi tutulmuştur. Işınlanan doğal kuvars minerali örnekleri her bir ışınlama işleminden sonra 220 ºC'a kadar ön ısıtma yapılıp bu sıcaklıkta 10 s tutulmuş ve ardından 0,5 °C/s, 1 °C/s, 2 °C/s, 3 °C/s, 4 °C/s, 5 °C/s, 6 °C/s, 7 °C/s, 8 °C/s, 9 °C/s, 10 °C/s'lik farklı ısıtma hızlarıyla 25 °C'lik oda sıcaklığından 450 ºC'ye kadar ısıtılarak TL ışıma eğrileri kaydedilmiştir. TL okumaları sonucunda elde edilen verilere bağlı olarak sıcaklığa karşılık TL ışıma şiddeti grafikleri çizilmiştir.

Lüminesans ölçüm sistemi Lexsyg smart TL/OSL okuyucuyla ışınlanıp farklı ısıtma hızlarında TL okuması yapılan örneklerden elde edilen TL ışıma eğrileri, Şekil 4.11'de sunulmuştur.



Şekil 4.11. Farklı Isıtma Hızlarında Elde Edilen TL Işıma Eğrileri

Şekil 4.11, bir örneğin TL davranışını farklı ısıtma hızlarında incelemek amacıyla elde edilmiş TL ışıma şiddeti eğrilerini göstermektedir. Yatay eksende sıcaklık (°C) yer almakta, dikey eksende ise TL şiddeti keyfi birimlerde verilmiştir. Farklı renkler ve semboller, 0,5 °C/s ile 10 °C/s arasında değişen toplam on bir farklı ısıtma hızını temsil etmektedir. Bu tür bir deney, özellikle tuzak seviyelerinin termal boşalma özelliklerini ve kinetik parametrelerini belirlemek için sıkça tercih edilir.

Ölçümlerde kullanılan ısıtma hızının artmasıyla birlikte TL tepelerinin sıcaklık ekseninde daha yüksek sıcaklık değerlerine kaydığı gözlenmiştir. Bu durum, tuzaklardan elektronların serbest kalma kinetiğiyle ilişkilidir ve Chen ve Kirsh (1981) tarafından ortaya konulan kinetik modele göre, ısıtma hızı arttıkça TL tepesi logaritmik olarak daha yüksek sıcaklıklarda gözlenir. Bu olgu, ölçümde ısısal gecikme (temperature lag) olarak adlandırılan olay ile de ilişkilidir. Isısal gecikme, örnek içindeki sıcaklığın ölçüm sistemindeki nominal sıcaklığa ulaşamamasından kaynaklanmakta ve özellikle yüksek ısıtma hızlarında TL ışıma tepesi sıcaklığının gerçekte olduğundan daha yüksek gözlenmesine neden olmaktadır (McKeever, 1985).

Isıtma hızı arttıkça TL eğrilerinde gözlenen genişleme ve tepe yüksekliğinde azalma, sadece taşıyıcıların kinetiği ile değil, aynı zamanda ısısal sönüm etkisi ile de açıklanabilir. Isısal sönüm, yüksek sıcaklıklarda lüminesans merkezlerinin verimliliğinin azalmasına neden olur; bu da TL sinyalinin tepe sıcaklık yakınlarında bastırılmasına yol açar. Özellikle hızlı ısıtmalarda sıcaklık artışı daha kısa sürede gerçekleştiğinden, lüminesans merkezlerinin bu sıcaklıklarda yeterince etkinleşmeden sönümlenmesi, toplam TL sinyalinin düşmesine neden olur (Aitken, 1985; Chen ve Pagonis, 2011).

Ayrıca, düşük ısıtma hızlarında sinyal daha belirgin, daha dar tepeler şeklinde kaydedilmekte ve sinyal alanı daha geniş olmaktadır. Bu, sinyalin daha uzun sürede ölçülmesine olanak tanımakta ve sinyal–gürültü oranının iyileştirilmesini sağlamaktadır. Öte yandan, yüksek ısıtma hızlarında

sinyalin toplam şiddeti azalmakta ve ölçüm hassasiyeti düşmektedir. Bu nedenle, TL ölçümlerinde 1–5 °C/s aralığındaki ısıtma hızları optimal kabul edilmekte ve daha güvenilir dozimetri sonuçları sağlamaktadır (Aitken, 1998).

Bu tür çoklu ısıtma hızı ölçümleri, örneklerin içinde birden fazla tuzak seviyesi olup olmadığını anlamak için de önemli ipuçları sunar. Eğer farklı ısıtma hızlarında yeni tepeler oluşsaydı ya da tepenin şekli dramatik şekilde değişseydi, bu durum numunede birden fazla tuzak ya da yeniden tuzaklanma mekanizmalarının etkili olabileceğini düşündürürdü. Ancak bu grafikte görülen eğriler, tek baskın bir TL tepesinin varlığını ve ölçümlerin oldukça tekrarlanabilir olduğunu göstermektedir. Bu da deneysel sistemin kararlı olduğunu ve örneğin ölçüm sırasında bozulmadığını ifade etmektedir.

Sonuç olarak, ısıtma hızının TL sinyali üzerinde doğrudan etkisi olduğu, bu etkinin hem ısısal gecikme hem de ısısal sönüm gibi fiziksel süreçlerle ilişkili olduğu görülmektedir. Bu parametrelerin göz önünde bulundurulması, özellikle kuvars gibi minerallerin radyasyon dozimetri çalışmalarında elde edilen verilerin güvenilirliği açısından kritik öneme sahiptir.

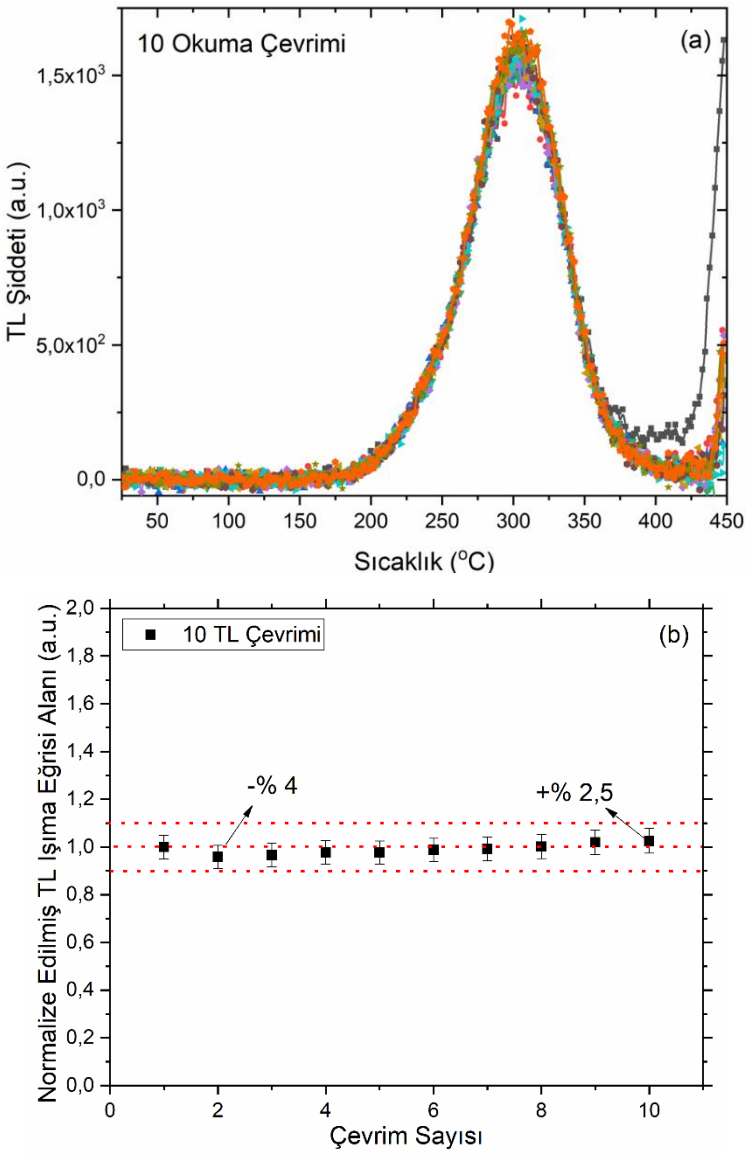
4.3.5. Yeniden Kullanılabilirlik Deneyi ile İlgili Bulgular

TL dozimetride kullanılan malzemelerin performansını değerlendirmek amacıyla gerçekleştirilen yeniden kullanılabilirlik çalışmaları, malzemenin çoklu ışınlama–okuma döngülerine verdiği yanıtın kararlılığını ortaya koymaktadır. Bu deneylerde, bir TL malzemesi sabit dozlarla tekrarlanan ışınlamalara tabi tutulmakta ve her döngüde elde edilen TL sinyali kaydedilmektedir. Eğer ölçülen TL şiddeti, art arda yapılan ışınlama–okuma işlemleri sonucunda önemli bir değişiklik göstermiyorsa, bu durum malzemenin radyasyon yanıtında stabil olduğunu ve dozimetri uygulamaları için uygun bir yeniden kullanılabilirlik özelliği taşıdığını göstermektedir. TL sinyalinin döngüler boyunca kararlı kalması, malzemenin hem ekonomik hem de pratik açıdan avantajlı bir dozimetri materyali olarak değerlendirilmesini sağlar. Bu bağlamda, yeniden kullanılabilirlik testi, özellikle kişisel ve çevresel dozimetri uygulamalarında TL malzemesinin güvenilirliğini ve uzun vadeli kullanım potansiyelini belirleyen önemli bir kriterdir.

Doğal kuvars mineralinin TL yeniden kullanılabilirlik özelliğini değerlendirmek amacıyla, 90–140 μm aralığında parçacık boyutuna sahip 8 ± 0.2 mg kütleli toz örnekler hazırlanmıştır. Bu örnekler, kenarlıklı disklere silikon yağı ile sabitlenmiş ve her biri için beş farklı örnek diski oluşturulmuştur. Hazırlanan örnekler, Lexsyg smart TL/OSL sistemi içerisinde bulunan stronsiyum–90 β kaynağı kullanılarak 10 Gy'lik sabit bir dozla ışınlanmıştır. Işınlamanın ardından, her bir ölçüm döngüsünde örneklere 220 °C'ye kadar ön ısıtma uygulanmış ve bu sıcaklıkta 10 s süreyle bekletilmiştir. Ön ısıtma işlemini takiben, TL ışıma eğrileri kaydedilmiştir.

Bu işlemler, "ışınlama–ön ısıtma–TL okuma" döngüsü şeklinde her örnek için 10 defa tekrarlanmıştır. Elde edilen TL eğrileri, 168 °C ile 430 °C sıcaklık aralığında kalan alanları bakımından analiz edilmiş; her çevrimde elde edilen alanlar, ilk çevrimde kaydedilen alan değerine

göre normalize edilerek değerlendirilmiştir. Böylece kuvars örneklerinin TL sinyal kararlılığı ve yeniden kullanılabilirliği nicel olarak analiz edilmiştir. İlgili grafikler Şekil 4.12'de sunulmuştur.



Şekil 4.12. Yeniden Kullanılabilirlik Deneyi ile Elde Edilen (a) TL Işıma Eğrileri ve (b) Ölçüm Tekrar Sayısına Karşılık Normalize Edilmiş TL Işıma Eğrisi Alanlarının Değişimleri

Şekil 4.12(a)'da, her bir döngüde uygulanan ışınlama–ön ısıtma–okuma işlemleri sonrasında elde edilen TL ışıma eğrileri görülmektedir. Şekil incelendiğinde, 10 okuma çevrimi boyunca TL eğrilerinin formunun ve maksimum ışıma şiddetinin büyük ölçüde korunduğu gözlenmektedir. Bu durum, kuvars örneklerinin çoklu okuma koşullarında yapısal ya da lüminesans yanıtında önemli bir bozulma göstermediğini işaret etmektedir.

Şekil 4.12(b)'de ise, her bir çevrimde kaydedilen TL eğrisinin 168 °C ile 430 °C sıcaklık aralığında kalan alanı hesaplanmış ve ilk döngüde elde edilen alana göre normalize edilerek TL sinyalinin çevrim sayısına göre değişimi değerlendirilmiştir. Normalize edilmiş TL alanları, %4'lük

bir düşüş ve maksimum %2,5'lik artış sınırları içerisinde kalmaktadır. Bu değerler, kuvars örneklerinin TL yanıtının yüksek derecede tekrarlanabilir olduğunu ve çoklu ışınlama–ölçüm çevrimlerinde stabil bir performans sergilediğini ortaya koymaktadır. Benzer sonuçlar daha önceki çalışmalarda da raporlanmış olup, kuvarsın yeniden kullanılabilirliğinin yüksek olduğu bildirilmektedir (Bailiff, 1980; Bøtter–Jensen ve ark., 2003; Yukihara ve McKeever, 2011).

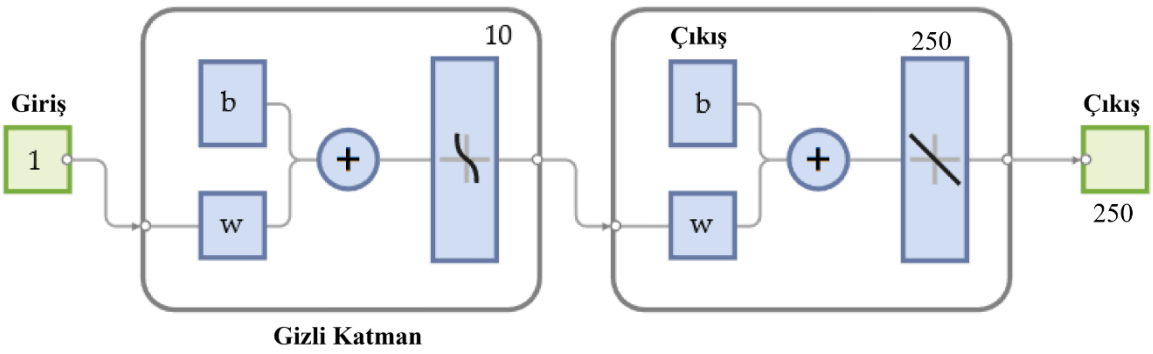
Yeniden kullanılabilirliğin bu düzeyde yüksek olması, kuvars minerallerinin kişisel dozimetre ve çevresel doz ölçümleri gibi tekrarlı ışınlamaya maruz kalan uygulamalarda güvenle kullanılabileceğini göstermektedir. Ayrıca, örneklerin her döngüde aynı ısıl işlem protokolüne (220 °C/10 s ön ısıtma) tabi tutulması, sığ tuzakların etkili şekilde boşaltılmasını ve ölçümlerde sadece kararlı tuzaklardan gelen sinyallerin değerlendirilmesini sağlamış; böylece yeniden kullanılabilirlik analizi için daha tutarlı sonuçlar elde edilmesine katkıda bulunmuştur (McKeever, 1985; Aitken, 1985).

4.4. Termolüminesans (TL) Işıma Eğrilerinin YSA ile Tahmini ile İlgili Bulgular

TL ölçümleri, malzemelerin farklı seviyelerde iyonlaştırıcı radyasyona maruz kaldıklarında gösterdikleri davranışın güvenilir bir şekilde karakterize edilebilmesi için doz–yanıt ilişkilerinin doğru biçimde modellenmesini zorunlu kılar. Kuvars minerali, iyonlaştırıcı radyasyon enerjisini depolama kapasitesi ve kararlı lüminesans özellikleri sayesinde dozimetrik uygulamalarda, jeolojik tarihlendirme yöntemlerinde ve arkeolojik çalışmalarda sıkça tercih edilen bir malzemedir.

Farklı seviyelerdeki beta radyasyon dozlarına maruz bırakılan kuvars örneklerine ait TL ışıma eğrilerini tahmin etmek amacıyla bir yapay sinir ağı (YSA) modeli oluşturulmuştur. Modelin giriş veri seti, her biri belirli bir radyasyon dozunu temsil eden 45 farklı veriden oluşmaktadır. Bu girdilere karşılık gelen çıkış verileri ise, her doz için 250 noktadan oluşan bir TL ışıma eğrisi ile tanımlanmıştır. Modelin öğrenme sürecinin daha kararlı ve verimli olabilmesi için, tüm veriler eğitimden önce detaylı bir şekilde gözden geçirilmiştir. Veri seti, doz aralığındaki dağılımı temsil edecek şekilde tabakalı örnekleme yöntemi kullanılarak %70 eğitim, %15 doğrulama ve %15 test alt kümelerine ayrılmıştır.

Şekil 4.13'te gösterilen YSA mimarisi, bir adet nöron içeren giriş katmanı (radyasyon doz değeri), doğrusal olmayan ilişkileri yakalamaya yönelik on nöronlu gizli katman ve her biri bir TL ışıma eğrisi noktasını temsil eden 250 nöronlu bir çıkış katmanından oluşacak şekilde tasarlanmıştır. Modelin tümü, veri hazırlama, eğitim ve performans değerlendirme işlemleri için MATLAB 2023b yazılımında yer alan Deep Learning Toolbox 23.2 ve Neural Net Fitting uygulaması kullanılarak geliştirilmiş ve uygulanmıştır.



Şekil 4.13. TL Işıma Eğrisi Tahminleri için Oluşturulan YSA Modeline ait Yapısal Tasarım

4.4.1. TL Işıma Eğrisi Tahmini İçin YSA Algoritmalarının Karşılaştırmalı Analizi

Farklı radyasyon dozlarında ışınlanmış kuvars örneklerinden elde edilen TL ışıma eğrilerinin tahmin edilmesine yönelik olarak geliştirilen yapay sinir ağı (YSA) modellerinin öngörü performansı, üç farklı eğitim algoritması (Levenberg–Marquardt (LM), Bayesian Regularization (BR) ve Scaled Conjugate Gradient (SCG)) kullanılarak detaylı olarak araştırılmıştır. Yeterli yakınsama ve performans kararlılığı sağlamak amacıyla, eğitim süreci maksimum 1000 eğitim döngüsü (epoch, epok) ile sınırlandırılmıştır.

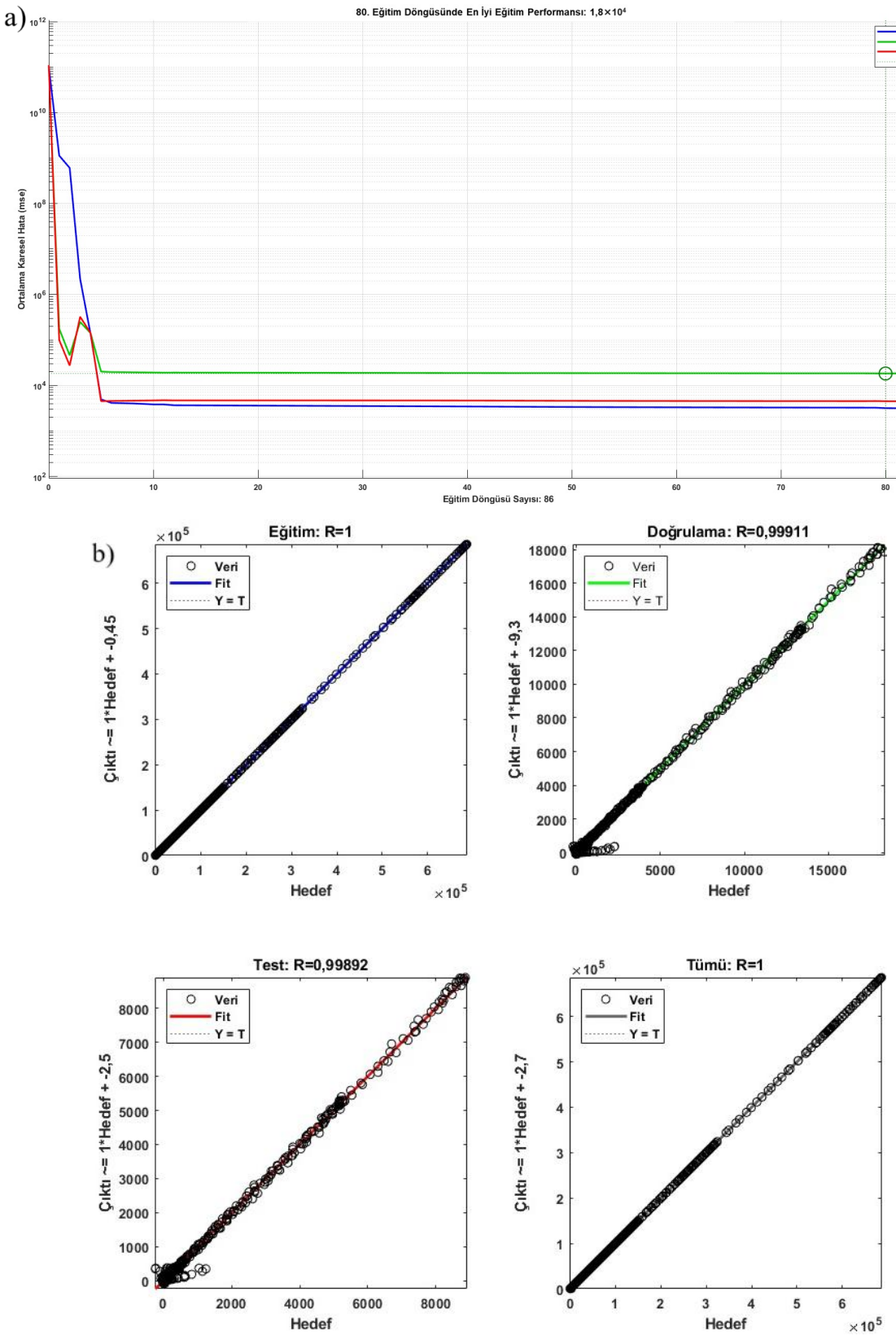
Karşılaştırmalı değerlendirme üç temel ölçüte dikkat edilerek gerçekleştirilmiştir:

(i) Eğitim–doğrulama–test ortalama karesel hata (MSE) grafiklerinin ortaya koyduğu performans eğilimleri,

(ii) Korelasyon katsayılarını (R değerleri) içeren regresyon analizi sonuçları ve

(iii) Düşük (1 Gy), orta (72,4 Gy) ve yüksek (465,7 Gy) olmak üzere üç temsili doz seviyesinde tahmin edilen TL ışıma eğrilerinin doğruluğu.

Şekil 4.14'te, LM optimizasyon algoritmasının simülasyonuna ve regresyon sonuçlarına ait performans çıktıları sunulmaktadır.



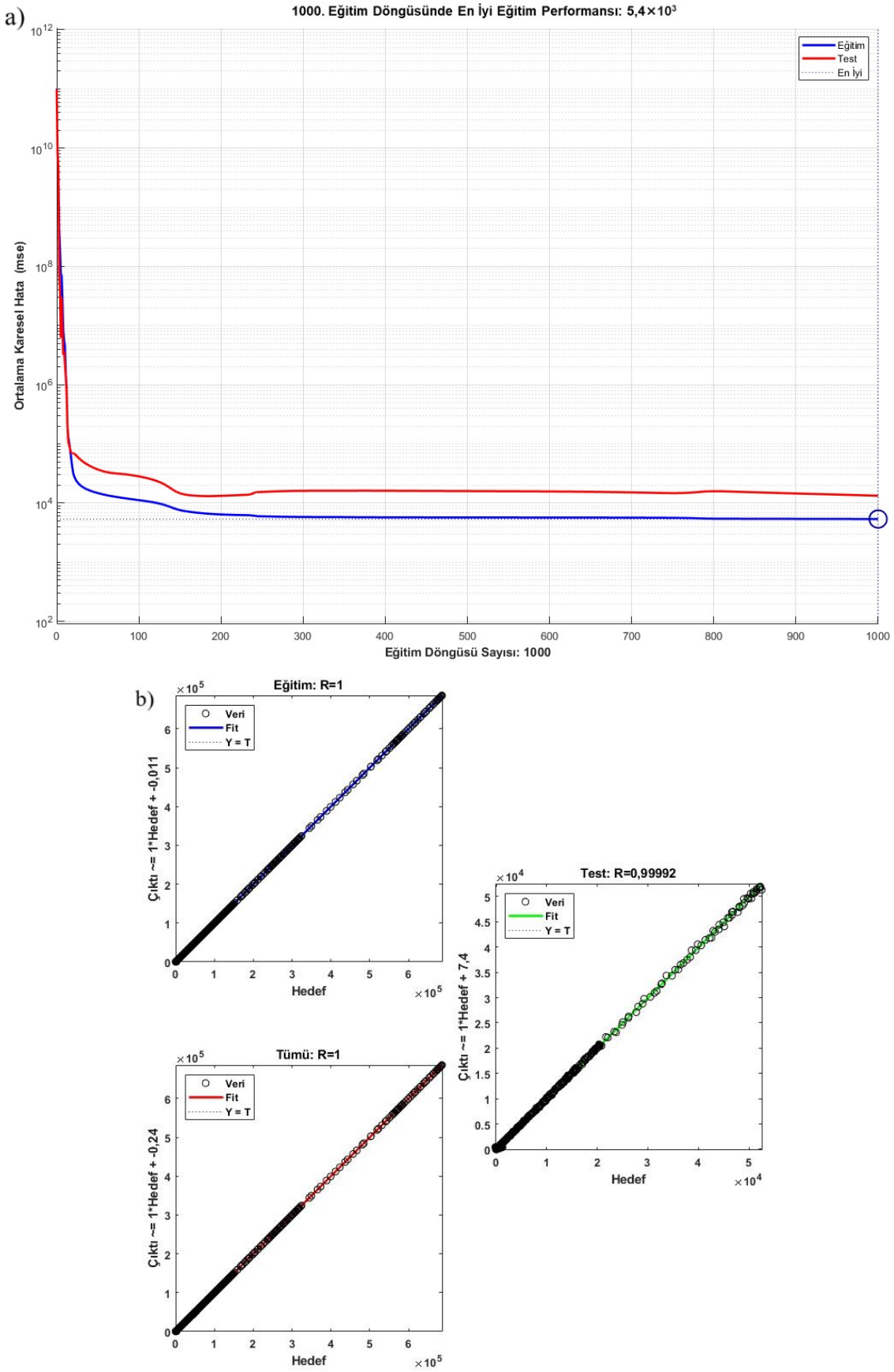
Şekil 4.14. LM Algoritması için YSA Simülasyon Sonuçları: (a) Performans Doğrulaması, (b) Hedef ve Çıktı Arasındaki Doğrusal Regresyon Analizi

LM algoritması kullanılarak elde edilen performans grafiği, yapay sinir ağı modelinin öğrenme sürecine hızlı bir biçimde adapte olduğunu açıkça ortaya koymaktadır. Ortalama karesel hata (MSE) değerinin özellikle ilk eğitim döngülerinde belirgin bir düşüş göstermesi, algoritmanın güçlü yakınsama kabiliyetini teyit etmektedir. Doğrulama alt kümesi için en düşük hata değeri $1{,}8 \times 10^{4}$ olup bu noktadan sonra eğitim, doğrulama ve test eğrilerinin birbirine paralel ve istikrarlı bir seyir izlemesi, modelin aşırı öğrenme (overfitting) sorununa karşı başarılı bir şekilde kontrol edildiğini ve erken durdurma (early stopping) mekanizmasının etkin işlediğini göstermektedir.

Doğrusal regresyon analizinden elde edilen korelasyon katsayıları, modelin hem öğrenme hem de genelleme performansını nicel olarak desteklemektedir. Eğitim için R = 1, doğrulama için R = 0,99911, test için R = 0,99892 ve tüm veriler için R = 1 değerleri hesaplanmıştır. Bu yüksek korelasyon katsayıları, literatürde de sıkça vurgulandığı üzere (Haykin, 1999), LM algoritmasının doğruluk ve güvenilirlik açısından öne çıkan özelliklerinden biridir. Regresyon eğrilerinin hedef = çıktı doğrusu (Y = T) ile neredeyse tamamen çakışması ve sapmaların ihmal edilebilir düzeyde kalması, modelin tahmin kabiliyetini daha da pekiştirmektedir.

Elde edilen bu sonuçlar, yapay sinir ağı modelinin TL bozunum eğrilerinin tahmininde oldukça başarılı ve güvenilir olduğunu göstermektedir. Ayrıca, LM algoritmasının düşük hata değerlerine hızla ulaşabilmesi, literatürde de belirtildiği gibi (Murray ve Wintle, 2000; Pagonis ve ark., 2006), özellikle karmaşık eğri uyarlamalarında etkin bir yöntem olduğunu doğrulamaktadır. Bu bağlamda geliştirilen modelin yalnızca eğitim setinde değil, daha önce görülmemiş veriler üzerinde de yüksek performans sergilemesi, genellenebilirliğinin güçlü olduğunu ortaya koymaktadır.

Şekil 4.15 BR optimizasyon algoritmasına ait simülasyon performansını ve regresyon sonuçlarını göstermektedir.

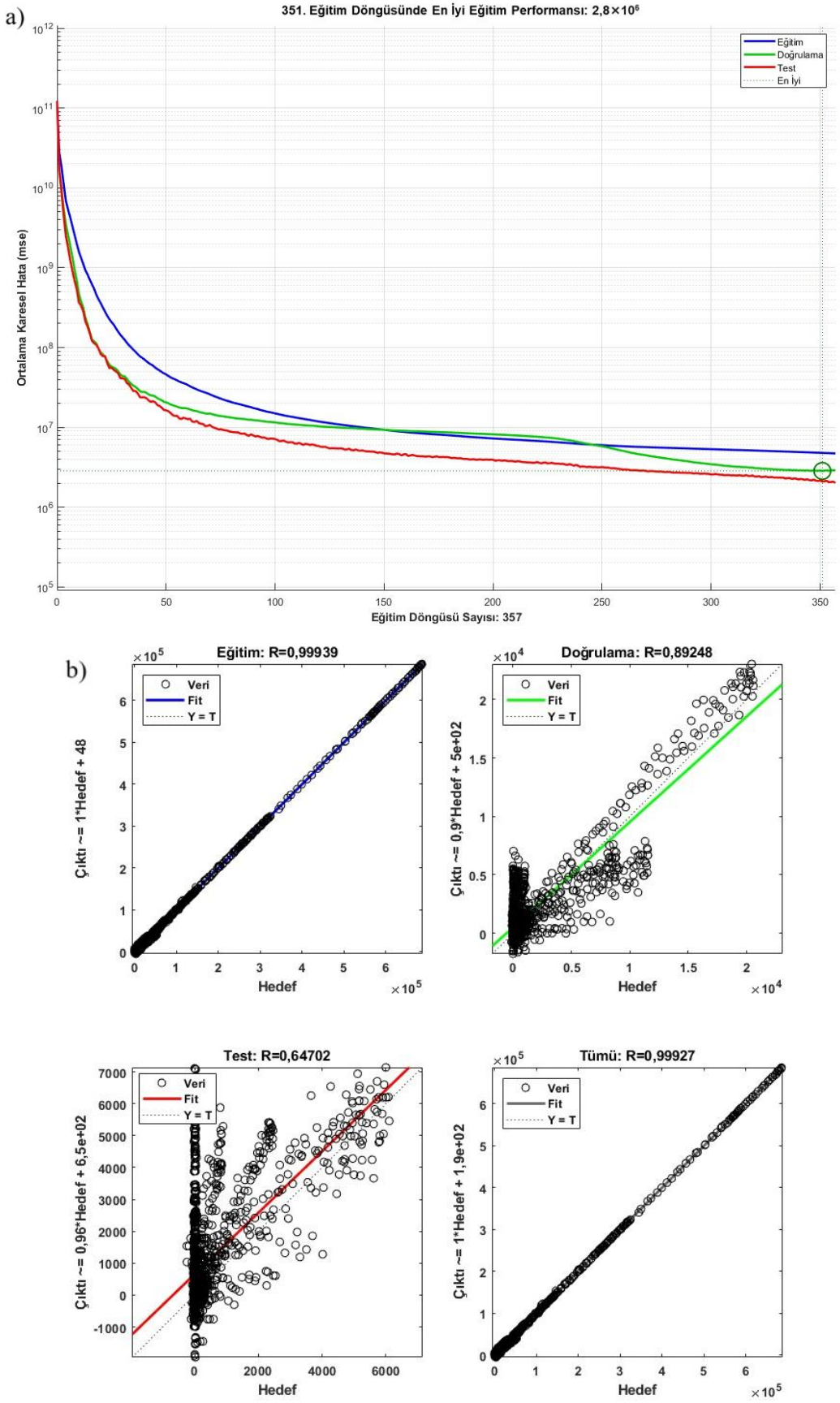


Şekil 4.15. BR Algoritması için YSA Simülasyon Sonuçları: (a) Performans Doğrulaması, (b) Hedef ve Çıktı Arasındaki Doğrusal Regresyon Analizi

BR algoritmasına ait performans grafiği, ortalama karesel hata (MSE) değerinin eğitim sürecinin başlarında hızla düştüğünü ve 1000. döngüde doğrulama alt kümesi için en iyi performansın yaklaşık $5{,}4 \times 10^{3}$ seviyesinde gerçekleştiğini göstermektedir. Eğitim ve test eğrilerinin birbirine oldukça yakın ve paralel seyretmesi, modelin aşırı öğrenme (overfitting) sorunu yaşamadığını ve öğrenmenin istikrarlı şekilde ilerlediğini göstermektedir.

Regresyon grafikleri ise modelin çıktı ile hedef verileri arasında yüksek bir doğrusal uyum sağladığını ortaya koymaktadır. Korelasyon katsayıları sırasıyla R = 1 (eğitim), R = 0,99992 (test) ve R = 1 (tüm veri seti) olarak hesaplanmıştır. Test ve tüm veri regresyonları, tahminlerin hedef değerlere neredeyse bire bir karşılık geldiğini göstermektedir. Regresyon çizgileri, hedef = çıktı doğrusu (Y = T) ile büyük ölçüde çakışmakta, bu da modelin hem öğrenme hem de genelleme yeteneğinin oldukça yüksek olduğunu kanıtlamaktadır. Bu sonuçlar, BR algoritması ile optimize edilmiş yapay sinir ağı (YSA) modelinin TL ışıma eğrilerinin modellemesinde yüksek doğrulukla çalıştığını ve kararlı bir öğrenme performansı sergilediğini ortaya koymaktadır.

Şekil 4.16 SCG optimizasyon algoritmasına ait simülasyon performansını ve regresyon sonuçlarını göstermektedir.



Şekil 4.16. SCG Algoritması için YSA Simülasyon Sonuçları: (a) Performans Doğrulaması, (b) Hedef ve Çıktı Arasındaki Doğrusal Regresyon Analizi

SCG algoritmasına ait performans grafiği, MSE değerinin eğitim sürecinin erken evrelerinde belirgin şekilde azaldığını ve 351. eğitim döngüsünde doğrulama alt kümesi için en iyi performansın $2{,}8 \times 10^{6}$ olarak gerçekleştiğini göstermektedir. Ancak, eğitim, doğrulama ve test alt kümelerine ait hata eğrilerinin birbirine yakın ancak paralel olmaktan uzak şekilde seyretmesi, modelin genel öğrenme davranışında bazı tutarsızlıklar olduğunu işaret etmektedir. Bu durum, modelin genelleme kabiliyetinin BR ve LM algoritmalarına kıyasla daha sınırlı olabileceğini göstermektedir.

Regresyon analizine ait grafikler incelendiğinde, eğitim veri setinde yüksek doğrusal uyum sağlandığı (R = 0,99939) görülmektedir. Doğrulama seti için korelasyon katsayısı R = 0,89248 olup bu değer, modelin doğrulama alt kümesinde makul seviyede genelleme sağladığını ancak kararsızlık içerdiğini göstermektedir. Test verisinde ise korelasyon katsayısı R = 0,64702 gibi oldukça düşük bir değerde kalmıştır; bu durum, modelin bilinmeyen veriler üzerindeki tahmin başarısının zayıf olduğunu ve aşırı öğrenme (overfitting) olmasa da düşük genelleme yeteneğiyle karşı karşıya kalındığını ortaya koymaktadır. Tüm veri seti üzerinden elde edilen korelasyon katsayısı R = 0,99927 olup genel görünümde oldukça iyi bir uyum izlenmektedir; ancak bu durum, doğrulama ve test alt kümelerindeki uyumsuzluğu maskeliyor olabilir.

Sonuç olarak, SCG algoritması ile optimize edilen YSA modeli, eğitim verisi üzerinde etkili bir öğrenme göstermiş olsa da doğrulama ve özellikle test verileri üzerinde beklenen seviyede bir genelleme performansı sergileyememiştir. Bu da modelin daha karmaşık veri setlerinde veya daha iyi ayarlanmış hiperparametrelerle yeniden eğitilmesi gerektiğine işaret etmektedir.

LM, BR ve SCG algoritmalarından elde edilen veriler karşılaştırmalı olarak analiz edildiğinde, her üç algoritma ile optimize edilen YSA modellerinin TL ışıma eğrilerinin tahminindeki başarı düzeylerini kapsamlı şekilde ortaya koymaktadır. LM algoritması, erken dönemde hızlı yakınsama sağlamış ve doğrulama alt kümesinde $1{,}8 \times 10^{4}$ gibi düşük bir MSE değeri elde etmiştir. Eğitim, doğrulama ve test eğrilerinin paralel seyretmesi, modelin aşırı öğrenmeden kaçındığını ve kararlı bir genel performans sergilediğini göstermiştir. Elde edilen R katsayılarının tamamına yakını 1'e çok yakın olması, LM algoritmasının düşük ve orta doz aralıklarında etkili bir modelleme sunduğunu doğrulamaktadır.

BR algoritması ise özellikle yüksek doğruluk ve genelleme başarısı ile öne çıkmıştır. MSE değeri $5{,}4 \times 10^{3}$ seviyesine kadar düşmüş, test ve eğitim alt kümelerinde elde edilen R = 1 ve R = 0,99992 değerleri, bu algoritmanın deneysel veriler üzerindeki tahmin performansının oldukça güçlü olduğunu göstermektedir. BR modelinin yüksek doz gibi karmaşık ışınım eğrilerinde dahi istikrarlı tahminler yapabilmesi, güçlü bir düzen oluşturma kapasitesine bağlanabilir. Bu bağlamda BR algoritması, gürültülü verilerle çalışılan TL deneylerinde güvenilir ve esnek bir çözüm olarak değerlendirilmektedir.

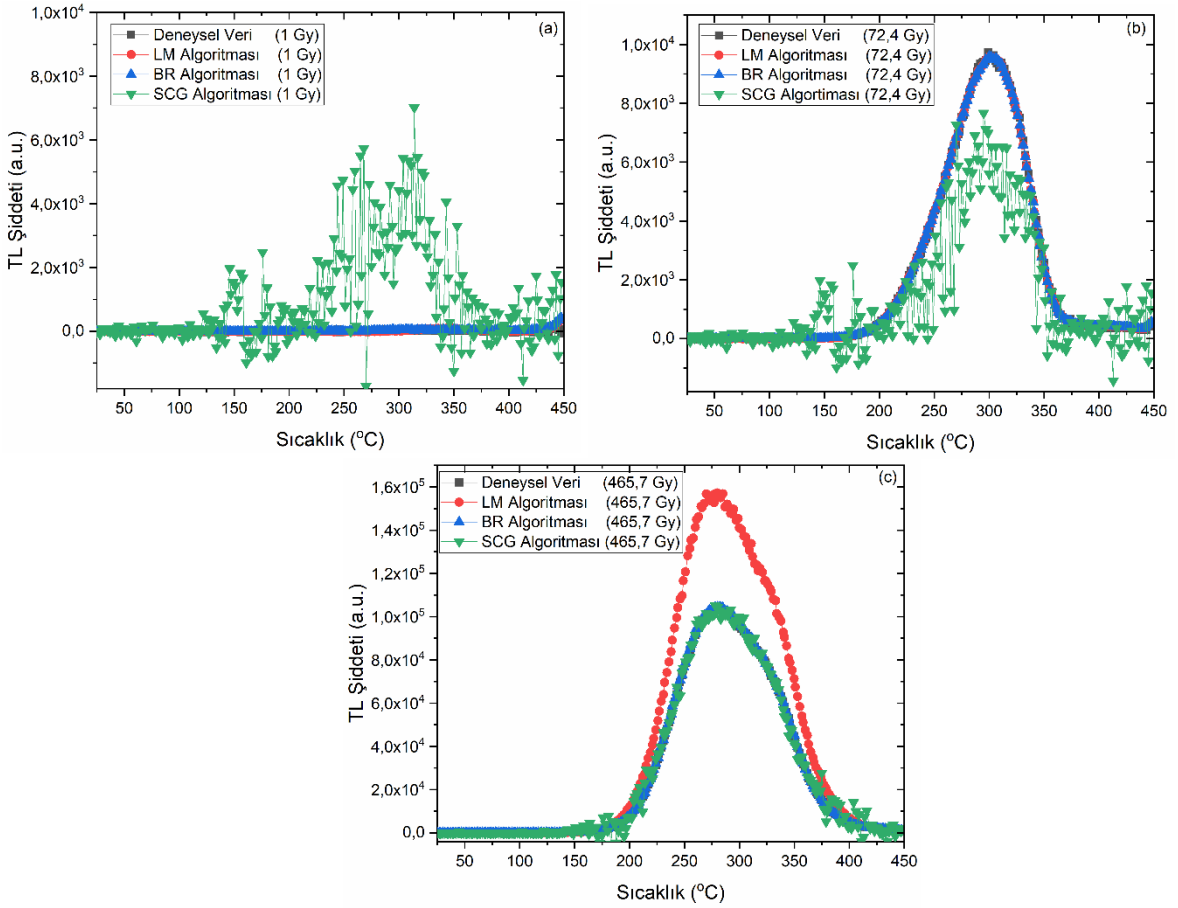
Öte yandan SCG algoritması, eğitim alt kümesinde yüksek uyum sağlasa da (R = 0,99939), doğrulama (R = 0,89248) ve özellikle test alt kümesindeki düşük korelasyon katsayısı (R = 0,64702), modelin genelleme kabiliyetinde önemli zayıflıklar bulunduğunu ortaya koymaktadır. Performans

grafiğinde test ve doğrulama eğrilerinin dalgalı seyretmesi ve birbirinden uzaklaşması, modelin karmaşık doz-aralıklarında yeterince istikrarlı sonuçlar üretemediğini desteklemektedir. SCG'nin nispeten düşük başarı düzeyi, bir veri kümesinde önceden tanımlanmış bir kayıp fonksiyonunu en aza indirme kabiliyetinin yetersizliğine ya da eğitim veri setine olan duyarlılığına bağlanabilir.

Sonuç olarak, BR algoritması genel performans açısından en başarılı modelleme yaklaşımı olarak öne çıkmakta, LM algoritması hızlı yakınsama ve düşük-orta dozlarda doğruluk açısından avantaj sunmakta, SCG ise sınırlı genelleme yeteneği nedeniyle daha dikkatli hiperparametre ayarlamaları gerektirmektedir. Bu karşılaştırmalı değerlendirme, TL ışınım eğrilerinin yapay sinir ağı tabanlı modellemesinde kullanılacak algoritma seçiminde doz aralığı ve veri gürültüsü gibi parametrelerin kritik rol oynadığını göstermektedir.

TL ölçümlerinin YSA ile LM, BR ve SCG algoritmaları kullanılarak yapılan eğitimi sırasında kullanılmayan üç farklı radyasyon dozu -düşük (1 Gy), orta (72,4 Gy) ve yüksek (465,7 Gy)- için deneysel olarak elde edilen TL ışıma eğrileri ile YSA modeli tarafından üretilen eğriler karşılaştırmalı olarak sunulmuştur.

Şekil 4.17'de, 1 Gy, 72,4 Gy ve 465,7 Gy radyasyon dozları ile ışınlanmış kuvars örneklerine ait deneysel TL ışıma eğrileri ile LM, BR ve SCG algoritmaları kullanılarak optimize edilen YSA modeli tarafından tahmin edilen eğrilerin karşılaştırıldığı grafikler yer almaktadır. Bu grafiklerde, sıcaklık x–ekseni, TL şiddeti ise y–ekseni üzerinde gösterilmiştir.



Şekil 4.17. (a) 1 Gy, (b) 72,4 Gy ve (c) 465,7 Gy Radyasyon Dozları için Deneysel, LM, BR ve SCG Algoritmaları ile Elde Edilen TL Işıma Eğrilerinin Karşılaştırması

Düşük doz (1 Gy) koşullarında, LM algoritması TL eğrisinin genel yapısını koruyarak deneysel veriyi büyük ölçüde takip etmiş, ancak TL tepe yapısının belirgin olmadığı bu düşük dozda BR ve SCG algoritmalarına kıyasla nispeten durağan bir yanıt üretmiştir. BR algoritması, bu doz seviyesinde düşük sinyalli ve gürültülü veriyi etkili şekilde düzenleyerek deneysel eğriye daha yakın tahminler sunmuştur. Ancak SCG algoritmasının tahminleri belirgin ölçüde dağınık ve gürültülüdür; özellikle TL tepe bölgesinde büyük sapmalar ve dalgalanmalar gözlenmektedir. Bu durum, düşük dozda SCG algoritmasının sinyal/gürültü ayrımında yetersiz kaldığını göstermektedir.

Orta doz (72,4 Gy) için, LM ve BR algoritmaları deneysel TL eğrisinin genel şeklini başarılı biçimde yakalamış, tepe sıcaklığı ve simetrisi açısından deneysel verilerle yüksek uyum sergilemiştir. BR algoritması, LM ile benzer bir doğruluk sağlamasına rağmen daha pürüzsüz bir eğri üretmiş, bu da sinyal stabilitesi açısından avantaj sağlamıştır. SCG algoritması ise yine gözle görülür ölçüde gürültülü bir tahmin eğrisi sunmuş ve bu doz seviyesinde dahi modelin kararlılığına dair bazı belirsizlikler oluşturmuştur. Yine de TL tepesi civarında SCG, LM ve BR'a benzer bir tepki verebilmiştir.

Yüksek doz (465,7 Gy) koşullarında, LM algoritması TL tepe şiddetini doğru tahmin etmekle birlikte, tepe genişliğinde ve simetrisinde küçük sapmalar göstermiştir. BR algoritması ise, tepe sıcaklığını ve genliğini son derece doğru şekilde modellemiş, deneysel eğriyle neredeyse tamamen çakışan bir yanıt üretmiştir. Bu durum, BR algoritmasının yüksek doz koşullarında bile aşırı öğrenmeyi baskılayarak genelleme başarımını koruyabildiğini göstermektedir. SCG algoritması bu seviyede daha tutarlı çalışmakla birlikte, BR ve LM'ye kıyasla daha basık ve düşük genlikli bir eğri sunmuş, bu da modelin yüksek dozda TL tepe yüksekliğini tam olarak öngöremediğini göstermektedir.

TL sinyallerinin tahmininde, BR algoritması üç doz aralığında da daha yumuşak, deneysel verilerle yüksek uyumlu ve kararlı eğriler üretmiştir. LM algoritması düşük ve orta dozlarda güvenilir sonuçlar verirken, yüksek dozda küçük sapmalarla da olsa kullanılabilirliğini korumuştur. SCG algoritması ise özellikle düşük dozda zayıf tahmin performansı sergilemiş, orta ve yüksek dozlarda ise görece kabul edilebilir ama daha gürültülü çıktılar üretmiştir.

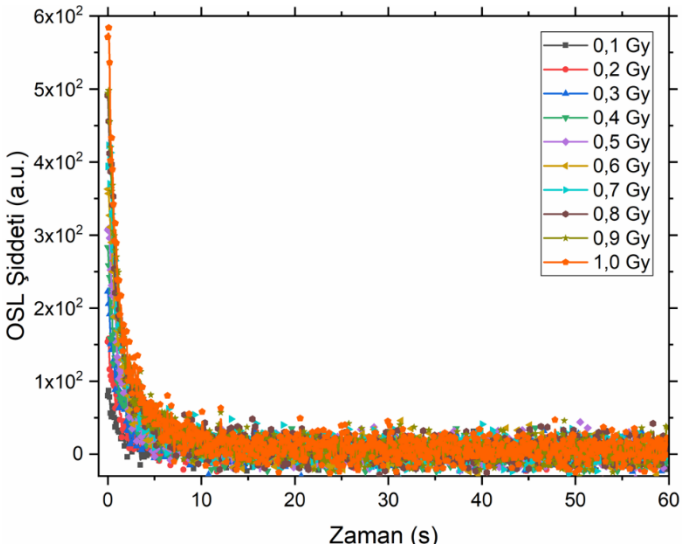
4.5. Optik Uyarmalı Lüminesans (OSL) Ölçümleri ile İlgili Bulgular

4.5.1. Doz Yanıt Deneyi ile İlgili Bulgular

Kuvars mineralinin OSL doz–yanıt davranışlarının incelenmesi amacıyla 90–140 µm parçacık boyutuna sahip ve $8 \pm 0{,}2$ mg kütleli toz örnekler hazırlanmıştır. Hazırlanan örnekler, kenarlıklı disklere silikon yağı kullanılarak yapıştırılmış ve her biri Lexsyg smart TL/OSL okuyucu sisteminde yer alan dahili stronsiyum–90 β kaynağı ile 0,1 Gy ile 1034,9 Gy arasında değişen 50 farklı dozda ışınlanmıştır.

Her ışınlama döngüsünün ardından, örnekler 220 °C'ye kadar ısıtılmış ve bu sıcaklıkta 10 s süreyle tutulmuştur. Bu ön ısıtma işlemi, düşük sıcaklıkta boşalan sığ tuzakların etkisini azaltmak ve daha kararlı tuzaklardan gelen lüminesans sinyallerini ön plana çıkarmak amacıyla her ölçüm döngüsünde standart olarak uygulanmıştır. OSL ölçümleri için ön ısıtma sonrasında, örnekler 5 °C/s ısıtma hızıyla 125 °C'ye kadar ısıtılarak bu sıcaklıkta sabitlenmiş ve 458 nm dalga boyuna sahip mavi LED'lerle (ışık şiddeti: 40 mW/cm²) 60 s süreyle uyarılmıştır. OSL bozunum eğrileri, Hoya U–340 (2,5 mm) cam filtresi ve Delta BP 365/50 EX girişim filtresi (5 mm) ile donatılmış bir BSL TL–365 nm dedeksiyon penceresi kullanılarak kaydedilmiştir. Doz–yanıt deneylerinde ışınlama–ön ısıtma–OSL ölçümü–OSL fon ölçümü döngüsü kullanılmıştır.

OSL doz–yanıt deneyleri sonucunda 0,1–1 Gy'lik doz aralığında elde edilen OSL bozunum eğrilerine ait grafikler Şekil 4.18'de görülmektedir.

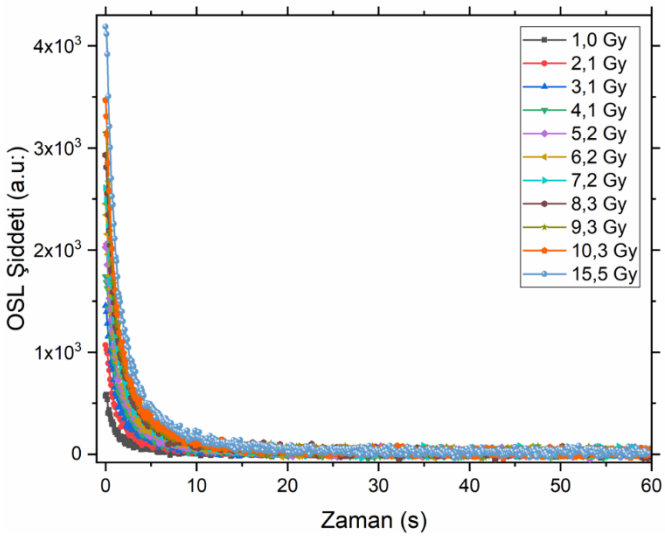


Şekil 4.18. 0,1–1 Gy Aralıklarındaki Farklı Dozlarda Elde Edilen OSL Bozunum Eğrileri

Şekil 4.18'de de görüldüğü gibi başlangıçta, uyarma süresinin ilk birkaç saniyesinde OSL şiddetinin oldukça yüksek olduğu, ardından hızlı bir şekilde düştüğü gözlenmektedir. Bu durum, kuvars kristali içindeki kolay erişilebilen sığ tuzaklarda hapsolmuş yük taşıyıcılarının hızlı bir şekilde boşalarak yeniden birleşim merkezlerine ulaşması ve lüminesans üretmesiyle açıklanabilir (Aitken, 1998; Yukihara ve McKeever, 2011). Zamanla daha kararlı tuzaklara erişildikçe sinyalin şiddeti azalmakta ve düşük seviyelerde sabitlenmektedir. Bu klasik bir "hızlı bileşen" davranışıdır ve kuvars gibi OSL–dozimetri uygulamalarında yaygın olarak gözlemlenir (Singhvi ve Krbetschek, 2014).

Grafikte ayrıca, uygulanan radyasyon dozunun artmasıyla birlikte başlangıçtaki OSL şiddetinin de belirgin şekilde arttığı gözlemlenmektedir. Örneğin, 0,1 Gy'de gözlenen OSL şiddeti, 1,0 Gy'e kadar olan dozlarla birlikte dozla orantılı olarak yükselmekte, ancak 1,0 Gy civarında sinyaller birbirine yakın seyretmektedir. Bu durum, doz–yanıt eğrisinin bu aralıkta doğrusal bir seyir izlediğini, ancak doygunluğa yaklaşma eğilimi gösterdiğini düşündürmektedir. Bu da kuvarsın düşük dozlarda hassasiyetinin yüksek olduğunu ve kişisel dozimetri gibi uygulamalarda etkili bir malzeme olduğunu göstermektedir (Bulur, 1996; McKeever, 2001).

OSL doz–yanıt deneyleri sonucunda 1–15,5 Gy'lik doz aralığında elde edilen OSL bozunum eğrilerine ait grafikler Şekil 4.19'da görülmektedir.



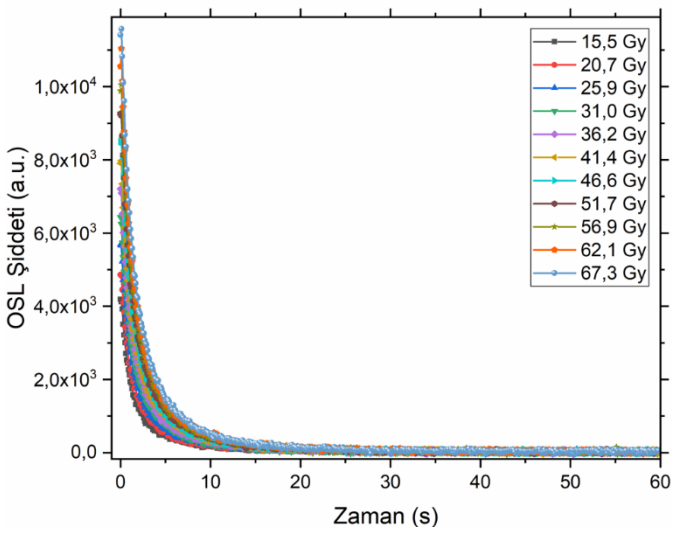
Şekil 4.19. 1–15,5 Gy Aralıklarındaki Farklı Dozlarda Elde Edilen OSL Bozunum Eğrileri

OSL bozunum eğrileri, özellikle ilk birkaç saniyede sinyal şiddetinin çok yüksek olduğu ve sonrasında hızlı bir şekilde azaldığı klasik bir "hızlı bileşen" davranışı sergilemektedir. Bu durum, kuvars kristali içinde ışınlamayla uyarılmış serbest elektronların, düşük enerjiye sahip sığ tuzaklarda kısa süreli olarak tutulup daha sonra mavi ışıkla uyarılmaları sonucu hızla serbest kalmalarından kaynaklanır (Yukihara ve McKeever, 2011). Bu serbest kalan elektronlar yeniden birleşme merkezlerine ulaşarak yoğun lüminesans üretirler; bu da sinyalin hızlı başlangıcını açıklar (Aitken, 1998).

Uygulanan doz arttıkça OSL şiddetinin de artış gösterdiği net şekilde izlenmektedir. Örneğin, 1 Gy'den 15,5 Gy'ye kadar olan dozlar arasında özellikle ilk birkaç saniyedeki sinyalin doza bağlı olarak düzenli şekilde arttığı gözlenmektedir. Bu durum, kristal yapıdaki tuzaklarda biriken taşıyıcıların sayısının dozla birlikte artmasıyla açıklanabilir. Doz arttıkça, daha fazla tuzak dolmakta ve uyarma sırasında daha fazla elektron serbest kalmaktadır. Bu artış, OSL sinyalinin dozla birlikte artmasına neden olur ve bu da doz–yanıt ilişkisini doğrular (Bulur, 1996; Singhvi ve Krbetschek, 2014).

Ancak dikkat edilirse, daha yüksek dozlarda (örneğin 10,3 Gy ve 15,5 Gy) sinyal artışı daha az belirgin hale gelmiştir. Bu durum, tuzakların bir kısmının doygunluğa ulaşmış olabileceğine işaret edebilir ve doğrusallıktan sapmanın (doğrusal altılık) başlangıcını gösterebilir (McKeever, 2001).

OSL doz–yanıt deneyleri sonucunda 15,5–67,3 Gy'lik doz aralığında elde edilen OSL bozunum eğrilerine ait grafikler Şekil 4.20'de görülmektedir.



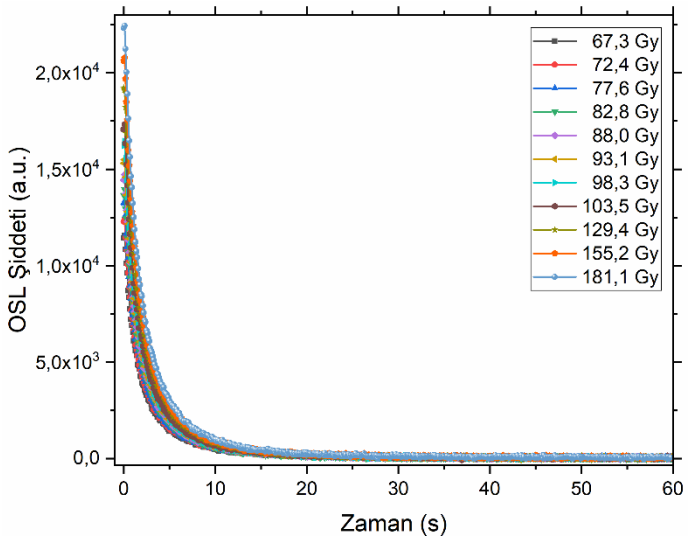
Şekil 4.20. 15,5–67,3 Gy Aralıklarındaki Farklı Dozlarda Elde Edilen OSL Bozunum Eğrileri

Elde edilen bozunum eğrileri, önceki düşük doz aralığında gözlenen hızlı sinyal düşüş eğilimini sürdürmektedir. Her bir eğride, optik uyarımın ilk saniyelerinde yüksek şiddetli sinyal gözlenmiş, bu sinyal hızla azalarak daha kararlı düşük seviyeye ulaşmıştır. Bu durum, OSL sinyalinin büyük oranda hızlı tuzaklardan kaynaklandığını göstermektedir (Yukiharave McKeever, 2011).

Doz arttıkça toplam OSL şiddetinde artış gözlenmektedir; ancak bu artışın önceki doz aralığına göre daha düşük oranda olduğu dikkati çekmektedir. 15,5 Gy ile 67,3 Gy aralığında sinyal artışı devam etmekte fakat sinyalin doza karşı duyarlılığı giderek azalmaktadır. Bu durum, tuzak doluluk oranının artması nedeniyle sinyal artışının doza göre daha yavaş gerçekleştiğini, yani sistemin doğrusal altı yanıt bölgesine geçtiğini göstermektedir (McKeever, 1985; Aitken, 1998).

Özellikle 50 Gy ve üzerindeki dozlarda eğrilerin neredeyse çakıştığı gözlemlenmektedir. Bu, kuvarsın bazı tuzaklarının doygunluğa ulaştığını ve OSL veriminin doza duyarlılığının azaldığını göstermektedir. Bu davranış, yüksek dozların belirlenmesinde doğrusal olmayan kalibrasyon eğrilerinin kullanılmasını gerektirmektedir (Bulur, 1996).

OSL doz–yanıt deneyleri sonucunda 67,3–181,1 Gy'lik doz aralığında elde edilen OSL bozunum eğrilerine ait grafikler Şekil 4.21'de görülmektedir.



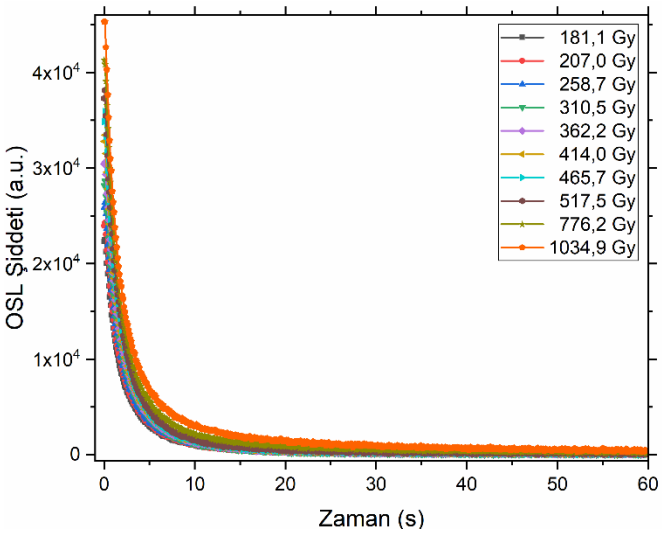
Şekil 4.21. 67,3–181,1 Gy Aralıklarındaki Farklı Dozlarda Elde Edilen OSL Bozunum Eğrileri

Elde edilen eğriler, önceki düşük ve orta doz aralıklarında gözlenen hızlı OSL sinyal sönümünün bu yüksek doz aralığında da devam ettiğini göstermektedir. İlk birkaç saniyede maksimum seviyeye ulaşan OSL sinyali, zamanla belirgin şekilde azalmaktadır. Bu karakteristik eğilim, OSL sinyalinin daha çok hızlı boşalan tuzaklardan kaynaklandığını göstermekte olup literatürde yaygın olarak gözlemlenen bir durumdur (Aitken, 1998; Yukihara ve McKeever, 2011).

67,3 Gy'den 181,1 Gy'ye kadar artan dozlarda ölçülen toplam OSL şiddeti incelendiğinde, sinyal büyüklüğünde artışın giderek yavaşladığı, eğrilerin büyük ölçüde birbirine yaklaştığı görülmektedir. Bu durum, kuvars örneklerinde kullanılan tuzakların önemli bir kısmının bu doz aralığında doygunluğa ulaştığını ve dolayısıyla yüksek dozlara karşı duyarlılığın azaldığını göstermektedir. Bu tür bir davranış, klasik doza karşı sinyal eğrilerinde doğrusal üstülükten (supralineer) doğrusal altılığa (sublineer) ve sonunda doygunluğa (saturasyon) geçişin bir işareti olarak yorumlanmaktadır (McKeever, 1985).

Sinyal eğrileri arasındaki farkların azalması, 88 Gy'den sonra OSL sisteminin doza karşı doygunluk (saturasyon) eğilimine girdiğini düşündürmektedir. Bu da özellikle yüksek doz tayininde sinyal büyüklüğünün yeterince artmaması nedeniyle kalibrasyonun doğruluğunu ve çözünürlüğünü olumsuz etkileyebilecek önemli bir faktördür (Bulur, 1996).

OSL doz–yanıt deneyleri sonucunda 181,1–1034,9 Gy'lik doz aralığında elde edilen OSL bozunum eğrilerine ait grafikler Şekil 4.22'de görülmektedir.



Şekil 4.22. 181,1–1034,9 Gy Aralıklarındaki Farklı Dozlarda Elde Edilen OSL Bozunum Eğrileri

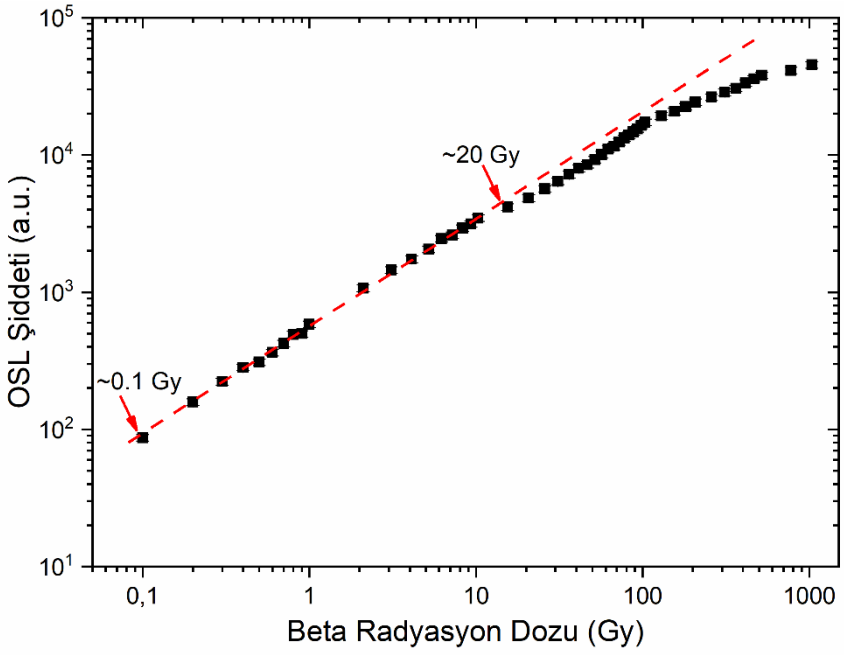
Yüksek doz aralığında (özellikle 181,1 Gy'den 1034,9 Gy'ye kadar) OSL sinyallerinin başlangıç yoğunluklarında sınırlı bir artış gözlenmekte, eğriler birbirine oldukça yakın seyretmektedir. Bu durum, kuvarsın OSL yanıtının bu doz aralığında doygunluk (saturasyon) eğilimine girdiğini ve aktif tuzakların büyük bir kısmının doldurulduğunu göstermektedir. Bu doygunluk (saturasyon), tuzakların sınırlı kapasitesi nedeniyle radyasyon dozu artsa da OSL sinyalinde anlamlı bir artış gözlenememesiyle açıklanır (Yukihara ve McKeever, 2011).

OSL eğrilerindeki bu davranış, özellikle doz yanıt eğrilerinde doygunluk (saturasyon) bölgesi olarak tanımlanan kısmı temsil eder. Bu bölgede OSL sinyali, uygulanan dozla birlikte logaritmik ya da plato şeklinde artış gösterir. Bu özellik, kuvarsın yüksek doz tayini için kullanımında sınırlayıcı bir faktördür (Bulur, 1996; Aitken, 1998). Ayrıca, bu doygunluk (saturasyon) etkisi nedeniyle yüksek dozlara karşı ölçüm hassasiyeti azalmakta ve doz doğruluğu düşebilmektedir.

Sonuç olarak doğal kuvars örneklerine ait OSL bozunum eğrileri, 0,1 Gy'den 1034,9 Gy'e kadar geniş bir radyasyon dozu aralığında değerlendirilmiş ve doz artışına bağlı olarak OSL sinyal şiddetinin belirgin şekilde arttığı gözlemlenmiştir. Özellikle düşük doz aralığında (0,1–1 Gy) doğrusal artış sergileyen OSL şiddeti, orta dozlara doğru doğrusal üstü bir eğilim göstermekte ve yaklaşık 500 Gy sonrasında doyuma yaklaşmaktadır. Bu durum, kuvarsın hem düşük hem de yüksek doz ölçümlerinde kullanılabilirliğini ortaya koymaktadır. Bozunum eğrilerinin tamamında, sinyallerin ilk birkaç saniyede hızla azaldığı ve ardından durağanlaştığı görülmekte olup bu eğilim kuvarsın hızlı tuzaklarının baskın olduğunu ve çoklu kapan tuzak sistemine sahip olduğunu göstermektedir. Eğriler arasında şekilsel bir uyumun korunması, kuvars örneklerinin doz tepkilerinin tekrarlanabilirliğini ve ölçüm güvenilirliğini göstermektedir. Tüm bu bulgular, doğal kuvarsın geniş doz aralıklarında güvenilir OSL dozimetresi olarak kullanılabileceğini ve çevresel ile kazaya bağlı radyasyon dozlarının belirlenmesinde uygun bir aday olduğunu göstermektedir (Aitken, 1998;

McKeever, 1985; Bulur ve Bøtter–Jensen, 2000; Wintle ve Murray, 2006; Kalita ve Wary, 2011; Yuksel, 2015; Soares ve ark., 2020).

0,1–1034,9 Gy aralığındaki farklı dozlarda elde edilen OSL bozunum eğrilerinin başlangıç değerlerinin her bir doz değeri için hesaplanarak radyasyon dozuna karşılık OSL şiddetlerinin grafiği logaritmik eksenler kullanılarak çizilmiş ve Şekil 4.23'teki grafik elde edilmiştir.



Şekil 4.23. Kuvarsın Beta Radyasyonu Altında Başlangıç OSL Sinyaline ait Doz–Yanıt Eğrisi

Şekil 4.23'te sunulan kuvars örneklerine ait doz–yanıt eğrileri, başlangıçtaki OSL şiddetlerinin yaklaşık 20 Gy'e kadar olan aralıkta soğurulan beta dozu ile orantılı olarak arttığını göstermektedir. Bu durum, hassas dozimetri ve tarihlendirme uygulamaları açısından uygun, belirgin bir doğrusal (lineer) bölgeye işaret etmektedir (Aitken, 1998; Sánchez ve ark., 2008; Aitken, 1997). Düşük ve orta doz aralıklarında gözlenen bu doğrusallık, kuvarsın OSL özelliklerine ilişkin önceki çalışmalarla tutarlıdır. Bu çalışmalarda, hızlı OSL bileşeninin şiddetinin, kararlı tuzaklarda istikrarlı şekilde biriken yük taşıyıcıları nedeniyle dozla doğru orantılı olarak arttığı bildirilmiştir (Banerjee ve ark., 2000).

Yaklaşık 20–520 Gy aralığındaki dozlarda, ölçüm noktalarının doğrusal eğilimden saparak eğrinin altına düşmeye başladığı gözlemlenmiştir. Bu durum, doğrusal altı bir bölgenin başlangıcına işaret etmektedir. Doğrusal altı davranış, mevcut tuzakların ve yeniden birleşme merkezlerinin kademeli olarak dolması sonucu, hapsedilen yük taşıyıcılarının daha fazla birikiminin sınırlanmasına ve buna bağlı olarak lüminesans sinyalinin artış hızının azalmasına bağlanmaktadır (Preusser ve ark., 2008; Bailey, 2001). Benzer doğrusal altı eğilimler, kuvars OSL çalışmaları kapsamında geniş ölçekte rapor edilmiştir. Bu durum, yüksek dozlarda doyma etkilerinin ve tuzaklar arası rekabetin (sığ ya da derin birden fazla tuzağın boş olması durumunda serbest elektronun hangi tuzağa

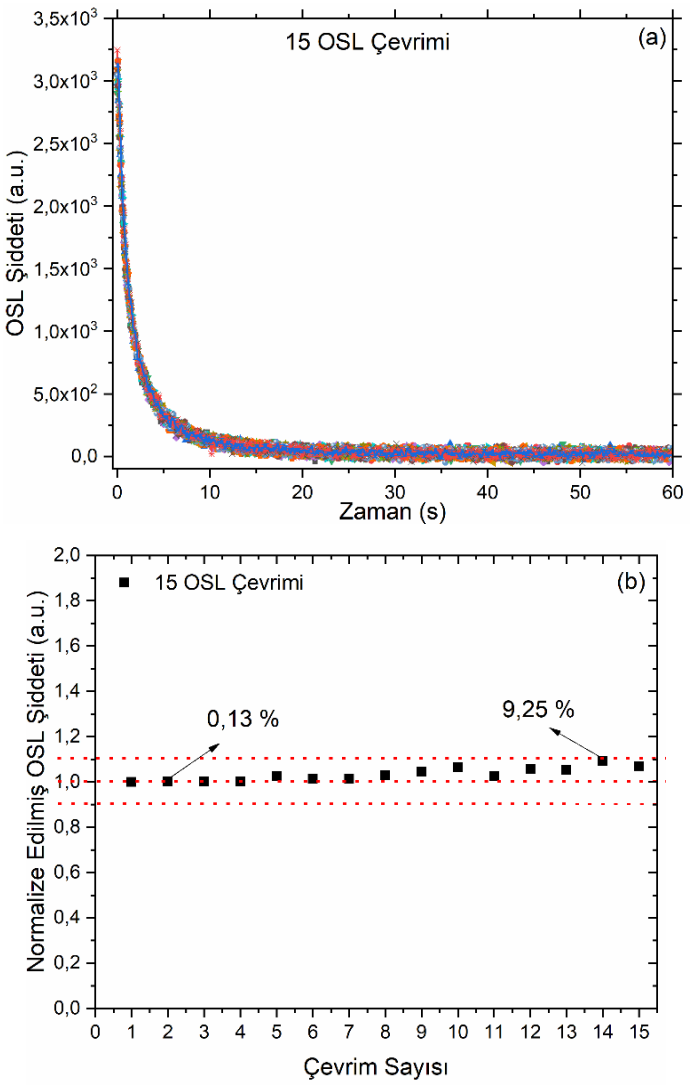
yakalanacağının belirli olmaması durumu) ortaya çıkabileceğini doğrulamaktadır (Pagonis ve ark., 2008; Murray ve Wintle, 2000).

Analiz edilen doz aralığında belirgin bir doğrusal üstü (supralineer) gözlenmemiştir. Bu da uygulanan ışınlama koşulları altında yeni ya da daha derin tuzakların etkinleşmediğini göstermektedir (Banerjee ve ark., 2000). Elde edilen bu yanıt, incelenen kuvars örneklerinin düşük ve orta doz aralığında güvenilir OSL dozimetresi ve tarihlendirme uygulamaları için uygun olduğunu göstermektedir. Bu özellik, jeoloji ve arkeoloji alanlarındaki geriye dönük dozimetri çalışmaları açısından temel bir gereklilik olarak değerlendirilmektedir (Preusser ve ark.,2008; Pagonis ve ark., 2008; Bøtter-Jensen ve ark., 2003).

Kuvars mineraline ait doz–yanıt eğrisinden de görüldüğü üzere 520 Gy'in üstündeki dozlarda da doyum davranışı gözlenmeye başlamaktadır. Bu davranış, kuvars kristalinde mevcut olan elektron tuzaklarının büyük kısmının dolmasıyla ilişkilidir. Bu doz seviyesinden sonra eklenen radyasyon, yeni serbest elektronlar oluştursa da bu elektronların hapsedilebileceği boş tuzak sayısı sınırlı olduğundan sinyal artışı giderek yavaşlamaktadır (Aitken, 1998; Murray ve Wintle, 2000). Bu durum, kuvarsın dinamik ölçüm aralığının üst sınırını göstermektedir. 520 Gy sonrasında ölçülen sinyallerdeki artışın kararsız ve düşük oranda olması, dozimetri açısından güvenilirliği azaltmaktadır. Başka bir ifadeyle, bu bölgedeki ölçümler doz tahmini için uygun değildir. Bununla birlikte, YSA gibi ileri modelleme yöntemleri veya doygunluk düzeltme fonksiyonları (örneğin ekspotansiyel yaklaşım) kullanılarak 520 Gy üzerindeki sinyal–doz ilişkisi matematiksel olarak daha doğru temsil edilebilir (Bulur, 2000).

4.5.2. Yeniden Kullanılabilirlik Deneyi ile İlgili Bulgular

Yeniden kullanılabilirlik, güvenilir bir OSL dozimetre malzemesi için temel bir gerekliliktir. Kuvars örneklerinin OSL hassasiyeti, tekrarlanan ışınlama ve okuma döngüleri sonucunda anlamlı düzeyde değişiklik gösteriyorsa, bu malzeme pratik dozimetri uygulamaları açısından uygun kabul edilemez. Bu çalışmada, kuvars örneklerinin yeniden kullanılabilirliği, kontrollü laboratuvar koşulları altında ayrıntılı şekilde değerlendirilmiştir. Hazırlanan alikotlar, sabit 10 Gy test dozu ile bir beta kaynağı kullanılarak tekrar tekrar ışınlanmış; ardından oda sıcaklığına hızlı bir şekilde soğutulmuş ve her döngüde aynı önısıtma ve optik uyarım protokolleri uygulanarak okunmuştur. Bu ışınlama–okuma döngüsü, tüm diğer deneysel parametreler sabit tutularak toplam 15 kez tekrarlanmıştır. Bu ölçümler sonucunda elde edilen OSL şiddeti ile yeniden kullanım döngü sayısı arasındaki ilişki Şekil 4.24'te sunulmuştur.



Şekil 4.24. 15 Tekrarlı Ölçüm Döngüsüne (D = 10 Gy) ait Kuvars Örneklerinin (a) OSL Bozunum Eğrileri ve (b) Yeniden Kullanılabilirliği

Şekil 4.24'te, her bir ölçüm döngüsü sırasında kaydedilen OSL bozunum eğrileri, OSL şiddetine karşı zaman grafiği olarak sunulmuştur. Elde edilen eğriler, tüm döngüler boyunca belirgin bir üstel bozunum davranışı sergilemekte olup, genel şekil ve bozunum hızında anlamlı bir değişiklik gözlenmemiştir. Bu davranış, kuvars OSL ömürlerinin tekrar eden izotermal bozunum ve doz geri kazanım deneyleri altında yüksek tekrarlanabilirlik gösterdiğini ortaya koyan birçok çalışma ile uyumludur. Buylaert ve ark (2012), izotermal bozunum ve doz geri kazanım protokolleri altında kuvars OSL ömürlerinin yüksek düzeyde tekrarlanabilir olduğunu göstermiş ve bu durumun sinyal kararlılığını desteklediğini bildirmiştir. Benzer şekilde, Preusser ve ark (2008) da farklı doz aralıklarında OSL hassasiyetindeki değişimleri incelemiş ve kuvars örneklerinin tutarlı davranış sergilediğini vurgulayarak, bu malzemelerin doz tahmini ve tekrarlı kullanım açısından uygunluğunu pekiştirmiştir. Şekil 4.24(b)'de, normalize edilmiş başlangıç OSL şiddeti ile yeniden kullanım döngü sayısı arasındaki ilişki özetlenmiştir. Grafikte, OSL sinyal şiddetinin 15 döngü boyunca dikkat çekici

bir şekilde sabit kaldığı ve başlangıç ölçümüne göre gözlenen en yüksek sapmanın yaklaşık %9,25 olduğu görülmektedir. Bu küçük varyasyon, kabul edilebilir deneysel belirsizlik sınırları içerisinde kalmakta olup, kuvars örneklerinin çoklu OSL ölçümleri için mükemmel bir yeniden kullanılabilirliğe sahip olduğunu bir kez daha doğrulamaktadır. Truscott ve ark (2000) ile McKeever ve ark (1997) tarafından yapılan önceki çalışmalar da sabit ön ısıtma ve uyarım koşulları altında doğal kuvarsın OSL hassasiyetini tekrarlı döngüler boyunca koruyabildiğini bildirmiştir.

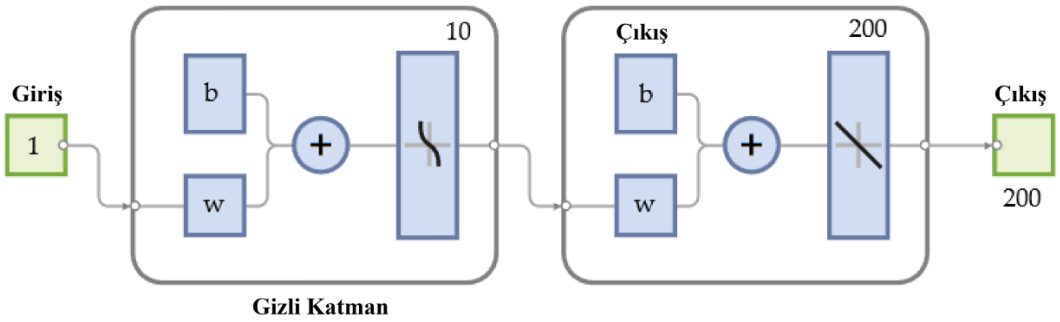
Tüm bu sonuçlar birlikte değerlendirildiğinde, test edilen kuvars örneklerinin tekrarlanan ışınlama ve okuma işlemleri altında mükemmel bir yeniden kullanılabilirlik sergilediği görülmektedir. Bu özellik, söz konusu örneklerin geriye dönük dozimetri, doz geri kazanım deneyleri ve lüminesans tarihlendirme uygulamalarında rutin kalite kontrol süreçlerinde kullanılabilirliğini desteklemektedir.

4.6. Optik Uyarmalı Lüminesans (OSL) Bozunum Eğrilerinin YSA ile Tahmini ile İlgili Bulgular

OSL ölçümleri, iyonlaştırıcı radyasyonun farklı seviyelerine maruz kalan malzemelerin davranışını karakterize edebilmek amacıyla doz–yanıt ilişkilerinin doğru şekilde modellenmesini gerektirmektedir. Kuvars, radyasyon enerjisini depolayabilme özelliği ve kararlı lüminesans özellikleri nedeniyle dozimetrik uygulamalar, jeolojik tarihlendirme ve arkeolojik araştırmalar gibi çeşitli bilimsel alanlarda yaygın olarak çalışılan bir malzemedir. Soğrulmuş radyasyon dozlarına karşılık kaydedilen OSL bozunum eğrilerinin genel davranışını anlamak ve modellemek, güvenilir doz tahminleri yapılabilmesi açısından büyük önem taşımaktadır.

Yapılan deneysel çalışmanın bu aşamasında, farklı beta radyasyon doz değerleri kullanılarak kuvars örneklerine ait OSL bozunum eğrilerinin tahmin edilmesi amacıyla bir YSA modeli geliştirilmiştir. Girdi veri seti, 45 farklı radyasyon doz değerinden oluşmaktadır ve her bir girdiye karşılık gelen çıktı veri seti, 200 veri noktasından oluşan bir OSL bozunum eğrisi ile temsil edilmiştir. Veriler eğitilmeden öncemin–maks ölçekleme yöntemi kullanılarak modelin kararlı şekilde yakınsaması sağlanmıştır. Veri seti daha sonra doz aralığının tamamını temsil edecek şekilde ve rastgele olarak eğitim (%70), doğrulama (%15) ve test (%15) alt kümelerine ayrılmıştır.

Şekil 4.25'te gösterilen YSA mimarisi, bir adet nöron içeren giriş katmanı (radyasyon doz değeri), doğrusal olmayan ilişkileri yakalamaya yönelik on nöronlu gizli katman ve her biri bir OSL bozunum eğrisi noktasını temsil eden 200 nöronlu bir çıkış katmanından oluşacak şekilde tasarlanmıştır. Modelin tümü, veri hazırlama, eğitim ve performans değerlendirme işlemleri için MATLAB 2023b yazılımında yer alan Deep Learning Toolbox 23.2 ve Neural Net Fitting uygulaması kullanılarak geliştirilmiş ve uygulanmıştır.



Şekil 4.25. OSL Bozunum Eğrisi Tahminleri için Oluşturulan YSA Modeline ait Yapısal Tasarım

4.6.1. OSL Bozunum Eğrisi Tahmini İçin YSA Algoritmalarının Karşılaştırmalı Analizi

Kuvars örneklerine ait OSL bozunum eğrilerinin tahmin edilmesine yönelik olarak geliştirilen yapay sinir ağı (YSA) modellerinin öngörü performansı, üç farklı eğitim algoritması LM, BR ve SCG kullanılarak sistematik biçimde araştırılmıştır. Yeterli yakınsama ve performans kararlılığı sağlamak amacıyla, eğitim süreci maksimum 1000 eğitim döngüsü (epok) ile sınırlandırılmıştır.

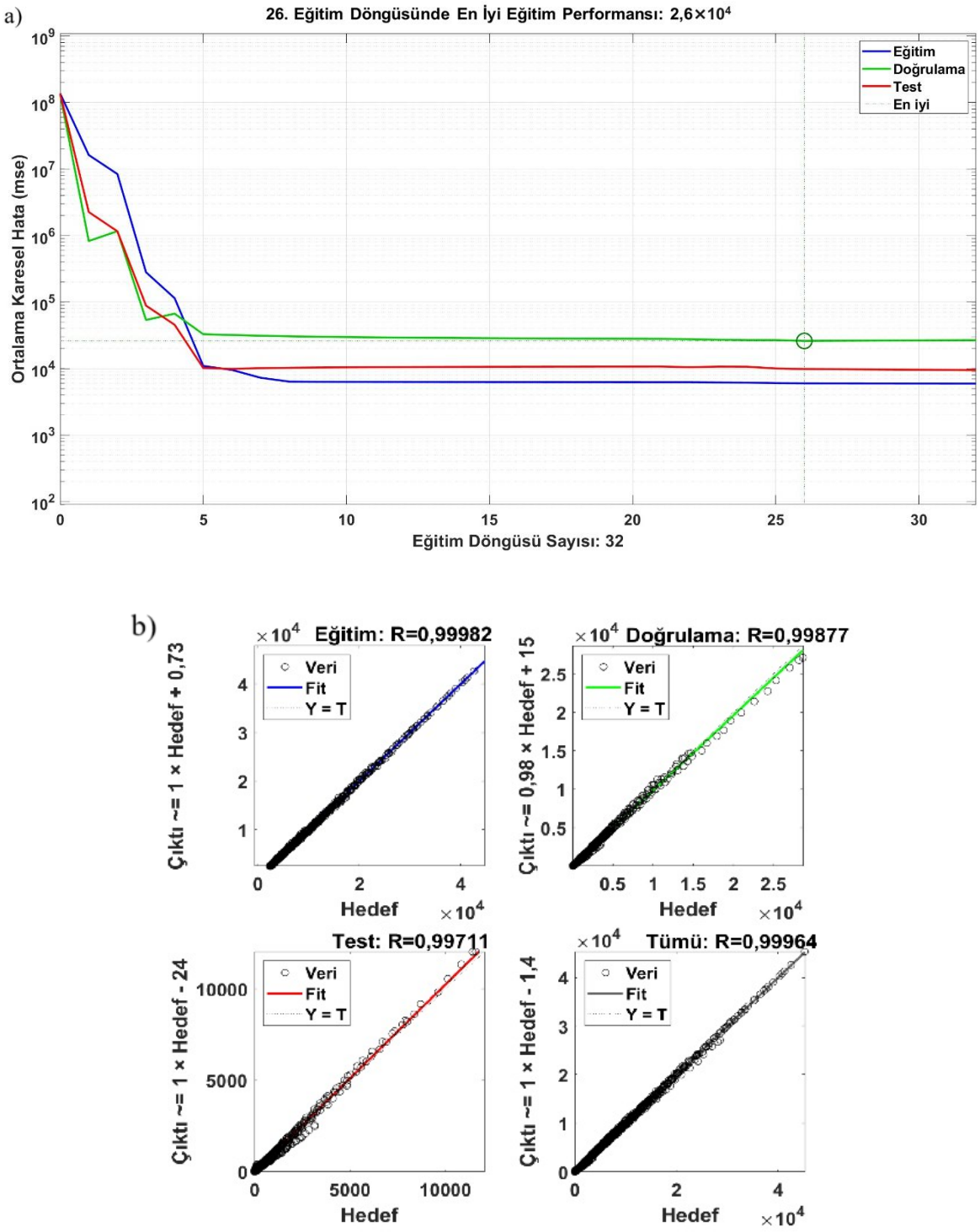
Karşılaştırmalı değerlendirme üç temel ölçüt dikkate alınarak gerçekleştirilmiştir:

(i) Eğitim–doğrulama–test ortalama karesel hata (MSE) grafiklerinin ortaya koyduğu performans eğilimleri,

(ii) Korelasyon katsayılarını (R değerleri) içeren regresyon analizi sonuçları ve

(iii) Düşük (1 Gy), orta (72,4 Gy) ve yüksek (465,7 Gy) olmak üzere üç temsili doz seviyesinde tahmin edilen OSL bozunum eğrilerinin doğruluğu.

Şekil 4.26'da LM optimizasyon algoritmasının simülasyonuna ve regresyon sonuçlarına ait performans çıktıları sunulmaktadır.

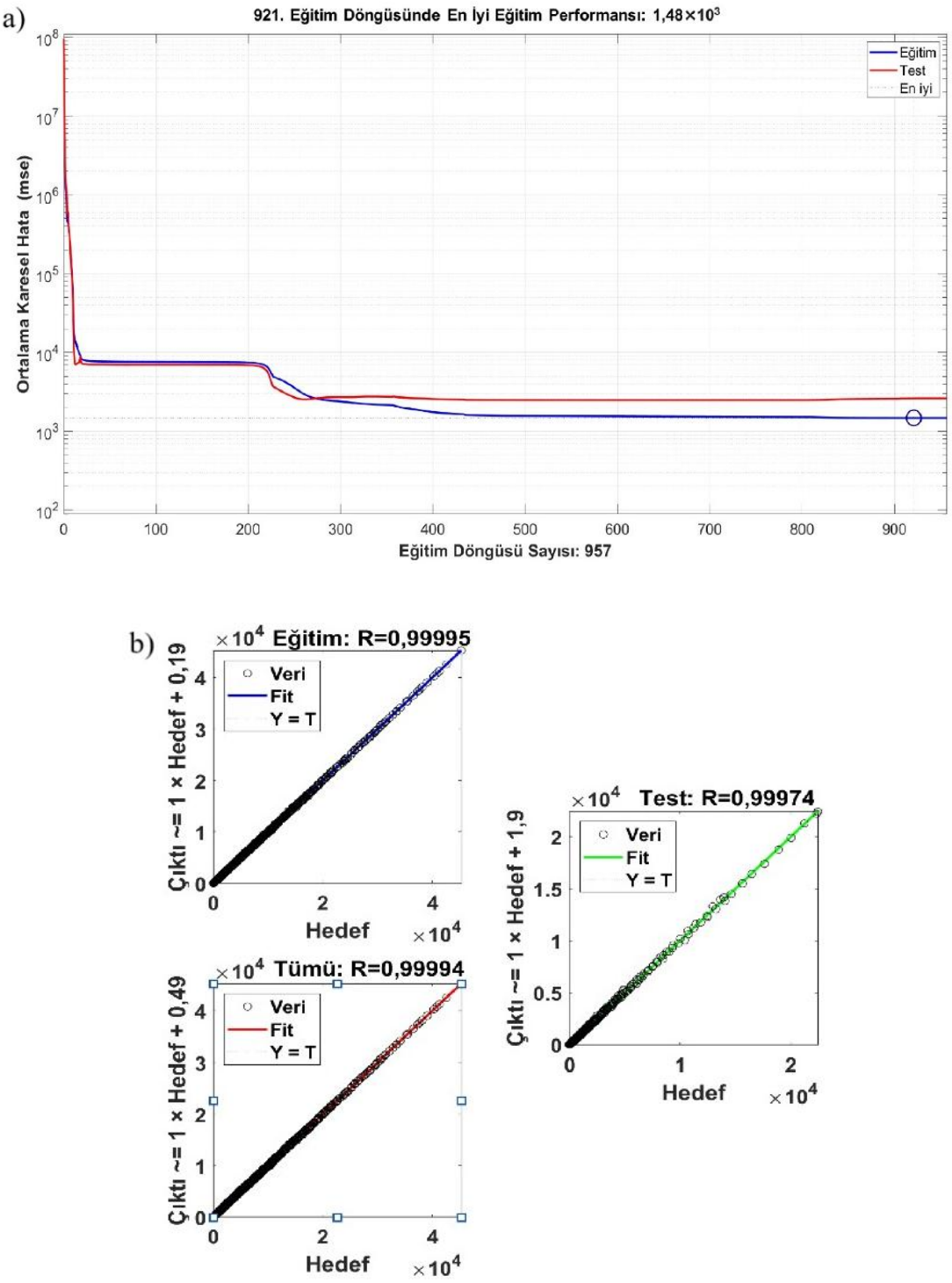


Şekil 4.26. LM Algoritması için YSA Simülasyon Sonuçları: (a) Performans Doğrulaması, (b) Hedef ve Çıktı Arasındaki Doğrusal Regresyon Analizi

LM algoritmasına ait performans grafiği, MSE değerinin ilk birkaç eğitim döngüsü (epok) içerisinde hızlı bir şekilde azaldığını ve 26. eğitim döngüsünde 26048,34 ile minimum doğrulama değerine ulaştığını göstermektedir. Bu noktadan sonra, eğitim, doğrulama ve test eğrileri neredeyse birbirine paralel şekilde seyretmektedir; bu durum, modelin aşırı öğrenme (overfitting) problemi

yaşamadığını göstermektedir. Regresyon sonuçları, yüksek tahmin doğruluğunu ortaya koymakta olup, elde edilen korelasyon katsayıları şu şekildedir: R = 0,99982 (eğitim), R = 0,99877 (doğrulama), R = 0,99711 (test) ve R = 0,99964 (genel).

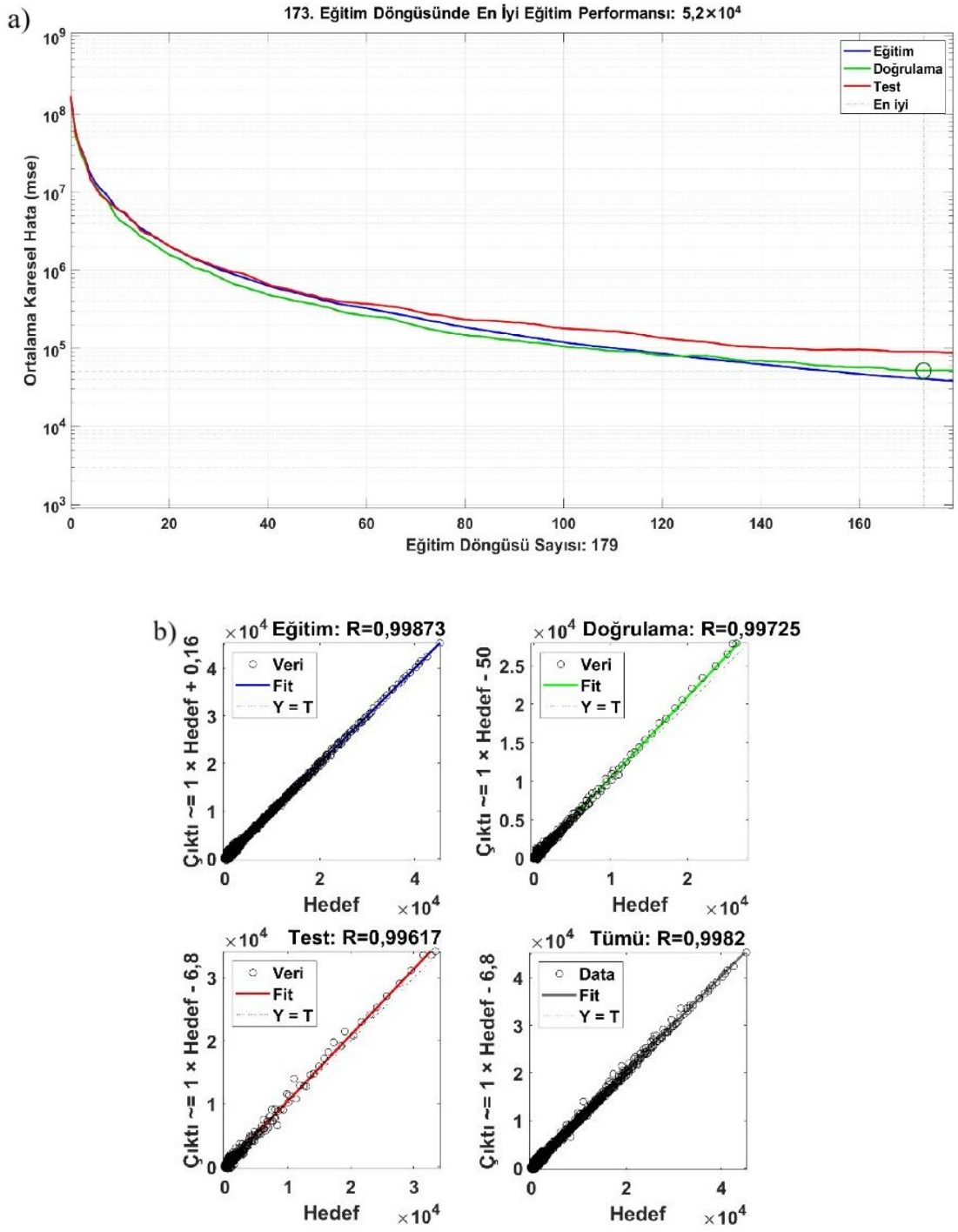
Şekil 4.27, BR optimizasyon algoritmasına ait simülasyon performansını ve regresyon sonuçlarını göstermektedir.



Şekil 4.27. BR Algoritması için YSA Simülasyon Sonuçları: (a) Performans Doğrulaması, (b) Hedef ve Çıktı Arasındaki Doğrusal Regresyon Analizi

BR algoritması, daha uzun bir eğitim süresi ile güçlü bir genelleme yeteneği sergilemiş ve 921. eğitim döngüsünde 1477,85 ile en iyi eğitim MSE değerine ulaşmıştır. Regresyon sonuçları, modelin veriyle son derece uyumlu olduğunu göstermekte olup, elde edilen korelasyon katsayıları şu şekildedir: R = 0,99995 (eğitim), R = 0,99974 (test) ve R = 0,99994 (tümü). Bu sonuçlar BR algoritmasının aşırı öğrenmeyi etkili bir şekilde en aza indirdiğini doğrulamaktadır.

Şekil 4.28, SCG optimizasyon algoritmasına ait simülasyon performansını ve regresyon sonuçlarını göstermektedir.



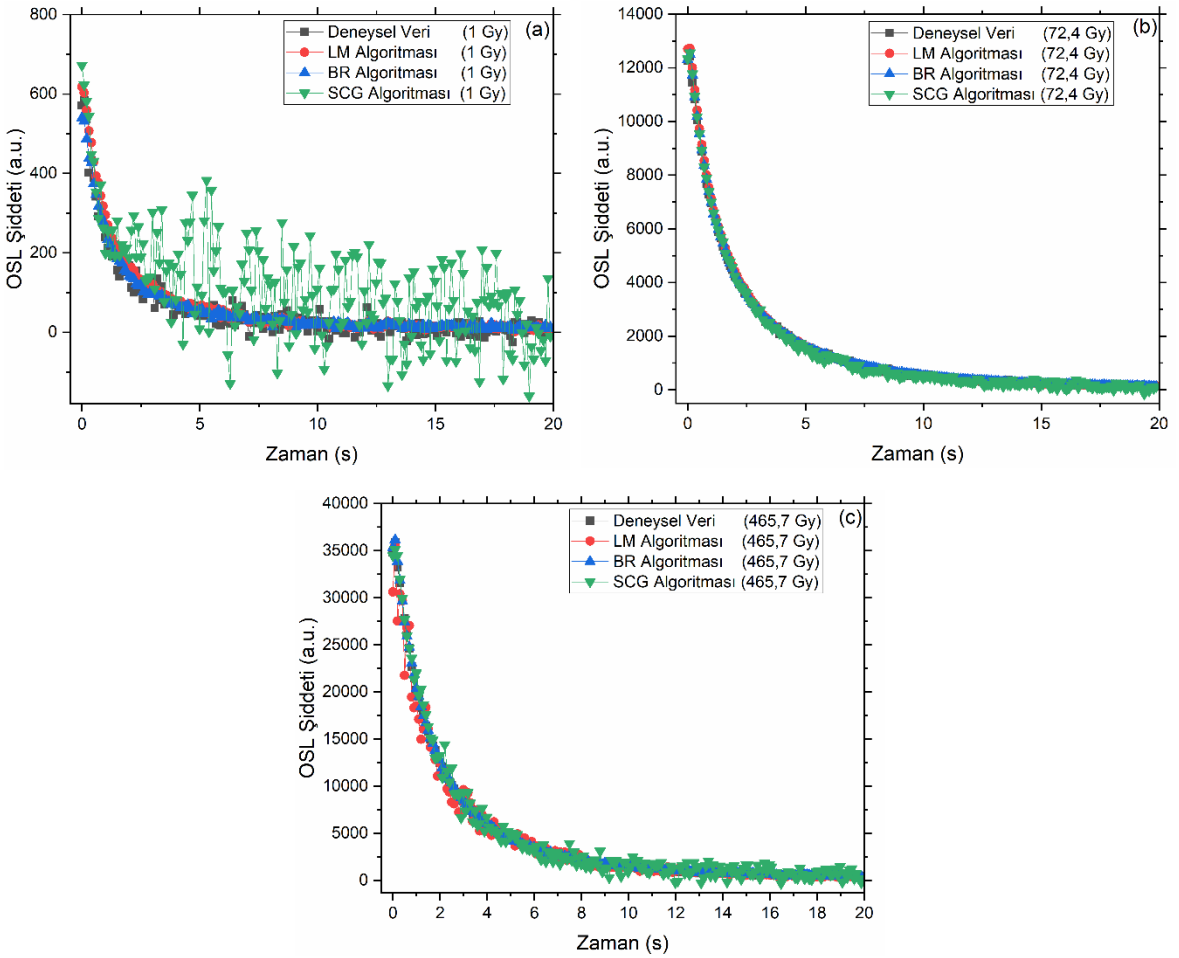
Şekil 4.28. SCG Algoritması için YSA Simülasyon Sonuçları: (a) Performans Doğrulaması, (b) Hedef ve Çıktı Arasındaki Doğrusal Regresyon Analizi

SCG algoritmasına ait performans grafiği, LM algoritmasına kıyasla daha yavaş bir yakınsama gösterdiğini ortaya koymakta olup, en iyi doğrulama MSE değeri 51979,40 ile 173. eğitim döngüsünde elde edilmiştir. Elde edilen R değerleri, LM ve BR algoritmalarına göre biraz daha düşük olmakla birlikte; R = 0,99873 (eğitim), R = 0,99725 (doğrulama), R = 0,99617 (test) ve R = 0,9982 (tümü) olarak hesaplanmıştır.

Bu bölümde, YSA ile yapılan ve LM, BR ve SCG algoritmalarının eğitimi sırasında kullanılmayan üç farklı radyasyon dozu -düşük (1 Gy), orta (72,4 Gy) ve yüksek (465,7 Gy)- için deneysel olarak elde edilen OSL bozunum eğrileri ile YSA modeli tarafından üretilen eğriler karşılaştırmalı olarak sunulmuştur.

Bu çalışmada, OSL bozunum eğrilerinin tahmini için geliştirilen YSA modellerinde üç farklı eğitim algoritması olan LM, BR ve SCG yöntemleri karşılaştırılmıştır. LM algoritması, hızlı yakınsama sağlayarak düşük ve orta doz aralıklarında yüksek doğruluk sunarken; BR algoritması, uzun sürede eğitilmesine rağmen düşük MSE ve yüksek korelasyon katsayıları ile tüm doz aralıklarında en iyi genelleme performansını göstermiştir. SCG algoritması ise daha yavaş bir öğrenme eğilimi sergilemiş ve doğrulama ile test setlerinde daha düşük korelasyon değerleriyle sınırlı bir başarı elde etmiştir. Elde edilen sonuçlar, BR algoritmasının OSL eğrilerinin modellemesinde üstün doğruluk ve kararlılık sağladığını, LM'nin hızlı ve etkili bir alternatif olduğunu, SCG'nin ise dikkatli hiperparametre optimizasyonu gerektirdiğini göstermektedir.

Şekil 4.29'da 1 Gy, 72,4 Gy ve 465,7 Gy radyasyon dozları ile ışınlanmış kuvars örneklerine ait deneysel OSL bozunum eğrileri ile LM, BR ve SCG algoritmaları kullanılarak optimize edilen YSA modeli tarafından tahmin edilen eğrilerin karşılaştırıldığı grafikler yer almaktadır. Bu grafiklerde, zaman x–ekseni, OSL şiddeti ise y–ekseni üzerinde gösterilmiştir.



Şekil 4.29. (a) 1 Gy, (b) 72,4 Gy ve (c) 465,7 Gy Radyasyon Dozları için Deneysel, LM, BR ve SCG Algoritmaları ile Elde Edilen OSL Bozunum Eğrilerinin Karşılaştırması

Düşük doz (1 Gy) karşılaştırmasında, LM algoritması tarafından tahmin edilen eğri genel olarak deneysel bozunum eğrisini takip etmekle birlikte, özellikle bozunumun geç evresinde BR algoritmasına kıyasla daha fazla sapma göstermektedir. Orta doz (72,4 Gy) için LM algoritması, deneysel bozunum eğrisi ile son derece iyi bir uyum sağlamış hem başlangıçtaki sinyal şiddetini hem de eğrinin son kısmındaki uzantıyı doğru bir şekilde modelleyebilmiştir. Ancak yüksek doz aralığında (465,7 Gy), LM tahmini, başlangıçtaki yüksek şiddetli bölgedeki davranışta küçük uyumsuzluklar sergilemiştir. Bu durum, karmaşık yüksek doz davranışlarını tahmin etmede yerel minimumlara takılmanın model doğruluğunu sınırlayabileceğini göstermektedir. Genel olarak değerlendirildiğinde, LM algoritması hızlı yakınsama ve yüksek doğruluğu sayesinde düşük ve orta doz aralıklarında en etkili yöntem olarak öne çıkmaktadır.

Düşük doz (1 Gy) için, BR algoritması tarafından tahmin edilen eğri, deneysel bozunum eğrisi ile yüksek derecede uyumludur ve özellikle eğrinin son kısmında LM ve SCG algoritmalarına kıyasla daha başarılı bir uyum sergilemektedir. Orta doz (72,4 Gy) durumunda BR algoritması, LM ile neredeyse aynı doğrulukta sonuçlar üretmiş ve deneysel veri ile mükemmele yakın bir uyum

yakalamıştır. Yüksek doz (465,7 Gy) için BR, LM ve SCG'ye kıyasla daha yumuşak ve başlangıçtaki yüksek şiddetli bölgeyle daha iyi hizalanmış tahminler sunarak üstün performans göstermiştir. Bu sonuçlar, BR algoritmasının güçlü düzenleme (regularization) yeteneği sayesinde karmaşık ve gürültülü lüminesans verilerinin modellenmesinde yüksek güvenilirlik sağladığını doğrulamaktadır.

Düşük doz (1 Gy) durumunda, SCG algoritması tarafından üretilen tahminler, özellikle eğrinin son bölümünde daha fazla saçılım ve gürültü içermekte olup deneysel bozunum davranışından belirgin şekilde sapmaktadır. Orta doz (72,4 Gy) için SCG, deneysel eğriyi yakından takip ederek LM ve BR algoritmaları ile karşılaştırılabilir düzeyde güvenilir sonuçlar üretmiştir. Yüksek doz (465,7 Gy) seviyesinde SCG, kabul edilebilir düzeyde tahminler sunmakla birlikte özellikle eğrinin dik başlangıç bölümünü modellemede BR algoritmasına göre biraz daha zayıf kalmıştır. Bu bulgular, SCG algoritmasının dengeli ancak nispeten yavaş yakınsama sağladığını ve aşırı doz seviyelerinde yerel varyasyonlara karşı daha hassas olduğunu ortaya koymaktadır.

Elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde:

Düşük doz koşullarında (1 Gy) BR algoritması, aşırı öğrenmeyi kontrol etme yeteneği ve güçlü genelleme başarımı sayesinde deneysel veriye en yakın uyumu sağlamaktadır. Orta doz aralığında (72,4 Gy), üç algoritma da yüksek doğrulukla tahminler üretmiş; LM ve BR neredeyse aynı sonuçları vermiştir. Yüksek doz aralığında (465,7 Gy) BR tahmin doğruluğunu korurken LM küçük sapmalarla kabul edilebilir performans göstermiş, SCG ise daha gürültülü fakat makul tahminler üretmiştir.

Bu nedenle, geniş ve karmaşık doz aralıklarını kapsayan ve gürültü azaltımının kritik olduğu uygulamalarda BR algoritması önerilmektedir. Düşük ve orta doz koşullarında hızlı ve doğru modelleme için LM algoritması etkili bir seçenek olarak değerlendirilebilir. SCG ise dengeli ve kararlı genelleme yeteneği ile dikkat çekmekte, ancak aşırı doz durumlarında dikkatli parametre ayarı gerektirmektedir.

Bu gözlemler literatürdeki bulgularla da tutarlıdır. Orta büyüklükteki ileri beslemeli (feed forward) ağlarda LM algoritmasının etkinliği yaygın şekilde rapor edilmiştir (Hagan ve Menhaj, 1994). BR algoritmasının güçlü genelleme ve düzenleme yeteneği, gürültülü veri setleri üzerinde doğrulanmıştır (MacKay, 1992). SCG ise geniş ölçekli problemlerde hesaplama verimliliği ve kabul edilebilir doğruluğu ile tanımlanmıştır (Møller, 1993).

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, Türkiye'nin Mersin ili, Erdemli ilçesinde bulunan bir halk plajından alınan kum örneklerinden ayrıştırılan kuvars mineralinin termolüminesans (TL) ve optik uyarmalı lüminesans (OSL) özellikleri kapsamlı şekilde araştırılmıştır. Çalışma hem deneysel ölçümler hem de yapay sinir ağı (YSA) tabanlı modelleme aşamalarını içermektedir. Elde edilen bulgular, kuvarsın dozimetri alanındaki potansiyelini ortaya koymakta ve yapay zekâ tabanlı analiz yöntemlerinin TL/OSL çalışmalarına entegrasyonu konusunda önemli katkılar sunmaktadır. Yapılan çalışma sonucunda elde edilen sonuçlar aşağıda sunulmuştur.

Mineralojik Karakterizasyon: X-Işını Kırınımı (XRD) analizleri, çalışmada kullanılan örneklerin yüksek saflıkta α–kuvars fazına sahip olduğunu göstermiştir. Taramalı elektron mikroskobu–enerji dağılım spektroskopisi (SEM–EDS) sonuçları, kristal morfolojisinin düzgün ve kenarlarının net olduğunu, elementel bileşimin ise teorik kuvars değerleri ile uyumlu olduğunu doğrulamıştır. Bu sonuçlar, kullanılan kuvarsın TL ve OSL deneyleri için uygun bir mineral olduğunu ortaya koymuştur.

TL Ölçümleri: Filtre testleri sonucunda, IRSL–TL 565 nm (Schott–BG 39–Glass–3 mm; AHF–BrightLine HC 575/25–Interference–5 mm) kombinasyonu, sinyal–gürültü oranı açısından en uygun filtre olarak belirlenmiştir. Ön ısıtma deneyleri, 220 °C'de 10 s parametresinin sığ tuzakların temizlenmesinde etkili olduğunu ortaya koymuştur. Doz–yanıt eğrileri 1–100 Gy aralığında doğrusal, 100–360 Gy aralığında doğrusal altı, 360 Gy'den sonra ise doğrusal üstü davranış sergilemiştir. Isıtma hızı değişimlerinin TL tepe konumu ve şiddeti üzerinde belirgin etkiler oluşturduğu gözlenmiştir.

OSL Ölçümleri: 0,1–1034,9 Gy aralığında elde edilen OSL bozunum eğrileri, 0,1–20 Gy aralığında doğrusal, 20–520 Gy aralığında doğrusal altı ve 520 Gy üzerindeki dozlarda ise doyum eğilimi göstermiştir. Bozunum eğrilerinde hızlı bileşenlerin baskın olduğu, ilk 0,5–1 s içerisinde sinyalin yaklaşık %65 oranında azaldığı belirlenmiştir. Yeniden kullanılabilirlik testlerinde, 15 tekrarlı ışınlama–okuma döngüsü sonunda OSL şiddetinde anlamlı bir değişim gözlenmemiş, ortalama değişim oranı %1,8 olarak hesaplanmıştır.

YSA Modelleme Bulguları: Deneysel TL ve OSL bozunum eğrilerinin tahmini amacıyla MATLAB ortamında Neural Net Fitting (NNF) araç çubuğukullanılarak üç farklı optimizasyon algoritması ile modelleme yapılmıştır: Levenberg–Marquardt (LM), Bayesian Regularization (BR) ve Scaled Conjugate Gradient (SCG).

- LM algoritması, düşük ve orta doz bölgelerinde en düşük hata (MSE) ve en yüksek korelasyon katsayısı değerleri ile öne çıkmıştır.
- BR algoritması, özellikle yüksek doz bölgelerinde aşırı öğrenmeyi önleyerek daha dengeli tahminler sağlamış ve genelleme yeteneği açısından avantaj sunmuştur.
- SCG algoritması ise düşük bellek kullanımı ve daha kısa eğitim süresi ile dikkat çekmiş, ancak bazı doz aralıklarında LM ve BR'ye kıyasla daha düşük uyum göstermiştir.

Üç algoritmanın karşılaştırılması, farklı doz aralıklarında en uygun modelin seçiminde algoritma özelliklerinin belirleyici olduğunu ortaya koymuştur.

Öneriler

Bu çalışmada belirlenen filtre seçimi, ön ısıtma ve doz–yanıt parametreleri, kuvars temelli TL/OSL dozimetri çalışmalarında doğrudan uygulanabilir. YSA modellemelerinin farklı mineral türlerine ve farklı çevresel koşullara uygulanarak genellenebilirliği test edilmelidir. Yüksek doz bölgelerindeki doyum etkisini azaltacak yeni matematiksel düzeltme fonksiyonları geliştirilmeli, ayrıca derin öğrenme tabanlı yaklaşımlar (CNN, LSTM vb.) ile bozunum eğrisi tahminlerinin doğruluğu artırılmalıdır.

KAYNAKLAR

Aitken, M. J. , (1985) . Thermoluminescence Dating, Academic Press, London.

Aitken, M.J. Luminescence Dating. In Chronometric Dating in Archaeology; Taylor, R.E., Aitken, M.J., Eds.; Springer US: Boston, MA, 1997; pp. 183–216 ISBN 978-1-4757-9694-0.

Aitken, M. J. (1998). An Introduction to Optical Dating: The Dating of Quaternary Sediments by the Use of Photon-Stimulated Luminescence. Oxford University Press.

Akselrod, M. S. (2011). Fundamentals of materials, techniques, and instrumentation for OSL and FNTD dosimetry. AIP Conference Proceedings, 1345(1), 274–302. https://doi.org/10.1063/1.3576173.

Bailiff, I. K. (1980). "Reproducibility of thermoluminescence response of quartz." Radiation Measurements, 3(2), 95–101.

Bailiff, I. K. (2001). Thermoluminescence dosimetry (TLD) and its applications in retrospective dosimetry. Radiation Measurements, 33(2), 259–266.

Bailey, R.M. Towards a General Kinetic Model for Optically and Thermally Stimulated Luminescence of Quartz. Radiat Meas 2001, 33, 17–45, doi:https://doi.org/10.1016/S1350-4487(00)00100-1.

Banerjee, D.; Bøtter-Jensen, L.; Murray, A.S. Retrospective Dosimetry: Estimation of the Dose to Quartz Using the Single-Aliquot Regenerative-Dose Protocol. Applied Radiation and Isotopes 2000, *52*, 831–844, doi:https://doi.org/10.1016/S0969-8043(99)00247-X.

Bear, M. F., Connors, B. W., ve Paradiso, M. A. (2016). Neuroscience: Exploring the Brain (4th ed.). Wolters Kluwer.

Bishop, C. M. (2006). Pattern Recognition and Machine Learning. Springer.

Bos, A. J. J. (2007). High sensitivity thermoluminescence dosimetry. Radiation Measurements, 41(S1), S45–S56. https://doi.org/10.1016/j.radmeas.2007.01.030

Bos, A. J. J., ve Wallinga, J. (2009). Optically stimulated luminescence signals from quartz: A review. Radiation Measurements, 44(5–6), 558–565.

Bos, A. J. J., ve Wallinga, J. (2012). Optically stimulated luminescence dating of young quartz samples using the SAR protocol. Radiation Measurements, 47(9), 732–738.

Bos, A. J. J., Wallinga, J., Murray, A. S., ve Schokker, J. (2019). Towards robust luminescence dating of young sediments: Investigating sensitivity changes and anomalous fading in quartz. Radiation Measurements, 120, 151–157. https://doi.org/10.1016/j.radmeas.2018.02.001

Boyle, R., (1964). Register of the Roy. Soc. 1663, 213.

Bøtter-Jensen, L., McKeever, S. W. S., ve Wintle, A. G. (2003). Optically stimulated luminescence dosimetry. Elsevier.

Botterjensen, L., (1997). Luminescence Techniques-Instrumentation and Methods, Radiation Measurements. Vol 27, Iss 5-6, 479-768.

Bulur, E. (1996). An alternative technique for optically stimulated luminescence (OSL) experiment. Radiation Measurements, 26(5), 701–709.

Bulur, E., Bøtter-Jensen, L. ve Murray, A.S., 2000. Optically stimulated luminescence from quartz measured using the linear modulation technique. Radiation Measurements, PII: S1350-4487(00)00115-3.

Bulur, E. (2000). A simple OSL experiment for study of deep traps in quartz. Radiation Measurements, 32(3), 141–145.

Bulur, E., ve Göksu, H. Y. (1998). Investigations on the linearly modulated optically stimulated luminescence signals of Al2O3:C. Radiation Measurements, 29(5), 639–650.

Buylaert, J.-P., Jain, M., Murray, A. S., Thomsen, K. J., Thiel, C., ve Sohbati, R. (2012). A robust feldspar luminescence dating method for Middle and Late Pleistocene sediments. Boreas, 41(3), 435–451. https://doi.org/10.1111/j.1502-3885.2012.00248.x

CAMEO, Museum of Fine Arts Boston. (2022). *Quartz*. In CAMEO.

Chawla, S., Gundu Rao, T.K. ve Singhvi, A.K., 1998. Quartz thermoluminescence: dose and dose-rate effects and their implications. Radiation Measurements, PII: S135044879700200X.

ChemEurope. (2025). Quartz. In ChemEurope Encyclopedia. https://www.chemeurope.com/en/encyclopedia/Quartz.html Mindat.org. (n.d.). Quartz — Mineral information, data and localities. (Erişim tarihi: Ağustos 2025)

Chen, R. (1969). On the calculation of activation energies and frequency factors from glow curves. Journal of Applied Physics, 40(2), 570–585.

Chen, R., ve Kirsh, Y. (1981). Analysis of thermoluminescence glow curves. Pergamon Press.

Chen, R., ve McKeever, S. W. S. (1997). Theory of Thermoluminescence and Related Phenomena. World Scientific.

Chen, R., vePagonis, V. (2011). Thermally and Optically Stimulated Luminescence: A Simulation Approach. Wiley.

Chen, Y., Sun, K., Wang, X., Li, X., ve Zhang, L. (2018). Recent progress on thermoluminescence materials for radiation dosimetry. Materials Research Express, 5(9), 092002. https://doi.org/10.1088/2053-1591/aad7a3

Daniels ve ark., 1953. Nature 171, 1153 (1953).

Deer, W. A., Howie, R. A., veve Zussman, J. (1992). An Introduction to the Rock-Forming Minerals. Longman.Elhaddad, E., et al. (2021). Thermoluminescence behavior and kinetic analysis of quartz under gamma irradiation. Radiation Physics and Chemistry, 182, 109342.

Erkmen, Z.E., (2019). Modern Fizik Takviyeli Malzeme Karakterizasyonu ve Temel İlkeleri (2. Basım), Nobel Yayınevi, Ankara.

Fleming, S. J., (1966). "Study of Thermoluminescence of Crystalline Extracts from Pottery.'' Archaeometry, 9, 170–173.

Furetta, C., ve Weng, P. (2018). Spectral properties of quartz TL in the intermediate glow region. Journal of Luminescence, 202, 50–58.

Goodfellow, I., Bengio, Y., ve Courville, A. (2016). Deep Learning. MIT Press.

Haykin, S. (1999). Neural Networks: A Comprehensive Foundation (2nd ed.). Prentice Hall.

Hagan, M.T.; Menhaj, M.B. Training Feedforward Networks with the Marquardt Algorithm. Trans. Neur. Netw. 1994, 5, 989–993, doi:10.1109/72.329697.

Hamzaçebi, C., (2021), Matlab Uygulamalı Yapay Sinir Ağları, Seçkin Yayıncılık, ISBN: 9789750270550, Ağustos 2021, Ankara.

Horowitz, Y. S. (2015). Thermoluminescence dosimetry. In Comprehensive Biomedical Physics (Vol. 4, pp. 273–293). Elsevier. https://doi.org/10.1016/B978-0-444-53632-7.00085-1

ICRP (2007). The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103.

İ. Işık, E. Işık, ve H. Toktamış, "Dose and fading time estimation of glass ceramic by using artificial neural network method", *DÜMF MD*, c. 12, sy. 1, ss. 47–52, (2021a), doi: 10.24012/dumf.703171.

Işık, E., Işık, I., ve Toktamiş, H. (2021b). Analysis and Estimation of Fading Time from Thermoluminescence Glow Curve by Using Artificial Neural Network. Radiation Effects and Defects in Solids, 176 (765–776). https://doi.org/10.1080/10420150.2021.1954000

Jain, A. K., Murty, M. N., ve Flynn, P. J. (1999). Data clustering: A review. ACM Computing Surveys, 31(3), 264–323. https://doi.org/10.1145/331499.331504

Kandel, E. R., Schwartz, J. H., ve Jessell, T. M. (2013). Principles of Neural Science (5th ed.). McGraw-Hill.

Kalita, J. M., ve Wary, G. (2011). Reusability and linearity properties of natural quartz for dosimetric purposes. Journal of Luminescence, 131(1), 145–150.

Kitis, G., ve Manam, J. (1998). A new analytical equation for the general order thermoluminescence glow curves. Physica Status Solidi (a), 168(1), 167–175.yokKwon, S.J., Artificial Neural Networks, Nova Science Publishers, 2011.

Köksal, F., Köseoğlu, R., (2010). Spektroskopi ve Lazerlere Giriş, Nobel Yayınevi, Ankara.

Kumar, A. ve Annalakshmi, O., 2023. Thermoluminescence properties of quartz: a natural dosimeter from beach sand. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, https://doi.org/10.1007/s10967-023-09107-9

Leal-Ayala, D. R., ve ark. (2012). Application of artificial neural networks to thermoluminescence glow curve analysis. Radiation Measurements, 47(9), 709–714.

LeCun, Y., Bengio, Y., ve Hinton, G. (2015). Deep learning. Nature, 521(7553), 436–444. https://doi.org/10.1038/nature14539

Li, P., ve Zhang, Z. F. (2017). Standing wave effect and fractal structure in dislocation evolution. Scientific Reports, 7, 46613.

Lomax, J., Kreutzer, S. veFuchs, M. (2014). Performance tests using the Lexsyg luminescence reader. *Geochronometria*, 41(4), 327–333.

MacKay, D.J.C. A Practical Bayesian Framework for Backpropagation Networks. Neural Comput 1992, 4, 448–472, doi:10.1162/neco.1992.4.3.448.

MacKay, D. J. C. (1992). Bayesian interpolation. Neural Computation, 4(3), 415–447. https://doi.org/10.1162/neco.1992.4.3.415

MTA (Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü), *Kuvars*, https://www.mta.gov.tr/v3.0/bilgi-merkezi/kuvars (Erişim 27 Ocak 2023).

Maraba, B. (2017). Investigation of OSL properties of some dosimetric materials using linear modulation technique. Radiation Physics and Chemistry, 130, 138–144.

Maurer, R., Fraeman, M., Martin, M., ve Roth, D. R. (2008). Schematic of atomic displacement damage in crystalline solid [Figure 3]. In Harsh Environments: Space Radiation Environment, Effects, and Mitigation (Richard Maurer veve Martin Fraeman, eds.). ResearchGate.

McCulloch, W. S., ve Pitts, W. (1943). A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity. The Bulletin of Mathematical Biophysics, 5(4), 115–133. https://doi.org/10.1007/BF02478259

McKeever, S.W.S., (1985). Thermoluminescence of Solids. Cambridge University Press.

McKeever, S. W. S. (2001). Optically stimulated luminescence dosimetry. Nuclear Technology Publishing.

McKeever, S.W.S., 2001. Optically stimulated luminescence dosimetry. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B, 184(1-2), 29–54.

Mitchell, T. M. (1997). Machine Learning. McGraw-Hill.

Møller, M.F. A Scaled Conjugate Gradient Algorithm for Fast Supervised Learning. Neural Networks 1993, 6, 525–533, doi:https://doi.org/10.1016/S0893-6080(05)80056-5.

Murray, A. S., ve Wintle, A. G. (2000). Luminescence dating of quartz using an improved single-aliquot regenerative-dose protocol. *Radiation Measurements*, 32(1), 57–73. https://doi.org/10.1016/S1350-4487(99)00253-X

Murray, A.; Arnold, L.J.; Buylaert, J.-P.; Guérin, G.; Qin, J.; Singhvi, A.K.; Smedley, R.; Thomsen, K.J. Optically Stimulated Luminescence Dating Using Quartz. Nature Reviews Methods Primers 2021, 1, 72, doi:10.1038/s43586-021-00068-5

Pagonis, V., Kitis, G., ve Furetta, C. (2006). Numerical and Practical Exercises in Thermoluminescence. Springer.

Pagonis, V., Nathan, R. P., ve Ankjærgaard, C. (2019). Simulations of thermoluminescence and optically stimulated luminescence processes using comprehensive models of electron trapping. Radiation Measurements, 120, 179–189. https://doi.org/10.1016/j.radmeas.2018.06.008

Pagonis, V., Lawless, J., Chen, R. ve Chithambo, M.L., 2011. Analytical expressions for time-resolved optically stimulated luminescence experiments in quartz. Journal of Luminescence, 131, 1827-1835.

Pagonis, V., Thompson, J., ve Chen, R. (2011). Simulation of thermoluminescence and optically stimulated luminescence processes using MATLAB. Radiation Measurements, 46(12), 1380–1384. https://doi.org/10.1016/j.radmeas.2011.05.062

Pagonis, V.; Wintle, A.G.; Chen, R.; Wang, X.L. A Theoretical Model for a New Dating Protocol for Quartz Based on Thermally Transferred OSL (TT-OSL). Radiat Meas 2008, 43, 704–708, doi:https://doi.org/10.1016/j.radmeas.2008.01.025.

Preusser, F.; Degering, D.; Fuchs, M.; Hilgers, A.; Kadereit, A.; Klasen, N.; Krbetschek, M.; Richter, D.; Spencer, J. Luminescence Dating: Basics, Methods and Application. Eiszeitalter ve Gegenwart / Quaternary Science Journal 2008, 57, 95–149.

Randall, J. T., ve Wilkins, M. H. F. (1945). Phosphorescence and electron traps: I. The study of trap distributions. Proceedings of the Royal Society A, 184(999), 365–389.

Rendell, H. M., Khanlary, M. R., Townsend, P. D., Calderón, T., ve Luff, B. J. (1993). Thermoluminescence spectra of minerals. Mineralogical Magazine, 57, 217–222.

Richter, A. ve Kumar, T. (2014). Instruction Manual Lexsyg smart – Automated TL/OSL Reader. Freiberg Instruments GmbH.

Rumelhart, D. E., Hinton, G. E., ve Williams, R. J. (1986). Learning representations by back-propagating errors. Nature, 323(6088), 533–536. https://doi.org/10.1038/323533a0

Russell, S., ve Norvig, P. (2021). Artificial Intelligence: A Modern Approach (4th ed.). Pearson.

Sánchez, J.; Mosquera, D.; Montero Fenollós, J. TL and OSL Dating of Sediment and Pottery from Two Syrian Archaeological Sites. Geochronometria 2008, 31, 21–29, doi:10.2478/v10003-008-0017-6.

Schmidt, C., ve Woda, C. (2019a). Cathodoluminescence of quartz: A review on the current state of the art. Minerals, 9(1), 30. https://doi.org/10.3390/min9010030

Schmidt, C. ve Woda, C., (2019b). Quartz thermoluminescence spectra in the high-dose range. Physics and Chemistry of Minerals, https://doi.org/10.1007/s00269-019-01046-w.

Schmidhuber, J. (2015). Deep learning in neural networks: An overview. Neural Networks, 61, 85–117. https://doi.org/10.1016/j.neunet.2014.09.003

Shah, A. (2020, Kasım 12). The concept of artificial neurons ve perceptrons in neural networks. Towards Data Science. https://towardsdatascience.com/the-concept-of-artificial-neurons-perceptrons-in-neural-networks-fab22249cbfc (Erişim tarihi: 27 Ocak 2023)

Singhvi, A.K., ve Krbetschek, M.R. (2014). Luminescence dating: Quo vadis? Quaternary Geochronology, 22, 5–10.

Singh, M., Kaur, N. ve Singh, L., 2012. Thermoluminescence characteristics of high gamma dose irradiated natural quartz. Nuclear Inst. and Methods in Physics Research B, 276, 19-24.

Singh, M., ve ark. (2020). Machine learning approaches for luminescence data analysis. Applied Radiation and Isotopes, 166, 109370.

Singh, V. P., Manav, M., ve Singh, N. (2021). Thermoluminescence dosimetry and its applications: A comprehensive review. Journal of Luminescence, 233, 117919. https://doi.org/10.1016/j.jlumin.2020.117919

Soares, B. R., Mateus, F. D. C., Asfora, V. K., ve Pedro, L. (2020). Dosimetric properties of natural quartz from Brazil. Radiation Measurements, 136, 106393.

Soares, B.R., Caicedo Mateus, F.D., Asfora, V.K. ve Guzzo, P.L., 2023. Investigating the OSL components and the sensitivity changes in a natural quartz crystal showing an intense post-sensitization TL signal. Radiation Effects and Defects in Solids.

Sun, Y., Chen, Y., Tian, X., ve Zhang, L. (2020). Thermoluminescence of organic–inorganic hybrid materials for dosimetry applications. Journal of Materials Science: Materials in Electronics, 31(5), 3944–3953. https://doi.org/10.1007/s10854-020-03024-y

Thomas, S. ve Chithambo, M.L., 2018. General features and kinetic analysis of thermoluminescence from annealed natural quartz. Journal of Luminescence, 197, 406-411.

Thomas, P. J., ve Chithambo, M. L. (2018). Thermoluminescence of quartz and feldspar: A review. Radiation Measurements, 117, 22–32. https://doi.org/10.1016/j.radmeas.2018.06.010

Thomas S., Chithambo M. (2018). A study of the kinetics of a high temperature thermoluminescence peak in annealed natural quartz. Journal of Luminescence, 204, 603–608. DOI: 10.1016/j.jlumin.2018.08.077

Thomsen, K. J., Jain, M., ve Murray, A. S. (2015). Optically stimulated luminescence dating of young sediments: A review. Geochronometria, 42(1), 3–29. https://doi.org/10.1515/geochr-2015-0003

Toktamiş, D., Er, M. B., ve Işık, E. (2022). Classification of Thermoluminescence Features of the Natural Halite with Machine Learning. Radiation Effects and Defects in Solids, 177, 360–371.

Topaksu, M., Yüksel, M., Doğan, T., Nur, N., Akkaya, R., Yegingil, Z. ve Topak, Y., 2013. Investigation of the characteristics of thermoluminescence glow curves of natural hydrothermal quartz from Hakkari area in Turkey. Physica B: Physics of Condensed Matter, 424, 27-31.

Townsend, P. D. (1994). Analysis of TL emission spectra. Radiation Measurements, 23(2–3), 341–348

Truscott, A.J.; Duller, G.A.T.; Bøtter-Jensen, L.; Murray, A.S.; Wintle, A.G. Reproducibility of Optically Stimulated Luminescence Measurements from Single Grains of Al2O3:C and Annealed Quartz. Radiat Meas 2000, 32, 447–451, doi:https://doi.org/10.1016/S1350-4487(00)00080-9.

Turing, A. M. (1950). Computing machinery and intelligence. Mind, 59(236), 433–460. https://doi.org/10.1093/mind/LIX.236.433

Twardak, A., Bilski, P., Olko, P., ve Gieszczyk, W. (2019). New TL materials for high-dose dosimetry. Radiation Measurements, 121, 111–114. https://doi.org/10.1016/j.radmeas.2018.11.009

Wang, X., Zhang, H., Li, J., ve Chen, R. (2022). Artificial intelligence approaches in thermoluminescence glow-curve analysis: Current status and future prospects. Radiation Measurements, 154, 106741. https://doi.org/10.1016/j.radmeas.2022.106741

Wintle, A. G. (2008). Luminescence dating: Where it has been and where it is going. Ancient TL, 26(2), 35–46.

Wintle, A. G. (2017). Luminescence dating: where it has been and where it is going. Geochronometria, 44(1), 3–11.

Wintle, A. G., ve Murray, A. S. (2006). A review of quartz optically stimulated luminescence characteristics and their relevance in single-aliquot regeneration dating protocols. Radiation Measurements, 41(4), 369–391.

Wintle, A.G. ve Adamiec, G., (2017a). Optically stimulated luminescence signals from quartz: A review. Radiation Measurements, 98, 10-–33.

Wintle, A. G., ve Adamiec, G. (2017b). Optically stimulated luminescence dating of sediments using quartz. Quaternary Geochronology, 39, 174–183.

Yukihara, E. G., ve McKeever, S. W. S. (2011). Optically Stimulated Luminescence: Fundamentals and Applications.

Yüksel M., Doğal ve Katkılanmış Bor Minerallerinin Dozimetre Geliştirmek Amacıyla Termolüminesans (TL) Yöntemi Kullanılarak Çalışılması, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Anabilim Dalı, Doktora Tezi, Adana, 2013.

Yüksel M., Termolüminesans Yöntemi ve Dozimetrik Çalışmalar, Fen Bilimleri ve Matematik Temel Alanı Örnek Araştırmaları Kitabı, Nobel Akademik Yayıncılık, Ankara, pp.171-192 (2018).

Yüksel, M., (2022), Yapay Sinir Ağları ile Radyasyon Dozu Tahmini, 3. Uluslararası Katılımlı Radyasyondan Korunma Kongresi, Bildiri Özetleri Kitabı, Sayfa, 2. 2-4 Aralık 2022, Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi, Ankara.

Yüksel, M., ve Ünsal, E. (2025). Thermoluminescence Properties of Plagioclase Mineral and Modelling of TL Glow Curves with Artificial Neural Networks. Applied Sciences, 15, 4260. https://doi.org/10.3390/app15084260

Zhang, H., Sun, Y., Chen, Y., ve Tian, X. (2019). Recent developments in thermoluminescence materials for emerging applications. Materials Research Express, 6(7), 072001. https://doi.org/10.1088/2053-1591/ab1800

ScienceFacts.net. (2023, Kasım). Band Theory [Uyarlanmış çevrimiçi görüntü]. ScienceFacts.net. https://www.sciencefacts.net/wp-content/uploads/2023/11/Band-Theory.jpg

ÖZGEÇMİŞ

Fırat DENİZ, ilköğrenimini 1991 yılında Adana Seyhan Şehit İlbey Gülbey İlkokulunda ve 1994 yılında Şakirpaşa Ortaokulunda, ortaöğrenimini 1997 yılında Adana Erkek Lisesi Ağırlıklı Yabancı Dil Bölümünde tamamladı. 2002 yılında Dokuz Eylül Üniversitesi Buca Eğitim Fakültesi İlköğretim Fen Bilgisi Öğretmenliği Programından lisans derecesi ile mezun oldu. 2022 yılından itibaren Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalı'nda yüksek lisans öğrenimini sürdürmektedir. Evli, iki çocuk babasıdır.