

**T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ**



**SAĞIR KÖY-KIRKBAŞ KÖYÜ (YALVAÇ/ ISPARTA) BOKSİTLERİNİN
JEOLOJİK, JEOKİMYASAL VE KÖKENSEL İNCELEMESİ**

Sinan Emre ÇAKIR

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

JEOLOJİ MÜHENDİSLİĞİ

ANABİLİM DALI

DOKTORA TEZİ

TEMMUZ 2025

ANTALYA

**T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ**



**SAĞIR KÖY-KIRKBAŞ KÖYÜ (YALVAÇ/ ISPARTA) BOKSİTLERİNİN
JEOLOJİK, JEOKİMYASAL VE KÖKENSEL İNCELEMESİ**

Sinan Emre ÇAKIR

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

JEOLOJİ MÜHENDİSLİĞİ

ANABİLİM DALI

DOKTORA TEZİ

TEMMUZ 2025

ANTALYA

**T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**SAĞIR KÖY-KIRKBAŞ KÖYÜ (YALVAÇ/ ISPARTA) BOKSİTLERİNİN
JEOLojİK, JEOKİMYASAL VE KÖKENSEL İNCELEMESİ**

**Sinan Emre ÇAKIR
JEOLojİ MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI
DOKTORA TEZİ**

**T.C. Akdeniz Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon
Birimi tarafından FDK-2024-6670 nolu proje ile desteklenmiştir.**

TEMMUZ 2025

T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

SAĞIR KÖY-KIRKBAŞ KÖYÜ (YALVAÇ/ ISPARTA) BOKSİTLERİNİN
JEOLojİK, JEOKİMYASAL VE KÖKENSEL İNCELEMESİ

Sinan Emre ÇAKIR
JEOLojİ MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI
DOKTORA TEZİ

Bu tez 21/07/2025 tarihinde jüri tarafından Oybirliği ile kabul edilmiştir.

Prof. Dr. M. Gürhan YALÇIN (Danışman)
Prof. Dr. Nurdane İLBeyLİ
Doç. Dr. Üyesi Alican ÖZTÜRK
Dr. Öğr. Üyesi Ali TÜMÜKLÜ
Dr. Öğr. Üyesi Oya CENGİZ

ÖZET

SAĞIR KÖY-KIRKBAŞ KÖYÜ (YALVAÇ/ ISPARTA) BOKSİTLERİNİN JEOLJİK, JEOKİMYASAL VE KÖKENSEL İNCELEMESİ

Sinan Emre ÇAKIR

Doktora Tezi, Jeoloji Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. M. Gürhan YALÇIN

Haziran 2025; 157 sayfa

Isparta'nın kuzey sınırlarında yer alan Kırbaş ve Sağırköy boksit yatakları, bölgenin jeolojik özellikleriyle ilişkili olarak önemli maden potansiyeline sahip sahalar arasında yer almakta olup, bu bölgede daha önce yapılmış herhangi bir akademik çalışma bulunmamaktadır. Tez konusu kapsamında yapılan bu çalışmada bölgede bulunan boksitlerin, jeokimyasal, kökenel ve jeolojik özellikleri, oluşum ve yataklanmaları, oluşumlarını etkileyen koşul ve faktörlerin belirlenmesi, yorumlanması amaçlanmıştır.

Boksitler, gipsit (hidrarjilit) $[Al(OH)_3]$, böhmit $[AlO(OH)]$, diyorit ($Al_2O_3 \cdot H_2O$), minerallerinin bir karışımı olup genellikle silis, TiO_2 demir oksit içermektedir. Genel anlamda boksit, alüminyum oksit ve hidroksitlerin karışımından oluşan bir kayaç olarak dikkat çeker. Yoğunluğu $2,5-3,5 \text{ g/cm}^3$, sertliği ise 1-3 arasında değişen bu kayaç, kimyasal bileşimine bağlı olarak endüstride değişik alanlarda da kullanılmaktadır. Boksit, alüminyum metali üretiminde temel hammadde olması nedeniyle hem dünya genelinde hem de Türkiye özelinde önemli bir ticari değer taşımaktadır.

Isparta (Yalvaç) Kırbaş ve Sağırköy bölgesinde yer alan boksitlere ait çalışma alanından toplanan örnekler üzerinde mineralojik incelemeler yapılmış, bölgenin genel jeoloji çalışmaları yapılmış, araziden alınan veriler değerlendirilerek bölgede bulunan boksitlerin oluşum şartları ve kökenlerinin yorumlamaları yapılmıştır. Boksit ve yan kayaçlardan alınan numunelerin kimyasal analizlere hazırlıkları ve ayrıntılı analizleri (XRD, XRF, FT-IR, ICP-MS, SEM) yapılmış, örneklere ait XRF analizi sonuçları incelenerek istatistik veriler elde edilmiştir.

İnceleme alanında bulunan boksitlerin, Hacılabaz formasyonuna ait Jura-Kretase yaşlı kireçtaşı birimi içerisinde yer aldığı ve Üst Kambriyen–Alt Ordovisyen yaşlı Seydişehir Formasyonu'na ait kumtaşı, çamurtaşı ve kireçtaşı ardalanmasıyla birlikte, yamaç birikintileri ve çökel kaya dokanağının yaklaşık 250 metre güneybatısında yer aldığı gözlenmiştir.

Yapılan XRF analizleri ve istatistiksel incelemeler sonucunda, boksit örneklerinin ortalama %48,37 düzeyinde Al_2O_3 içeriğine sahip olduğu, ayrıca yer yer Al_2O_3 tenörünün %70'in üzerine çıktığı ve bu değerlerle ekonomik tenör sınırlarının üzerinde seyrettiği belirlenmiştir. Fe_2O_3 içerikleri ortalama %8,88 düzeyinde ölçülmüş, bazı örneklerde ise bu oranın %21'e kadar yükseldiği tespit edilmiştir. Bu varyasyon, demir oksitlerin boksitleşme süreci sırasında ikincil zenginleşme ürünleri olarak geliştiğini ve özellikle bölgesel ayrışma koşullarının etkisini yansıttığını göstermektedir. Ayrıca, ortalama %33 seviyesinde olan SiO_2 içeriği, bazı numunelerde %50'nin üzerine çıkarak, silis açısından

zenginleşmiş ve kaolinitik fazların hakim olduğu boksit türlerinin varlığını işaret etmektedir. Bu durum, söz konusu yatakların yüksek alümina içeriğiyle dikkat çeken, ekonomik potansiyele sahip karstik boksit yatakları olduğunu ortaya koymaktadır.

Jeokimyasal veriler, boksitlerin yalnızca tek evreli lateritik ayrışmayla değil, aynı zamanda çok aşamalı alterasyon ve taşınım süreçleriyle şekillendiğini ortaya koymaktadır. Ana kaya olarak feldspatça zengin (muhtemelen gnaysik) birimlerin ayrışması sonucu ortaya çıkan malzemenin, karstik kireçtaşları içerisinde gelişen boşluklara taşınarak burada biriktiği düşünülmektedir. Bu taşınım sürecinde, alüminyum ve silisyum içeren mineraller birlikte çökelmiş; böylece hem alümina hem de silis bakımından zengin, karstik karakterli, taşınmış bir boksit tipi gelişmiştir.

Hacıalabaz formasyonunun kireçtaşlı seviyeleri içinde bazalt ara seviyeleri veya dayk/sill intrüzyonları bulunması, bu bazaltların daha sonra yüzeyleyip ayrışmaya maruz kalmasına olanak sağlamıştır. Boksitlerin jenez mafik bileşimli bazaltlar, yüksek oranda Al_2O_3 içerebilecek feldispatlar ve mafik mineraller olarak belirlenmiştir.

Sonuç olarak, Sağır Köy-Kırkbaş Köyü boksitleri, yüksek Al_2O_3 , değişken Fe_2O_3 ve yer yer yüksek SiO_2 içerikleriyle karakterize olup, karstik ortamlarda şekillenen, çok evreli bir jeolojik gelişim sürecinin ürünüdür. Bu yataklar, yalnızca lateritik ayrışmanın değil; aynı zamanda bölgesel metamorfizma, alterasyon, taşınım ve yeniden çökeltme süreçlerinin ortak etkisiyle oluşmuş, mineralojik olarak zenginleşmiş karmaşık bir yapıya sahiptir.

ANAHTAR KELİMELEER: Boksit, Çok değişkenli istatistik, Isparta, Jeokimyasal Süreçler, Jenez, Kırkbaş Köyü, Mineroloji, Parajenez, Petrografi, Sağırköy, Yalvaç

JÜRİ: Prof. Dr. M. Gürhan YALÇIN

Prof. Dr. Nurdane İLBEYLİ

Doç. Dr. Üyesi Alican ÖZTÜRK

Dr. Öğr. Üyesi Ali TÜMÜKLÜ

Dr. Öğr. Üyesi Oya CENGİZ

ABSTRACT

GEOLOGICAL GEOCHEMICAL AND GENESIS EXAMINATION OF KIRKBAS AND SAGIRKOY YALVAÇ (ISPARTA) BAUXITES

Sinan Emre ÇAKIR

PhD Thesis in Geological Engineering

Supervisor: Prof. Dr. M. Gürhan YALÇIN

Jun 2025; 157 pages

The bauxite deposits located in the Kırkbaşı and Sağırköy regions, situated along the northern boundary of Isparta, represent significant mineral resources linked to the area's geological features. However, there has been no previous academic study conducted on these localities. Within the scope of this thesis, the study aimed to investigate and interpret the geochemical, genetic, and geological characteristics of the bauxites in the region, including their formation, modes of occurrence, and the controlling factors that influenced their development.

Bauxite is a rock composed primarily of the minerals gibbsite (hydrargillite) $[\text{Al}(\text{OH})_3]$, böhmite $[\text{AlO}(\text{OH})]$, and diaspore $(\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O})$, typically accompanied by silica, TiO_2 , and iron oxides. In general terms, bauxite is defined as a mixture of aluminum oxides and hydroxides. With a density ranging between 2.5–3.5 g/cm^3 and hardness varying between 1–3, bauxite is used in various industrial applications depending on its chemical composition. As the principal raw material in aluminum metal production, bauxite holds substantial commercial value both globally and within Turkey.

Mineralogical investigations were carried out on samples collected from the Kırkbaşı and Sağırköy bauxite deposits located in the Yalvaç (Isparta) region. In addition to regional geological surveys, field data were evaluated to interpret the depositional environment and genesis of the bauxite occurrences. Detailed laboratory analyses, including XRD, XRF, FT-IR, ICP-MS, and SEM, were conducted on samples from bauxites and associated host rocks. Statistical data were obtained by evaluating the results of XRF analyses.

The investigated bauxite occurrences were found to be situated within Jurassic-Cretaceous aged limestone units belonging to the Hacıalabaz Formation and observed approximately 250 meters southwest of the contact zone between slope deposits and clastic-carbonate sequences of the Upper Cambrian–Lower Ordovician-aged Seydişehir Formation, consisting of sandstone, mudstone, and limestone alternations.

According to XRF analyses and statistical evaluations, the average Al_2O_3 content of the bauxite samples is approximately 48.37%, with some samples exceeding 70%, indicating values above the economic grade threshold. The Fe_2O_3 content averaged around 8.88%, reaching up to 21% in certain samples. This variation suggests that iron oxides developed as secondary enrichment products during the bauxitization process, reflecting the influence of regional weathering conditions. Additionally, the SiO_2 content, averaging 33%, exceeded 50% in some samples, indicating the presence of silica-

enriched, kaolinitic bauxite types. These findings confirm that the studied deposits represent economically valuable karst-hosted bauxite bodies with high alumina content.

Geochemical data indicate that the bauxites formed not only through single-phase lateritic weathering but also through multi-phase alteration and transportation processes. It is inferred that weathering of feldspar-rich parent rocks (likely gneissic) generated aluminum- and silica-bearing materials, which were transported and deposited into cavities within karstic limestone. During this transportation process, aluminum- and silica-rich minerals were co-precipitated, forming a transported, karstic bauxite type enriched in both alumina and silica.

Within the limestone levels of the Hacıalabaz formation, intercalations of basalt or dike/sill intrusions are present, which subsequently became exposed at the surface and subjected to weathering. The genesis of the bauxites has been attributed to mafic basalts containing feldspars and mafic minerals that are capable of hosting high Al_2O_3 contents.

In conclusion, the Sağırköy–Kırkbaşı bauxite deposits are characterized by high Al_2O_3 , variable Fe_2O_3 , and locally high SiO_2 contents, and they represent the product of a complex, multi-stage geological evolution within karstic environments. These deposits formed through the combined effects of lateritic weathering, regional metamorphism, alteration, transportation, and redeposition processes, resulting in mineralogically enriched and geologically complex bauxite bodies.

KEYWORDS: Bauxite, Genesis, Geochemical Processes, Isparta, Kırkbaşı, Mineralogy, Multivariate statistics, Paragenesis, Petrography, Sağırköy, Yalvaç

COMMITTEE: Prof. Dr. M. Gürhan YALÇIN

Prof. Dr. Nurdane İLBEYLİ

Assoc. Prof. Dr. Alican ÖZTÜRK

Asst. Prof. Dr. Ali TÜMÜKLÜ

Asst. Prof. Dr. Oya CENGİZ

ÖNSÖZ

Bu tez çalışması, lisansüstü eğitimim süresince edindiğim bilgi ve deneyimlerin bir ürünü olup, saha çalışmasından laboratuvar analizlerine, değerlendirme aşamalarından yazım sürecine kadar uzun ve titiz bir çalışmanın sonucunda ortaya çıkmıştır.

Tezimin her aşamasında bilgi ve tecrübelerini benimle paylaşarak akademik gelişimime büyük katkı sağlayan, yönlendirici eleştirileri ve değerli fikirleriyle çalışmamın şekillenmesine önemli katkılarda bulunan, bilimsel yaklaşımı ve meslek etiği konusundaki rehberliği ile yolumu aydınlatan danışman hocam Akdeniz Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Anabilim Dalı öğretim üyesi Prof. Dr. M. Gürhan YALÇIN'a en içten ve sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Mikroskobik ve minerolojik yorumlamalar konusundaki katkılarından dolayı İstanbul Teknik Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü öğretim üyesi Prof. Dr. Emin ÇİFTÇİ hocama da ayrıca teşekkür ederim.

Bu çalışmada ele alınan ve daha önce üzerinde herhangi bir akademik araştırma yapılmamış olan saha verilerine ulaşmamı sağlayarak, bilimsel açıdan özgün bir katkı sunmama imkan tanıyan, değerli Yüksek Maden Mühendisi Salih AKBOĞA'ya; araştırma sahasına ait işletme ruhsatına sahip ve sahada çalışmamıza destek veren Dakduklu Metalurji Madencilik A.Ş. firma yetkilisi Sayın Rıdvan DAKDUKLU'ya teşekkür etmeyi bir borç bilirim.

Arazi, laboratuvar, büro ve yazım süreçlerinde her zaman desteklerini esirgemeyen, kıymetli katkılarını ve görüşlerini benimle paylaşan Jeoloji Mühendisliği Bölümü hocalarıma ve Arş. Gör. Özge Özer ATAĞÖZÜ'ne; aynı zamanda bu çalışmanın tüm aşamalarında aktif olarak yer alan ve değerli katkılar sunan eşim Dr. Jeoloji Mühendisi Betül KURŞUN ÇAKIR'a en derin şükranlarımı sunarım.

Son olarak, her daim yanımda olan, bana maddi ve manevi destek sağlayarak güç veren kıymetli aileme içten teşekkürlerimi sunarım.

Bu tez çalışmasının, Yalvaç (Isparta) bölgesi başta olmak üzere, boksit yataklarının jeolojik, jeokimyasal ve kökensel özelliklerinin bilimsel temelde anlaşılmasına katkı sağlamasını temenni ederim.

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	iii
ÖNSÖZ	v
AKADEMİK BEYAN	ix
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	x
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xiii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xv
1. GİRİŞ	1
1.1. Çalışmanın Amacı.....	1
1.2. İnceleme Alanı	2
2. LİTERATÜR TARAMASI	4
3. MATERYAL VE METOT	18
3.1. Arazi Çalışmaları ve Örneklemeye.....	18
3.2. Laboratuvar Çalışmaları.....	23
3.3. Büro Çalışmaları	27
3.4. Mineralojik ve Petrografik Analizler	29
3.4.1. X-RAY Difraktometresi (XRD) analiz çalışması	29
3.4.2. Fourier Dönüştümlü Kızılötesi Spektroskopisi (FT-IR) analiz çalışması	30
3.4.3. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) analiz çalışması.....	31
3.5. Jeokimyasal Analizler	32
3.5.1. XRF analiz çalışması.....	32
3.5.2. ICP-MS analiz çalışması	33
3.6. İstatistiksel Analizler.....	34
3.6.1. Betimsel istatistik	34
3.6.2. Pearson korelasyon analizi	35
3.6.3. Kümeleme analizi.....	35
3.6.4. Box-plot analizi.....	35
3.6.5. Regresyon analizi	36
3.6.6. Enterpolasyon (bölgesel dağılım) haritaları	36
4. BULGULAR.....	37

4.1.	Bölgenin Genel Jeolojik Yapısı	37
4.2.	İnceleme Alanı ve Yakın Çevresinin Jeolojisi	39
4.2.1.	Seydişehir formasyonu (Eos)	45
4.2.2.	Hacıalabaz formasyonu (JKh).....	45
4.2.3.	Hüseyinliçeşme formasyonu (Teh)	46
4.2.4.	Yarıkkaya formasyonu (Tmy).....	46
4.2.5.	Bağkonak formasyonu (Tmb)	47
4.2.6.	Göksöğüt formasyonu (Tmgü).....	47
4.2.7.	Alüvyon (Qal)	48
4.3.	Mineralojik ve Petrografik Özellikler	48
4.3.1.	XRD analizi.....	48
4.3.2.	FT-IR Analizi	65
4.3.3.	Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) Analizi	72
4.4.	Jeokimyasal Özellikler	78
4.4.1.	ICP-MS Analizi.....	78
4.4.2.	XRF Analizi	84
4.5.	İstatistiksel Veriler	87
4.5.1.	Majör element betimsel istatistiği	87
4.5.2.	Üçgen diyagramlar	88
4.5.3.	İz element betimsel istatistiği.....	90
4.5.4.	Box-plot analizi.....	95
4.5.5.	Kümeleme analizi.....	97
4.5.6.	Pearson korelasyon analizi.....	98
4.5.7.	Regresyon analizi	103
4.5.8.	Enterpolasyon haritaları	106
4.5.9.	Örümcek diyagramları	112
4.5.10.	Boksitlerin oluşumunu belirleyen grafikler	114
4.6.	Alüminyum Boksitin Çevre ve İnsan Sağlığı Üzerindeki Etkileri.....	118
4.7.	Sürdürülebilir Madencilik ve Çevresel Yönetim	123
4.7.1.	Çevresel etkiler.....	124
4.7.2.	Ekonomik etkiler.....	124
4.8.	Boksit Yataklarının Yeryüzündeki Dağılımı	127

4.8.1.	Isparta bölgesi boksit yatakları	129
4.8.2.	Türkiye’de boksit yatakları	132
4.8.3.	Dünya genelinde boksit yatakları	134
5.	TARTIŞMA	136
6.	SONUÇLAR	139
7.	KAYNAKLAR	143
ÖZGEÇMİŞ		



AKADEMİK BEYAN

Doktora Tezi olarak sunduğum “**Sağır Köy-Kırkbaş Köyü (Yalvaç/ Isparta) Boksitlerinin Jeolojik, Jeokimyasal ve Kökensel İncelemesi**” adlı bu çalışmanın, akademik kurallar ve etik değerlere uygun olarak yazıldığını belirtir, bu tez çalışmasında bana ait olmayan tüm bilgilerin kaynağını gösterdiğimi beyan ederim.

21/07/2025

Sinan Emre ÇAKIR

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

% : Yüzde

Σ : Toplam

> : Büyüktür

< : Küçüktür

Kısaltmalar

Al	: Alüminyum
Al ₂ O ₃	: Alüminyumdioksit veya Korund
Al ₂ SiO ₅	: Sillimanit/ Kyanit
Al ₂ O ₃ .H ₂ O	: Diyasporit
Al ₂ Si ₂ O ₅ (OH) ₄	: Kaolinit
AÜ	: Akdeniz Üniversitesi
B	: Boksit Numuneleri
BSE	: Geri Saçılmış Elektron (SEM Analizi)
Ca	: Kalsiyum
CaO	: Kalsiyum oksit
Ca ₅ (PO ₄) ₃ F/Cl/OH	: Apatit
CBS	: Coğrafi bilgi sistemleri
CIA	: Chemical Index of Alteration
Cr	: Krom
F	: Flor
Fe	: Demir
Fe ₂ O ₃	: Hematit
Fe ₃ O ₄	: Manyetit
FeO(OH)	: Götüt
FeO(OH)·nH ₂ O	: Limonit

FeTiO ₃	: İlmenit
FT-IR	: Fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi
Ga	: Galyum
GB	: Güney-Batı
GD	: Güney- Doğu
GPS	: Küresel Konumlama Sistemi
Hf	: Hafnium
HGM	: Harita Genel Müdürlüğü
HREE	: Ağır Nadir Toprak Elementleri
ICP-MS	: (Inductively Coupled Plasma – Mass Spectrometer) İndüksiyonla birleşmiş plazma kütle spektrometrisi
K	: Potasyum
KAlSi ₂ O ₆	: Lösit
KD	: Kuzey-Doğu
LREE	: Hafif Nadir Toprak Elementleri
MTA	: Maden Tetkik Arama
MnO ₂	: Manganez oksit
Na	: Sodyum
Nd	: Neodimyum
Ni	: Nikel
P	: Fosfor
REE	: Nadir Toprak Elementleri
Sc	: Skandiyum
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu analizi
Si	: Silisyum
SiO ₂	: Silisyum dioksit veya silika
Th	: Thorium
TiO ₂	: Titanyumdioksit veya Rutil

USGS	: United States Geological Survey
WGS84	: World Geodetic System 1984
XRD	: X-Işını Kırınım yöntemi
XRF	: X-ışını floresans spektrometresi
V	: Vanadyum
Y	: Yan kayaç Numuneleri
Zn	: Çinko
$\gamma\text{-Al(OH)}_3$	: Gibsit (hidrarjilit)
$\gamma\text{-AlO(OH)}$	: Böhmit
$\alpha\text{-AlO(OH)}$	: Diaspor

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1: Sağır Köy-Kırkbaş Köyü (Yalvaç/ Isparta) yer bulduru haritası (MTA 2024; HGM 2023)	3
Şekil 3.1. a) Kuzey açık boksit ocağı; b) Güney açık boksit ocağı	18
Şekil 3.2. a) Güney açık boksit ocağı; b) Boksit numunesine ait fotoğraf c) Yan kayaç mostra fotoğrafı d) Boksit kalıntılarına ait fotoğraf	19
Şekil 3.3. a) Kuzey açık boksit ocağı; b) Yan kayaç mostra fotoğrafı c) Boksit numunesine ait fotoğraf d) Boksit kalıntılarına ait fotoğraf	20
Şekil 3.4. Numune Lokasyonları	22
Şekil 3.5. a) Boksit stoğu b) Kuzey açık boksit ocağı c) Lup kullanımı d) Radyasyon ölçümü e) Tabaka doğrultu ve eğim yönü ve miktarı ölçümü f) Numunelerin paketlenmesi	23
Şekil 3.6. a) Kayaç kırıcı işlemi b) Çakıl boyutundaki örneklerin paketlenme ve etiketlenmesi c) Numunelerin halkalı öğütücü havanına eklenmesi d) Halkalı öğütücü çalıştırma işlemi e) Tamamlanan öğütme işlemi f) Numunelerin halkalı öğütücüden eleğe aktarımı	24
Şekil 3.7. a), b), c) Öğütülen numunelerin elekten geçirilmesi d) Elekten geçirilen numunelerin tartılması e), f) Numunelerin paketlenme etiketleme işlemleri	25
Şekil 3.8. a) Öğütücü havan, halkalarının ve temizlenmesi b) Öğütücü malzemelerinin kompresör ile kurutulması c) Eleklerin temizlenip kurutulması	26
Şekil 3.9. a) Kil-silt boyutundaki numune ve borik asitin pellet haznesine eklenmesi b) 15 MPa'ya kadar presleme işlemi c), d) Pelletin haznedan çıkarılması e), f) Xrf analizine hazır pellet numuneleri	27
Şekil 3.10. Çalışma alanı ve Afyon L26-a1 ve L25-b2 paftasından oluşturulan bölgesel jeoloji haritası (Arcgis 10.7 Basemap Imagery 2024; MTA 2024; HGM 2023)	28
Şekil 3.11. XRF cihazı ve programı	32
Şekil 4.1. Afyon-L25 ve Afyon-L26 genel jeoloji haritalarından yararlanılarak hazırlanan bölgesel jeoloji haritası (Davraz ve Batur 2020)	38
Şekil 4.2. Sağırköy ve Kırkbaş köyü numune alım lokasyonları ve bölgesel jeoloji haritası (MTA L25-b2 genel jeoloji haritası, 2024)	40
Şekil 4.3. Sağırköy ve Kırkbaş köyü numune alım lokasyonları ve bölgesel jeoloji haritası (MTA L-25 ve L-26 genel jeoloji haritası 2024)	42
Şekil 4.4. Sağırköy ve Kırkbaş köyü genelleştirilmiş stratigrafik kesit (MTA L-25 ve L-26 genel jeoloji haritası 2024)	43
Şekil 4.5. Sağırköy ve Kırkbaş boksitlerinin stratigrafik birimlerle ilişkilerini gösteren jeolojik enine kesit (MTA, 2024).	44
Şekil 4.6. B-1 numunesine ait XRD diyagramı	49
Şekil 4.7. B-5 numunesine ait XRD diyagramı	50
Şekil 4.8. B-7 numunesine ait XRD diyagramı	51
Şekil 4.9. B-10 numunesine ait XRD diyagramı	52
Şekil 4.10. B-11 numunesine ait XRD diyagramı	53
Şekil 4.11. B-14 numunesine ait XRD diyagramı	55
Şekil 4.12. B-19 numunesine ait XRD diyagramı	56
Şekil 4.13. B-28 numunesine ait XRD diyagramı	57
Şekil 4.14. Y-9 numunesine ait XRD diyagramı	58
Şekil 4.15. Y-27 numunesine ait XRD diyagramı	60

Şekil 4.16. BT-5 Boksit numuneleri FT-IR spektrumları	66
Şekil 4.17. BT-11 Boksit numuneleri FT-IR spektrumları	67
Şekil 4.18. BT-28 Boksit numuneleri FT-IR spektrumları	68
Şekil 4.19. Y-9 yan kayaç numuneleri FT-IR spektrumları	68
Şekil 4.20. Y-27 yan kayaç numuneleri FT-IR spektrumları	69
Şekil 4.21. B-5 örneğine ait SEM çekimleri	73
Şekil 4.22. B-11 örneğine ait SEM çekimleri	74
Şekil 4.23. B-19 örneğine ait SEM çekimleri	74
Şekil 4.24. B-28 örneğine ait SEM çekimleri	75
Şekil 4.25. Y-11 örneğine ait SEM çekimleri	76
Şekil 4.26. Y-27 örneğine ait SEM çekimleri	77
Şekil 4.27. $Al_2O_3-Fe_2O_3-SiO_2$ üçgen diyagramlarında boksit ve yan kayaç numunelerinin dağılımları a) Mineral sınıflaması (Aleva 1994) b) Boksit sınıflandırması (Boulangue vd. 1996) c) Lateritleşme derecesi (Schellman 1986) d) Beauvais (1993) tarafından tanımlanan jeokimyasal ayrışma yolları ve boksitleşme süreci (Tardy, 1997)	89
Şekil 4.28. Boksit örneklerinin majör element box-plot analizi	96
Şekil 4.29. Yan kayaç örneklerinin majör element box-plot analizi	97
Şekil 4.30. Boksit ve Yan kayaç örneklerinin dendrogram diyagramı	98
Şekil 4.31. Majör oksit bölgesel dağılım haritaları	107
Şekil 4.32. Majör oksit bölgesel dağılım haritaları 3	108
Şekil 4.33. Majör oksit bölgesel dağılım haritaları 4	109
Şekil 4.34. İz element bölgesel dağılım haritaları 1	109
Şekil 4.35. İz element bölgesel dağılım haritaları 3	110
Şekil 4.36. İz element bölgesel dağılım haritaları 4	111
Şekil 4.37. İz element bölgesel dağılım haritaları 5	112
Şekil 4.38. Boksit örneklerinin (UCC) normalize edilmiş örümcek diyagramı (Upper Continental Crust değerleri Taylor ve McLennan 1981'dan alınmıştır)	113
Şekil 4.39. Boksit örneklerinin kondirite göre normalize edilmiş örümcek diyagramı (normalleştirilme değerleri: Sun ve Mc Donough 1989)	114
Şekil 4.40. Ni-Cr logaritmik dağılımını diyagramı (Schroll ve Sauer 1968; Nyamsari ve Yalçın 2017; Atakoğlu ve Yalçın 2021)	115
Şekil 4.41. Cr-Eser element katsayıları logaritmik dağılımını diyagramı (Özlü 1983; Nyamsari ve Yalçın 2017; Nyamsari vd. 2020; Atakoğlu ve Yalçın 2021)	115
Şekil 4.42 Ga-Zr-Cr üçlü grafiği, Hacıalabaz formasyonunda incelenen karstik boksitlerdeki elementlerin konsantrasyonları kullanılarak Özlü, 1983'ten değiştirilerek hazırlanmıştır. (A, B, C, D: ultrabazik, bazik, nötr ve asidik magmatik kayaçlar; I, II, III, IV: ultramafik, mafik, nötr ve asidik karakterli öncül kayaçlar)	116
Şekil 4.43. Boksit örneklerinin Harker diyagramlarıyla gösterimi	117
Şekil 4.44. Al_2O_3 ile nadir toprak elementleri arasındaki korelasyonları gösteren diyagramlar	117
Şekil 4.45. Boksit örneklerinde Eu/Eu^* ile TiO_2/Al_2O_3 arasındaki korelasyon diyagramı	118
Şekil 4.46: Isparta ili maden haritası (MTA 2022)	131
Şekil 4.47: Türkiye'deki boksit yatakları (Okay ve Tüysüz 1999; Robertson ve Ustaömer 2009; Hanilçi 2019)	133

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1. Boksitlerde yaygın olarak bulunan mineraller.....	13
Çizelge 2.2. Boksitlerin kimyasal ve fiziksel özellikleri	14
Çizelge 3.1. Isparta/ Yalvaç Sağırköy ve Kırkbaş köyü bölgesine ait barit ve yan kayaç numune alımı koordinatları ve radyasyon değerleri (WGS84).....	21
Çizelge 4.1. Boksit numunelerine ait XRD verilerinin yorumu	62
Çizelge 4.2. Yan kayaç numunelerine ait XRD verilerinin yorumu.....	64
Çizelge 4.3. XRD verilerine göre başlıca mineraller ve yorumlamaları.....	64
Çizelge 4.4. ICP-MS analiz sonuçları.....	79
Çizelge 4.5. XRF analiz sonuçları	85
Çizelge 4.6. XRF analiz sonuçları (devamı).....	86
Çizelge 4.7. Boksit majör element verilerinin betimsel istatistiği	88
Çizelge 4.8. Yan kayaç majör element verilerinin betimsel istatistiği	88
Çizelge 4.9. Boksit iz element verilerinin betimsel istatistiği	91
Çizelge 4.10. Yan kayaç iz element verilerinin betimsel istatistiği.....	93
Çizelge 4.11. Majör element oksitlerin ve iz elementlerin Pearson korelasyon analizi	99
Çizelge 4.12. Majör element oksitlerin ve iz elementlerin Pearson korelasyon analizi 2	100
Çizelge 4.13. Majör element oksitlerin ve iz elementlerin Pearson korelasyon analizi 3	101
Çizelge 4.14. Açıklanabilir varyans oranları	103
Çizelge 4.15. Al_2O_3 -CaO lineer dağılım varyansı	104
Çizelge 4.16. Al_2O_3 -CaO lineer dağılım hata oranı	104
Çizelge 4.17. TiO_2 - Cr_2O_3 lineer dağılım varyansı.....	104
Çizelge 4.18. TiO_2 - Cr_2O_3 lineer dağılım hata oranı	105
Çizelge 4.19. TiO_2 -Nb lineer dağılım varyansı	105
Çizelge 4.20. TiO_2 -Nb lineer dağılım hata oranı	105
Çizelge 4.21. Sn-Zr lineer dağılım varyansı	105
Çizelge 4.22. Sn-Zr lineer dağılım hata oranı.....	105
Çizelge 4.23. Eu-Tb lineer dağılım varyansı	106
Çizelge 4.24. Eu-Tb lineer dağılım hata oranı.....	106
Çizelge 4.25. Al_2O_3/SiO_2 modülüne (oranına) göre boksit sınıflaması	124
Çizelge 4.26. Endüstride kullanılabilir nitelikteki boksit cevheri kriterleri.....	127
Çizelge 4.27. Türkiye ve dünya boksit üretimi.....	134
Çizelge 4.28. Türkiyedeki boksit yataklarının özellikleri (Hanilçı, 2019)	134

1. GİRİŞ

Toros Dağları'nın arkasında konumlanan Isparta yöresi, Türkiye'nin pek çok bölgesinde olduğu gibi stratigrafik dizilimleri, tektonik yapısı, petrografik özellikleri ile endüstriyel hammadde ve maden potansiyeli açısından araştırmacıların ilgisini çeken önemli bir alandır. Bölge, farklı yaş ve kökenlere sahip kaya birimlerinin bir arada bulunması nedeniyle karmaşık ve çeşitli bir jeolojik yapıya sahiptir.

Boksit, alüminyum üretiminin temel hammaddesi olup, ülkemizde sınırlı alanlardan çıkarılmasına rağmen düşük yoğunluğu ve yüksek dayanıklılığı sayesinde geniş kullanım alanlarına sahiptir. Alüminyum, yer kabuğunda en yaygın bulunan elementlerden biri olmakla birlikte, ekonomik anlamda işletilebilir kabul edilmesi için cevherde yaklaşık %30 tenöre ulaşması gerekmektedir. Jeolojik süreçler sonucunda alüminyumun yer aldığı ortamda dört katına kadar zenginleşmesi, ekonomik bir alüminyum yatağının oluşumu için uygun koşulları sağlayabilmektedir. Bununla birlikte, boksit oluşumları sırasında yalnızca alüminyum değil, aynı zamanda silisyumdioksit (SiO_2) içeriği de önem taşımaktadır. SiO_2 oranının %15-20 seviyelerine ulaşması, alüminyumun farklı mineral formları şeklinde (örneğin Kiyanit [Al_2SiO_5], Sillimanit [Al_2SiO_5], Korund [Al_2O_3], Lössit [KAlSi_2O_6]) kristallenmesine yol açabilmektedir. Bu durum, oluşan cevherin özelliklerini ve ekonomik değerini etkileyen önemli bir faktördür (Yalçın vd. 2016). Bazı ortamlarda boksit yataklarının oluşum süreçlerinde, özellikle metamorfizma ve tektonik olaylar etkili olmuştur (Yalçın 2005). Ayrıca, bu yatakların bulunduğu ortam ile yan kayaçlar arasındaki benzerlikler, boksitlerin kökenini anlamada önemli bir etken teşkil etmektedir (Yalçın vd. 2016).

Genel olarak alüminyumun en önemli doğal kaynağı, boksit şeklinde bulunan cevherlerdir. Bu tür cevherlerin oluşumu ve gelişimi, ana kayaçla olan ilişkileri doğrultusunda farklı sınıflandırmalara tabi tutulmaktadır. Söz konusu bağlamda boksitler, ana kayacın türüne bağlı olarak farklı genetik gruplara ayrılmakta ve bu sınıflandırma, cevherin oluşum ortamını anlamada önemli ipuçları sunmaktadır (Işık 1997).

Bu çalışmanın odak noktası olan Isparta ilinin Yalvaç ilçesine bağlı Sağır Köy ve Kırkbaş Köyü çevresi, şimdiye kadar literatürde detaylı olarak incelenmemiş ve herhangi bir boksit yatağı tespiti yapılmamış bir bölgedir. Bu nedenle, bu alanda yer alan boksit oluşumlarının jeolojik, jeokimyasal ve mineralojik özelliklerinin belirlenmesi, bölgenin maden potansiyelinin ortaya konulması açısından bilimsel ve ekonomik yönden önemli katkılar sunacaktır.

1.1. Çalışmanın Amacı

Boksit yatakları, jeokimyasal ve mineralojik özellikleriyle çeşitli türlere ayrılmakta olup, oluşum süreçleri çevresel ve jeolojik faktörlere bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Bu çalışma, Türkiye'deki boksit yataklarının jeolojik, jeokimyasal ve mineraloji açısından incelenmesinin dışında, özellikle Sağır Köy-Kırkbaş Köyü (Yalvaç/ Isparta) boksit yataklarının özellikleri, oluşum mekanizmaları ve kökenlerine odaklanmaktadır.

Bu çalışmanın temel amacı, literatürden yararlanarak inceleme alanının bölgesel ve inceleme alanı yakın civarı jeolojisinin çıkarılması, CBS yazılımları kullanarak

1/25.000 ve 1/100.000 genel jeoloji haritalarının sayısallaştırılması, ilgili stratigrafik kesitlerinin çizilmesi; boksit cevherlerinin ve yan kayaç örneklerinin mineralojik ve jeokimyasal özelliklerinin belirlenmesi; elde edilen jeokimyasal verilerin çok değişkenli istatistiksel analiz sonuçları ile yorumlanması; CBS yazılımları kullanılarak enterpolasyon (bölgesel dağılım) haritaları oluşturulması; boksitin oluşum süreçleri ile kökeninin belirlenmesi; boksit sahasının radyasyon değerlerinin belirlenmesi; ve yatakların ekonomik potansiyelinin açıklanması şeklindedir. Bununla beraber Sağır Köy-Kırkbaş Köyü boksit yataklarının, dünyanın diğer bölgelerindeki boksit yatakları ile karşılaştırmalı bir analizi sunulmuş, tüm boksit oluşum modelleriyle ilişkilendirilmiştir.

Metodolojik olarak, daha önce yapılmış akademik çalışmalar, jeolojik haritalar, laboratuvar analizleri ve sahadan elde edilen veriler kullanılarak kapsamlı bir literatür taraması gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, bölgenin jeolojik özelliklerini anlamak için yapısal ve stratigrafik verilere dayanarak detaylı bir inceleme yapılmıştır.

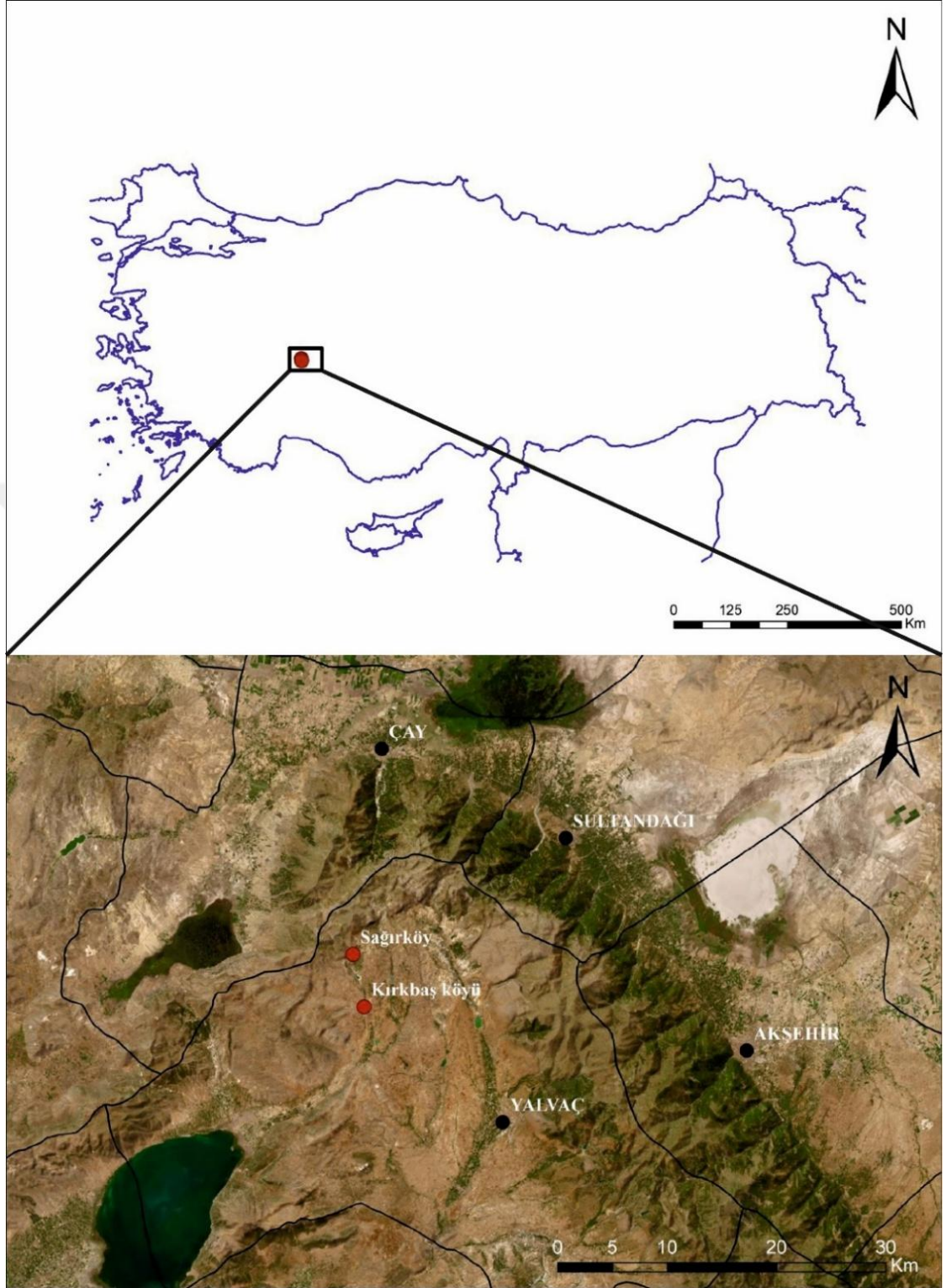
Bu çalışma, Sağır Köy-Kırkbaş Köyü (Yalvaç/ Isparta) boksit yataklarının oluşum koşullarının ve ekonomik potansiyelinin belirlenmesine yönelik bilimsel bir katkı sunmayı amaçlamaktadır.

Literatür taraması kapsamında, daha önce yakın ve uzak bölgelerde yapılmış olan benzer çalışmalara yer verilmiş, mevcut verilere yeni bulgular eklenmiştir. Çalışma alanı olan Isparta il sınırlarındaki Kırkbaş ve Sağırköy boksit yataklarına ait herhangi bir veriye rastlanmamıştır. Bu nedenle, bu ocaklar üzerinde tarafımdan yapılmış yeni analizler, boksitlerin kökenine dair daha fazla bilgi sunmakta ve bu çalışmaların özgünlüğünü ortaya koymaktadır. İlgili bu boksit yataklarının rezerv hesaplamalarına yönelik herhangi bir çalışmaya rastlanmamıştır. Aynı sahada 1 adet işletme ruhsatı gözlenmektedir. Kırkbaş ve Sağırköy boksit yatakları, bilimsel ve endüstriyel açıdan yeni bir araştırma alanı sunmaktadır.

1.2. İnceleme Alanı

Türkiye'de boksit yatakları batı ve orta Toroslar'da yaygın olarak bulunmaktadır. İnceleme alanına en yakın büyük rezervler Akseki (Antalya), Seydişehir (Konya), Çatköy, Ayrancı (Karaman) ve Isparta (Şarkikaraağaç) yörelerinde toplanmıştır. Bu bölgelerde birçok araştırmacı tarafından saptanmış çok sayıda boksit yatakları bulunmaktadır (Karadağ vd. 2006; Yalçın vd. 2025). Isparta ili Yalvaç ilçesi Kırkbaş ve Sağırköy bölgelerinin arasında bulunan inceleme alanı ve yakın çevresine ait yer bulduru haritası Şekil 1.1'de ayrıntılı olarak yer almaktadır.

Kırkbaş ve Sağırköy civarındaki çalışmaları yapılan Kuzey ve Güney açık boksit sahaları, 1:25.000 ölçekli Afyon L25-b2 paftasının doğu kesimi ile L26-a1 paftasının batı kenarında konumlanmaktadır. Yalvaç merkezinin yaklaşık 15 km kuzeybatısında, Kırkbaş köyünün 5 km kuzeybatısında, Sağırköyün ise yaklaşık 3km güneybatısında konumlanmaktadır ve iki ocak arasında yaklaşık 300m mesafe bulunmaktadır. Galerilere ulaşmak için asfalt yolun sona erdiği noktadan itibaren, Kırkbaş köyünün kuzeybatısına doğru yaklaşık 5 kilometrelik bir patika yol takip edilmiştir.



Şekil 1.1: Sağır Köy-Kırkbaşı Köyü (Yalvaç/ Isparta) yer bulduru haritası (MTA 2024; HGM 2023)

2. LİTERATÜR TARAMASI

Elmalı-Güzelsu/ Egridir bölgesinde yapılan, Toros boksitleri ve konumları isimli çalışmada, ofiyolit sorunu konusunda bir pozisyon alınması ve Permiyen boksitlerinin sağladığı kanıtlara dayanarak, ofiyolitlerin kısmen Paleozoik yaşta olduğu görüşü doğrulandı (Wipperf 1962).

Boksit yataklarının oluşumu, tropikal iklim ve kimyasal ayrışma süreçlerinin bir sonucu olarak meydana gelir. Bu süreçte, yer kabuğundaki mineraller çözünür ve alüminyum oksit mineralleri yerleşir. Boksit yatakları, genellikle laterit tipinde oluşur ve yüksek nem ve sıcaklık koşulları ile zenginleşir. Lateritleşme sürecinde, mafik kayaların kimyasal olarak ayrışması sonucunda alüminyum açısından zengin boksit mineralleri meydana gelmiştir. Özellikle doleritlerin ayrışmasıyla, kayalar içindeki silikat minerallerinin çözünerek ortamdan uzaklaşması ve geride alüminyum oksitlerin yoğunlaşması söz konusu olmuştur (Bardossy ve Aleva 1990). Jeokimyasal analizler, bu yatakların oluşumunda temel olarak gibsit, böhmit ve dijaspor gibi alüminyum oksitlerin baskın olduğunu göstermektedir. Düşük silisli boksitler, kimyasal işleme sürecinde daha az sodyum kaybı ve daha yüksek alümina kazanımı sağlar. Demir oksit oranı ise cevherin rengi ve yoğunluğu üzerinde etkili olur. Boksit yataklarının jeokimyasal özellikleri, bu yatakların oluşumunda etkili olan kimyasal ve fiziko-kimyasal süreçlerin bir yansımasıdır. Boksit mineralojisinin ve jeokimyasal bileşimlerinin analizi, yatakların alüminyum üretimi için uygun olup olmadığını belirlemede önemli bir araçtır. Boksit mineralleri genellikle yüksek alüminyum oksit (Al_2O_3) içeriği ile bilinse de, demir oksit (Fe_2O_3), silika (SiO_2) ve diğer bileşiklerin varlığı da yatakların ekonomik değerini etkileyebilir. Isparta/Yalvaç bölgesindeki boksit yatakları, yer kabuğundaki alüminyum oksit minerallerinin birikmesiyle oluşmuş olup, bu minerallerin kimyasal özellikleri, boksit yataklarının oluşum süreçlerini açıklamada önemli bir rol oynar. Gibsit, dijaspor ve böhmit mineralleri arasındaki farklar, boksit yataklarının jeokimyasal bileşiminde çeşitlilik yaratmakta ve bu çeşitlilik, boksitlerin işlenebilirliğini etkileyebilir. Ayrıca, boksit yataklarının içerdiği demir oksit, silika ve diğer bileşiklerin oranları, bu yatakların ekonomik değerini doğrudan etkileyen faktörlerdir (Bardossy 1982).

Türkiye boksitlerinde yaygın olarak gözlenen dijaspor fazı, yüksek sıcaklık ve basınç koşullarında oluştuğuna işaret ederken; tropikal bölgelerde yaygın olan gibsit fazı, düşük sıcaklıkta daha olgunlaşmamış laterit profillerini temsil etmektedir (Valeton vd. 1991).

Boksitlerde iz element dağılımı, özellikle Cr, V, Ga ve Zr gibi elementler açısından önemlidir. Isparta/Yalvaç bölgesi boksitlerinde yapılan analizlerde şu iz elementler belirlenmiştir: Krom (Cr): 120-150 ppm; Vanadyum (V): 80-100 ppm; Galyum (Ga): 50-70 ppm; Zirkonyum (Zr): 30-50 ppm. Bu elementlerin konsantrasyonları, boksitin oluştuğu kayaların kimyasal bileşimi ile doğrudan ilişkilidir. Özellikle krom ve vanadyum oranlarının yüksek olması, bu boksitlerin ultramafik kayalardan türediğine işaret etmektedir (Öncel 1995).

Isparta bölgesindeki boksit yatakları, çoğunlukla Üst Jura yaşlı kireçtaşları ile dolerit intrüzyonları arasında konumlanmaktadır. Bu yatakların oluşumu, tropikal ve subtropikal iklim koşullarında meydana gelen lateritik ayrışma süreçleriyle ilişkilidir (Tardy 1997).

Türkiye'nin güneybatısında yer alan Isparta ilinin Yalvaç ilçesine bağlıdır ve Alp-Himalaya orojenik kuşağının kuzey kolu üzerinde yer almaktadır. Bu bölge, Batı Toroslar'ın bir parçası olan Göller Bölgesi içerisinde konumlanmıştır ve jeolojik olarak oldukça karmaşık bir yapıya sahiptir. Isparta Kıvrımı olarak adlandırılan bu tektonik yapı, Anadolu levhasının Afrika ve Avrasya levhaları arasında sıkışması sonucu meydana gelmiş ve Neojen'den günümüze kadar aktif olan deformasyon süreçleriyle şekillenmiştir (Şengör ve Yılmaz 1981; Andrew ve Robertson 2002).

Boksit yataklarının başlıca bileşenleri, hidroksilli alüminyum mineralleri olan gibbsit ($\text{Al}(\text{OH})_3$), diyaspor ($\text{AlO}(\text{OH})$) ve böhmit ($\gamma\text{-AlO}(\text{OH})$)'dir. Bu minerallerin oranları, yatağın olduğu ortamın sıcaklığı, basıncı ve pH koşulları gibi faktörlere bağlı olarak değişkenlik gösterir (Valeton vd. 1991). Gibbsit, genellikle düşük sıcaklık ve nemli iklim koşullarında gelişen lateritik boksitlerde yaygındır. Diyaspor ve böhmit, yüksek sıcaklık ve daha kuru iklimlerde oluşan karstik boksit yataklarında baskındır (Yalçın vd. 2025). Bu mineralojik çeşitlilik, cevherin zenginleştirme ve işlenme süreçlerini doğrudan etkiler. Ayrıca, kil mineralleri (kaolinit), hematit, götit gibi demir oksitleri ve titanyum mineralleri (anataz, rutil) de ikincil bileşenler olarak bulunabilir (Bardossy 1982).

Yalvaç bölgesindeki boksitlerin oluşumunda, özellikle karstlaşma süreçlerinin önemli rol oynadığı görülmektedir. Bu durum, Antalya'nın Alanya ilçesindeki Masatdağı boksitleriyle benzerlik göstermektedir. Masatdağı boksitleri, Üst Permien yaşlı karbonatlı birimlerde karstik boşluklarda birikmiş olup, diyaspor, böhmit, gibsit, korundum, hematit, götit, masif demir hidroksit ve kil minerallerini içermektedir (Işık 1997; Karadağ vd. 2003).

Yalvaç bölgesindeki boksit oluşumları, özellikle karstik boşluklarda birikmiş olup, bu özellikleriyle Türkiye'nin güneyindeki Doğankuzu ve Mortaş yataklarına benzerlik göstermektedir. Bu yataklar, Üst Kretase yaşlı kireçtaşları içinde karstik boşluklarda gelişmiş olup, böhmit, hematit, pirit, markazit, anataz, diyaspor, jips, kaolinit ve smektit minerallerini içermektedir (Öztürk vd. 2002).

Jeolojik açıdan önemli bir diğer nokta, bölgedeki kayaçların eğilim ve yapılarını etkileyen büyük yapısal hareketlerdir. Bu hareketler, daha sonra boksit minerallerinin yerleşmesi için uygun koşullar yaratmıştır. Üst Kretase ve Senozoyik dönemlerde, deniz seviyesinin yükselmesi ve düşmesi gibi olaylar, karasal kayaçların denizel çökeltmelerle yer değiştirmesine ve yeni minerallerin birikmesine neden olmuştur. Bu süreçler, boksit yataklarının son halini almasını sağlamıştır (Andrew ve Robertson 2002).

Boksitlerin jeokimyasal özellikleri, bileşimlerinde bulunan ana oksitlerin yüzdeleri, iz element dağılımları ve mineralojik bileşenler açısından büyük önem taşımaktadır. Boksitlerin ana bileşenleri genellikle Al_2O_3 , Fe_2O_3 , SiO_2 ve TiO_2 olup, bu bileşenlerin miktarları yatakların oluşum süreçleri hakkında bilgi vermektedir (Yalçın 2005).

Küçükkoray boksitlerinden alınan numunelerin ana oksit bileşimlerine göre yapılan üçgen diyagram analizleri ($\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Fe}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$, $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Fe}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$, $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-TiO}_2$, $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-TiO}_2$), cevherin demir açısından zengin, silis açısından fakir olduğunu ortaya koymuştur (İlhan 2006). İlhan ve Yalçın'ın (2007) "Küçükkoray (Ayrancı-Karaman) boksit yataklarının oluşumu" isimli çalışmasında Orta Toroslar'daki

Bolkardağları içinde yer almakta olan inceleme alanının, stratigrafik istif Üst Permiyen yaşlı Dedeköy Formasyonu ile başladığını ve tabanda dolomit, üstte ise dolomitik kireçtaşları ve yer yer kalkışist seviyeleri ile temsil edildiğini saptamışlardır. Boksit yatakları, Üçtepeler formasyonundaki karbonatlı seviyelerin üzerinde oluşmuş ve bu kayaların boşluk, dolin ve mağaralarını doldurmuştur. Diyasporik özellik taşıyan cevherler, yaklaşık KB-GD doğrultusunda uzanmakta ve merccek, damar ve karstik dolgu (dolin dolgusu) şeklinde gözlenmektedir. Merccek şeklindeki en büyük mostra 50×15 m, en küçük ise $2 \times 0,5$ m boyutlarındadır. Damarlar 1–10 m uzunluğunda; dolin çapları ise 20–25 m'ye ulaşmaktadır.

Boksit yataklarının jeolojik yapısı, yerel litostratigrafik birimlere göre farklılık gösterir. Genellikle, boksitler, alüminyum içeren kayaların üzerindeki alüvyon ve lateritik topraklarla örtülür. Bunun dışında, boksit yataklarının yüzeydeki derinliği ve lokal dağılımı, çevresel etkilerle şekillenen doğal erozyon ve çözülme süreçlerinin de etkisi altındadır (İlhan 2006). Boksit yataklarının jeokimyasal analizleri, mineralojik bileşimlerinin ötesinde, elementel içeriklerini ve ekonomik potansiyellerini değerlendirmek için gereklidir. Alüminyum oksit (Al_2O_3) oranı, boksit yataklarının kalitesini belirleyen temel bir faktördür. Ayrıca, boksitlerin içindeki demir oksit (Fe_2O_3) oranı da ekonomik değerlendirmelerde önemli rol oynar, çünkü yüksek demir içeriği, boksitlerin işlenmesi sırasında zorluklar yaratabilir (Putzolu vd. 2018). Boksit yataklarında, alüminyum oksit haricinde, sıklıkla kalsiyum (CaO), magnezyum (MgO), silisyum (SiO_2) ve titanyum (TiO_2) elementleri de bulunur. Bu elementlerin oranları, boksitlerin işlenebilirliğini ve potansiyel alüminyum üretimi verimliliğini etkiler. Yüksek silisyum içeriği, boksitlerin eriyebilirliğini azaltırken, yüksek demir oksit içeriği ise alüminyum üretimi sırasında çıkan istenmeyen yan ürünlerin artmasına yol açabilir (Zhang 2014).

Boksit yataklarının ekonomik değeri, yalnızca mineralojik ve jeokimyasal özelliklerine değil, aynı zamanda bu yatakların konumuna, ulaşılabilirliğine ve çevresel koşullara da bağlıdır. Yüksek alüminyum oksit içeren ve düşük demir içeriğine sahip boksit yatakları, alüminyum üretimi için daha verimli kabul edilir. Ayrıca, boksitlerin işlenmesi sırasında çıkan yan ürünlerin işlenebilirliği de, boksitlerin ticari potansiyelini belirler (İlhan 2006). Ayrancı/ Karaman bölgesinde yapılmış olan çalışmada boksitin Geç Triyas-Erken Jura yaşlı, örtü kayacının ise Permiyen-Kretase yaşlı olduğu ve Miyosan yaşlı formasyonlarla çevrelediği saptanmıştır (Kansun vd. 2010; Yalçın ve İlhan 2013). Bolkardağı ve Ayrancı gibi sahalarda yapılan ayrıntılı çalışmalar, bu yatakların nadir toprak elementleri (REE) açısından zenginleştiğini ve stratigrafik konumlarının boksitlerin kökenini anlamada belirleyici rol oynadığını ortaya koymuştur (İlhan 2006; İlhan ve Yalçın 2007).

Yatağın mineralojik içeriği incelendiğinde baskın olarak diyaspor, üst seviyelerde gibsit ve hematit gibi fazlar gözlenmektedir. Diyaspor fazının varlığı, özellikle metamorfoz ve hidrotermal alterasyon gibi yüksek sıcaklık ve basınçlı ortamlarla ilişkili olarak yorumlanmaktadır (Öncel ve Söğüt 2008). Bununla birlikte, özellikle Al/Si oranlarının 10'dan yüksek olması, zenginleşmiş boksit profilinin önemli bir kimyasal ayrışma geçirdiğini ve rezidüel bir karakter taşıdığını göstermektedir.

Yalvaç bölgesindeki boksitlerin jeokimyasal analizleri, Al_2O_3 , Fe_2O_3 , SiO_2 ve TiO_2 gibi ana elementlerin zenginleştiğini göstermektedir. Bu durum, Seydişehir

bölgesindeki boksitlerle benzerlik arz etmektedir. Seydişehir boksitleri, Mesozoik yaşlı kireçtaşları içinde karstik boşluklarda birikmiş olup, Al_2O_3 içeriği %56-58 arasında değişmektedir (Karadağ vd. 2009). Yalvaç bölgesindeki boksitlerin Al_2O_3 içeriği de benzer değerler göstermektedir, bu da benzer jeokimyasal süreçlerin etkili olduğunu düşündürmektedir.

Jeokimyasal olarak, REE (Nadir Toprak Elementleri) konsantrasyonları ve Ga, V, Sc gibi teknoloji metallerinin izlenmesi, boksitlerin ekonomik potansiyelinin yanında köken analizine de katkı sağlamaktadır. Çin, Gine ve Hindistan boksitlerinde yüksek Ga ve Sc içeriği gözlenirken (Karadağ vd. 2009), Türkiye yataklarında bu elementlerin daha düşük konsantrasyonlarda bulunması, cevherin farklı jeokimyasal evrim geçirdiğini göstermektedir.

Jeokimyasal analizlerde Al_2O_3 değerlerinin %33,4 ile %70,7 arasında olması, sahadaki cevherin "yüksek tenörlü" olarak sınıflandırılmasını sağlamaktadır. Ayrıca Sc, Ga, V gibi kritik elementlerin iz oranlarında belirli zenginleşme paternlerinin gözlenmesi, boksitlerin sadece alüminyum değil, aynı zamanda teknoloji metalleri açısından da önemli potansiyele sahip olduğuna işaret etmektedir (Karadağ vd. 2009).

Alüminyum oksit minerallerinin daha derinlerden yüzeye doğru hareket etmesi, bu minerallerin yoğunlaşmasına ve daha büyük boksit yataklarının oluşmasına olanak tanır. Ayrıca, yer kabuğunun erime noktası ve magma hareketleri, minerallerin yer değiştirmesini sağlar. Magma hareketleri ile kayaların yer değiştirmesi ve alüminyum oksit minerallerinin daha kolay bir şekilde yüzeye çıkması sağlanır (Retallack 2010).

Yapılan literatür taramasında, boksit yataklarının oluşumunun büyük ölçüde paleocoğrafik konum, iklimsel değişim, ana kaya litolojisi ve tektonik rejimlerle yakından ilişkili olduğu görülmüştür (Bárdossy 1982; Valetton 1972). Karstik boksitlerin, özellikle karbonatlı ana kayaların çözünmesi sonucu gelişen boşluklarda silisyumdan arınmış, alüminyumca zenginleşmiş lateritik profillerin birikmesiyle oluştuğu bilinmektedir (Yalçın ve Gültekin 2011).

Boksit yataklarının oluşumu, ana kayanın litolojik bileşimi, paleoiklim şartları, tektonik rejim ve üstteki toprak oluşumu süreçlerinin birleşiminden oluşan karmaşık bir jeodinamik sistemin ürünüdür (Valetton 1972; Bardossy 1982). Karstik boksit yataklarının, özellikle Tetis kuşağı boyunca, kireçtaşı temeli üzerine gelişmiş olmaları ve neotektonik aktiviteyle ilişkili olmaları, bu özelliklerin paleoortam rekonstrüksiyonu açısından çok önemlidir (Yalçın ve Gültekin 2011).

Bolkardağı (Karaman) bölgesindeki boksit yatakları, Permien yaşlı karbonatlı birimlerde gelişmiş olup, diyor, hematit ve kil minerallerini içermektedir. Bu yataklar, Yalvaç bölgesindeki boksitlerle mineralojik olarak benzerlik göstermektedir. Ancak, Bolkardağı boksitleri, daha çok lateritik süreçlerle oluşmuşken, Yalvaç bölgesindeki boksitler karstik boşluklarda birikmiştir (Yalçın ve İlhan 2013).

Yalvaç bölgesindeki boksitlerin kökeni, hem lateritik hem de karstik süreçlerin birleşimiyle açıklanabilir. Bu durum, Bolkardağı bölgesindeki boksitlerle benzerlik göstermektedir. Bolkardağı boksitleri, hem lateritik hem de karstik süreçlerle oluşmuş olup, protolitten saprolite ve nihayetinde boksitlere geçiş gözlemlenmektedir. Boksit

mineralleri, alüminyum oksit içerikleriyle bilinir ve bu yataklar, Türkiye'nin en önemli boksit üretim alanlarından biridir. Gibsit ($\text{Al}(\text{OH})_3$) gibi yüksek kaliteli alüminyum oksit mineralleri, bu yatakların temel bileşenleridir (MYBD 2019). Boksit yataklarının mineralojik özellikleri, özellikle lateritik süreçler aracılığıyla oluşan alüminyum oksit minerallerinin birikmesiyle ortaya çıkmaktadır (Yalçın ve İlhan 2013).

Boksit oluşumu, çoğunlukla alüminyum oksit mineralleri olan gibbsit, böhmite ve diaspore minerallerinin kimyasal çökmesiyle sonuçlanır. Bu minerallerin oranları, yatakların yer aldığı çevresel ve jeolojik koşullara göre değişkenlik gösterir. Boksit yatakları, özellikle tropikal bölgelerde, geniş yüzey alanlarında yayılabilen ve derinliğine inilebilen yataklar halinde bulunur. Bu yataklar, yerel endüstriler için yüksek ekonomik değer taşır, çünkü boksit işleme tesisleri bu yataklardan doğrudan alüminyum üretimi yapabilmektedir (Zhang 2014).

Boksit yatakları, karasal ve denizel çevrelerde farklı özellikler gösterir. Karasal boksit yatakları, genellikle tropikal bölgelerde, yer yüzeyine yakın alanlarda yer alır. Bu yataklar, yüksek sıcaklık ve yağışla etkileşen laterit toprakları üzerinde gelişir. Diğer taraftan, denizel boksit yatakları, okyanus akıntılarının etkisiyle oluşur. Bu yataklar, deniz seviyesinin yükselmesiyle birlikte alüminyum oksit minerallerinin okyanuslarda birikmesiyle oluşur. Denizel boksit yatakları, genellikle deltaik ve kıyı ortamlarında bulunur ve kimyasal çözünme süreçlerinin etkisiyle zenginleşir. Karasal ve denizel boksit yataklarının oluşumunda iklim, yer şekilleri ve su koşullarının önemli rol oynadığı görülmüştür (Bing vd. 2017).

Sidibe'nin (2018) Kindia (Gine, Batı Afrika) bölgesindeki boksit yataklarının jeolojisi, jeokimyası ve kökeni isimli çalışmada, Debele ve Balaya platolarındaki jeolojik incelemeler, iki yatakta da jipsit, götite ve alüminyumlu götite gibi ana minerallerin, anataz, rutil, diaspore ve kaolinit gibi minör minerallerin bulunduğunu göstermiştir. Mikroskopik incelemelerde ise zirkon ve klastik kuvars aksesuar mineraller olarak tespit etmiştir. Jipsit, kaolinitin desilikasyonu ile, diaspore ise jipsitin dehidrasyonu sonucu oluşmuş olabileceğini, yüksek TiO_2 içerikleri, tabanda ultrabazik-bazik kayaların varlığına işaret ederek titanyumun ayrışmaya karşı dirençli yapısıyla açıklanmıştır. Balaya ve Debele boksitlerinin, Telimele Dizisi'nin Silüriyen şistlerinden türediği, sedimanter boksitlerin ise bu lateritik boksitlerin taşınımıyla oluştuğu saptanmıştır.

Boksitlerin en belirgin bileşeni Al_2O_3 'tür ve ekonomik değeri açısından en kritik oksittir. Türkiye'deki boksit yataklarında Al_2O_3 oranları genellikle %40-60 arasında değişmektedir. Isparta/Yalvaç bölgesinde yapılan analizlerde bu oran %52-57 arasında ölçülmüştür. Demir oksit, boksit yataklarının renklenmesine ve mineralojiye katkıda bulunan temel bileşenlerden biridir. Özellikle lateritik boksitlerde Fe_2O_3 miktarı %10-30 arasında değişmektedir. Isparta/Yalvaç bölgesi boksitlerinde Fe_2O_3 içeriği %18 civarındadır (Öztürk vd. 2002). Silisyum oksit içeriği, boksitin saflığını ve ekonomik potansiyelini etkileyen önemli bir faktördür. Isparta/Yalvaç bölgesi boksit yataklarında SiO_2 oranı genellikle %3-7 arasında değişmektedir. Bu oran, lateritik süreçlerin etkisini göstermektedir. Titanyum oksit, boksitlerde genellikle minör bileşen olarak bulunur. Isparta/Yalvaç bölgesindeki yataklarda TiO_2 içeriği %2 civarında ölçülmüştür. Bu değer, boksitin kökeni ve oluşum süreçleri hakkında bilgi sağlamaktadır. Antalya ve Isparta illerinde yer alan boksit yatakları, özellikle böhmite ve diaspore mineralleri açısından zengindir. Bu yataklar, daha fazla işleme gereksinimi olan boksitlerdir, ancak bu

yatakların alüminyum oksit içeriği yüksek olup, ülke ekonomisine önemli katkı sağlar. Boksit yataklarının kökenine dair geliştirilen jeokimyasal modeller, iz element analizleri ile desteklenmektedir. Isparta/Yalvaç bölgesi boksitleri üzerinde yapılan çalışmalar, bu yatakların karstik süreçlerle oluştuğunu ve tropikal iklim koşullarında geliştiğini göstermektedir. Jeokimyasal modelleme sonuçlarına göre: Alüminyum Oksit (Al_2O_3) zenginleşmesi, feldispatların yoğun kimyasal ayrışmasına bağlıdır. Demir Oksit (Fe_2O_3) oranı, oksidasyon süreçleriyle artış göstermektedir. Silisyum Oksit (SiO_2) miktarı, kuvars içeriği ve çökelme süreçlerine bağlı olarak değişmektedir. Isparta/Yalvaç bölgesi boksitlerinin jeokimyasal analizi, bu yatakların karstik süreçlerle oluştuğunu ve kimyasal bileşimlerinin bölgedeki kayalarla uyumlu olduğunu göstermektedir. Al_2O_3 oranının yüksek olması, bu yatakların ekonomik açıdan önemli olduğunu vurgulamaktadır. İz element verileri ise kayaların kökenine dair önemli bilgiler sağlamaktadır (MTA 2018).

Boksit yataklarının mineralojik, jeokimyasal ve jeolojik özellikleri, boksitlerin kalitesini, işlenebilirliğini ve ekonomik değerini belirleyen temel faktörlerdir. Bu nedenle, boksit yataklarının oluşumu, mineralojisi, jeokimyasal bileşimi ve ekonomik potansiyeli hakkında kapsamlı bir değerlendirme yapmak önemlidir. Boksit yataklarının oluşumunda jeolojik faktörler de son derece önemlidir. Yüksek tektonik aktiviteler, yer kabuğunda geniş çatlaklar ve kırılmalar meydana getirir. Bu kırıklar, yer altındaki minerallerin yüzeye ulaşmasına yardımcı olur. Ayrıca, yüksek basınç ve sıcaklık koşulları altında kayaların fiziki yapıları değişebilir ve alüminyum oksit minerallerinin daha yoğun bir şekilde birikerek boksit yataklarının oluşmasına neden olur (Putzolu vd. 2018).

Boksitlerin jeokimyasal özellikleri ayrıca yerel toprak kimyasının, iklim koşullarının ve biyolojik aktivitenin etkisiyle değişir. Boksit yatakları, çevresel faktörlerin etkisiyle sürekli olarak yeniden şekillenir ve bu durum, yatakların yerel jeolojik haritalama çalışmalarıyla belirlenmesini sağlar (Putzolu vd. 2018).

Madenli (Orta Toroslar) bölgesinde, üst kretase platform karbonatlarının stratigrafisi ve sedimentolojisi üzerine yapılan çalışmada ardışıklıkta, bentik foraminifer biyostratigrafisi ve sedimentolojik analiz yoluyla üç stratigrafik boşluk belgelenerek kalınlığı 40 metreye kadar ulaşan boksit yataklarıyla belirtilmiştir (Solak vd. 2019).

Boksitlerin TiO_2 içeriği, pigment üretimi ve ileri seramik uygulamalarında ek bir ekonomik değer yaratabilir. Ayrıca bazı yataklarda iz elementler olarak Ga, V, Cr, Ni, Zn, Sc gibi stratejik öneme sahip elementler tespit edilmiştir. Bu unsurlar, cevherin ileri teknolojiler için değerlendirilmesini mümkün kılmaktadır (MYBD 2019).

Minim-Martap (Kamerun) ve Debele-Balaya (Gine) sahalarında da son yıllarda yapılan karşılaştırmalarda köken yorumları yapılmıştır (Nyamsari ve Yalçın 2017; Sidibe ve Yalçın 2019).

Dünya genelinde, özellikle Çin'deki boksit yatakları, lateritik süreçlerle oluşmuş olup, yüksek Al_2O_3 içeriği ve düşük silis içeriği ile karakterizedir. Yalvaç bölgesindeki boksitler, mineralojik ve jeokimyasal özellikleri bakımından bu yataklarla benzerlik göstermektedir. Ancak, oluşum ortamları açısından farklılıklar bulunmaktadır; Çin'deki boksitler genellikle tropikal iklim koşullarında oluşmuşken, Yalvaç bölgesindeki boksitler daha ılıman iklim koşullarında gelişmiştir (Sun vd. 2019).

Nadir toprak element (REE) kaynakları ile ilgili yapılan çalışmada işletilmesi ve işlenmesiyle ilişkili çevresel ve sağlık sorunlarının dikkate alınması, iyon adsorpsiyon tipi yatakların işletilmesiyle ilişkili daha olumlu sonuçları belirlemiş ve Bolkardağı bölgesinde nadir toprak elementleriyle zenginleştirilmiş boksitlerin işletilmesini sağlayacak kaynakların ve işleme teknolojilerinin daha fazla değerlendirilmesi için gerekçeler ortaya koymuştur. U, Th ve HREE ve manyetit, zirkonyum ve rutil gibi ağır mineraller açısından zengin olan ve ortalama derecesi yaklaşık %0,08 TREE olan Çanaklı (Burdur) yatağı tarafından temsil edilmektedir (Öztürk vd. 2019).

Bu bağlamda, florit yataklarının jeokimyası üzerine yaptığı çalışmada Yalçın vd. (2020), düşük sıcaklıklı hidrotermal süreçlerin bazı minerallerin zenginleşmesine yol açtığını, aynı zamanda nadir toprak elementlerinin seçici mobilizasyonunda etkili olduğunu belirtmiştir. Benzer şekilde, bu çalışmada da kil minerallerinin varlığı ve kuvarsça zengin fraksiyonların korunması, düşük sıcaklıkta ve hafif alkalın pH koşullarında gerçekleşmiş bir taşınma açığa çıkış sürecine işaret etmektedir (Yalçın vd. 2020).

Sütleğen Antalya bölgesinde yapılan boksit çalışmasında yapılan analizler doğrultusunda oluşum sıcaklığı 140-200°C arasında tespit edilmiştir. (Özer vd. 2019; Atakoğlu ve Yalçın 2021). Özer'in (2020) Sütleğen/ Kaş/ Antalya bölgesi boksit yataklarının jeolojik ve jeokimyasal özellikleri üzerine yaptığı çalışmada bölgeden toplanan boksit, kireçtaşı ve terra-rossa örnekleri üzerinde gerçekleştirilen XRF, XRD, ICP-MS analizleri ve mikroskopik incelemeler sonucunda, boksitlerin mineralojik bileşiminin ağırlıklı olarak böhmit, kaolinit, hematit, gibsit, götit ve anatazdan oluştuğu belirlemiştir. Bu minerallerin varlığı, boksitlerin lateritik ayrışma süreçleriyle oluştuğunu ve karstik kireçtaşı boşluklarında biriktiğini göstermektedir (Özer Atakoğlu vd. 2021). Ayrıca, nadir toprak elementleri (REE) analizleri, boksitlerin Ce, Ga ve Co gibi elementler açısından zenginleştiğini ve bu elementlerin taşınımında kaolinit gibi kil minerallerinin rol oynadığını göstermiştir. Sütleğen boksitlerinin oluşumu, ultrabazik kayaların ayrışması sonucu oluşan lateritik malzemenin karstik kireçtaşı boşluklarına dolmasıyla gerçekleşmiştir. Bu süreçte, Al, Fe ve Ti gibi elementlerin zenginleşmesi, boksitlerin ekonomik değerini artırmaktadır.

Sütleğen boksitlerinin REE içeriklerinin istatistiksel çalışmasında $\sum \text{REE}$ konsantrasyonları $\sum \text{LREE/HREE}$ ve La/Y oranlarıyla ilişkilendirilmiştir. $\sum \text{REE}$ konsantrasyonunun $\sum \text{LREE/HREE}$ ve La/Y oranlarıyla pozitif korelasyonlu olduğu ve korelasyon katsayılarının sırasıyla 0,89 ve 0,44 olduğu bulunmuştur. $\sum \text{REE}$ konsantrasyonu ile La/Y oranı arasındaki pozitif korelasyon, boksit oluşum ortamındaki pH'ın REE'ler üzerinde pozitif bir etkiye sahip olduğu şeklinde yorumlanabilir. Cevher oluşumunun asidik koşulları altında, boksitler REE'ler açısından zenginleşmiştir (Özer Atakoğlu ve Yalçın 2021).

Yörede yüzeylenen birimler genel olarak Mesozoyik yaşlı karbonatlı istiflerden oluşmaktadır. Isparta/Yalvaç bölgesi çevresinde özellikle Üst Jura–Alt Kretase yaşlı platform karbonatları (kireçtaşı ve dolomitler) yaygın olarak yüzeylenmektedir. Bu karbonatlı istifler, boksit yataklarının oluşumuna ev sahipliği yapan ana litolojilerdir. Söz konusu karbonatlı platformlar üzerinde boksit lateritleşme ürünleri ile temsil edilen diskordanslı laterit seviyeleri gözlenmektedir. Bu durum, boksitlerin, karbonatlı zemin

üzerinde geliştiğini ve yüzeysel süreçlerle ilişkili olduğunu göstermektedir (Yalçın vd. 2021).

Payas bölgesinde yapılan, “Kıta kenarı karbonatlarındaki alkali bazalttan Ti açısından zengin boksit oluşumu” çalışmasında soğuk iklim döneminde boksit oluşumundan sonra hızlı bir transgresyon, bölgedeki Neotetis Okyanusu'nun kapanması sırasında epizodik ofiyolitik nap yüklenmesiyle ilişkili olan kıta kenarının çökmesiyle açıklanabilir (Öztürk vd. 2021).

Beyşehir Suğla havzasında yapılan, tektonik ve jeolojik evrim ile alakalı çalışmada, bölgesel iklim, büyük ölçekli tektoniklere (yani orografik bariyer gelişimi) jeomorfik tepkiyle tutarlı bir şekilde değişmiş gibi görünse de, Beyşehir-Suğla havzası çevredeki karbonat temel kayaçlarında karstik özelliklerin varlığıyla hidrolojik kapanmadan korunduğu görülmektedir (Gülbüz vd. 2021).

Türkiye boksit cevherinin radyolojik özellikleri ile ilgili çalışmada hesaplanan ortalama radyum eşdeğer aktivite değeri $177,4 \text{ Bq kg}^{-1}$, havada emilen ortalama gama doz hızı $78,8 \text{ nGy h}^{-1}$, buna karşılık gelen ortalama yıllık etkili doz değeri $96,6 \text{ } \mu\text{Sv y}^{-1}$ ve ortalama yaşam boyu kanser riski $3,85 \times 10^{-4}$ olarak belirlenmiştir (Altıkulaç 2022)

Ağır betonun nükleer kalkan performansına yönelik çalışmada, çimentoda kullanılan çimento tipinin etkisinin araştırılması ile ilgili kalsiyum alüminat çimentosu (CAC), Portland çimentosundan (OPC) kimyasal, fiziksel ve mineralojik özellikler farklıdır. Portland çimentosunun temel bileşenleri kil ve kireç taşıdır. CaO ve SiO_2 bu hammaddelerden elde edilen birincil oksitlerdir. Alümina kaynağı olan boksit, kalsiyum alüminat çimentosu üretiminde hammadde olarak kullanılır (Kilicoglu vd. 2023)

Milas (Muğla) bölgesi diyasporlara ait gemolojik özellikler çalışılmıştır. Bu çalışmada elde edilen verilere göre Milas-Sodra bölgesinde metaboksit oluşumları içerisinde ve metaboksit kireçtaşı kantağına yakın altere zonlarda kloritoid ve muskovit ile birlikte diyaspor kristallerini olduğu belirlenmiştir. Petrografik analizler sonucunda kayaçlar “muskovit kuvarşist”, grano-lepidoblastik dokuya sahip “kuvarşist”, lepidoblastik dokuya sahip “mika kuvarşist”, lepidoblastik dokuya sahip “fillit” ve nematoblastik dokuya sahip “klorit-epidot fels” olarak bulunmuş ve sınıflandırma yapılmıştır. Diyaspor kristallerinin ekonomik taş sınıfında yer aldığı öngörülmüştür (Kinacı ve Ozturk 2023).

Tavşanlı bölgesi metaboksit yataklarının diyaspor oluşumları ile ilgili çalışmada damarlar kırılma deformasyonu ile breşleşmiş ve kırık mineraller damar oluşumunun son aşamasında granoblastik kalsit ve ankerit tarafından çimentolanmıştır. Yüksek P metamorfizmasının son aşamasında Al açısından zengin sıvıların kayma bölgelerine göçüyle diyaspor oluşumunun ilişkili olduğunu gösterilmektedir (Gündoğan 2022).

Doğanşehir (Malatya) boksitlerine ait nadir toprak elementleri ile ilgili yapılan çalışmada boksitlerin ultrabazik ve bazik kayaçlardan kaynaklandığını ortaya konulmuştur. Mineralojik ve jeokimyasal verilere dayanarak, Doğanşehir boksitlerinin kaynakları bazik ila ultrabazik kayaçlar olduğu anlaşılmıştır (Kara 2023).

Öte yandan, lateritik boksit yatakları, özellikle Gine, Hindistan ve Brezilya gibi ülkelerde, sıcak ve nemli tropikal iklim koşullarında gelişmiş laterit profillerinde yaygın olarak gözlenmektedir (USGS 2023).

Ayrancı bölgesi boksit yataklarının ve yakın civarının jeolojik özellikleri ile ilgili çalışmada Üst Permien yaşlı Dedeköy formasyonu içerisinde boksit yatakları açıkça görülmektedir. Saha çalışmalarına göre boksitler Geç Triyas - Erken Jura aralığında, Üst Permien yaşlı karbonat kayalar ve Alt Triyas yaşlı şeyl - kumtaşı - kireçtaşı birimleri üzerinde oluşmuş ve daha sonra karbonat kayaları içindeki mağaralara ve dolinlere çökmüştür. Boksitlerin dolomitlerin üstünde ve kireçtaşlarının altında, içinde ve üstünde yer almasının karbonat kayalarının farklı davranışlarından kaynaklandığı düşünülmektedir (Yalçın ve Çopuroğlu 2023).

Tropikal bölgelerdeki yoğun yağışlar ve sıcak iklimler, bu minerallerin çözünmesini hızlandırarak boksit oluşumunu teşvik eder. Bu nedenle, boksit yatakları genellikle tropikal iklim kuşağı ile ilişkilidir. Ayrıca, boksit yataklarının oluşumu, jeolojik devinimler ve magma aktiviteleri gibi süreçler tarafından etkilenebilir. Bölgenin tektonik yapısı, bu yatakların oluşumu üzerinde belirleyici bir faktördür. Yalvaç ve çevresi, Aksu-Fethiye hattı üzerinde yer almakta olup, bu alanın neo-tektonik hareketler ile şekillendiği bilinmektedir. Alüminyum mineralleri, yer kabuğundaki silikat minerallerinin çözünmesi sonucu lateritik topraklar formunda birikmiştir. Bununla birlikte, bölgedeki boksit yataklarının dağılımı, yerel tektonik yapılar, jeolojik kırıklar ve başkalaşım süreçleri ile doğrudan ilişkilidir (Yalçın vd. 2025).

Dinek, Şarkikaraağaç-Isparta bölgesinde yapılan Sultandede Metasedimanter Kayaların Jeokimyası, Kökeni ve Tektonikleri ile ilgili çalışmada, metasedimanter kayaların oksik ortamı ve disoksik, anoksik ve öksinik koşulları altında biriktiğini göstermektedir (Cengiz vd. 2025)

Boksitler, genellikle alümina (Al_2O_3) açısından zenginleşmiş lateritik veya karst kökenli kayalardır ve başlıca diyor, böhmite, gipsit gibi alüminyum hidroksit minerallerinden oluşurlar. Bu mineraller, sıklıkla kuvars, hematit, götit, anataz ve kalsit gibi aksesuar mineraller ile birlikte bulunur (Pflug 1961; Bardossy 1982).

Boksitlerin mineralojik yapısında, yer yer boşlukları dolduran ince taneli kuvars ve kalsit kristalleri gözlenebilir. Özellikle karst kökenli boksitlerde, boşluklarda gelişmiş öz şekilli (euhedral) veya yarı öz şekilli kuvars kristallerine ve mozaik doku sergileyen mineral topluluklarına rastlanmaktadır. Bu tür mineralojik özellikler, boksitin oluşum koşulları ve diyorenez süreçleri hakkında önemli bilgiler sunmaktadır (MTA 2022).

İnceleme alanına oldukça yakın bir konumda bulunan Sücüllü/ Yalvaç “Lateritik Fe Ve Al Oluşumlarının Jeolojik, Mineralojik Ve Jeokimyasal Özellikleri Ve Ekonomik Potansiyelinin Araştırılması” isimli çalışmada sahadaki lateritik kuşak, Geç Jura’da sıcak, nemli, tropikal iklim koşullarında geliştiği. Bölge Paleozoik’ten sonra düzleşmiş ve Geç Jura’da sığ-lagün ortamından sonra oluşan karasal koşullar lateritleşme süreci için uygun bir ortam sağladığı saptanmıştır. Sahadaki lateritik oluşukların ana kayacın üzerinde yer alması ile lateritleşme sürecinde düz bir morfoloji vardır. Bu lateritler, Beyşehir-Hoyran Ofiyolitik istifin içindeki doleritlerin ayrışması ile oluşmuştur. Bunun yanı sıra, bölgedeki Hacılabaz karbonatları ve Sultandede epimetamorfikleri laterit topraklarına element, iyon ya da mineral katkısı sağlamıştır. Karbonatların kırık, boşluk ve katman aralarına

yerleşmiştir. Ayrıca, doleritlerle yer yer karmaşık görünüm sunarken, yer yer de dolerit üzerinde bulunduğu belirlenmiştir (Coşkun 2012).

Süçüllü bölgesindeki lateritik boksit yatakları, Jura yaşlı karbonat platformu üzerinde yer alan alkali bazalt lavları üzerinde gelişmiştir. Ortalama %26,04 Al_2O_3 , %19,77 Fe_2O_3 ve %29,48 SiO_2 içeren bu yataklar; kil mineralleri, Fe-oksihidroksitler, Al açısından zengin mineraller ve çeşitli silikat-karbonat minerallerinden oluşmaktadır. Üst Kretase’de sıcak-nemli tropikal iklim koşullarında oluşan lateritik boksitler, daha sonra erozyonla deniz ortamına taşınarak dolomitik kireçtaşları üzerinde yeniden çökelmiştir (Cengiz vd. 2025).

“Yarıkkaya (Yalvaç-Isparta) Kömür Yataklarıyla İlişkili Killerin Mineralojik ve Jeokimyasal Özellikleri” isimli çalışmada kalınlıkları 5-15 m arasında değişmekte olup, Yarıkkaya-3 lokasyonunda diğer litolojilerle arakatkılı olarak en fazla 40 m kalınlığa sahiptir. Kil formasyonunun mineral parajenezi başlıca illit, kaolinit, klorit ve az miktarda smektitten oluşmaktadır. SiO_2/Al_2O_3 ve Fe_2O_3/K_2O oranları, Yarıkkaya kil örneklerinin ağırlıklı olarak şeyl, daha az oranda grivak ve kuvars arenitten oluştuğunu göstermektedir. Ortalama Al_2O_3/TiO_2 oranları, Yarıkkaya kil örneklerinin ara kaynak kaya olduğunu göstermektedir. Cu, Ba, Pb, Zn, Co, Zr, Ga, Rb, V PAAS'a göre oldukça düşük, sadece Ni içerikleri daha yüksektir. İncelenen killerin jeokimyasal içerikleri, Seydişehir formasyonu kayaçlarından türeyen kırıntıların Yarıkkaya gölssel tortullarına malzeme verebileceği görülmüştür. (Cengiz vd. 2020).

Boksitler, bileşimlerinde farklı oranlarda bulunan alüminyum oksit ve hidroksit mineralleri ile karakterize edilmektedir. Genellikle gibsit [$Al(OH)_3$], böhmit [$\gamma-AlO(OH)$], diyaspor [$\alpha-AlO(OH)$] ve korund (Al_2O_3) minerallerinden oluşan karışımlar şeklinde bulunurlar. Çizelge 3.1’de, boksitlerin başlıca mineral bileşimleri özetlenmiştir. Bu minerallerin varlığı ve oranları, boksitlerin genetik kökeni, oluşum koşulları ve ekonomik değerleri açısından önemli bilgiler sunmaktadır (Yalçın ve İlhan 2013).

Çizelge 2.1. Boksitlerde yaygın olarak bulunan mineraller

Mineral	Kimyasal Formül	Kristal Yapısı
Gibsit	$Al(OH)_3$	Monoklinik
Böhmit	$\gamma-AlO(OH)$	Ortorombik
Diyaspor	$\alpha-AlO(OH)$	Ortorombik
Korund	Al_2O_3	Hegzagonal

Boksitlerin ekonomik değerini belirleyen başlıca unsurlar boksit mineralleridir. Bunlar gibbsit, böhmit, diyaspor ve korund şeklindedir. Gibbsit, en yaygın boksit mineralidir ve su içeriği yüksek olup, genellikle düşük sıcaklıkta çözünebilen bir mineraldir. Bu mineralin çözünmesi daha hızlıdır ve alüminyum oksit içeriği daha yüksektir. Alüminyum oksit minerali olarak boksit yataklarının çoğunda bulunur. Böhmit, daha yüksek sıcaklıklarda gelişen boksit mineralidir ve tropikal iklimlerde oluşur. Bu mineral, boksit yataklarında yaygın olarak görülür. Diyaspor, yüksek sıcaklıkta ve basınçta oluşan boksit mineralidir. Diğer mineral Boksit minerali, alüminyum üretiminde kullanılırken, aynı zamanda silika (SiO_2) ve demir oksit (Fe_2O_3) gibi elementler de içerebilir. Bu özellikler, boksit yataklarının ekonomik değerini etkiler. Bu çalışmada elde edilecek mineralojik ve jeokimyasal veriler, Sağırköy ve Kırkbaş

köyleri çevresindeki boksit oluşumlarının kökenine yönelik yeni bulgular sunacak ve bölgedeki boksit yataklarının ekonomik potansiyelini değerlendirmeye yönelik temel bilgiler sağlayacaktır (Yalçın vd. 2025). Çizelge 3.2’de, boksitlerin kimyasal ve fiziksel özellikleri özetlenmiştir (Klein ve Dutrow 2007).

Çizelge 2.2. Boksitlerin kimyasal ve fiziksel özellikleri

Mineral Adı	Kimyasal Formülü	Sertlik	Yoğunluk
Gibsit/Hidrarjilit	$\text{Al}(\text{OH})_3$ veya $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$	2,5-3	2,4
Böhmit	AlOOH veya $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$	3,5-4	3,01
Diyaspor	HAlO_2 veya $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$	6-7	3,3-3,5
Korund	Al_2O_3	9	4

Boksit yataklarının özellikleri, oluşum süreçlerine göre değişir. Genellikle lateritik kayaçlarda ve tropikal iklimlerde gelişen boksit yatakları, yoğun kimyasal ayrışma (aşındırma) süreçlerinin bir sonucudur. Bu süreçler sırasında, silika ve demir oksit gibi bileşikler çözünür ve alüminyum oksit mineralinin oluşumuna zemin hazırlar. Boksit yatakları, yüksek oranda alüminyum oksit (Al_2O_3) içermeli ve bu özellik, boksitin alüminyum üretimindeki değerini belirlemektedir. Boksit yatakları, tropikal bölgelerde ve laterit tipi formasyonlarda en yaygın olarak görülür. Bu yataklar, dünya genelinde alüminyum üretiminin yaklaşık %95’inin kaynağını oluşturur. Bununla birlikte, boksit yataklarının özellikleri, yerel iklim koşulları ve jeolojik süreçler ile büyük oranda şekillenir ve yoğunlukla yeniden kristalleşme, dönüşüm ve çözünme süreçleriyle belirlenir. Boksitlerin genel mineral bileşimi, üretim sürecinde yüksek Al_2O_3 içeriği sağlar ve bu özellik, boksitlerin ekonomik değerini doğrudan etkiler (Yalçın vd. 2025).

Boksit, başlıca alüminyum cevheri olup, genellikle lateritik ve karstik ortamlarda oluşan rezidüel bir tortul kayaçtır. Boksit yataklarının oluşumu iki temel jeolojik süreçle ilişkilidir: lateritleşme süreci ve karstlaşma süreci. Lateritleşmenin ilerlediği bölgelerde, boksit yatakları ve lateritik topraklar oluşabilmektedir. Bu süreçler sonucunda lateritik boksitler ve karstik boksitler meydana gelir. Atmosferdeki CO_2 ’nin etkisiyle karbonatlı kayaçlar çözünerek karstik çukurlar ve boşluklar oluşturur. Lateritleşme, tropikal ve subtropikal iklimlerde kayaçların uzun vadeli kimyasal ayrışma süreçlerinden geçerek belirli bileşenlerin uzaklaştırılması ve geri kalan minerallerin zenginleşmesiyle meydana gelen bir oluşumdur. Bu süreç boyunca, kayaç içindeki silikat mineralleri suyla tepkimeye girerek çözünür ve ortamdan uzaklaşırken, geride alüminyum oksitler, demir oksitler ve diğer çözünemeyen mineraller yoğunlaşır. Lateritleşme, dünyadaki en önemli boksit yataklarının oluşum süreçlerinden biridir. Boksit, alüminyum üretiminin temel hammaddesi olup küresel madencilik sektöründe büyük bir ekonomik değere sahiptir. Lateritik profiller, jeolojik geçmişteki iklim koşulları hakkında önemli bilgiler sunar. Özellikle eski sıcak ve nemli dönemlerin kanıtı olarak kayaçlarda korunmuş lateritik yapılar, paleoiklim analizlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır (Bárdossy ve Aleva 1990).

Karstik boksit yatakları, özellikle karbonatlı kayaçların (kireçtaşı ve dolomit) kimyasal çözünmesine bağlı olarak gelişen karst topografyasında, karst boşluklarında ve yüzeysel çökellerde biriken Alüminyum materyallerin yoğunlaşması sonucu meydana gelir (Pohl 2011). Karstik tip yataklar, çözünen karbonatların yerini alan ve daha az hareketli olan Al-hidroksit minerallerinin (gibsit, böhmit, diyaspor) birikimiyle

karakterizedir. Karstik boksit yatakları, genellikle Üst Permiyen'den Alt Kretase'ye kadar olan jeolojik dönemlerde yoğunlaşmış olup, Akdeniz çevresi, Balkanlar ve Anadolu'nun batı ve güney kesimlerinde yaygın olarak gözlenmektedir (Bárdossy ve Aleva 1990; Yalçın ve Gültekin 2001). Karstik boksitlerin oluşumunda, karbonatlı ana kayaların tropikal-sıcak nemli iklim koşullarında yüzeysel ve derinlik çözünmesi (epigenetik ve hipogenetik karstlaşma) ile karst boşluklarının gelişmesi kritik rol oynar. Bu süreçte silika, alkali ve alkali toprak elementleri ortamdan uzaklaşırken, alüminyum ve demir gibi çözünmesi zor elementler rezidüel olarak zenginleşir (Pohl 2011). Boksitlerin mineralojisi ve kimyası, ana kayaç tipi, iklim koşulları ve diyajenez süreçlerine bağlı olarak çeşitlilik gösterebilir (Yalçın ve Gültekin 2001). Türkiye'nin karstik boksit potansiyeli, Alp-Himalaya orojenik kuşağında yer alan ve geniş karbonat platformlarına sahip Toros Kuşağı boyunca önemli rezervlere sahiptir. Seydişehir (Konya), Akseki (Antalya), Alanya-Gazipaşa (Antalya) ve Yalvaç (Isparta) bölgelerinde ekonomik öneme sahip boksit yatakları raporlanmıştır (Öncel 1995). Bu yataklar genellikle Jura-Kretase yaşlı kireçtaşı birimleri içinde karst boşluklarında merccek, damar ve düzensiz cebrik şekillerde bulunmaktadır. Isparta-Yalvaç havzasında çevresinde yüzeyleyen karstik boksit oluşukları, bölgenin önemli yerel kaynakları arasındadır. Ön çalışmalar, bu yatakların Al_2O_3 bakımından zenginleşmiş, silis içeriği düşük ve demir oksitlerle birlikte hematit/götüt gibi demir minerallerince desteklenmiş olduğunu ortaya koymuştur. Bu alanlarda Üst Kretase yaşlı karbonat istifleri içinde gelişmiş karstik boşluklarda, Alüminyum lateritik materyalin karst dolgu malzemesi olarak biriktiği gözlenmiştir. Boksitler, mineralojik olarak ağırlıklı olarak böhmite, dijaspor ve gibsite mineralleri ile hematit, götüt ve kil mineralleri içermektedir. Ayrıca, bölgesel tektonizma ve karstlaşma süreçleri, bu boksitlerin yataklanma tarzı ve zenginleşme potansiyelini önemli ölçüde etkilemiştir. Bu bağlamda, bölgede boksitlerin köken araştırmaları ve ekonomik değerlendirme açısından detaylı jeokimyasal ve mineralojik analizlerle çalışılması gerekli olduğu anlaşılmıştır (Öncel ve Söğüt 2008). Karstik boksit yataklarında Al_2O_3 içeriği genellikle %45-60 aralığında olup, SiO_2 ve Fe_2O_3 içeriği ekonomik zenginlik için kritik parametrelerdir (Pohl 2011).

Karstik boksit yatakları, karbonatlı kayalar üzerinde gelişen lateritleşme ve çökme süreçleri sonucunda meydana gelir. Bu süreç şu aşamalardan oluşur: Tropikal iklim koşulları, boksit yataklarının oluşumunda en belirleyici faktörlerden biridir. Yüksek sıcaklıklar ve nem oranları, kimyasal ayrışma süreçlerini hızlandırarak kayalarda bulunan silikat minerallerinin çözünmesini sağlar. Alüminyum, özellikle kaolinit ve gibsite gibi minerallerin çözünmesinin ardından alüminyum oksit minerallerinin birikmesi ile boksit oluşumu başlar (Bardossy 1982). Hidrotermal süreçler, boksit oluşumunda önemli bir rol oynar. Sıcak sıvılar, yer kabuğunun derinliklerinden yüzeye doğru hareket ederken, alüminyum içeren kayalarla etkileşime girer ve bu süreç alüminyum minerallerinin zenginleşmesine yol açar. Bu hidrotermal aktivite genellikle daha kuru iklimlerde ve volkanik bölgelerde görülür. Yüksek sıcaklıklara sahip hidrotermal sıvılar, alüminyum oksit minerallerinin çözünmesine ve bu minerallerin yüzeyde birikmesine neden olur. Bu tür yataklar, boksitlerin en derin katmanlarında bulunabilir ve genellikle alüminyum zenginleşmesinin hızlandığı yerlerdir. Bu tip yataklar genellikle geniş hidrotermal alanlarda oluşur ve mineralojik olarak diğer boksit yataklarından farklılıklar gösterebilir (Bing vd. 2017; Putzolu vd. 2018). Tortul süreçler, boksit yataklarının oluşumunda etkili olan bir başka mekanizmadır. Alüminyum içeren kayalar, zaman içinde yüzeyde aşındırılır ve erozyonla taşınarak göl, nehir veya deniz ortamlarında birikir. Bu süreçler

sırasında, alüminyum oksit mineralleri çökeltir ve bu çökeltir zamanla boksit yataklarını oluşturur. Bu tip yataklar, genellikle denizel ve deltaik ortamlarda yer alır. Alüminyum oksit mineralleri, bu ortamlarda çökeltme süreçleriyle birikir. Zaman içinde bu çökeller tortul kayalara dönüşerek boksit yataklarını meydana getirir. Deltaik çevrelerde, alüminyum oksitlerin yoğun birikmesi, boksit minerallerinin kristalleşmesini sağlar (Bing vd. 2017). Ayrıca, bölgedeki boksitlerin REE (nadir toprak elementleri) ve TiO_2 içeriği gibi ekonomik yan ürün potansiyelleri de son yıllarda araştırmalara konu olmaktadır (Yalçın ve Gültekin 2001).

İleri seviyede lateritleşmiş topraklar, besin maddelerinin büyük oranda kaybolması nedeniyle genellikle tarıma uygun değildir. Ancak belirli koşullarda lateritik topraklar, demir ve diğer değerli elementler bakımından zenginleşerek ekonomik anlamda faydalı olabilir. Erozyonla taşınan boksitik malzemeler, bu çöküntü alanlarında birikir ve zamanla konsolide olur. Karstik boşluklarda biriken boksitler, yeraltı su seviyesine bağlı olarak farklı mineral fazlarına dönüşebilir (Tardy 1997). Lateritleşme, tropikal iklimlerdeki yoğun yağışlar ve yüksek sıcaklıklarla hızlanan kimyasal ayrışma sürecidir. Bu süreç, başlangıçta kayalardaki feldspat, mika gibi silikat minerallerinin, özellikle kalsiyum ve magnezyum bileşiklerinin çözünmesine yol açar. Çözünmeyen alüminyum mineralleri, yavaşça yer yüzeyine yakın bölgelerde yoğunlaşır. Özellikle gibbsit ($Al(OH)_3$) ve diyaspore ($AlO(OH)$) mineralleri, daha fazla çözünmeyen alüminyum bileşiklerinden oluşur ve boksit yataklarını oluşturur (Retallack 2010). Laterizasyon, boksit oluşumunun temel süreçlerinden biridir. Tropikal iklim koşullarında, yüksek sıcaklık ve nemin etkisiyle silikat kayaların kimyasal ayrışması başlar. Bu ayrışma, silika minerallerinin çözünmesini ve alüminyumun oksit formunda birikmesini sağlar. İlgili minerallerin başında gibbsite, böhmite ve diaspore gelir. Bu mineraller, alüminyum oksit bileşiklerinin kristalleşmesi ve birikmesiyle boksit yataklarını oluşturur. Boksit oluşumunun gerçekleştiği ortamlar genellikle yüksek yağışlı bölgeler olup, bu ortamlar, kayaların zamanla aşındığı ve alüminyum oksit minerallerinin çözüldüğü yerlerdir (Putzolu vd. 2018). Lateritleşme süreci, birçok faktöre bağlıdır; bunlar arasında yer şekilleri, hidrolojik koşullar ve sıcaklık önemli rol oynar. Boksit yataklarının çoğu, granit ve andezit gibi silikat kayaların ayrışması ile başlar. Bu kayalar, zaman içinde fiziksel ve kimyasal olarak ayrılarak boksit minerallerini meydana getirir. Tropikal bölgelerde bu süreç hızlanır, çünkü yüksek sıcaklık ve nem, minerallerin çözünme hızını artırır. Sonuç olarak, lateritleşme, yüksek alüminyum içeriğine sahip toprakların oluşmasına yol açar ve bu topraklar, zamanla boksit yataklarına dönüşür (İlhan 2006; Putzolu vd. 2018). Laterit formasyonları, yer kabuğundaki silikat minerallerinin kimyasal ayrışma süreci sırasında ayrışması ve alüminyum oksitlerin çökmesiyle gelişir. Bu minerallerin boksit formunda birikmesi, alüminyum üretimi açısından büyük ekonomik değere sahiptir. Çoğunlukla, boksit yatakları lateritik kayalardan türemekte ve bu yataklar genellikle yüksek oranda alüminyum oksit (Al_2O_3) içerir. Alüminyum oksit içeriği, boksitin kalitesini ve ekonomik değerini doğrudan etkileyen faktörlerden biridir. Boksit yataklarının oluşumu, bu kimyasal ve fiziksel etkileşimlerin uzun yıllar devam etmesi sonucu yer kabuğunda belirli alanlarda boksit minerallerinin birikmesi ile sonlanır. Alüminyum oksit mineralleri sıcaklık, nem ve kayaların bileşimi gibi etkenlere bağlı olarak farklı oranlarda birikir. Bu süreç, tropikal ve subtropikal bölgelerde, özellikle tropikal ormanların hakim olduğu alanlarda sıkça görülür (Sverdrup vd. 2015).

Boksitleşme, lateritleşme sürecinin ileri aşamalarında gerçekleşen özel bir durumdur. Bu mekanizma aşağıdaki temel aşamalardan oluşur: **Silikat Ayrışması:** Ana

kayadaki silikat mineralleri, asidik yağmurlar ve toprağın organik bileşenleri tarafından ayrıştırılır. Kayaçların, atmosfer koşullarına uzun süre maruz kalması sonucunda fiziksel ve kimyasal olarak bozunmasıyla başlar. Bu aşamada, feldispat gibi silikat mineralleri, hidrotermal veya meteorik suların etkisiyle yavaş yavaş çözünerek dönüşüme uğrar (Tardy 1997). Tropikal ve subtropikal bölgelerde yoğun yağışın etkisiyle kayaçlardan sodyum (Na), potasyum (K), kalsiyum (Ca) ve silisyum (Si) gibi mobil elementler taşınarak ortamdan uzaklaştırılır. Özellikle feldispatların kaolinit minerallerine dönüşmesi ve buna bağlı olarak silika kaybı bu aşamada hız kazanır (Bárdossy ve Aleva 1990). Ayrışma sırasında silika (SiO_2), özellikle yer altı suları ile mobilize edilerek sistemden uzaklaştırılır. Bu silika giderimi, boksitlerin saflığını artıran en önemli jeokimyasal mekanizmadır. Bölgedeki boksit yatakları, genellikle yüksek Al_2O_3 içeriği ile dikkat çeker. Bu yüksek alümina konsantrasyonu, özellikle kayaçların tropikal iklim koşullarında uzun süreli kimyasal ayrışmaya maruz kalmasıyla oluşur. Bu süreçte, feldspat gibi alüminyum içeren mineraller, yüzeysel koşullar altında ayrışarak gibsit ve böhmit gibi hidratlı alüminyum minerallerine dönüşür (Yalçın vd. 2025).

Alüminyum Zenginleşmesi: Silisyum, kalsiyum, magnezyum ve potasyum gibi mobil elementler yıkanarak uzaklaşır, geriye nispeten hareketsiz olan alüminyum ve demir oksitler kalır (Nahon 1991). Ortamdan silisyum uzaklaştırıldıkça, geride nispeten daha kararlı olan demir oksitler (hematit, götit) ve alüminyum oksitler (gibsit, böhmit, dijaspor) yoğunlaşarak birikmeye başlar. Bu süreç, ekonomik değeri olan boksit yataklarının oluşumu için oldukça önemlidir (Tardy 1997).

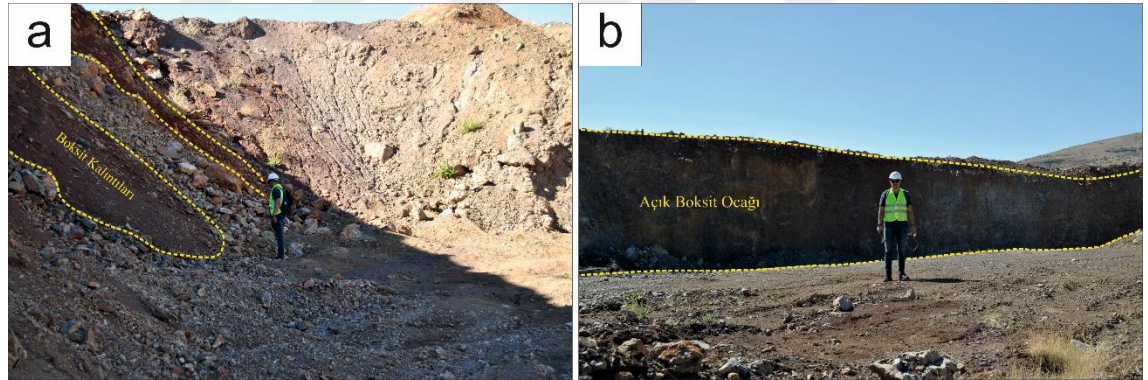
Gibbsit, Böhmit, TiO_2 ve Fe_2O_3 Oluşumu: Alüminyum oksit ve hidroksit formları (gibbsit, böhmit ve dijaspor), uygun pH ve su koşullarında kristalleşir (Bardossy 1982). Boksit yataklarında sıkça gözlenen bir diğer durum ise demir oksitlerin (Fe_2O_3) ve titanyum dioksit (TiO_2) gibi elementlerin konsantrasyonlarının artmasıdır.

Rezidüel Zenginleşme: Tekrarlayan çökeltme ve ayrışma süreci, boksit yataklarının kalınlığını ve derinliğini artırır. Zaman içerisinde lateritik profillerin gelişimi gözlemlenir. Genellikle yüzeyde kırmızımsı kahverengi demir oksit bakımından zengin bir tabaka oluşurken, alt seviyelerde alüminyum açısından daha zengin olan boksitik zonlar gelişir. Bu tabakalaşma, maden yataklarının keşfi ve değerlendirilmesi açısından önem arz etmektedir (Bárdossy ve Aleva 1990).

3. MATERYAL VE METOT

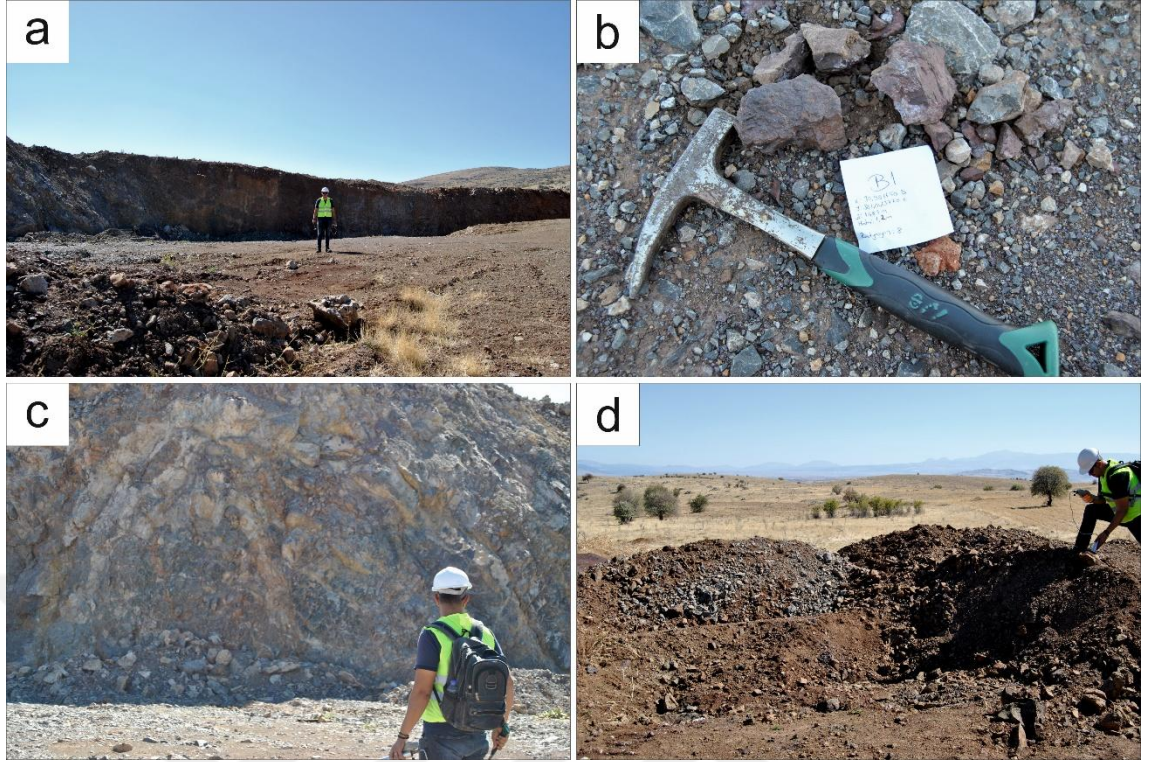
3.1. Arazi Çalışmaları ve Örneklem

2024 Eylül ayının sonlarında, Isparta iline bağlı Kırkbaşı ve Sağırköy bölgeleri arasında kalan alanda arazi çalışmalarımız başarıyla tamamlanmıştır. Bu süreçte, boksit yataklarının detaylı incelenmesi amacıyla toplamda 30 boksit cevheri ve 30 yan kayaç numunesi olmak üzere toplam 60 numune GPS ile enlem, boylam ve yükseklik verileri kaydedilerek derlenmiştir. Yapılan saha çalışmasında olabildiğince profiller boyunca numune alınmasına dikkat edilmiştir. XRF analizi 30 boksit ve 30 yan kayaç olmak üzere toplam 60 adet numuneye uygulanmıştır. XRD analizi 8 boksit 2 yan kayaç olmak üzere toplamda 10 numuneye uygulanmıştır. FT-IR analizi 3 boksit 2 yan kayaç numunesine olmak üzere toplamda 5 adet numuneye uygulanmıştır. SEM Taramalı elektron mikroskobu analizi 4 boksit 2 yan kayaç olmak üzere toplamda 6 numuneye uygulanmıştır. ICP-MS analizi 11 adet boksit 5 adet yan kayaç olmak üzere toplamda 16 adet numuneye uygulanmıştır. Numune derleme sürecinde, her bir örnek için lokasyon koordinatları, yükselti değerleri, tabaka doğrultu ve eğim yönü bilgileri gibi temel jeolojik veriler kaydedilmiştir. Ayrıca, sahada taşınabilir cihazlar kullanılarak radyasyon ölçüm değerleri alınmıştır. Toplanan tüm numuneler, uygun şekilde etiketlenip numune poşetlerine yerleştirilerek bölümümüzün Maden Yatakları Laboratuvarına taşınmıştır. Bu kapsamlı arazi çalışması, saha verilerinin laboratuvar ortamında yapılacak analizlerle desteklenmesi amacıyla titizlikle planlanmış ve gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.1. a) Kuzey açık boksit ocağı; b) Güney açık boksit ocağı

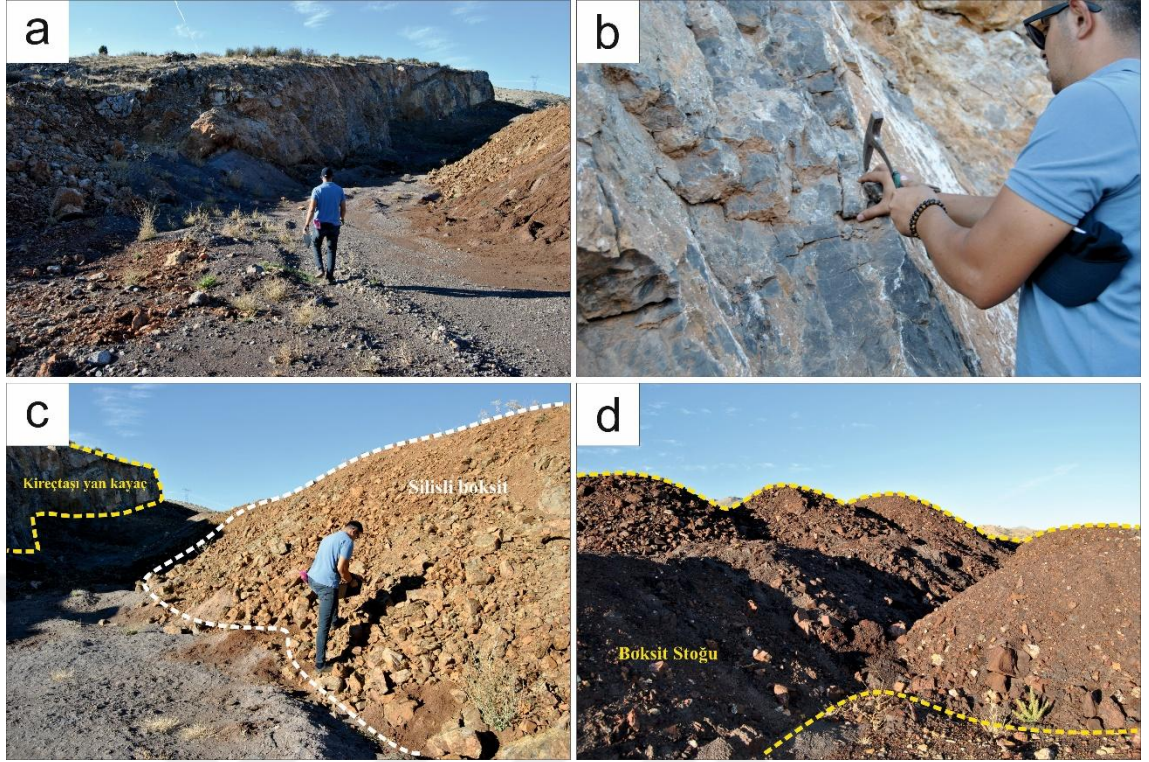
Bu tez çalışması kapsamında, Isparta ili Yalvaç ilçesi Sağır Köy ve Kırkbaşı Köyü sahalarında yer alan boksit yatakları üzerinde kapsamlı büro, arazi ve laboratuvar çalışmaları yürütülmüştür. Sahada gerçekleştirilen detaylı jeolojik gözlemler ve örneklemeler sonucunda elde edilen bulgular bu başlık altında ayrıntılı şekilde sunulmuştur. Sağır Köy ve Kırkbaşı Köyü kuzey ve güney açık boksit ocaklarına ait genel görünüm ve çalışma alanlarını gösteren fotoğraflar Şekil 3.1’de verilmiştir.



Şekil 3.2. a) Güney açık boksit ocağı; **b)** Boksit numunesine ait fotoğraf **c)** Yan kayaç mostra fotoğrafı **d)** Boksit kalıntılarına ait fotoğraf

İkinci lokasyon olan Kuzey açık boksit ocağına ait fotoğraflar Şekil 3.3’de yer almaktadır. Kuzey açık barit ocağı konum olarak Güney açık barit ocağının yaklaşık 250m kuzeybatısında ve Sağırköy’ün 2.6 km güney batısında yer almaktadır. Ocağın işletme derinliği yaklaşık doğal zemin kotundan 6,5m kazılarak yapılmıştır.

İlk lokasyon olan Güney açık boksit ocağına ait fotoğraflar Şekil 3.2’de yer almaktadır. Kırkbaş, Sağırköy bölgesindeki Kuzey açık boksit ocağı 1:25.000 ölçekli Afyon L25-b2 paftasının doğusunda L26-a1 paftasının batı sınırında yer almaktadır. Galeride ulaşım asfalt yol bittikten sonra Kırkbaş köyünün kuzeybatısına doğru yaklaşık 5 km kadar patika yol gidilerek sağlanmıştır. Güney açık boksit ocağı lokasyonu Sağırköy’ün 2.7 km güney batısı konumunda yer almaktadır. Kırkbaş ve Sağırköy bölgesinde bulunmakta olan boksit ocağı daha önce ruhsatlandırılarak işletilmiş ve stoklanmış fakat aktif olarak işletilmemektedir. Bölgede yeni boksit rezervi arayışları ve sondaj çalışmalarının devam edeceği bilgisine ulaşılmıştır. Ocağın işletme derinliği yaklaşık doğal zemin kotundan 6m kazılarak yapılmıştır. Bölgede üretim yapılmadığı için herhangi bir tahkimat bulunmamaktadır.



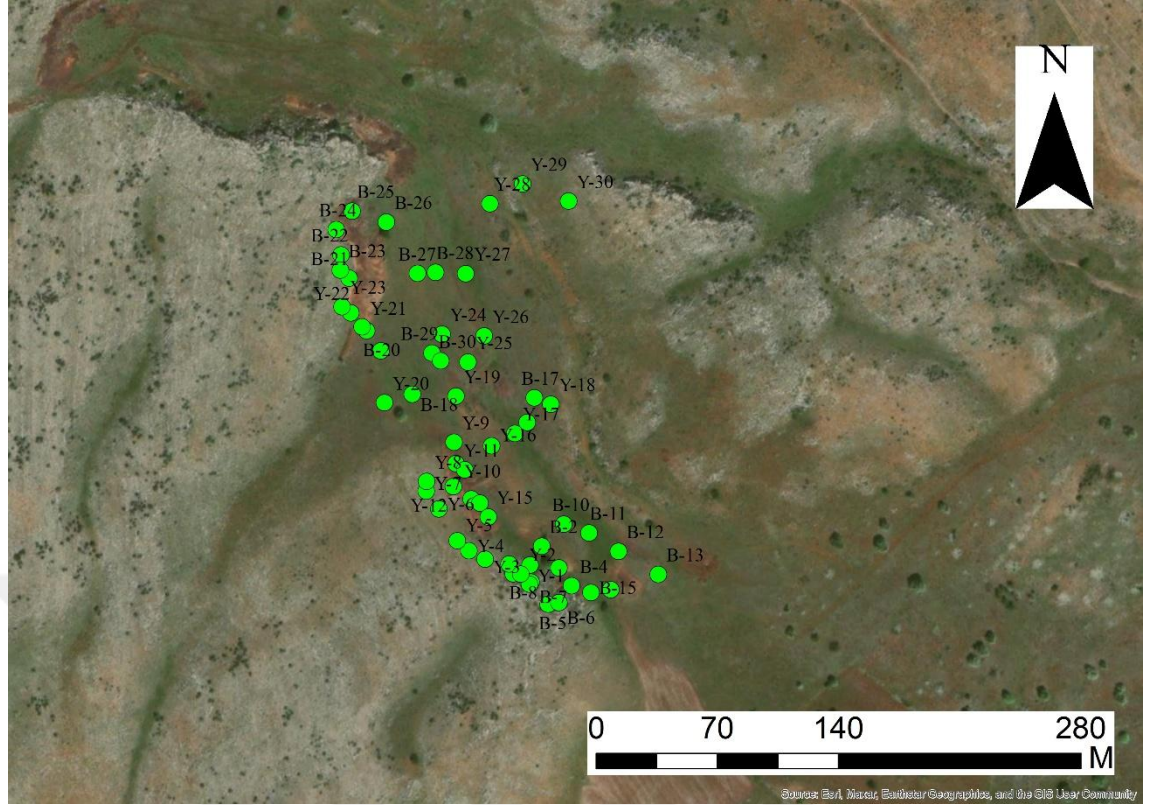
Şekil 3.3. a) Kuzey açık boksit ocağı; b) Yan kayaç mostra fotoğrafı c) Boksit numunesine ait fotoğraf d) Boksit kalıntılarına ait fotoğraf

Arazi çalışmaları planlanan zaman dilimi içerisinde tamamlanmış ve örnekleme işlemleri düzenli ve sistemli bir şekilde gerçekleştirilmiştir. Sahada elde edilen GPS verileri, WGS84 koordinat sistemine göre kaydedilmiştir. Bu konum bilgileri (Çizelge 3.1), ArcGIS 10.7 yazılımı kullanılarak, Basemap kullanılarak lokasyon haritası oluşturulmuştur (Şekil 3.4).

Çizelge 3.1. Isparta/ Yalvaç Sağırköy ve Kırkbaş köyü bölgesine ait barit ve yan kayaç numune alımı koordinatları ve radyasyon değerleri (WGS84)

	Y	X	Z	Hata (m)	Y Rd.
B-1	38.413770	30.981150	1483	1.2	8
B-2	38.413870	30.981220	1483	1.4	10
B-3	38.413760	30.981340	1483	1.3	9
B-4	38.413670	30.981430	1481	1.2	12
B-5	38.413570	30.981280	1479	1.4	10
B-6	38.413580	30.981350	1479	1.3	8
B-7	38.413680	30.981160	1478	1.3	14
B-8	38.413720	30.981040	1478	1.3	13
B-9	38.413770	30.981010	1481	1.3	14
B-10	38.413990	30.981360	1479	1.3	9
B-11	38.413950	30.981530	1477	1.3	14
B-12	38.413860	30.981730	1474	1.4	10
B-13	38.413750	30.982000	1476	1.2	13
B-14	38.413660	30.981690	1476	1.3	12
B-15	38.413640	30.981560	1475	1.3	9
B-16	38.414510	30.981090	1487	1.2	11
B-17	38.414640	30.981130	1488	1.3	12
B-18	38.414630	30.980320	1490	1.5	12
B-19	38.414850	30.980100	1491	1.7	11
B-20	38.414950	30.980000	1493	1.4	13
B-21	38.415220	30.979870	1495	1.4	12
B-22	38.415340	30.979810	1494	1.3	8
B-23	38.415260	30.979810	1493	1.5	9
B-24	38.415470	30.979770	1493	1.4	9
B-25	38.415570	30.979870	1492	1.3	8
B-26	38.415520	30.980100	1494	1.2	12
B-27	38.415260	30.980320	1493	1.5	11
B-28	38.415270	30.980440	1492	1.4	9
B-29	38.414850	30.980440	1494	1.3	10
B-30	38.414810	30.980500	1493	1.5	8

	Y	X	Z	Hata (m)	Y Rd.
Y-1	38.413670	30.981150	1478	1.2	11
Y-2	38.413720	30.981090	1478	1.4	14
Y-3	38.413790	30.980850	1479	1.4	11
Y-4	38.413830	30.980740	1477	1.4	11
Y-5	38.413880	30.980660	1477	1.5	8
Y-6	38.414040	30.980530	1473	1.3	8
Y-7	38.414130	30.980440	1473	1.6	8
Y-8	38.414180	30.980440	1471	1.4	12
Y-9	38.414390	30.980610	1478	1.4	8
Y-10	38.414280	30.980630	1478	1.4	8
Y-11	38.414250	30.980690	1481	1.3	9
Y-12	38.414160	30.980620	1474	1.5	8
Y-13	38.414100	30.980740	1439	1.4	9
Y-14	38.414080	30.980800	1480	1.3	9
Y-15	38.414010	30.980860	1483	1.5	9
Y-16	38.414380	30.980860	1487	1.5	8
Y-17	38.414450	30.981010	1487	1.2	9
Y-18	38.414610	30.981240	1487	1.2	9
Y-19	38.414630	30.980610	1487	1.5	10
Y-20	38.414580	30.980140	1488	2	10
Y-21	38.414970	30.979970	1492	1.3	9
Y-22	38.415040	30.979890	1493	1.4	11
Y-23	38.415070	30.979830	1492	1.4	10
Y-24	38.414950	30.980500	1496	1.8	8
Y-25	38.414810	30.980680	1494	2.3	9
Y-26	38.414950	30.980780	1494	1.7	12
Y-27	38.415270	30.980640	1496	1.4	11
Y-28	38.415640	30.980780	1496	1.3	9
Y-29	38.415750	30.980990	1498	1.3	7
Y-30	38.415670	30.981300	1500	1.2	12



Şekil 3.4. Numune Lokasyonları

Arazi çalışmaları kapsamında, bölgedeki boksit oluşumlarının detaylı incelenmesi amacıyla çeşitli jeolojik ve jeokimyasal gözlem ve ölçümler gerçekleştirilmiştir. Çalışma alanında işletilmiş olan ocaklardan toplanan boksitler stoklanmıştır. (Şekil 3.5a). Kuzey açık boksit ocağında sahadaki stratigrafik ve yapısal ilişkileri ortaya koymak amacıyla detaylı gözlemler yapılmıştır (Şekil 3.5b). Mineralojik ayrıntıların yerinde incelenmesi için el lupundan faydalanılmış ve mikroskobik seviyede tanımlamalar gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.5c). Ayrıca, sahadaki doğal radyoaktivite seviyelerini belirlemek amacıyla radyasyon ölçümleri yapılmıştır (Şekil 3.5d). Jeolojik yapısal analiz kapsamında tabakaların doğrultu ve eğim yönü ile eğim miktarları belirlenmiş ve ölçülmüştür (Şekil 3.5e). Son olarak, analizlerde kullanılmak üzere alınan kayaç ve toprak numuneleri, kontaminasyonu engelleyecek şekilde uygun biçimde paketlenmiş ve laboratuvara taşınmak üzere hazırlanmıştır (Şekil 3.5f). Bu kapsamlı arazi çalışmaları sayesinde, sahadaki boksit birimlerinin litolojik, yapısal ve jeokimyasal özelliklerine ilişkin güvenilir veriler elde edilmiştir.



Şekil 3.5. a) Boksit stoğu b) Kuzey açık boksit ocağı c) Lup kullanımı d) Radyasyon ölçümü e) Tabaka doğrultu ve eğim yönü ve miktarı ölçümü f) Numunelerin paketlenmesi

3.2. Laboratuvar Çalışmaları

Boksit ve yan kayaç numunelerinin laboratuvar ortamında analize hazırlanması için yapılan laboratuvar çalışmaları, numunelerin fiziksel ve kimyasal özelliklerinin detaylı olarak incelenmesini amaçlamaktadır.

Numuneler sahadan toplandıktan sonra laboratuvara getirilmiş ve boksit ve yan kayaç numuneleri 1'den 30'a, numaralandırılmıştır. Bu numaralandırma, çalışmanın her aşamasında numunelerin kimliklerinin korunması ve karışıklığın önlenmesi için titizlikle yapılmıştır. Numuneler öncelikle çeneli kayaç kırıcı (jaw crusher) makinesinde çakıl boyutuna kadar kırılmıştır. Ardından elde edilen bu çakıl boyutundaki malzemeler laboratuvar tipi halkalı öğütücü (ring mill) makinesinde öğütülerek kil-silt boyutuna getirilmiştir.



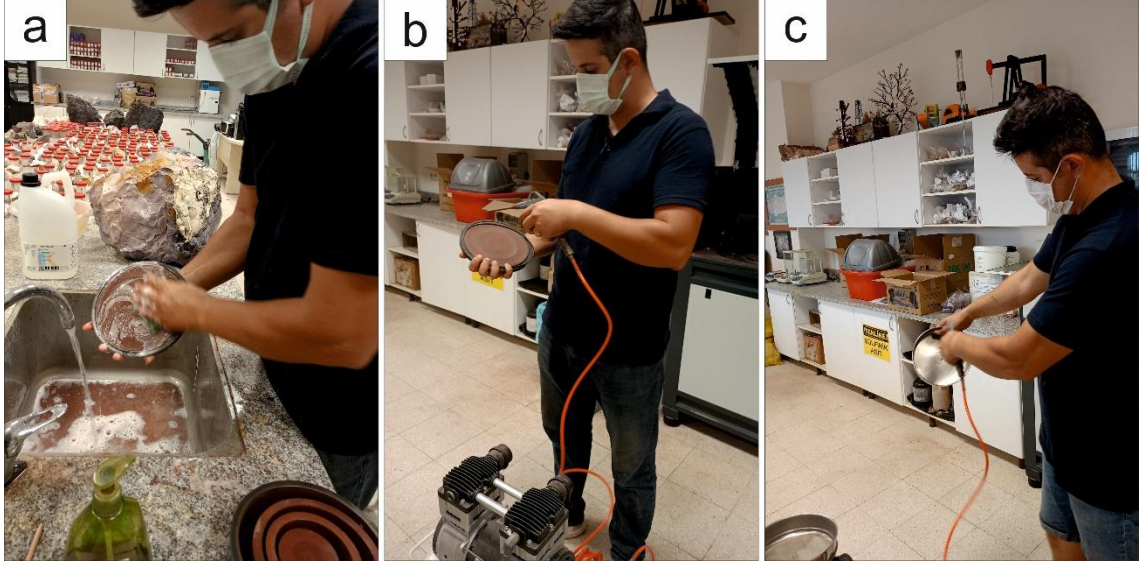
Şekil 3.6. a) Kayaç kırıcı işlemi b) Çakıl boyutundaki örneklerin paketleme ve etiketlenmesi c) Numunelerin halkalı öğütücü havanına eklenmesi d) Halkalı öğütücü çalıştırma işlemi e) Tamamlanan öğütme işlemi f) Numunelerin halkalı öğütücüden eleğe aktarımı

Arazi çalışmalarında elde edilen numuneler, laboratuvar ortamında analizlere uygun hale getirilmek üzere çeşitli hazırlık aşamalarından geçirilmiştir. Öncelikli olarak, alınan numuneler, uygun boyutlara indirgenebilmesi amacıyla çeneli kayaç kırıcı (jaw crusher) cihazında kırılmıştır (Şekil 3.6a). Çeneli kayaç kırıcıdan geçirilen ve çakıl boyutuna indirgenmiş örnekler, kontaminasyonu önleyecek şekilde dikkatlice paketlenmiş, her bir numune ait olduğu lokasyon ve örnek bilgilerini içerecek şekilde etiketlenmiştir (Şekil 3.6b). Paketlenen bu numuneler, ardından tane boyutunun daha da küçültülmesi amacıyla laboratuvar tipi halkalı öğütücü (ring mill) cihazından geçirilmiştir (Şekil 3.6c, 3.6d, 3.6e, 3.6f). Bu öğütme işlemi sayesinde numuneler, XRF, XRD, SEM ve FT-IR gibi analizlerde kullanılmaya uygun, homojen ve ince taneli bir forma getirilmiştir. Böylelikle laboratuvar analizlerinin güvenilirliği ve doğruluğu için gerekli numune hazırlama süreçleri eksiksiz şekilde tamamlanmıştır.



Şekil 3.7. a), b), c) Öğütülen numunelerin elekten geçirilmesi d) Elekten geçirilen numunelerin tartılması e), f) Numunelerin paketleme etiketleme işlemleri

Laboratuvarda öğütme işlemi tamamlanan numuneler, tane boyutunun homojenliğini sağlamak amacıyla 63 mikron (200 mesh) boyutlu elekten geçirilmiştir (Şekil 3.7a, 3.7b, 3.7c). Eleme işlemi sonrasında elde edilen ince taneli numuneler, analizler için gerekli miktarın belirlenebilmesi amacıyla hassas terazide tartılmıştır (Şekil 3.7d). Tartılan numuneler, analiz sürecinde karışıklık ve kontaminasyon riskini önlemek için dikkatlice paketlenmiş ve üzerinde detaylı etiket bilgileri bulunan torbalara yerleştirilmiştir (Şekil 3.7e, 3.7f). Paketleme aşaması, ileride yapılacak analizler için numunelerin kimlik bilgilerinin korunarak ve zarar görmeden muhafaza edilerek analizlere hazır hale getirilmiştir.

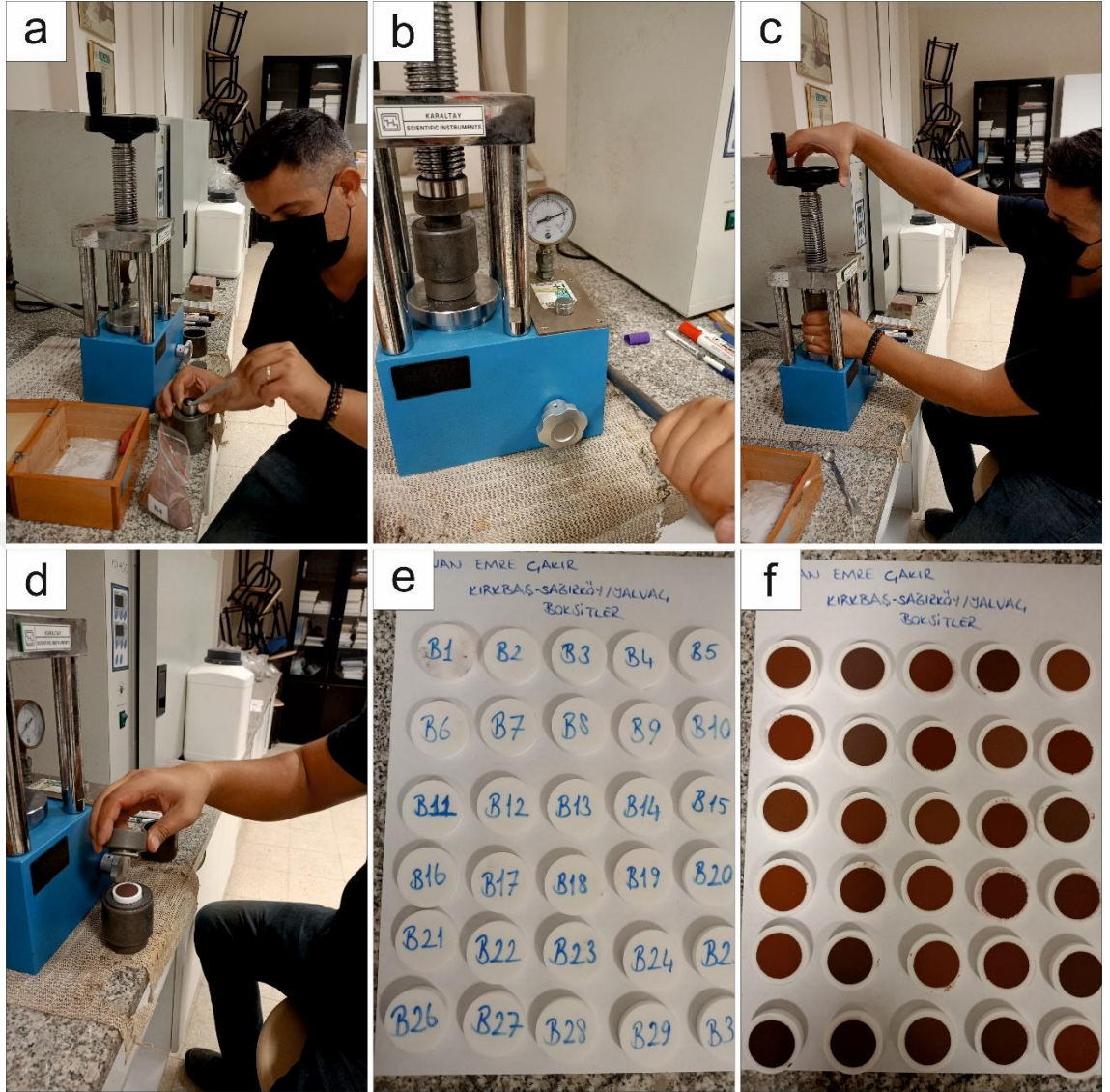


Şekil 3.8. a) Öğütücü havan, halkalarının ve temizlenmesi b) Öğütücü malzemelerinin kompresör ile kurutulması c) Eleklerin temizlenip kurutulması

Numune hazırlama sürecinde, analizlerin doğruluğunu ve güvenilirliğini sağlamak amacıyla laboratuvar ekipmanlarının temizliği titizlikle gerçekleştirilmiştir. Öncelikle öğütücü cihazın havanı ve halkaları detaylı şekilde temizlenmiştir (Şekil 3.8a). Temizlenen bu malzemeler, nemin tamamen giderilmesi için kompresör kullanılarak kurutulmuştur (Şekil 3.8b). Benzer şekilde, elekler de önce dikkatlice temizlenmiş, ardından kurutularak sonraki işlemler için kullanıma hazır hale getirilmiştir (Şekil 3.8c). Bu hazırlık adımları sayesinde, numuneler arası çapraz bulaşma riski en aza indirilmiştir.

Her bir öğütme işlemi sonrasında öğütücü cihazın içi detaylı bir şekilde temizlenmiştir. Öğütücünün halkaları ve iç haznesi su ve deterjan ile temizlenmiş, kuvarslı temizlik kumu ile cihaz tekrar çalıştırılmış, sonrasında kompresör hava yardımıyla kurutulmuştur.

Numuneler, X-Işını Floresans (XRF) analizine uygun forma getirilmek üzere pellet hazırlama aşamasından geçirilmiştir. Bu süreçte, önce kil-silt boyutuna kadar inceltilmiş numuneler ve bağlayıcı madde olarak kullanılan borik asit, pellet haznesine yerleştirilmiştir (Şekil 3.9a). Hazneye eklenen karışım, hidrolik baskı makinesi ile yaklaşık 15 MPa basınca kadar preslenerek sıkıştırılmıştır (Şekil 3.9b). Presleme işlemi sonrasında oluşan pelletler dikkatlice hazneden çıkarılmıştır (Şekil 3.9c, 3.9d). Elde edilen düzgün yüzeyli pelletler, XRF analizine hazır hale getirilmiş ve analiz öncesi kontrol edilmiştir (Şekil 3.9e, 3.9f). Bu işlem, analizlerde doğru ve tekrarlanabilir sonuçlar elde edilmesi için gerekli numune formunu sağlamıştır. Pelletler, numaralandırıldıktan sonra danışman hocamın rehberliği ile XRF cihazında analiz edilmiştir.



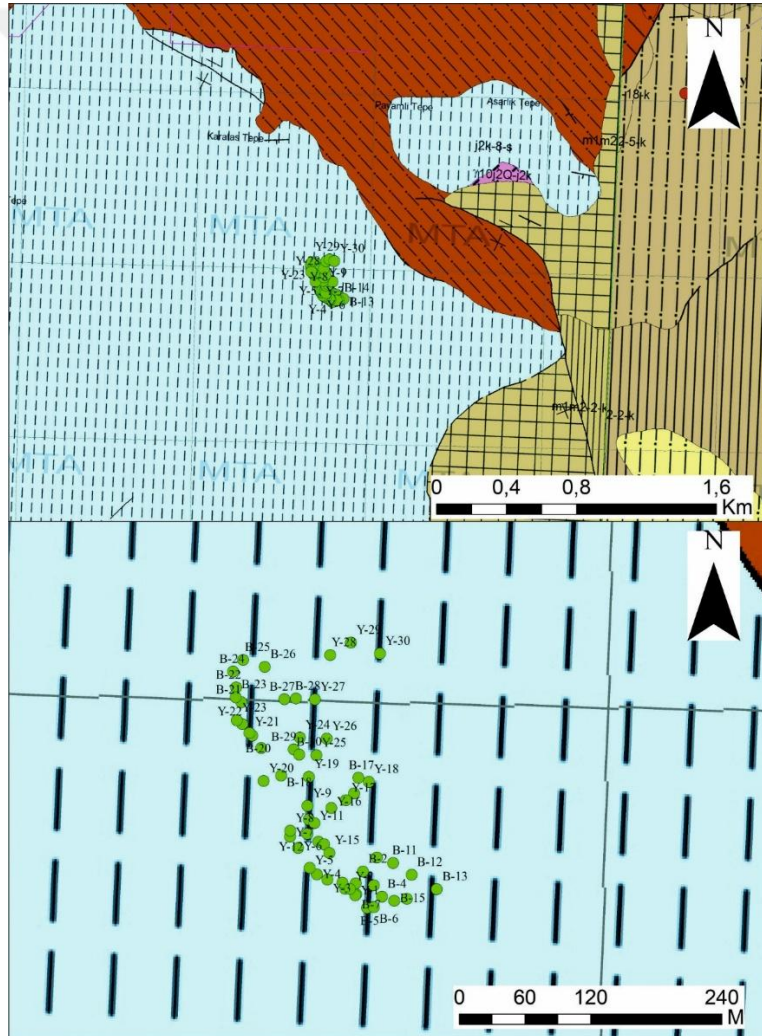
Şekil 3.9. a) Kil-silt boyutundaki numune ve borik asitin pellet haznesine eklenmesi **b)** 15 MPa'ya kadar presleme işlemi **c), d)** Pelletin hazneden çıkarılması **e), f)** Xrf analizine hazır pellet numuneleri

3.3. Büro Çalışmaları

Arazi çalışmalarının tamamlanmasının ardından, arazide GPS yardımıyla WGS84 koordinat sisteminde alınan numunelere ait lokasyon verileri bilgisayar ortamına aktarılmıştır. Aktarılan bu lokasyon verileri, CBS yazılımı olan ArcMap 10.7 yazılımı yardımıyla MTA'dan temin edilen Afyon L25-b2 ve L26-a1 paftalarındaki 1/25.000 ölçekli genel jeoloji haritaları (Şekil 3.10) ve Afyon L-25 ve L-26 1/100.000 genel jeoloji haritaları ile karşılaştırılarak analiz edilmiştir (Çakır ve Yalçın 2022). Bu süreçte, bölgenin genel jeolojisi ve formasyonlar hakkında detaylı bilgiler elde edilmiş ve bu veriler arazide yapılan gözlemlerle desteklenmiştir. Özellikle bölgede gözlemlenen (CaCO_3) kireçtaşlarının jeolojik zaman dilimi hakkında önemli bilgiler edinilmiştir. Paftaların genel jeoloji haritalarının üzerine lokasyon verileri eklendikten sonra, bölgesel jeoloji

haritaları oluşturulmuş ve bu haritalar saha çalışmaları sırasında yer bulduru olarak kullanılmıştır. Ayrıca, ilerleyen süreçte ArcMap yazılımı kullanılarak bölgeden alınan numuneler üzerinde yapılan analiz verilerinden yararlanılarak enterpolasyon (bölgesel dağılım) ve diğer istatistiksel yöntemlerle detaylı haritalar oluşturulması planlanmaktadır. Laboratuvar analizlerinden elde edilen XRF verileri, daha ileri istatistiksel analizler için kullanılmıştır.

SPSS yazılımı yardımıyla betimleyici istatistikler, korelasyon analizi, faktör analizi, hiyerarşik kümeleme analizi (Hierarchical Cluster Analysis), model özetleri (Model Summary), ANOVA analizi ve en yakın komşu analizi (Nearest Neighbor Analysis) gibi yöntemler uygulanması planlanmaktadır. Bu analizlerin yanı sıra, elde edilen veriler ışığında bölgenin jeolojik ve kimyasal özelliklerini daha kapsamlı bir şekilde anlamaya yönelik çalışmalar yapılacaktır. Bu sistematik ve titiz çalışma sayesinde boksit ve yan kayaç numunelerinin analizine yönelik güvenilir ve detaylı veriler elde edilmiş olup, ileride yapılacak çalışmalar için önemli bir temel oluşturulmuştur.



Şekil 3.10. Çalışma alanı ve Afyon L26-a1 ve L25-b2 paftasından oluşturulmuş bölgesel jeoloji haritası (Arcgis 10.7 Basemap Imagery 2024; MTA 2024; HGM 2023)

3.4. Mineralojik ve Petrografik Analizler

3.4.1. X-RAY Difraktometresi (XRD) analiz çalışması

X-ışınları, 1895 yılında Alman fizikçi Wilhelm Conrad Röntgen tarafından katot ışınları üzerinde yaptığı deneyler sırasında keşfedilmiştir. Röntgen, katot ışınlarının baryum platin siyanür kaplı ekranlara gönderildiğinde ortaya çıkan flüoresan ışınımı fark etmiş ve bu ışınların cam gibi katı ortamlardan geçerek havada absorbe edilmediğini gözlemlemiştir. Yapısını o dönemde tam olarak açıklayamadığı bu radyasyonu, bilinmeyen anlamına gelen "X" harfi ile adlandırarak X-ışınları terimini kullanmıştır (Röntgen 1895; Merlab 2022).

X-ışınlarının keşfinden kısa bir süre sonra, 1912 yılında Max von Laue, kristallerde X-ışınlarının kırınımına uğradığını saptamış; bu buluş kristal yapıların aydınlatılmasında dönüm noktası olmuştur. İngiltere’de William Henry Bragg ve oğlu William Lawrence Bragg, kristal yapıların analizi için geliştirdikleri Bragg Yasası ile X-ışını kırınımının temelini atarak XRD yöntemine öncülük etmişlerdir (Bragg ve Bragg 1913; Cullity ve Stock 2001; Potts ve West 2008).

XRD yöntemi, kristal yapıya sahip katı malzemelerin fazlarını ve atomik dizilimlerini belirlemeye yarayan, numuneye zarar vermeden gerçekleştirilebilen, hassas bir analiz tekniğidir. X-ışını tüpünden üretilen yapay X-ışınları, numune yüzeyine belirli bir açıyla gönderilir ve numunedeki kristal düzlemlerden farklı açılarla saçılan ışınlar difraksiyon desenleri oluşturur. Elde edilen difraktogramlar, numunedeki minerallerin özgün kristal yapılarına karşılık gelen kırınım piklerini ortaya koyarak mineralojik ve kısmen elementel bileşimlerin tespitine olanak tanır (Bish and Post 1993; Yünsel vd. 2019).

Bu çalışmada, boksit numunelerinin mineralojik karakterizasyonu amacıyla XRD analizi uygulanmıştır. Analiz için sahadan temin edilen boksit örnekleri, homojenizasyon amacıyla öncelikle kurutulmuş ve ardından toz haline getirilmiştir. Yaklaşık 30 gramlık her bir toz numune, etiketlenerek kilitli numune poşetlerine yerleştirilmiş ve laboratuvara sevk edilmiştir. Çalışma kapsamında temsil niteliği taşıyan 8 adet boksit ve 2 adet yan kayaç örneği (örnek kodları: B-1, B-5, B-7, B-10, B-11, B-14, B-19, B-27, Y-9, Y-27) XRD analizine tabi tutulmuştur.

XRD analizleri, $2\theta = 2^\circ - 70^\circ$ aralığında gerçekleştirilmiş olup, elde edilen difraktogramlar ASTM (American Society for Testing and Materials) standartlarına uygun şekilde değerlendirilmiştir. Özellikle optik mikroskopla tanımlanması güç olan minerallerin ayrıntılı mineralojik bileşimi, difraktogramlar üzerinden belirlenmiştir. Analiz sonuçları hem dijital (JPEG formatında) hem de elektronik ortamda araştırmacıya sunulmuştur (KTÜ 2025).

Boksit numunelerine yönelik bu XRD uygulamaları, özellikle gibbsit, böhmite, diyaspore, hematit ve götit gibi ana minerallerin tanımlanmasında kritik öneme sahiptir. Ayrıca, boksitin içinde bulunan kil mineralleri (kaolinit, illit vb.) ve aksesuar mineraller de bu yöntem sayesinde güvenilir şekilde tespit edilmiştir. Bu sayede boksitin kökeni, oluşum koşulları ve endüstriyel kullanım potansiyeli hakkında detaylı bilgi edinilmiştir (Yalçın ve Gültekin 2001).

3.4.2. Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi (FT-IR) analiz çalışması

Fourier Dönüşümlü Kızılötesi (FT-IR) spektroskopisi, organik ve inorganik bileşiklerde bulunan fonksiyonel grupların belirlenmesinde yaygın olarak kullanılan, güçlü ve hassas bir analitik tekniktir. Bu yöntem sayesinde bileşiklerin moleküler yapısındaki bağlanma tipleri, fonksiyonel grup çeşitliliği ve yapısal benzerlikler güvenilir biçimde ortaya konulabilmektedir. FT-IR analizi; proteinler, karbohidratlar ve aminoasitler gibi biyomoleküllerin karakterizasyonunda önemli rol oynamanın yanı sıra, ilaç geliştirme, adli bilimler, malzeme bilimi, kimya ve seramik sektörlerinde de geniş uygulama alanına sahiptir (Erkahveci ve Karaali 1996; Smith 2018).

FT-IR spektroskopisi, boyalar, polimerler, yapışkanlar, kaplamalar, reçineler ve dolgu maddeleri gibi kompleks malzemelerin tanımlanmasında hızlı ve doğru sonuçlar sunmaktadır. Bu özelliği sayesinde, üretimden tasarıma ve kalite kontrolden ürün geliştirmeye kadar birçok aşamada mühendisler ve araştırmacılar tarafından tercih edilmektedir. Analiz, malzeme doğrulama, katkı maddesi tanımlama ve miktar tayini, moleküler parçalanma incelemesi, formülasyon geliştirme ve temel yapısal açıklama gibi çeşitli alanlarda etkin biçimde kullanılmaktadır (Pavia vd. 2013).

FT-IR spektroskopisi, numune üzerinde orta kızılötesi (MIR) bölgedeki elektromanyetik dalgalar yardımıyla çalışır. Moleküllerdeki kimyasal bağlar, belirli frekanslardaki kızılötesi ışınları absorbe ederek titreşim hareketleri gerçekleştirir. Bu titreşimsel enerji, molekül içerisindeki farklı bağ türlerine göre değişiklik gösterdiğinden, her bağ farklı dalga boylarında enerji emer. Bu nedenle, elde edilen emilim bantlarının frekans ve şiddetleri, numunenin moleküler yapısına özgü karakteristik bir spektrum meydana getirir (Griffiths ve Haseth 2007).

Bu çalışmada, boksit numunelerinin mineralojik ve kimyasal özelliklerinin belirlenmesi amacıyla FT-IR analizi uygulanmıştır. Analize konu olan boksit örnekleri, saha çalışmalarında temin edilmiş; kurutulup homojenleştirildikten sonra ince toz haline getirilmiştir. Yaklaşık 2–3 gramlık her bir toz numune, ATR (Attenuated Total Reflectance) modülü kullanılarak analiz edilmiştir. Numuneler, elmas kristal ATR hücresine yerleştirilmiş ve 4000–400 cm^{-1} dalga sayısı aralığında spektrumları elde edilmiştir (MTA 2022).

Boksit numunelerinin FT-IR analizinde özellikle gibbsit ($\text{Al}(\text{OH})_3$), böhmite ($\text{AlO}(\text{OH})$), kaolinit ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$) ve hematit gibi minerallerin karakteristik fonksiyonel gruplarına ait absorpsiyon bantları tespit edilmiştir. Bu bantlar, OH gruplarına bağlı geniş absorpsiyonlar, Al–O–H ve Si–O titreşimleri gibi spektral özellikler göstermiştir. Elde edilen spektrumlar, ASTM ve literatürde tanımlanmış referans spektrumlar ile karşılaştırılarak mineral fazların doğrulaması yapılmıştır (Yalçın ve Gültekin 2001).

Analiz sonuçları hem elektronik ortamda hem de basılı çıktı formatında raporlanmış, boksitin mineralojik bileşimi ve safsızlıkları hakkında detaylı veriler elde edilmiştir. Bu sayede boksit cevherinin kökeni, oluşum koşulları ve endüstriyel kullanım potansiyeli hakkında önemli bulgulara ulaşılmıştır.

3.4.3. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) analiz çalışması

İnsan gözünün çözünürlük sınırı, yaklaşık olarak 100 metre uzaklıkta birbirine 2,5 cm mesafedeki iki ayrı noktayı ayırt edebilme kapasitesiyle sınırlıdır. Bu doğal kısıtlamalar, bilim insanlarını çok daha küçük detayların incelenebilmesi amacıyla görüntüleme yeteneği artırılmış cihazlar geliştirmeye yönlendirmiştir. Bu cihazlardan biri olan Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM), yüksek ayırma gücü ve görüntüleme ile kimyasal analiz yeteneğini birleştirme özelliği sayesinde özellikle mineraloji, malzeme bilimi ve jeoloji alanlarında yaygın biçimde kullanılmaktadır (Goldstein vd. 2003; Reed 2005).

SEM cihazında, yoğunlaştırılmış elektron demeti katı bir numuneye yönlendirilir. Bu elektronlar numuneye çarptığında, numune tarafından kısmen soğurulur (absorbe edilir) veya yansıtılır. Yansıyan elektronlar, numunenin yüzey özellikleri ve iç yapısına dair bilgi sağlayan çeşitli sinyaller üretir. Bu sinyallerin analiz edilmesiyle numunenin morfolojik ve kısmen kimyasal özellikleri ortaya konur. SEM analizlerinde, özellikle Enerji Dağılımlı X-ışını Spektrometresi (EDS) ve Dalga Boyu Dağılımlı Spektrometre (WDS) gibi tamamlayıcı yöntemler kullanılarak elementel bileşim tayinleri de yapılabilmektedir (Ramachandran ve Beaudoin 2001).

SEM cihazında en yaygın olarak kullanılan görüntüleme teknikleri, İkincil Elektron (SE) ve Geri Saçılmış Elektron (BSE) sinyallerinin toplanmasına dayanır. SE görüntüleri, numunenin yüzey topografisi hakkında detaylı bilgi sağlarken; BSE görüntüleri, mineral taneciklerinin şekli ve elementel kontrastı hakkında bilgi verir. BSE sinyal şiddeti, analiz edilen mineralin atom numarası ve özgül ağırlığı ile doğru orantılıdır. Bu nedenle ağır element içeren mineraller daha parlak, hafif element içerenler ise daha koyu görüntülenir (Goldstein 2003; Reed 2005).

Bu çalışmada, boksit numunelerinin morfolojik ve elementel özelliklerinin belirlenmesi amacıyla SEM analizi gerçekleştirilmiştir. Saha çalışmalarından elde edilen boksit örnekleri, laboratuvar ortamında önce kurutulmuş ve ince toz haline getirilmiştir. Numuneler analiz öncesinde, yüzey iletkenliğini artırmak ve yüksek vakum altında yük birikimini önlemek amacıyla altın (Au) kaplama yöntemi ile kaplanmıştır. Bu kaplama işlemi için altın-palladyum (Au-Pd) alaşımı da tercih edilmiştir (Goldstein vd. 2003).

Analizler sırasında yaklaşık 15 kV hızlandırma voltajı kullanılmıştır. Boksit numunelerinin yüzeyinden elde edilen SE, BSE ve kombine (SE + BSE) görüntüler, yüksek vakum koşullarında elde edilerek JPEG formatında sayısal ortama aktarılmış ve analiz raporlarına eklenmiştir. SEM görüntüleri sayesinde boksit içerisindeki gibbsit, böhmit, hematit ve anatiz gibi mineral fazların morfolojisi, tane boyutu dağılımı ve mineral ilişkileri detaylı şekilde belirlenmiştir (Yalçın ve Gültekin 2001).

SEM-EDS analizleri, boksit numunelerinde Al, Fe, Si, Ti ve diğer safsızlık elementlerinin hem kalitatif hem de yarı-kantitatif düzeyde belirlenmesini sağlamış ve cevherin jeokimyasal özellikleri hakkında önemli veriler sunmuştur.

3.5. Jeokimyasal Analizler

3.5.1. XRF analiz çalışması

X-ışını floresans (XRF) spektrometrisi, bir numunedeki elementlerin kalitatif ve kantitatif analizini gerçekleştiren, hızlı ve tahribatsız bir analitik tekniktir. Bu yöntem, numuneye gönderilen yüksek enerjili X-ışınlarının, atom çekirdeği çevresindeki iç yörüngelerdeki elektronları uyarak yerlerinden çıkarması (iyonizasyon) ve sonrasında elektronların daha yüksek enerji seviyelerinden boşalan seviyelere geçişi sırasında karakteristik X-ışını emisyonu (floresans) oluşumu prensibine dayanmaktadır (Skoog vd. 1998; Jenkins ve Snyder 1996).

Her element, kendine özgü enerji seviyeleri ve buna bağlı olarak belirgin karakteristik X-ışını enerji pikleri üretir. Bu nedenle, XRF cihazı ile elde edilen spektrumda her bir elementin parmak izi niteliğinde tanımlayıcı sinyalleri tespit edilebilir. Numuneye gönderilen X-ışınları atomların iç yörüngelerindeki elektronları yerinden uzaklaştırır; bu boşluğun üst yörüngedeki bir elektron tarafından doldurulması sırasında yayılan enerji, ölçülen floresans sinyali olarak kaydedilir (Potts ve West 2008). Bu sayede numunede bulunan majör, minör ve iz elementlerin kantitatif miktarları belirlenebilir.

Bu çalışmada, Yalvaç (Isparta) Sağırlı Köyü ve Kırkbaş Köyü çevresinden toplanan boksit numunelerinin jeokimyasal bileşimlerinin belirlenmesi amacıyla XRF analizi uygulanmıştır. Laboratuvar ortamında gerçekleştirilen hazırlık sürecinde, sahadan getirilen boksit numuneleri önce düşük sıcaklıkta kurutulmuş, ardından Retsch RM200 model havaneli öğütücü ile tamamen homojenize edilmiştir. Elde edilen ince taneli numuneler, pres pastil makinesi yardımıyla 15 MPa basınç altında dairesel pellet formuna getirilmiştir.



Şekil 3.11. XRF cihazı ve programı

Analizler, Akdeniz Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü Maden Yatakları Laboratuvarı'nda, Rigaku NEX-CG model enerji dispersif XRF (ED-XRF) cihazı (Şekil 3.11) ile gerçekleştirilmiştir. Bu cihaz, karakteristik X-ışını

emisyollarının enerji dağılım prensibi ile çalışmakta olup majör oksitler (Al_2O_3 , Fe_2O_3 , SiO_2 , TiO_2 , vb.), eser ve iz elementler (Ga, V, Cr, Zr, vb.) açısından yüksek doğrulukta ölçümler sağlamaktadır (Rigaku 2020).

Yapılan analizler sonucunda boksit numunelerinin alümina (Al_2O_3) içerikleri başta olmak üzere, demir oksit (Fe_2O_3), silikon dioksit (SiO_2) ve diğer önemli bileşenlerin miktarları belirlenmiş, böylece cevherin metalürjik kalitesi ve ekonomik potansiyeli açısından önemli bilgiler elde edilmiştir (Yalçın ve Gültekin 2001). Ayrıca analiz verileri, boksitin kökeni ve zenginleşme süreçlerinin anlaşılması açısından jeokimyasal değerlendirmelere temel oluşturmuştur.

3.5.2. ICP-MS analiz çalışması

Endüktif Eşleşmiş Plazma-Kütle Spektrometresi (ICP-MS), numunelerde bulunan elementlerin ultra düşük seviyelerde (ppb-ppt) belirlenmesine olanak sağlayan, son derece hassas ve çok elementli analiz kapasitesine sahip bir analitik tekniktir. ICP-MS analizinde, çözelti haline getirilmiş numuneler, argon gazı yüklü yüksek sıcaklıkta (~6000–10000 K) oluşturulan plazma ortamına püskürtülerek önce atomlaştırılır, ardından atomlar iyonlaştırılır. Elde edilen iyonlar, cihazda kütle/yük oranlarına (m/z) göre ayrılarak bir dedektör tarafından ölçülür ve numunedeki elementlerin konsantrasyonları belirlenir (Becker 2007).

ICP-MS analiz süreci temel olarak şu dört ana basamaktan oluşur:

Atomlaştırma: Çözeltideki elementler plazmada serbest atoma dönüştürülür.

İyonlaştırma: Atomların büyük bir kısmı (çoğunlukla +1 yüklü iyonlar) iyonlaştırılır.

Ayrıştırma: İyonlar kütle/yük oranlarına göre ayrılır.

Tespit ve ölçüm: İyonlar dedektörde sayılır ve elde edilen verilerle elementlerin derişimleri hesaplanır (Becker 2007).

ICP-MS tekniğı, Periyodik Çizelgede yer alan neredeyse tüm elementlerin tayininde kullanılabilir ve özellikle iz element analizlerinde diğer yöntemlere göre üstün hassasiyet ve düşük tayin limitleri sunmaktadır. Bu özellikleri sayesinde jeolojik malzemeler, özellikle boksit cevherleri gibi karmaşık matrislere sahip numunelerin iz element analizlerinde etkin bir şekilde kullanılmaktadır (Lichte 1987).

Bu çalışmada, Yalvaç (Isparta) Sağır Köyü ve Kırkbaş Köyü sahasından elde edilen boksit numunelerinin iz element içeriklerinin belirlenmesi amacıyla ICP-MS analizi gerçekleştirilmiştir. Sahadan alınan toplam 11 adet boksit, 5 adet yan kayaç örneğı, öncelikle laboratuvar ortamında kurutulmuş, homojenize edilip ince boyuta öğütülmüştür. Analize uygun şekilde hazırlanan numuneler, Akdeniz Üniversitesi Jeoloji Mühendisliğı Bölümü Maden Yatakları Laboratuvarı'nda ön işlemleri tamamlandıktan sonra, Maden Tetkik ve Arama (MTA) Genel Müdürlüğü laboratuvarına gönderilmiştir.

MTA laboratuvarında, numuneler için TS ISO 14869-1 (asidik çözme) ve TS ISO 14869-2 (alkali eritme) standartlarına uygun olarak çözme işlemleri uygulanmıştır. Numune matrisine bağılı olarak, dörütlü asit ($\text{HF-HNO}_3\text{-HClO}_4\text{-HCl}$) çözme yöntemi veya alkali eritme yöntemi tercih edilmiştir. Çözünmüş numuneler, ICP-MS cihazında analiz edilerek başta Ga (Galyum), V (Vanadyum), Cr (Krom), Zr (Zirkonyum) gibi boksitler

için jeokimyasal önemi olan iz elementlerin konsantrasyonları belirlenmiştir (MTA 2022).

Yapılan ICP-MS analizleri, boksit numunelerinin metalürjik kalite tayini, kökensel yorumlar ve zenginleşme süreçlerinin anlaşılması açısından önemli katkılar sağlamıştır.

3.6. İstatistiksel Analizler

Laboratuvar analizlerinden elde edilen veriler, IBM SPSS Statistics 26 yazılımı kullanılarak gerçekleştirilen betimleyici istatistikler, korelasyon, hiyerarşik kümeleme (Hierarchical Cluster Analysis), model özetleri (Model Summary), ANOVA ve en yakın komşu analizi (Nearest Neighbor Analysis) gibi çok boyutlu istatistiksel yöntemlerin uygulanmasına olanak sağlamıştır. Bu sistematik ve çok yönlü analiz süreci, yalnızca mevcut çalışmanın bulgularını desteklemekle kalmayıp, gelecekte yapılacak jeokimyasal araştırmalar için de sağlam bir bilimsel temel oluşturmaktadır.

Jeokimyasal verilerin istatistiksel olarak değerlendirilmesi, maden yataklarının oluşum süreçlerine dair bütüncül bir bakış açısı geliştirilmesine olanak tanır. Bu kapsamda uygulanan çok değişkenli istatistiksel analiz yöntemleri, özellikle elementler arasındaki ilişkilerin, ayrışma süreçlerinin ve mineralizasyon paternlerinin ortaya konulmasında etkili araçlardır. Bu tür analizler sayesinde, incelenen maden yataklarının genetik kökenine dair yorumların güçlendirilmesi ve jeodinamik ortamların daha doğru modellenmesi mümkün hale gelmektedir. Ayrıca, bu yaklaşım saha verilerinin yorumlanmasında nesnel bir temel sağlayarak, cevherleşme süreçlerinin sistematik biçimde çözümlenmesine katkıda bulunur (Rollinson 1993; İnce vd. 2021).

3.6.1. Betimsel istatistik

Araştırmalardan elde edilen nicel verilerin çözümlenmesinde, tanımlayıcı istatistiksel yöntemler önemli bir yer tutar. Bu yöntemler, veri setinin yapısını anlamak ve veriler hakkında genel bir çerçeve çizmek amacıyla kullanılır. Merkezi eğilim ölçüleri, değişkenlik ölçüleri ve dağılımın simetrik yapısını değerlendiren normallikten sapma ölçütleri, tanımlayıcı istatistiğin temel bileşenleri olarak öne çıkar. Aritmetik ortalama, verilerin genel eğilimi hakkında bilgi sunarken; medyan ve mod gibi ölçüler uç değerlerden daha az etkilenmeleri nedeniyle veri dağılımının yapısını anlamada tamamlayıcı niteliktedir. Değişkenlik ölçütlerinden standart sapma ve varyans, verilerin ortalama etrafında ne denli dağıldığını gösterirken, değişim aralığı veri setinin kapsadığı değer aralığını yansıtır. Normallikten sapma ölçütleri olan çarpıklık (skewness) ve basıklık (kurtosis) ise dağılımın simetrik olup olmadığını ve yoğunluğun hangi bölgeye kaydığını belirlemede kullanılır. Özellikle simetrik dağılımlarda aritmetik ortalama, medyan ve mod birbirine oldukça yakın değerler gösterirken; pozitif ya da negatif çarpıklık durumlarında bu ölçütler arasında belirgin farklar oluşur. Tüm bu betimsel istatistiksel veriler, araştırma bulgularının ön analizi açısından vazgeçilmezdir ve istatistiksel modellemenin ön adımını oluşturur (Şencan 2005; Büyüköztürk 2016; Alpar 2020, Özer 2020; Yalcin vd. 2025).

3.6.2. Pearson korelasyon analizi

İki ya da daha fazla değişken arasında doğrusal bir ilişkinin varlığını ve bu ilişkinin yönü ile gücünü belirlemek amacıyla kullanılan istatistiksel yöntemlerden biri korelasyon analizidir. Bu analiz, özellikle sayısal verilerin karşılaştırılmasında ve değişkenler arası etkileşimin ölçülmesinde etkili bir tekniktir. Korelasyon katsayısı, değişkenler arasındaki ilişkinin derecesini belirtmekte olup, -1 ile +1 arasında bir değer alır. Pozitif korelasyon durumunda bir değişkendeki artış diğer değişkende de artışa neden olurken, negatif korelasyon durumunda bir değişkendeki artış diğerinde azalışla ilişkilidir. Katsayının sıfıra yakın olması ise değişkenler arasında anlamlı bir doğrusal ilişki bulunmadığını gösterir (Sidibe ve Yalcin 2019).

En yaygın kullanılan korelasyon türü pearson momentler çarpımı korelasyon katsayısı olup, parametrik verilerle çalışılan analizlerde tercih edilmektedir. Bu yöntem, değişkenlerin ortak varyansına dayalı olarak hesaplanır ve iki değişkenin ne ölçüde birlikte değiştiğini yansıtır. Hesaplama kullanılan formülde, değişkenlerin kovaryans değeri ile standart sapmalarının çarpımı temel alınır. Pearson korelasyon katsayısı, özellikle sosyal bilimler ve jeoloji gibi çok değişkenli veri kümelerinin bulunduğu alanlarda değişkenler arasındaki lineer ilişkilerin istatistiksel olarak değerlendirilmesinde önemli bir araçtır (Alpar 2021; Özdamar 2013; Büyüköztürk 2016; Sidibe ve Yalcin 2019).

3.6.3. Kümeleme analizi

Kümeleme analizi, çok değişkenli istatistiksel teknikler arasında, özellikle benzer özellikler taşıyan veri gruplarının belirlenmesinde etkin şekilde kullanılan bir yöntemdir. Bu analiz yöntemi, gözlem birimlerini aralarındaki benzerlik veya uzaklık ölçütlerine göre anlamlı alt gruplar halinde sınıflandırmayı amaçlar. Böylece, birbirine daha çok benzeyen veriler aynı küme içerisinde yer alırken, farklı özelliklere sahip veriler ayrı kümelerde toplanır. Bu durum, verilerin daha sistematik ve yorumlanabilir hale getirilmesini sağlayarak araştırmacılara veri yapısı hakkında özetleyici ve yorumlayıcı bilgiler sunar. Kümeleme analizi, veri madenciliği, biyoloji, pazarlama, çevre bilimleri ve jeoloji gibi birçok farklı alanda yaygın olarak kullanılmaktadır. Analiz sürecinde kullanılan hiyerarşik ve hiyerarşik olmayan yaklaşımlar, verinin yapısına ve araştırma amacına göre seçilerek, kümeler arası ilişki dinamiklerinin daha net ortaya konmasına olanak tanır (Sharma 1996; Kaufman ve Rousseeuw 2009; Everitt vd. 2011; Özer 2020; Yalcin vd. 2025).

3.6.4. Box-plot analizi

Veri setlerinin dağılım özelliklerini görsel olarak ifade eden istatistiksel araçlardan biri olan kutu grafiği (box plot), tanımlayıcı istatistiklerin yorumlanmasında sıklıkla tercih edilmektedir. Bu grafik, özellikle değişkenlerin merkezi eğilim ölçüleri, dağılım yapısı ve uç değerlerinin (outlier) görsel olarak tespit edilmesinde büyük kolaylık sağlar. Kutu grafiği, veri setinin alt çeyreklik (Q1), medyan (Q2) ve üst çeyreklik (Q3) değerlerini temel alarak oluşturulur. Kutu kısmı veri setinin ortadaki %50'lik bölümünü (interquartile range - IQR) temsil ederken, grafiğin "bıyık" adı verilen kısımları, verinin minimum ve maksimum sınırlarını belirtir. IQR değerinin 1.5 katı kadar uzaklıkta bulunan veriler genellikle uç değer olarak değerlendirilir ve grafikte ayrı simgelerle

gösterilir. Bu yönüyle kutu grafiği, veri setinde normallikten sapma, çarpıklık ya da simetri gibi özelliklerin ilk bakışta anlaşılmasına imkan tanır. Farklı grupların karşılaştırmalı analizlerinde de kullanılan bu yöntem, özellikle çok değişkenli veri yapılarının betimlenmesinde etkili bir görsel araç olarak öne çıkmaktadır (McGill vd. 1978; Kalaycı 2010; Field 2013; Sidibe ve Yalcin 2019).

3.6.5. Regresyon analizi

Regresyon analizi, iki ya da daha fazla değişken arasında bulunan istatistiksel ilişkinin bir denklem yardımıyla modellenmesini sağlayan ileri düzey bir analiz yöntemidir. Bu analiz, bağımlı değişkenin bağımsız değişkenler aracılığıyla ne ölçüde açıklandığını belirlemeyi amaçlar. Korelasyon analizinden elde edilen güçlü ve anlamlı ilişkiler, regresyon modeli kurulmadan önce, değişkenlerin doğrusal dağılım göstermesi ve normallik varsayımlarını sağlaması açısından dikkatle değerlendirilmelidir. Çünkü lineer regresyon modelleri, doğrusal ve homojen dağılım varsayımını esas alır. Modelin kurulmasında yer alan değişkenlerin varyans açıklayıcılığı ise regresyon katsayıları ve standart hata terimleriyle belirlenir. Modelin genel geçerliliği ve anlamlılığı, ANOVA (Varyans Analizi) testi ile değerlendirilerek modelin istatistiksel olarak anlamlı olup olmadığı ortaya konur. Ayrıca modelin determinasyon katsayısı (R^2), bağımsız değişkenlerin bağımlı değişkeni hangi oranda açıkladığını ifade eder. Bu bağlamda, elementel analiz verilerinde yüksek korelasyon gösteren değişkenler için regresyon analizi, hem neden-sonuç ilişkilerinin matematiksel bir modelle ifadesini hem de öngörü gücünün test edilmesini mümkün kılar (Özdamar 2013; Özer 2020; Alpar 2021).

3.6.6. Enterpolasyon (bölgesel dağılım) haritaları

Bu çalışmada, Boksit ve yan kayaç örneklerine ait toplamda 60 numune üzerinden gerçekleştirilen XRF analiz sonuçları, CBS tabanlı olarak ArcGIS 10.7 ortamında İvers Ağırlıklı Uzaklık (IDW) enterpolasyon yöntemi kullanılarak mekansal olarak modellenmiştir. Her bir örnek için elde edilen majör oksit (%) ve iz element (%) verileri, coğrafi koordinatlarıyla birlikte sisteme entegre edilmiş ve toplamda 30 Boksit, 30 yankayaç numunesini içeren enterpolasyon (bölgesel dağılım) haritaları oluşturulmuştur. Bu haritalar, bölgedeki element dağılım desenlerinin ve jeokimyasal anomali zonlarının belirlenmesinde kritik rol oynamaktadır (Özer 2020; Sidibe ve Yalcin 2019).

IDW enterpolasyonu, her bir bilinen veri noktasının çevresindeki bilinmeyen noktaları ağırlıklı olarak etkileyerek, mekansal sürekli yüzeylerin oluşturulmasına olanak tanımaktadır. Bu yöntem, özellikle sınırlı sayıda örnek ile çalışılan jeokimyasal araştırmalarda, verilerin görsel olarak değerlendirilmesi açısından önemli avantajlar sağlamaktadır.

4. BULGULAR

Sağır Köy ve Kırkbaş Köyü sahasında farklı lokasyonlardan alınan boksit ve yan kayaç (ana kayaç) numuneleri üzerinde kapsamlı jeokimyasal, mineralojik ve jeolojik incelemeler gerçekleştirilmiştir. Arazi çalışmaları sırasında elde edilen yapısal, stratigrafik ve litolojik veriler, bölgedeki boksit oluşum koşullarının ve kökeninin yorumlanmasına katkı sağlamak amacıyla kullanılmıştır. Analitik çalışmalar kapsamında, hem boksit hem de yan kayaç örneklerine yönelik XRF, XRD, FT-IR, ICP-MS ve SEM analizleri yapılmıştır. Elde edilen kimyasal ve mineralojik veriler doğrultusunda istatistiksel değerlendirmeler gerçekleştirilmiş; örnekler arası karşılaştırmalar, jeokimyasal parametre tabloları ve çok değişkenli istatistiksel analizler (SPSS 26) ile bulgular desteklenmiştir. Bu verilerin tamamının yorumlanmasıyla, bölgedeki boksit oluşumlarının jeolojik evrimi, kaynaklı özellikleri ve ekonomik potansiyeli ortaya konulmuştur.

4.1. Bölgenin Genel Jeolojik Yapısı

Bölgede genel olarak Anamas-Akseki Otoktonu ve Beyşehir-Hoyran-Hadım naplarına ait birimler ile Neootokton örtü kayaları yüzeylemektedir. Anamas-Akseki Otoktonu bölgede geniş alanlarda Sultandağ Birimi ve Çay Birimine ait formasyonlar ile temsil edilmektedir. Bölgede Sultandağ birimine ait Gökoluk formasyonu, Hüdai Kuvarsiti, Çaltepe, Seydişehir, Ergenli, Kurucaova, Hacıalabaz ve Gölgeli formasyonları gözlenmektedir (Davraz ve Batur 2020). Çay birimine ait ise sadece Senozoyik yaşlı Değirmendere formasyonu yüzeylemektedir. İnceleme alanında Beyşehir-Hoyran-Hadım napları Marmaris Ofiyolit napına ait Marmaris Peridotiti, Domuzdağ napına ait Dutdere ve Bakırdağ formasyonları ile temsil edilmektedir. Neootokton Örtü kayaları ise Bağkonak, Yarıkkaya, Göksöğüt ve Kepeztepe formasyonları ile yamaç molozu ve alüvyondur (Balcı 2011; Umut 2009). Davraz ve Batur (2020) tarafından 1/100.000 ölçekli Afyon-L25 ve Afyon-L26 genel jeoloji haritalarından yararlanılarak hazırlanan bölgesel jeoloji haritası Şekil 4.1’de yer almaktadır. Isparta bölgesi, tektonik olarak aktif bir jeodinamik sistem içerisinde yer almakta olup, bu sistem Neojen’den günümüze kadar süregelen sedimantasyon ve deformasyon süreçlerini kapsamaktadır. Alp orojenezi sonucunda meydana gelen yükselim ve erozyon olayları, karbonat platformlarının aşınarak boksitli yüzeylerin oluşmasına zemin hazırlamıştır. Özellikle geç Senozoyik dönemden itibaren gelişen yüzeysel süreçler, hem lateritleşme hem de karstlaşma dinamiklerini desteklemiş, bu da ekonomik öneme sahip boksit yataklarının oluşmasına katkıda bulunmuştur (Andrew ve Robertson 2002; Robertson ve Dixon 1984). Sağır Köy-Kırkbaş Köyü boksit yatakları, Toros Orojenik Kuşağı içerisinde yer almaktadır. Bu bölge, Senozoyik ve Kretase yaşlı karbonat platformları ile karakterize edilir ve önemli tektonik hareketlere maruz kalmıştır. Bölgedeki jeolojik evrim, paleotektonik süreçlerin ve denizel regresyonun etkisiyle şekillenmiştir.

Bölgenin jeolojik evrimi, Prekambriyen ve Paleozoyik dönemlere kadar uzanır. Bu dönemlerde meydana gelen tektonik hareketler, bölgedeki kayaçların şekillenmesine ve minerallerin oluşumuna katkıda bulunmuştur. Yakın bölgede gözlenen temel kayaçlar Paleozoik metamorfik kayaçlar, mesozoik kireçtaşları, senozoyik yaşlı volkanik birimler şeklinde gözlenir. Bu kayaçlar, boksitleşme süreçlerinde önemli bir kontrol faktörü olarak görev yapmaktadır (Kurtman 1963). Bölgedeki stratigrafik birimler, genel olarak karbonat platformları ve karasal tortul istiflerden oluşmaktadır. Kretase yaşlı kireçtaşları,

Isparta/Yalvaç civarında, özellikle KD-GB uzanımlı fay zonları ve kıvrım yapıları boksitleşme sürecini doğrudan etkilemiştir. Tektonik aktivite, hem boksit mineralleşmesinin kontrolünde hem de bu minerallerin yeniden dağılımında rol oynamaktadır (Poisson 1977). Bölgedeki tektonik hareketler, özellikle ofiyolitik örtü birimlerinin yerleşmesi ve karstik yapının gelişimi açısından önemlidir. Karbonat platformlarının karstlaşması, boksitlerin birikimi için uygun boşlukların ve çökellerin oluşmasını sağlamıştır. Bunun yanı sıra, Neotektonik dönemde gelişen graben yapıları, genç tortulların çökmesini ve yerel bazen karasal karakterli istiflerin oluşumunu desteklemiştir (Koçyiğit 1989). Bölgede etkin olan tektonik süreçler, boksitleşmenin yerini ve dağılımını belirleyen en önemli faktörlerden biridir. Isparta Yalvaç bölgesinde Kuzey-güney doğrultulu fay sistemleri baskındır. Bindirme ve kırıklı yapıların gelişimi, hidrotermal akışkan dolaşımını etkilemiştir. Eosen sonrası tektonizma, boksit yataklarının korunmasını ve deformasyonunu etkilemiştir. Bu tektonik unsurlar, boksit yataklarının şekillenmesini doğrudan etkilemiş ve yatakların jeolojik gelişiminde belirleyici olmuştur (Yalçın vd. 2015).

4.2. İnceleme Alanı ve Yakın Çevresinin Jeolojisi

Afyonkarahisar'ın Şuhut ilçesinin güneyinden başlayarak Isparta'nın Senirkent ilçesi ve Eğirdir Gölü çevresine kadar uzanan çalışma sahasında, farklı tektonostratigrafik konumları temsil eden çeşitli jeolojik birimler bulunmaktadır. Bu alanda, Anamas-Akseki ve Beydağları otokton serileri, Beyşehir-Hoyran-Hadim, Likya ve Antalya napları ile bunların üstünde uyumsuz olarak gelişen neotektonik döneme ait Yalvaç Grubu, Şuhut Grubu ve Antalya Miyosen havzasına ait çökel istifleri yer almaktadır. Bunların üzerinde ise geç dönem karasal örtü birimleri olarak sınıflandırılan Pliyo-Kuvaterner ve Kuvaterner yaşlı birimler bulunmaktadır (Okay ve Tüysüz 1999; Andrew ve Robertson 2002).

Otokton serilerden biri olan Anamas-Akseki otoktonunda yer alan kaya toplulukları Sultandağı Birimi içinde toplanır. Bu birim geç Kambriyen-Erken Ordovisiyen zaman aralığında çökelen şeyl, silttaşı, kumtaşı ve kireçtaşı litolojilerine sahip Seydişehir Formasyonu, Dogger-Kretase yaşlı resifal kireçtaşları ile temsil edilen Hacıalabaz Formasyonu, Paleosen-Erken Eosen yaşlı platformal kireçtaşlarından oluşan Sarıdere Formasyonu ve Erken Eosen dönemine ait kumtaşı, şeyl ve marn seviyelerini içeren Hüseyinliçeşme Formasyonu ile karakterize edilmektedir (Göncüoğlu vd. 2000).

Anamas-Akseki otoktonuna ait bir başka birim olan Homa-Akdağ Birimi ise, Liyas-Malm yaşlı kumtaşı, silttaşı, çakıltası ve kireçtaşı ardalanmasına sahip Kocadere Formasyonu, Malm-Erken Kretase aralığında volkanoklastik ara seviyeler içeren Belcegez Formasyonu, Kretase yaşlı kireçtaşları ile tanımlanan Kocaçal Formasyonu ile temsil edilir. Ayrıca, Sarıdere ve Hüseyinliçeşme formasyonları da bu istif içinde tekrarlanır (Özgül 1997).

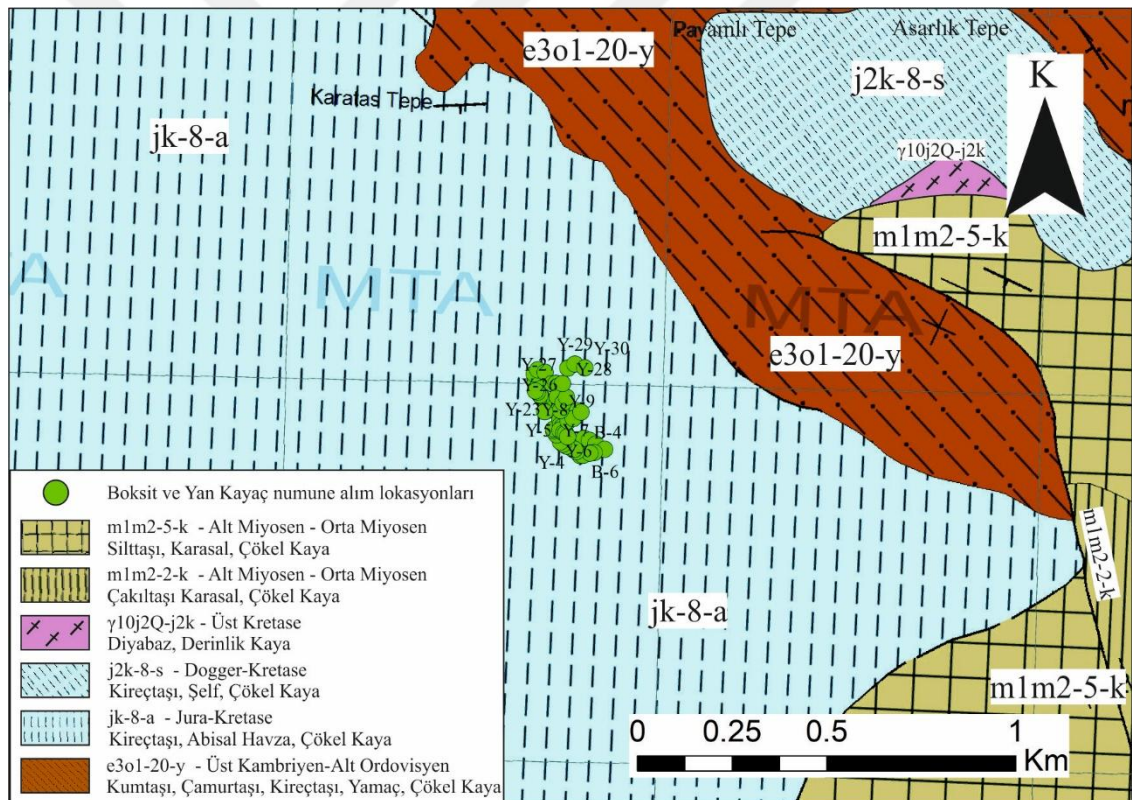
Kırdağ-Anamasdağ Birimi ise, Orta Karbonifer-Geç Permiyen aralığında çökelen kumtaşı ve kireçtaşlarından oluşan Tatarlı Formasyonu, Geç Triyas yaşlı sığ denizel karbonatlar ile tanımlanan Menteşe Formasyonu, Erken Liyas yaşlı silttaşı, kıltaşı ve konglomeralı kumtaşlarından oluşan Karacaören Formasyonu, Orta Liyas-Dogger dönemine tarihlenen resifal karbonatlardan meydana gelen Uluğbey Formasyonu, Malm yaşlı resifal kireçtaşlarını içeren Ergenli Formasyonu, Kretase yaşlı platformal

kireçtaşlarından oluşan Gök hacıdağ Formasyonu, Paleosen-Orta Eosen aralığındaki Büyükkırtepe Formasyonu ve Orta Eosen yaşlı türbiditik kumtaşı, kireçtaşı, şeyl ve marn seviyelerini kapsayan Dereköy Formasyonu ile stratigrafik olarak tanımlanmaktadır (Bozkurt ve Satır 2000; Göncüoğlu vd. 2000).

Beydağları otoktonu, çalışma alanında sadece Jura-Senomaniyen yaşlı neritik kireçtaşlarını içeren Beydağları Formasyonu ile temsil edilmektedir (Özgül 1997).

Tüm bu otokton serilerin üzerinde yer alan allokton naplar ise farklı kökenlere sahiptir. Beyşehir-Hoyran-Hadim napları, Kükürtdağ Grubu ve Sazak Grubu ile tanımlanırken; Likya napları, Tavas Napı ile ve Antalya napları ise Tahtalıdağ Napı ve Tekirova Ofiyolit Napı ile temsil edilmektedir (Okay 1989; Robertson 2000).

Bölgede geç döneme ait örtü birimleri; konglomera, kumtaşı ve silt taşları ile tanımlanan Akçaköy Formasyonu, Yalvaç Grubu ve Şuhut Grubu'nun kırıntılı çökelleri, Antalya Miyosen havzasına ait çökel birimleri ve Geç Pliyosen-Pleyistosen yaşlı Gölcük Formasyonu'nun volkanik üyesi ile Pliyo-Kuvaterner yaşlı karasal kırıntılı çökeller şeklinde gelişmiştir (Şenel 1997; Bozkurt ve Satır 2000).



Şekil 4.2. Sağırköy ve Kırkbaş köyü numune alım lokasyonları ve bölgesel jeoloji haritası (MTA L25-b2 genel jeoloji haritası, 2024)

Çalışma alanı ve 1/25.000 Afyon L26-a1 ve L25-b2 paftaları ve 1/100.000 Afyon L25 ve L26 içerisinde yer almaktadır. Pafta verileri ve genel jeoloji haritası verileri incelendiğinde bölgenin genel jeolojisi hakkında bilgiler edinilmiştir. Çalışma kapsamında, MTA tarafından üretilen 1/25.000 Afyon L26-a1 ve L25-b2 paftaları ve 1/100.000 Afyon L25 ve L26 paftalarına dayalı olarak bölgesel ölçekli genel jeoloji

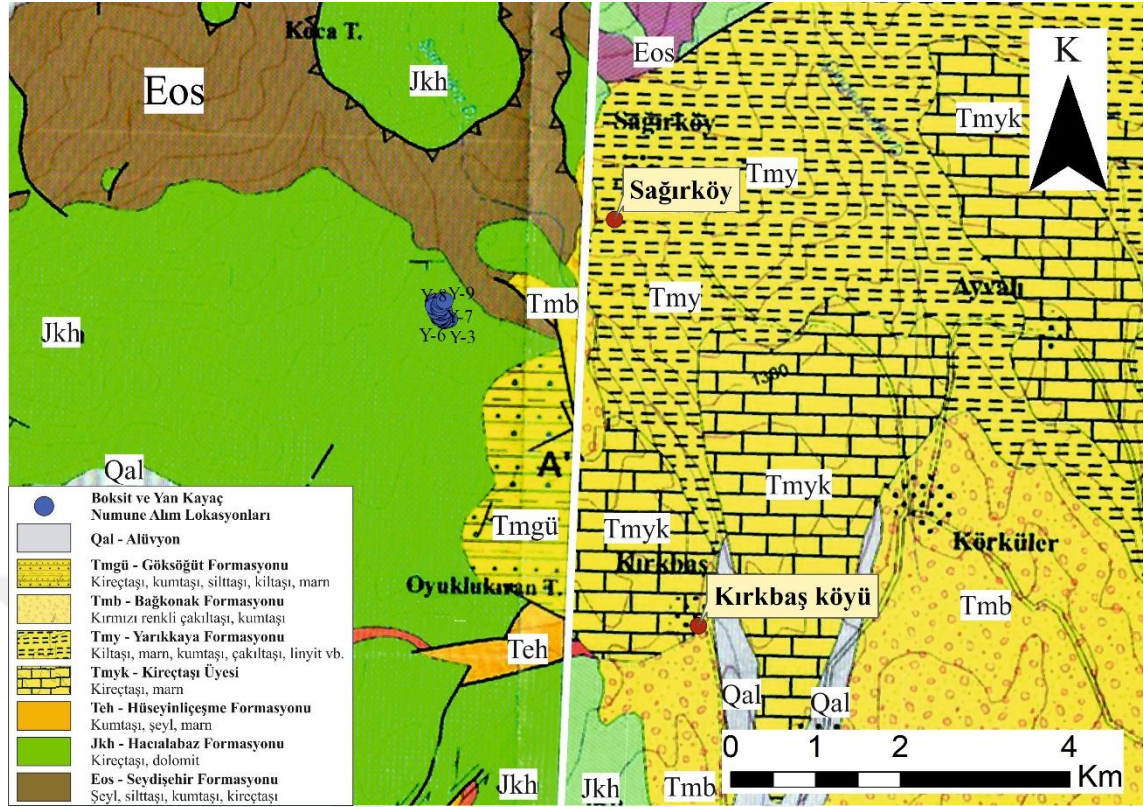
haritaları hazırlanmıştır. Bu haritalar, ArcGIS 10.7 Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) yazılımı kullanılarak sayısallaştırılmış; ardından, CorelDRAW 7.0 grafik editörü aracılığıyla lejantlar eklenmiş ve bölgedeki stratigrafik birimler detaylı biçimde yorumlanmıştır.

1/25.000 Afyon L26-a1 ve L25-b2 paftaları ve 1/100.000 Afyon L25 ve L26 paftalarına dayalı olarak bölgesel ölçekli genel jeoloji haritaları hazırlanmıştır. Bu haritalar, ArcGIS 10.7 Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) yazılımı kullanılarak sayısallaştırılmış; ardından, CorelDRAW 7.0 grafik editörü aracılığıyla lejantlar eklenmiş ve bölgedeki stratigrafik birimler detaylı biçimde incelenmiştir.

İnceleme alanının bölgesel jeoloji haritasında (Şekil 4.2) gösterildiği üzere, boksit yataklanmaları esas olarak Jura-Kretase yaşlı platformal kireçtaşları içerisinde yer almaktadır. Bu kireçtaşları, tipik olarak resifal ve lagüner ortamlarda çökelmiş, masif ve yoğun çatlaklı karbonatlardan oluşmaktadır (Özgül 1997). Boksit seviyeleri, ayrıca Üst Kambriyen–Alt Ordovisyen yaşlı Seydişehir Formasyonu’na ait kumtaşı, çamurtaşı ve kireçtaşı ardalanmasıyla birlikte, yamaç birikintileri ve çökel kaya birimlerinin yaklaşık 250 metre güneybatısında konumlanmaktadır. Seydişehir Formasyonu, sığ denizel ortamlarda çökelen kıtasal sahanlığın kenar kuşağında biriken tortul istifler ile karakterizedir (Göncüoğlu vd. 2000).

Bunun yanı sıra çalışma alanında, Geç Kretase yaşlı diyabaz dayk ve sill intruzyonları ile diyabaz derinlik kayaçları da gözlenmektedir. Bu magmatik kayaçlar, okyanusal litosferin parçaları olarak kabul edilen ve genellikle ofiyolit naplarıyla ilişkili mafik-ultramafik litolojileri temsil etmektedir (Robertson 2000). Ayrıca, Alt-Orta Miyosen yaşlı silttaşı ve çakıltası birimleri, bölgenin geç Neojen dönemdeki karasal çökme ortamlarını yansıtan kırıntılı istifleri oluşturmaktadır. Bu birimler, MTA tarafından hazırlanmış olan L25-b2 paftasına ait 1/25.000 ölçekli bölgesel jeoloji haritasında detaylı biçimde gösterilmektedir (Şenel 1997).

MTA tarafından üretilen L25-b2 ve L26-a1 paftalarına ait 1/25.000 ölçekli genel jeoloji haritalarından elde edilen veriler doğrultusunda, Kırkbaş Köyü çevresinin bölgesel stratigrafisi belirgin bir istiflenme sunmaktadır. Bu alandaki en genç birim, Holosen yaşlı alüvyon ve yamaç molozu gibi güncel çökel kayaçlarıdır. Bu birimler, günümüzdeki dere, çay ve ova sistemlerinde biriken, zayıf tutturulmuş, heterojen kırıntılı sedimanlardan oluşmaktadır (Şenel 1997). Holosen birimlerin altında Üst ve Orta Miyosen yaşlı çakıltası, kumtaşı ve çamurtaşı ardalanması yer almaktadır. Afyon L-25 ve L-26 1/100.000 ölçekli jeoloji haritasından değiştirilerek hazırlanan numune lokasyonlarını içeren bölgesel jeoloji haritası Şekil 4.3’te yer almaktadır. Bu kırıntılı tortullar, bölgenin geç Neojen döneminde aktifleşen karasal nehir ve göl ortamlarında birikmiş olup, genellikle kötü boylanmış ve zayıf çimentolu karakterdedir (Andrew ve Robertson 2002). Stratigrafik istifin en alt seviyesinde ise Üst Kretase yaşlı ofiyolitik kayaçlar gözlenmektedir. Bu ofiyolitik topluluklar, serpantinit, gabro, diyabaz ve bazalt gibi mafik-ultramafik kayaçlardan oluşmakta olup, bölgedeki okyanusal litosfer kökenli napların parçasıdır (Robertson 2000).



Şekil 4.3. Sağırköy ve Kırkbaşı köyü numune alım lokasyonları ve bölgesel jeoloji haritası (MTA L-25 ve L-26 genel jeoloji haritası 2024)

Sağırköy bölgesinin stratigrafik yapısı da benzer şekilde çeşitlilik göstermektedir. Bölgedeki en genç birimi, Orta Miyosen yaşlı çakıltaşı, kumtaşı ve çamurtaşı ardalanması oluşturmaktadır. Bu birimler, Miyosen dönemine ait fluviodeltaik ve sığ gölsel ortamlarda çökelmiş, genellikle çok sayıda litolojik geçiş zonu içeren tortullardır (Göncüoğlu vd. 2000). Bunun altında Alt Miyosen yaşlı çakıltaşı, kumtaşı ve çamurtaşı ardalanması yer almakta olup, benzer şekilde kıtasal kırıntılı tortul birikimini temsil etmektedir. Bölgedeki stratigrafik dizilimin en yaşlı seviyesini ise Üst Kambriyen–Alt Ordovisyen yaşlı çamurtaşı, kireçtaşı ve şelf-yamaç birikimi ardalanmasından oluşan Seydişehir Formasyonu oluşturmaktadır. Bu birimler, sığ denizel platformdan yamaç ve derin denizel ortamlara geçişi yansıtan şeyl, kireçtaşı ve kumtaşı ardalanmalarıyla karakterize edilir ve çalışma sahasında temel kayaları teşkil etmektedir (Özgül 1997; Göncüoğlu vd. 2000).

ÜST SİSTEM	SİSTEM	FORMASYON ÜYE	KAYA TÜRÜ	KAYATÜRÜ ÖZELLİKLERİ
Senozoyik	Kuvaterner	Alüvyon	Qal	Nehir, dere yataklarının taşıdığı düzlüklere biriken kil, silt, kum çakıl birimleri
	Miyosen	Göksöğüt Formasyonu	Tmğü	Kireçtaşı, Kumtaşı, Silttaşı, Kiltası, Marn
		Bağkonak Formasyonu	Tmb	Kırmızı renkli çakıltası, kumtaşı
		Yarıkkaya Formasyonu Kireçtaşı üyesi	Tmyk	Kiltası, Marn, Kumtaşı, Çakıltası, Linyit vb. Kireçtaşı, Marn
	Eosen	Hüseyinliçeşme Formasyonu	Teh	Kumtaşı, Şeyl, Marn
Mesozoyik	Kretase	Hacılabaz Formasyonu	Jkh	Kireçtaşı, Dolomit Boksit Cevheri
Paleozoyik	Kambriyen	Seydişehir Formasyonu	Eos	Sleyt, Metakumtaşı

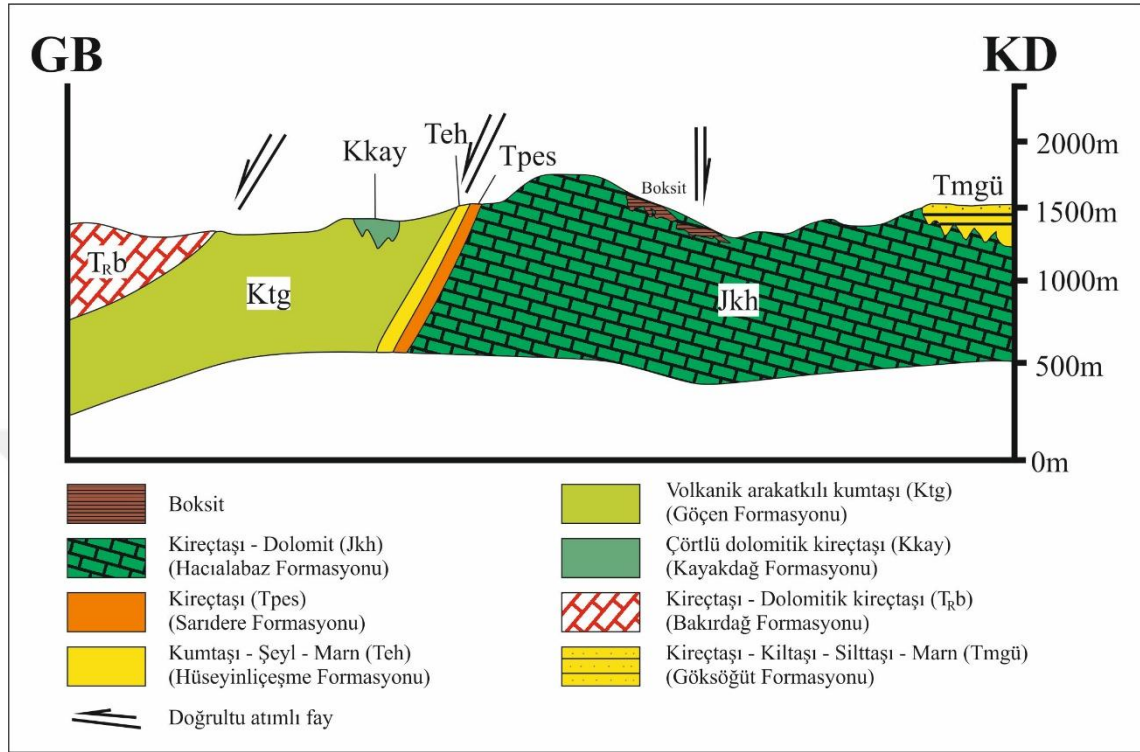
Şekil 4.4. Sağırköy ve Kırbaş köyü genelleştirilmiş stratigrafik kesit (MTA L-25 ve L-26 genel jeoloji haritası 2024)

İncelenen sahada yüzeyleyen litostratigrafik birimler, Paleozoyik'ten Kuvaterner'e kadar geniş bir zaman aralığını kapsamaktadır (Şekil 4.4). En altta, Kambriyen yaşlı Seydişehir Formasyonu bulunmaktadır. Bu formasyon; sleyt ve metakumtaşından oluşan litolojik bir bileşime sahiptir ve bölgedeki en yaşlı birimdir. Üzerinde, Kretase yaşlı Hacılabaz Formasyonu yer almakta olup, kireçtaşı ve dolomit litolojileri ile temsil edilmektedir. Seydişehir ve Hacılabaz formasyonlarının üzerinde yer ala Eosen yaşlı Hüseyinliçeşme Formasyonu, kumtaşı, şeyl ve marn litolojilerinden oluşur. Bu formasyonun üzerinde uyumsuz Miyosen yaşlı Yarıkkaya Formasyonu bulunmaktadır. Yarıkkaya Formasyonu'nun alt seviyelerinde kireçtaşı ve marn üyesi gelişirken, üst seviyelerinde kiltası, marn, kumtaşı, çakıltası ve yer yer linyit arakatıkları gözlenmektedir. Stratigrafik dizilimin devamında yine uyumsuz Bağkonak Formasyonu yer alır. Bu formasyon, kırmızı renkli çakıltası ve kumtaşı seviyeleri ile ayırt edilmektedir.

Miyosen yaşlı istifin üst kısımlarında ise Göksöğüt Formasyonu yer almakta olup, kireçtaşı, kumtaşı, silttaşı, kiltası ve marn aralanmasından oluşur. Bu iki Miyosen formasyonu (Göksöğüt, Bağkonak), litostratigrafik olarak "Yalvaç Grubu" adı altında toplanmıştır. En üstte ise Kuvaterner yaşlı Alüvyon birimi bulunmaktadır. Bu birim, nehir ve dere yataklarının taşıdığı kil, silt, kum ve çakıl birikintilerinden oluşmaktadır.

Stratigrafik aralanma, sedimantolojik süreçlerin ve bölgesel jeodinamiklerin zaman içerisindeki evrimini ortaya koymaktadır.

MTA tarafından hazırlanmış Afyon L25 ve L26 numaralı 1/100.000 ölçekli genel jeoloji haritalarından elde edilen veriler doğrultusunda, çalışma alanında yer alan formasyonlar yaşlıdan gence doğru şu şekilde sıralanmaktadır;



Şekil 4.5. Sağırköy ve Kırkbaş boksitlerinin stratigrafik birimlerle ilişkilerini gösteren jeolojik enine kesit (MTA, 2024).

Jkh (Hacılabaz Formasyonu): Kireçtaşı-dolomit bileşimlidir ve karstik boşluk gelişimi açısından elverişlidir. Bu boşluklar, taşınan lateritik malzemenin biriktiği yerler olarak işlev görmüştür (Demirkol 1977). Teh (Hüseyinliçeşme Formasyonu): Kireçtaşı seviyesidir ve karstlaşmaya uygun litolojisiyle dikkat çekmektedir (Öztürk ve Öztürk 1989). Tpes (Sarıdere Formasyonu): Çörtlü dolomitik kireçtaşı olup, geçirimsizliği düşük ama mekanik dirençli bir birimdir (Öztürk ve Öztürk 1989). Ktg (Göçen Formasyonu): Volkanik arakatkılı kumtaşlarından oluşan bu birim, ayrışma ürünlerinin kaynağı olabilecek feldspatça zengin litolojileri içerebilir (Haude 1972). Trb (Bakırdağ Formasyonu): Kireçtaşı-dolomitik kireçtaşı litolojisiyle, karstik yapıların gelişimine uygun ortam sunar (Haude 1972). Tmgü (Göksöğüt Formasyonu): Üst seviyede yer alan bu birim, kireçtaşı-kıltaşı-silttaşı-marn bileşimiyle örtü birimi niteliğindedir. Lateritik süreçlerin varlığı, volkanik arakatkılı kumtaşı (Ktg) gibi feldspatça zengin birimlerden türeyen ayrışma ürünleriyle görülmektedir. Karstik kireçtaşları (Jkh, Teh), hem fiziksel boşluk sağlayarak hem de kimyasal ortam sunarak, boksitleşme için ideal çökeltme alanları oluşturmuştur. Metamorfizma ve alterasyon, boşluklara taşınan malzemenin mineralojik olarak yeniden düzenlenmesine neden olmuştur. Dendrogram analizleri ile belirlenen benzer jeokimyasal özellikler, aynı kaynak ve süreçlerden türeyen boksit türlerini desteklemektedir (Demirkol vd. 1979; Öztürk ve Öztürk 1981).

Ana kaya feldspatça zengin bir magmatik kayadır (örneğin, gnays). Bu kayadan türeyen ayrışma ürünleri, lateritik süreçlerle yüzeyde Al açısından zenginleşmiş; fakat silis tam olarak ortamdaki uzaklaştırılamamıştır. Böylece Al_2O_3 bakımından zengin ancak Si içeriği görece yüksek olan bir malzeme oluşmuştur.

Enine kesitte görülen karstik kireçtaşı birimleri, bu lateritik materyalin taşındığı ve biriktiği ortamlar olarak işlev görmüştür (Şekil 4.5). Bu da karstik boşlukların boksit oluşumu açısından kritik rol oynadığını gösterir. Zaman içinde bu boşluklara dolan materyal, hem birincil ayrışma süreçlerinden, hem de olası bölgesel metamorfizma etkilerinden etkilenmiş ve mineralojik olarak kaolinitik ve boksitik karakter kazanmıştır.

4.2.1. Seydişehir formasyonu (Eos)

Düşük dereceli metamorfizma geçirmiş sleyt, metakumtaşı ardalanmalı formasyon, ilk kez Blumenthal (1947) tarafından Seydişehir şistleri olarak adlandırılmıştır. Alt düzeylerinde açık yeşil, boz, yer yer kıvımsız mavi renkli kuvarsit ve kırmızı, pembe renkli yumrulu kireçtaşı arakatkılı metasilttaşı, metaşeyl ve metakumtaşlarından meydana gelir. Yeşil şist metamorfizması başlangıcı nedeniyle hamur kloritleşmiş ve serizitleşmiştir. Metakumtaşlarında derecelenme ve akıntı yapıları gelişmiştir. Formasyonda ayrıca alt düzeylerde yeşil renkli, ayrılmış volkanit silleri de gözlenebilir.

Çalışma alanında Seydişehir formasyonunun üzerinde Hacılabaz formasyonu uyumsuz olarak yer alır. Yaklaşık kalınlığı 1000 metre dolayındadır.

Formasyonda izlenmiş *Asaphellus* sp., *Macropyge* sp., *Pseudegnostus* sp. (Haude 1972), *Prooneotodustenus* (Demirkol 1977), *Cephalopoda* (*Orthoceras*), *Phycodes*, *Trilobit pygidium* (Öztürk vd. 1981) gibi fosillerden ve bölgesel deneştirme ile formasyona Geç Kambriyen-Erken Ordovisiyen yaşı verilmiştir.

Formasyon türbiditik akıntıların etkin olduğu açık şelf-kita yamacı ortamında çökelmiştir.

4.2.2. Hacılabaz formasyonu (JKh)

Karbonatlardan meydana gelen formasyon Demirkol (1977) tarafından adlandırılmıştır. Formasyon en alt düzeyinde kuvars taneli, boz renkli kumtaşı içeren koyu gri renkli, orta-kalın tabakalanmalı mikrit-biyomikritlerle başlar. Üste doğru gri boz renkli, orta-kalın tabakalanmalı dolomit ve mikritik kireçtaşlarıyla yaklaşık 70 metre kalınlıkta bazaltik volkanitler gelir. Volkanitler, orta-kalın tabakalanmalı, kül rengi dolomit, dolomitik kireçtaşı ve kireçtaşlarına geçer. Üste doğru koyu kül renkli, orta-kalın tabakalı, algli, foraminiferli mikrit ve biyomikritlerle devam eder. Daha üst düzeylerinde kalın tabakalanmalı veya tabakasız, kavrık, biyoklastik kireçtaşlarıyla devam eden formasyon boz, kırmızımsı, pembe renkli, ince-orta tabakalanmalı kireçtaşlarıyla sona erer. Formasyon, Paleozoyik yaşlı birimleri transgresif olarak üzerler. Birim 1900 metre dolayında kalınlık gösterir.

4.2.3. Hüseyinliçeşme formasyonu (Teh)

Çamurtaşı, şeyl, kilaşı ile içinde değişik yaş ve boyutlarda olistolitler içeren türbiditik kumtaşlarından oluşan birim Öztürk ve Öztürk (1989) tarafından isimlendirilmiştir. Formasyon bordo-yeşil renkli, ince tabakalanmalı, laminali kilaşı ve çamurtaşı ile başlar ve bordo renkli şeyllere geçer. Yaklaşık 1-1.5 metre kalınlık sunan bu seviye üstüne türbiditik kumtaşları gelir ve dereceli olarak kilaşına geçiş gösterir. Kumtaşı çok tür bileşenli olup yuvarlak, yarı köşeli elemanların boyları kil-kaba kum boyutunda değişir. Çimento karbonattır. Kumtaşları, yer yer 1- 1.5 metre çapa çıkan ve çoğunlukla Triyas yaşlı Involutina'lı biyomikrit ile Globotruncana'lı çörtlü biyomikrit olistolitleri içerir.

Sarıdere formasyonu üzerinde geçişli olarak yer alan birim, yer yer Şuhut grubu ve yamaç molozları tarafından uyumsuzlukla, genellikle de Beyşehir-Hoyran-Hadim napları tarafından tektonik olarak üzerlenir. Kalınlığı yaklaşık olarak 60-70 metre dolayındadır.

Formasyon, taşınmış neritik (Rudist, Siderolites sp.) ve bentik (Globorotalia sp., Globigerina sp.) organizma bakımından zengindir. Ancak kendi içinde kesin yaş verecek bir organizma bulunamamıştır. Formasyonun yaşının alt üst ilişkileri ve bölgesel deneştirme ile Erken Eosen-Lütesiyen öncesi olabileceği öngörülmüştür (Öztürk ve Öztürk 1989).

Birim bulantı akıntılarının egemen olduğu duraysız ortam koşullarında çökelmiştir.

4.2.4. Yarikkaya formasyonu (Tmy)

Kilaşı, çamurtaşı, marn ve yersel olarak çakilaşı bileşinlerinden oluşan birim, Demirkol ve diğerleri (1977) tarafından "Yarikkaya Formasyonu" olarak tanımlanmıştır.

Yarikkaya formasyonunun alt bölümü, egemen olarak kilaşı ve çamurtaşı ardalanmasından oluşur. Birimin ana bileşenini oluşturan kilaşı ve çamurtaşları genellikle soluk yeşilimsi, düzensiz laminalı, zayıf pekleşmiş ve yersel ince taneli kumtaşı ara katkılıdır. Kömürleşmiş bitki kalıntıları ile başlıca Planorbis sp.'den oluşan tatlı su gastropodları, kilaşı-çamurtaşı kesiti içinde yaygın olarak bulunur. Yarikkaya çevresinde en fazla 75 m kalınlıkta olabilen birim, güneye doğru gidildikçe inceler.

Yarikkaya yöresinde bulunan ekonomik nitelikteki linyit düzeyi, kilaşı üyesinin en üst bölümünde yer alır. Linyit kalınlığı ortalama 150 cm olup, havzanın güneyine doğru düşük ivmeli bir hızla inceler. Bu yöredeki kömürler koyu kahve ile siyahımsı renkte olup, yumuşak ve sert linyit arasında değişen özellikte bulunurlar. Yarikkaya formasyonunda genellikle kömür düzeyinin üst bölümünde yer alan marnlar, başlıca sarımsı, açık grimsi ve orta ile ince düzgün yarılmıdır. Kilaşı, çamurtaşı ve killi kireçtaşından oluşan ara düzeyler olağandır. Değişik türde bitkilere ait yaprak izleri marnlar içinde yaygın olarak bulunur.

Yarıkkaya formasyonu havzanın kuzey kenarında, Bağkonak formasyonuna ait çakıltaşı ile yanal ve düşey yönde giriklik gösterir. Göksöğüt formasyonunun alt bölümünü oluşturan çakıltaşları, birimi aşınmalı bir dokanakla üstler. Dokanak ilişkileri Ayvalı kuzeyinde açık olarak gözlenir.

Yarıkkaya formasyonu içinde yer alan linyitlerde Prof. Dr. E. Akyol ve Dr. F. Akgün (Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir) tarafından Orta Miyosen'e ait aşağıda belirtilen spor ve polen toplulukları saptanmıştır (Yağmurlu 1991).

Kireçtaşı Üyesi: Beyaz, gri renkli sert sıkı tutturulmuş, orta-kalın katmanlı kireçtaşları Demirkol ve diğerleri (1977) tarafından kireçtaşı üyesi olarak ayırtlanmıştır.

Yarıkkaya formasyonunun üst kısımlarında yer alan kireçtaşı üyesi Kırbaş ve Ayvalı köyleri civarında yüzeylenir. Tanımsız gastropod ve lamelli kavkılar içerir.

4.2.5. Bağkonak formasyonu (Tmb)

Kaba çakıltaşı, kumtaşı ve silttaşlarından oluşan formasyon, Demirkol ve diğerleri (1979) tarafından adlandırılmıştır. Formasyonda gözlenen kaba çakıltaşları, üste doğru giderek küçülen taneleri ile çakıltaşı-kumtaşı ardalanmasına ve kumtaşı, silttaşı seviyelerine geçer. Çakıltaşları kırmızı, sarımsı, boz renklerde, kötü boylanmalı, gevşek tutturulmuş ve yer yer karbonat çimentoludur. Taneler, genellikle kireçtaşı, kuvars, kuvarsit, şistlerden oluşmuştur. Yersel çapraz tabakalanma, oygu, dolgu ve mercek yapıları görülür. Kumtaşları, krem, pembe, boz, yeşil, kahve renkli, orta-kalın tabakalanmalı, gevşek, yer yer sıkı tutturulmuş ve karbonat çimentoludur. Silttaşları ise açık yeşil, boz renk sunarlar.

Formasyon, Geç Miyosen-Pliyosen yaşlı Göksöğüt formasyonu tarafından uyumlu olarak üzerlenmiştir. Birimin kalınlığı, 180 metre ile 220 metre arasında değişir.

Formasyonda yaş verilebilecek herhangi bir fosile rastlanılmamıştır. Çalışma alanı dışında benzer birimlerden alınan yaşlar ve stratigrafik korelasyon ile birime Geç Miyosen yaşı verilebilir.

Formasyon, alüvyonal yelpaze ortamında çökelmiş olmalıdır.

4.2.6. Göksöğüt formasyonu (Tmgü)

Genel olarak kumtaşı ve silttaşı ile başlayan, kıltaşı, marn, killi kireçtaşı ardalanması ile devam eden ve killi kireçtaşı ile son bulan formasyon, Demirkol ve diğerleri (1979) tarafından adlandırılmıştır. Birim altta yeşil, boz, kahve ve yer yer pembe renkli, çakıltaşı ara seviyeli, gevşek tutturulmuş, ince-orta tabakalanmalı, karbonat çimentolu kumtaşı ve silttaşları ile başlar. Kıltaşı, marn, killi kireçtaşı ardalanmasında, kıltaşları yeşil, marnlar kirli beyaz, killi kireçtaşları ise taze yüzeyleri krem, gri, beyaz, ayrışma yüzeyleri ise boz, sarı renklerde olup ince tabakalanmalıdır. Üst düzeylerde görülen killi kireçtaşları ise orta, kalın, yer yer masif tabakalanmalı, taze yüzeyleri bej, krem, kirli beyaz renkli, ayrışma yüzeyleri sarı, krem renkli, sert, sıkı tutturulmuş ve bol makro (gastropod, ostracoda) fosillidir (Öztürk ve Öztürk 1981).

Birim, Pliyo-Kuvaterner ve Kuvaterner çökelleri tarafından örtülmüştür. Formasyon yaklaşık 130 metre'lik bir kalınlık sunar.

Formasyonda yaş verilebilecek herhangi bir fosile rastlanılmamıştır. Çalışma alanı dışında benzer birimlerden alınan yaşlar ve stratigrafik korelasyon ile birime Geç Miyosen- Pliyosen yaşı verilebilir.

Formasyonun çökelme ortamı, akarsu ortamından göl ortamına geçişi yansıtmaktadır.

4.2.7. Alüvyon (Qal)

Nehir yataklarında, düzlüklerde ve göl kenarlarındaki çakıl, kum ve çamur birikintileridir.

4.3. Mineralojik ve Petrografik Özellikler

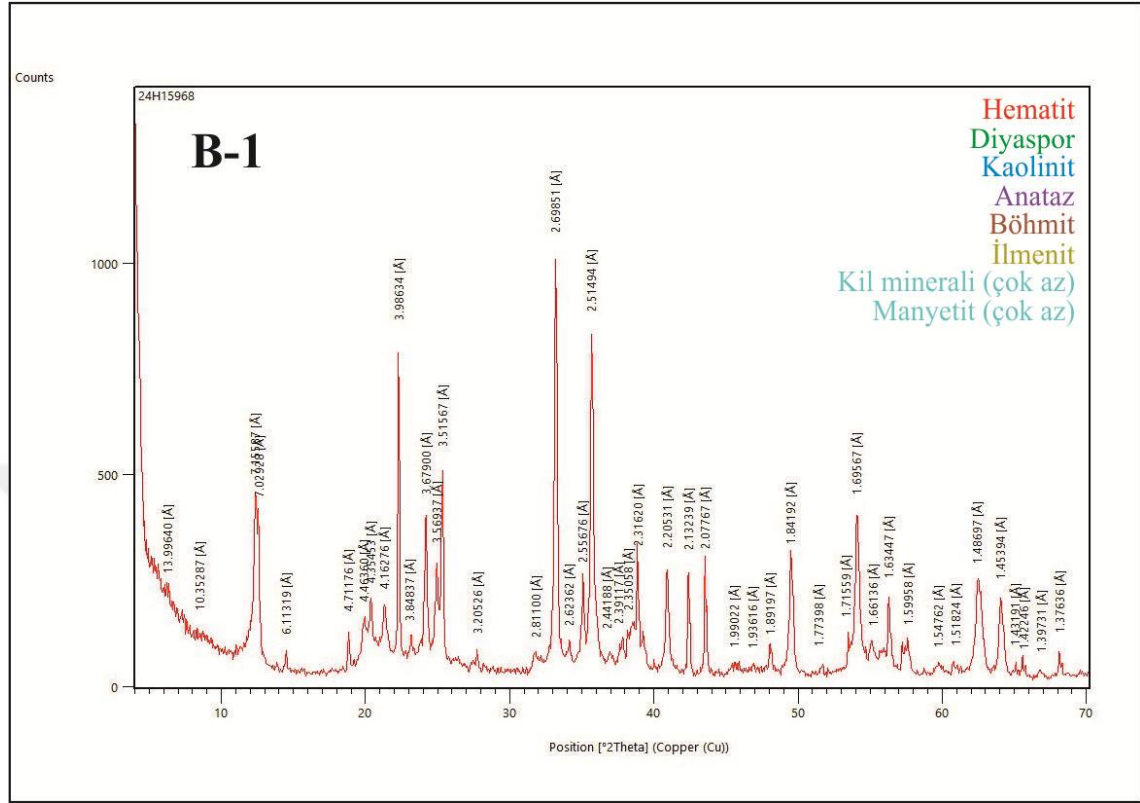
4.3.1. XRD analizi

Çalışmada gerçekleştirilen X-ışını difraksiyon (XRD) analizleri sonucunda, boksit numunelerinin mineralojik bileşiminde başlıca böhmite (γ -AlO(OH)), diaspore (α -AlO(OH)) ve gibbi alüminyum hidroksit minerallerinin baskın olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, örneklerde hematit (Fe_2O_3), götite ($\text{FeO}(\text{OH})$) ve anataz (TiO_2) gibi demir ve titanyum oksit fazlarının varlığı da tespit edilmiştir. Yan kayaç örneklerinde ise kuvars (SiO_2) ve illit gibi kil mineralleri ön plana çıkmıştır. Mineralojik çeşitlilik, örnekler arası petrografik farklılıkları ve sahadaki boksitleşme süreçlerinin heterojenliğini yansıtmaktadır. Özellikle B-1, B-5, B-11 ve B-14 kodlu boksit numunelerinde diaspore oranı yüksek bulunurken, B-10 ve B-19 numunelerinde böhmite ve hematit içeriklerinin belirgin şekilde arttığı gözlemlenmiştir. Bu bulgular, çalışma alanındaki lateritik süreçlerin farklı derecelerde etkili olduğunu ve mineral oluşumunda yerel jeokimyasal ortam koşullarının önemli rol oynadığını ortaya koymaktadır. 2 ayrı boksit ocağından (Güney açık ve Kuzey açık ocakları) alınan numunelere yapılan XRD diyagramları ilk 15 numune için Güney açık boksit ocağını, son 15 numune için ise kuzey açık boksit ocağını temsil etmektedir. B-1 numunesine ait XRD diyagramı Şekil 4.6'da yer almaktadır. Boksit ve yan kayaç numunelerine ait XRD analizinde, 5–70° 2 θ aralığında belirlenen kırınım desenleri incelenmiştir.

B-1 numunesinde başlıca mineraller olarak hematit (Fe_2O_3), diaspore (AlO(OH)), kaolinit ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$), anataz (TiO_2), böhmite (γ -AlO(OH)) ve iz miktarda ilmenit (FeTiO_3) ile manyetit (Fe_3O_4) tanımlanmıştır. Ayrıca düşük yoğunluklu ve geniş tabanlı pencereler, düşük miktarda kil mineralleri varlığına işaret etmektedir.

Numunede hem hidroksitli alüminyum fazlarının (böhmite ve diaspore) hem de hematit ve anataz gibi oksit fazlarının birlikte gözlemlenmesi, bu boksitin ileri derecede ayrışma geçirmiş, ancak birincil minerallerin varlığını kısmen koruyan bir yapıya sahip olduğunu göstermektedir. Diaspore ve böhmite birlikte tespit edilmesi, yüksek sıcaklık ve orta-yüksek pH koşullarında gelişmiş bir boksitleşme sürecine işaret eder. Hematit

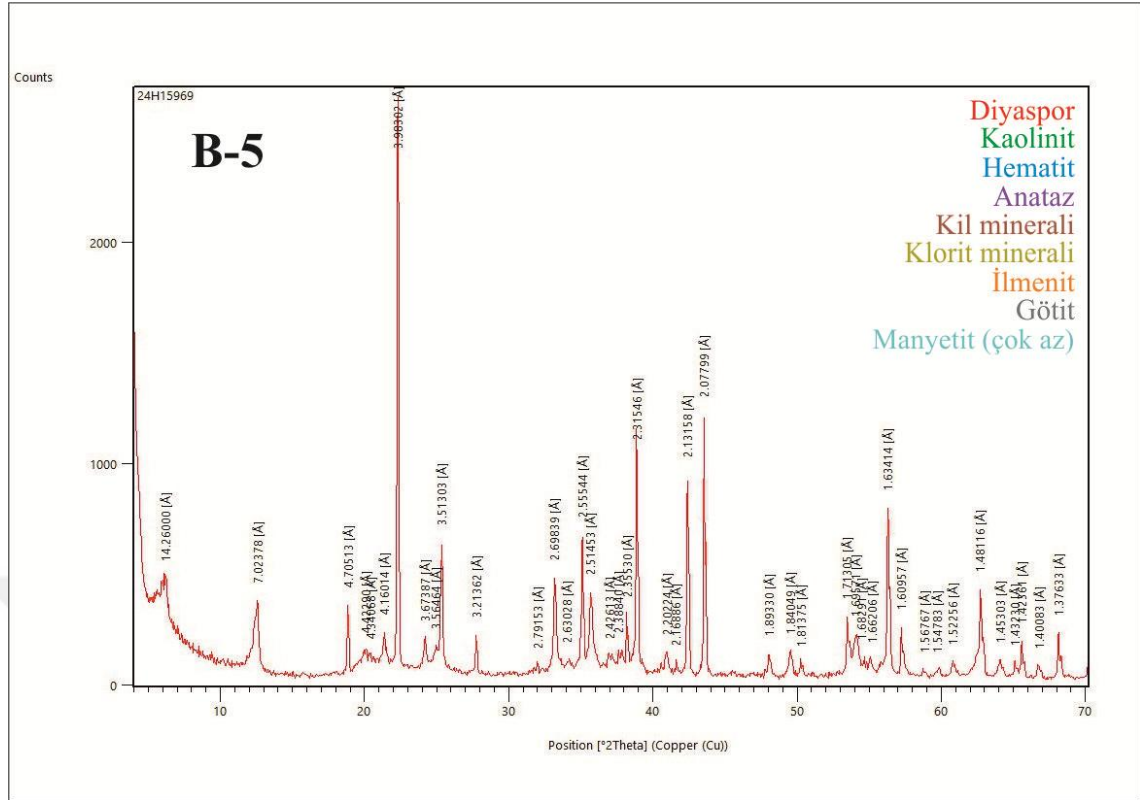
varlığı, lateritik koşullarda demir oksit zenginleşmesinin meydana geldiğini düşündürmektedir.



Şekil 4.6. B-1 numunesine ait XRD diyagramı

Anataz ve ilmenit gibi titanyum içeren minerallerin varlığı, birincil kayaçlarda titanyum açısından zengin minerallerin bulunduğu ve bu minerallerin ayrışma süreçlerinde stabil kalarak boksit matrisinde yer aldıklarına işaret eder. Kaolinitin varlığı ise alüminyumun kil formunda tutulduğu bir faza geçiş olduğunu düşündürür; bu da yer yer alterasyonun daha az etkili olduğu lokal bölgeleri işaret edebilir (Putzolu vd. 2018). Manyetit gibi ferromanyetik minerallerin iz düzeyde tespit edilmesi, bölgedeki primer kayaç bileşiminin magmatik kökenli katkılar içerdiğini düşündürülebilir.

B-5 numunesinde baskın olarak tespit edilen hematit, demir oksit fazının başlıca temsilcisidir ve yoğun lateritik alterasyon süreçlerine işaret etmektedir (Şekil 4.7). Hematit varlığı, Fe bakımından zenginleşmiş tropikal-yarı tropikal iklim koşullarında gelişen oksidasyon süreçlerinin göstergesidir (Bardossy ve Aleva 1990). Aynı zamanda hematit, boksitlerin kırmızı renklenmesinden de sorumludur.



Şekil 4.7. B-5 numunesine ait XRD diyagramı

Diyaspor ve böhmüt, numune de saptanan başlıca alüminyum hidroksit fazlarıdır. Bu iki mineral, yüksek derecede altere olmuş alüminyumlu kayaların karakteristik ürünleridir. Diyasporun varlığı, yüksek sıcaklık ve nispeten daha derin gömülme koşullarına, böhmüt ise daha yüzeysel ve düşük sıcaklık-yüksek pH koşullarına işaret eder (Öncel ve Söğüt 2008). Kaolinit ve kil mineralleri, silikatlı minerallerin ayrışması sonucu oluşmuş olup, alterasyonun ilerlemiş olduğunu göstermektedir. Bu mineraller, lateritleşme sürecinde silisin uzaklaştırılmasına karşın bir miktar kil mineralinin çökmesiyle açıklanabilir.

Anataz (TiO_2) ve ilmenit (FeTiO_3), titanyum içeriğinin varlığına işaret eden aksesuar minerallerdir. Anatazın varlığı, Ti'nin dayanıklı fazlara geçiş yaparak boksit içinde korunabildiğini gösterir. Bu durum, kayacın ana kayaç olarak Ti bakımından zengin bir protoliti olduğunu düşündürülebilir (Valeton 1972).

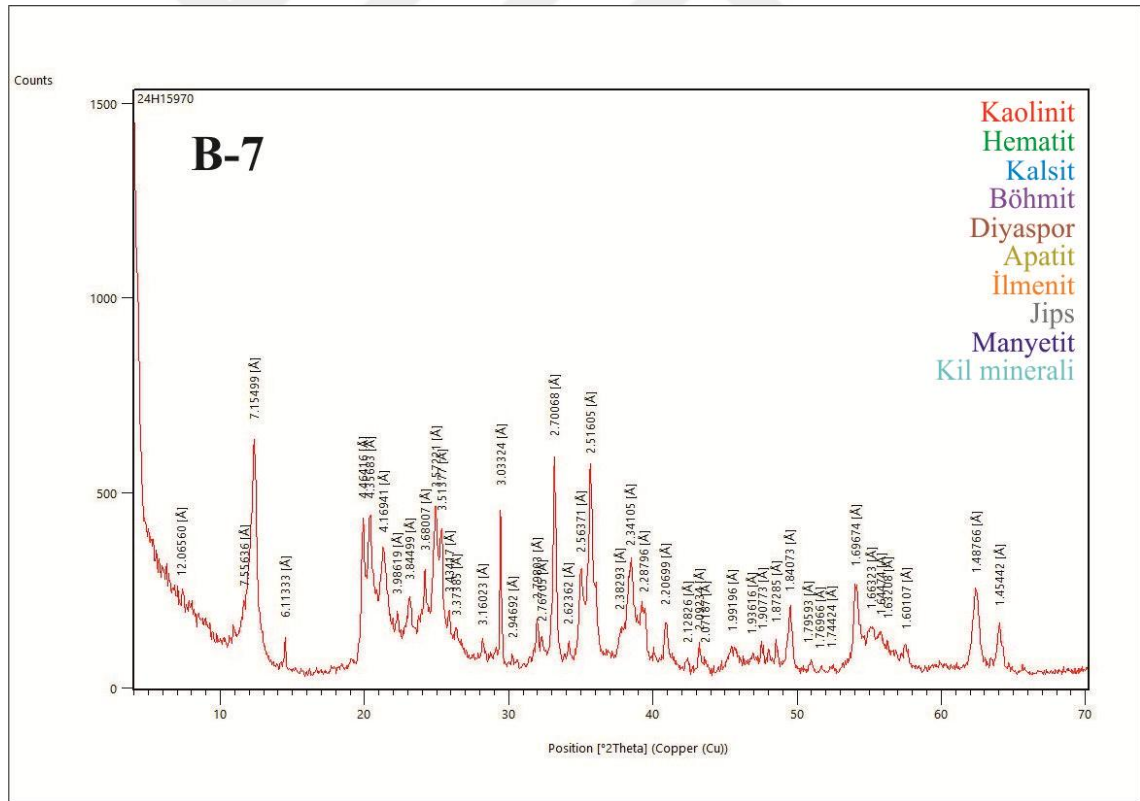
Klorit mineralleri ve götüt, genellikle Fe ve Mg içeriği bakımından zengin koşullarda kristalleşir. Götüt özellikle daha nemli koşullarda oluşur ve genellikle hematite dönüşmeden önceki ara oksit fazlardan biridir. Manyetit, düşük oranda gözlenmekle birlikte, demir açısından zenginleşmiş ancak daha redüksiyon ortamlarında kristallenmiş bir oksit mineralidir. Bu, yer yer redüksiyon koşullarının da etkili olabileceğini göstermektedir.

Bu mineral topluluğu, B-5 numunesinin oluştuğu ortamın oldukça karmaşık bir jeokimyasal evrim geçirdiğini göstermektedir. Mineralojik çeşitlilik, oksidatif koşulların

yanı sıra farklı pH ve sıcaklık derecelerinin etkili olduğunu ve protolitin oldukça çeşitli mineralojiye sahip olduğunu düşündürmektedir.

B-7 numunesinde baskın olarak tespit edilen kaolinit, silikat minerallerin yoğun ayrışması sonucu oluşmuş tipik bir alterasyon ürünüdür (Şekil 4.8). Kaolinit, lateritleşme sürecinde serbest kalan alüminyumun düşük silis içeriğiyle birleşerek çökeldiği ortamları yansıtır (Tardy 1997). Bu durum, protolitin silikatça zengin olduğu ve hidrotermal ya da atmosferik ayrışma süreçlerine maruz kaldığını göstermektedir.

Hematit, bu örnekte de önemli miktarda gözlenmiş olup, ortamın oksidatif karakterini destekleyen bir demir oksit mineralidir. Hematit, yüksek sıcaklık ve iyi drene olabilen yüzey koşullarında çökelir ve kırmızımsı rengin temel kaynağıdır (Bardossy ve Aleva 1990). Kalsit, boksitlerde yaygın olmayan, ancak karbonatlı çökelme ortamlarından ya da çevreleyen kalkerli litolojilerden yeniden dolaşıma girerek çökelebilen bir mineraldir. Bu mineralin varlığı, karbonatlı çözücü sıvılarla temas ya da süperjen kökenli karbonat çökelmeleriyle açıklanabilir. Böhmite ve dijaspor, numunedeki başlıca alüminyum hidroksit fazlarıdır. Bu iki mineralin birlikte bulunması, lateritleşmenin farklı evrelerinin ve değişen sıcaklık-pH koşullarının göstergesidir. Dijaspor, daha yüksek sıcaklık ve stabil koşullarda kristalleşirken; böhmite daha yüzeysel ve daha düşük sıcaklıkta oluşur (Valeton 1972).



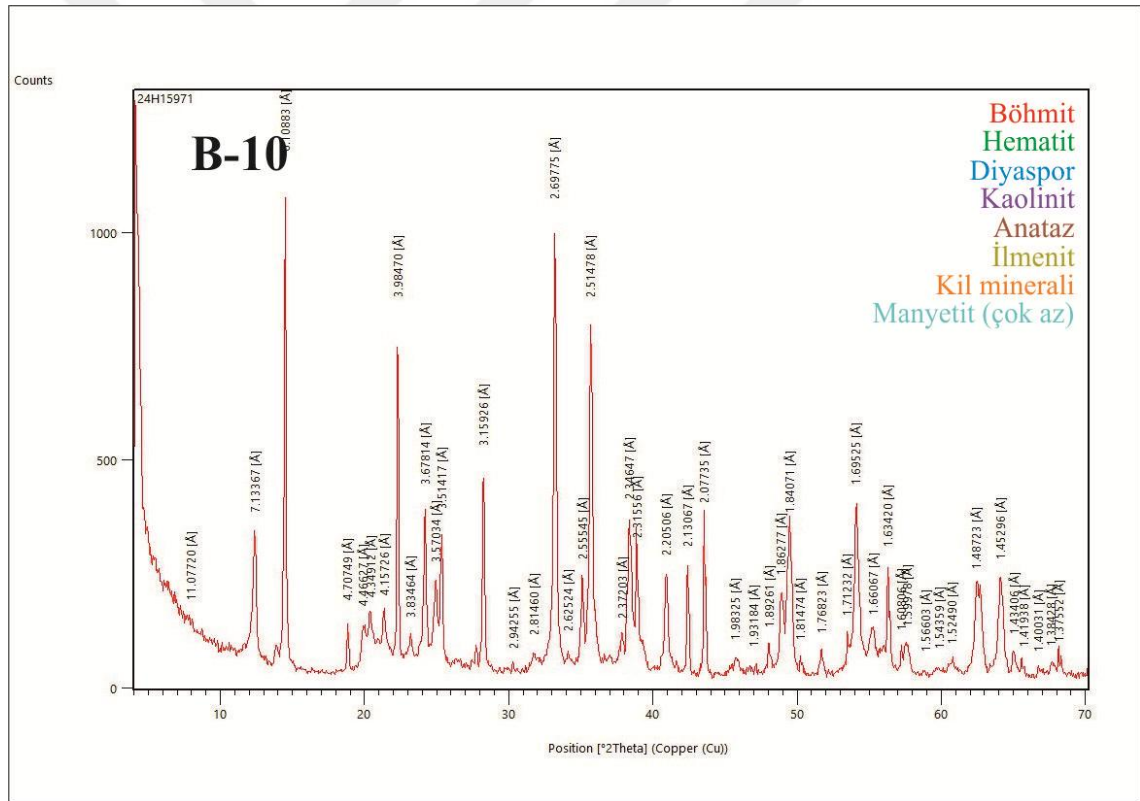
Şekil 4.8. B-7 numunesine ait XRD diyagramı

Apatit ($\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{F/Cl/OH}$), fosfor varlığına işaret eden bir aksesuar mineraldir. Genellikle biyolojik faaliyetlerle ya da magmatik kökenli bileşenlerle ilişkilendirilir. Apatit varlığı, bu numunenin protolitin fosfatça zengin bir kaynak olabileceğine işaret

eder. İlmenit, manyetit, jips ve kil mineralleri, çeşitli derecelerde oksidatif ve redüktif koşullar altında kristalleşmiş yardımcı fazları temsil eder. Jipsin varlığı, evaporatif süreçlerin etkili olduğu ya da sülfatlı sularla temasın yaşandığı ortamlara işaret etmektedir.

Sonuç olarak, B-7 numunesi çok bileşenli bir mineralojiye sahiptir ve hem oksidatif hem de karbonatlı ortam etkilerinin birlikte görüldüğü karmaşık bir jeokimyasal evrim geçirmiştir. Bu durum, Güney Açık Boksit Ocağı'nda yer alan B-7 numunesinin hem lateritik alterasyonun ileri evrelerini hem de farklı kaynaklı minerallerin etkisini barındırdığını göstermektedir.

B-10 numunesinde baskın olarak tespit edilen böhmit ve diyaspör, alüminyumun esas fazlarını oluşturur (Şekil 4.9). Böhmit, genellikle daha yüzeysel ve düşük sıcaklık koşullarında kristalleşirken; diyaspör ise yüksek basınç ve sıcaklık şartlarında oluşur. Bu iki fazın birlikte varlığı, numunenin hem yüzeysel lateritik süreçlerden hem de muhtemelen daha derin veya yeniden kristallenme süreçlerinden etkilendiğini göstermektedir (Valeton 1972; Bardossy ve Aleva 1990).



Şekil 4.9. B-10 numunesine ait XRD diyagramı

Hematit, kırmızımsı rengin nedeni olan baskın demir oksit fazıdır. Boksitlerin karakteristik bir bileşeni olan hematit, Fe^{3+} bakımından zengin ve iyi oksijenlenmiş ortamların göstergesidir. Hematit oluşumu, yoğun drenaj, tropikal ya da subtropikal iklim koşulları ve uzun süren lateritleşme süreçleriyle doğrudan ilişkilidir (Tardy 1997).

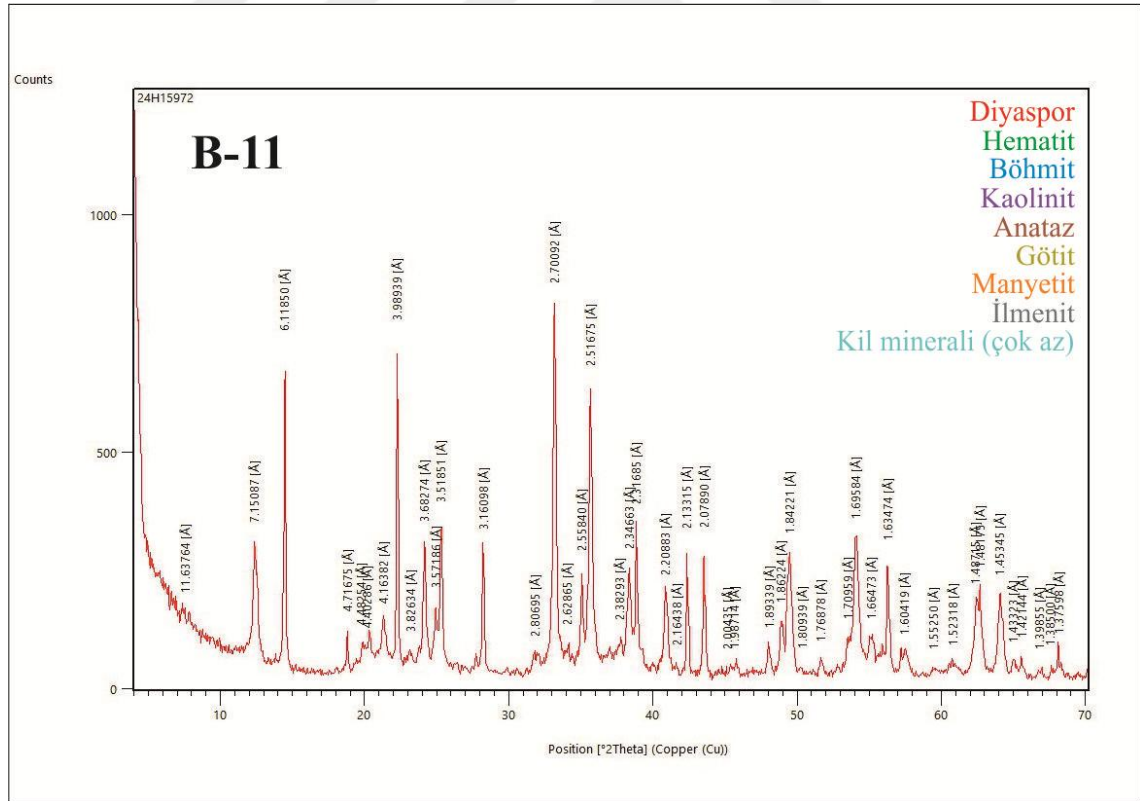
Kaolinit, bu örnekte de alterasyon sonucu oluşmuş önemli bir alüminyum silikat fazı olarak dikkat çeker. Genellikle feldspatça zengin kayaçların kimyasal ayrışması sonucu oluşur. Boksit oluşumunun ilk evrelerinde veya protolitin değişiminde önemli bir rol oynar.

Anataz, titanyum dioksit (TiO₂) formunda bir mineraldir ve daha çok çözünmezlik özelliğiyle rezidüel olarak boksitlerde bulunur. Anatazın varlığı, protolitin muhtemelen mafik ya da ultramafik bileşenler içerdiğine veya ağır minerallerle zenginleşmiş olduğuna işaret edebilir.

İlmenit, manyetit ve diğer aksesuar mineraller, Fe-Ti zengin bileşenleri yansıtır ve genellikle aşınıp taşınmadan oluşmuş lateritik profilin yerinde oluştuğuna işaret eder.

Az miktarda görülen manyetit, genellikle redüksiyon koşullarını temsil eder; hematit ile birlikte bulunması, değişken oksijenasyon seviyelerini yansıtır.

Bu mineralojik bileşim, B-10 numunesinin Güney Açık Boksit Ocağı'ndaki lateritleşmenin ileri evrelerine işaret ettiğini ve alümina açısından zengin, demir oksitlerle doygun bir profil sunduğunu göstermektedir. Aynı zamanda protolitin karmaşık bir bileşim içerdiğini ve bu nedenle hem alüminyum hem de demir-titanyum mineralleri bakımından zenginleştiği anlaşılmaktadır.



Şekil 4.10. B-11 numunesine ait XRD diyagramı

B-11 numunesindeki diyaspor ve böhmite, alümina bakımından zengin bir boksitik profilin göstergesidir. Diyasporun varlığı, daha yüksek sıcaklık ve basınç koşullarında

kristalleştigine işaret ederken; böhmitin varlığı, daha sıg ve düşük sıcaklık koşullarında gelişen bir faz olduğunu gösterir (Şekil 4.10). Bu birliktelik, profilin oluşum sürecinde farklı jeokimyasal koşullara maruz kaldığını düşündürmektedir (Bárdossy ve Aleva 1990).

Hematit ve götit, Fe içeriği açısından zenginleşmiş bir profilin göstergesidir. Götit, genellikle daha nemli ortamlarda ve hematite kıyasla daha düşük sıcaklıklarda oluşan bir Fe oksihidroksittir. Bu iki fazın birlikte gözlenmesi, ortamın oksidasyon potansiyelinin zamanla değiştiğine ve lateritleşme evrelerinin ardışık olarak geliştiğine işaret eder (Tardy 1997; Aleva 1994).

Kaolinit, silikat ayrışmasının tipik bir ürünü olarak feldspatça zengin ana kayaçların ayrışması sonucu oluşmuştur. Bu durum, numunenin protolitinde silikat minerallerinin de önemli bir yer tuttuğunu göstermektedir.

Anataz, özellikle dayanıklı bir TiO_2 fazı olarak lateritlerin içinde rezidüel olarak bulunur. Kayaçın titanyum içeriği ve bu elementin taşınmaya karşı dirençli doğası, anatazın birikimini destekler.

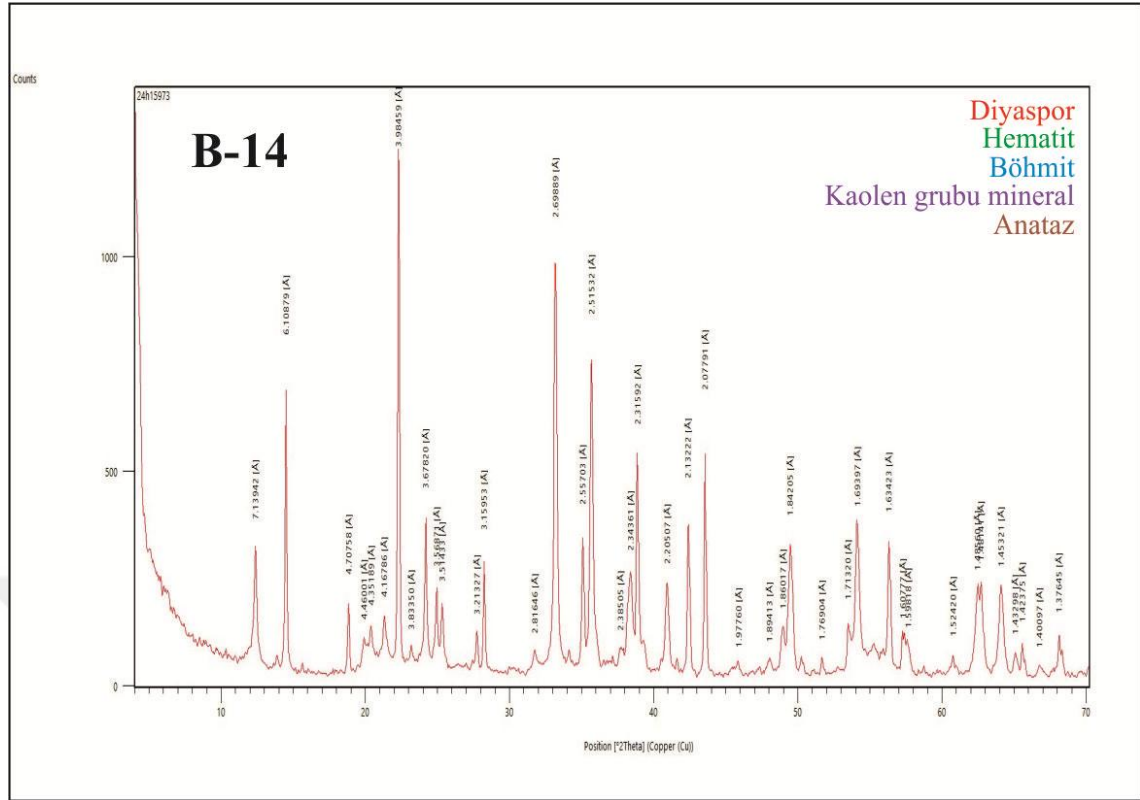
İlmenit ve manyetit gibi aksesuar minerallerin varlığı, boksitlerin protolitinde demir ve titanyum içeren minerallerin mevcut olduğunu ve bu minerallerin ayrışmaya karşı direnç göstererek birikim sağladığını göstermektedir.

Bu mineral topluluğu, B-11 numunesinin hem alümina hem de demir bakımından zenginleşmiş bir lateritik ortamda oluştuğunu ve oldukça karmaşık bir alterasyon geçmişine sahip olduğunu ortaya koymaktadır. Götit ve diyaspor birlikteliği, özellikle iklimsel ve hidrotermal koşulların değişkenliğini işaret etmesi bakımından dikkat çekicidir.

B-14 numunesinde yer alan diyaspor ve böhmit, yüksek derecede boksitikleşmiş bir profili ortaya koymaktadır. Diyaspor, genellikle düşük su aktivitesine sahip koşullarda kristalleşen bir $AlOOH$ fazı olup, boksitlerin yüksek derecede olgunlaşmış evrelerini temsil ederken; böhmit, daha yüzeysel ya da daha düşük sıcaklıklı evrelerin belirtisidir (Valeton and Wilke 1993). Bu iki fazın birlikte bulunması, paleoiklimsel ve hidrotermal etkilerin bir arada değerlendirilmesini zorunlu kılmaktadır.

Kaolen grubu mineralleri, feldspatça zengin ana kayaçların ayrışmasıyla ortaya çıkan yaygın alterasyon ürünleridir. Bu minerallerin varlığı, protolitin silikatça zengin olduğunu ve silisyumun ortamdan tam olarak uzaklaştırılamadığını göstermektedir. Bu da, tam gelişmemiş bir laterit profilini ya da görece kısa süreli ayrışma süreçlerini işaret edebilir (Tardy 1997).

Hematit, ortamın oksidatif koşullarda evrim geçirdiğine işaret etmektedir. Laterit oluşumu sırasında Fe içeriği mobil hale geçer ve oksidatif koşullarda hematit olarak çöker. Bu da Fe'nin yeniden kristalleştigi ve ortamda biriktiği anlamına gelir. Anataz, oldukça dayanıklı bir TiO_2 minerali olup, kimyasal ayrışma süreçlerinde titanyumun rezidüel fazı olarak kalır. Anatazın mevcudiyeti, titanyum içeren minerallerin ayrışması sonrası Ti'nin taşınmadan ortamda kaldığını göstermektedir.



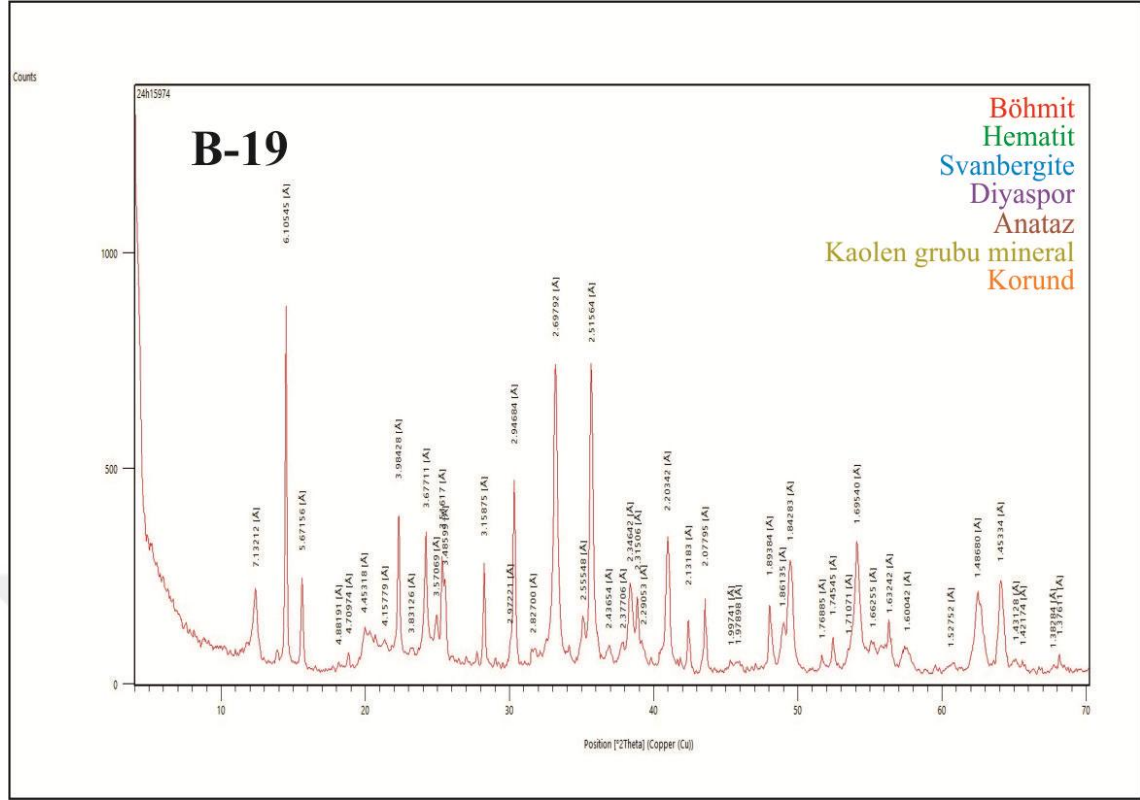
Şekil 4.11. B-14 numunesine ait XRD diyagramı

B-14 numunesi genel olarak, yüksek derecede boksitleşmiş ve olgunlaşmış bir profilin ürünüdür (Şekil 4.11). Alümina fazlarının (diyaspor ve böhmit) yanı sıra hematit ve anatazin varlığı, hem alüminyum hem de demir-titanyum zenginleşmesini ortaya koymakta; kaolen grubu mineraller ise ayrışma düzeyinin ve protolitin yapısal özelliklerinin izlerini taşımaktadır.

B-19 numunesindeki böhmit ve diaspor, alümina fazlarının birlikte bulunduğunu göstermektedir (Şekil 4.12). Böhmit, genellikle düşük sıcaklıkta oluşan bir AlOOH fazı iken; diaspor daha yüksek sıcaklık ve basınç koşullarını temsil eder. Bu birlikte bulunma durumu, farklı boksitleşme evrelerinin veya çok fazlı alterasyon süreçlerinin etkili olduğunu düşündürmektedir (Bardossy ve Aleval 1990).

Svanbergit, stronsiyum, baryum ve kalsiyum içerebilen sülfosfat yapısında bir mineral olup, genellikle fosfatlı lateritlerde gözlenir. Bu mineralin varlığı, ortamda fosfor zenginleşmesinin yanı sıra boksitleşme sırasında ikincil mineralleşme süreçlerinin etkili olduğunu ortaya koyar. Ayrıca, svanbergitin varlığı boksitlerin ekonomik potansiyelini artıran bir özelliktir (Bardossy ve Aleval 1990).

Hematit ve anataz, sırasıyla demir ve titanyumun rezidüel formlarını temsil eder. Oksidatif koşullar altında demirin hematite dönüşmesi, ortamdaki yüksek oksijen potansiyelini ve iyi gelişmiş laterit koşullarını göstermektedir. Benzer şekilde, anatazin varlığı da dayanıklı TiO_2 fazlarının ortamda kaldığını ve ayrışmanın oldukça ileri düzeyde olduğunu göstermektedir.



Şekil 4.12. B-19 numunesine ait XRD diyagramı

Kaolen grubu mineralleri, ana kayaçta yer alan feldspat gibi silikat minerallerin ayrışması sonucu oluşmuştur. Bu mineraller, özellikle ayrışmanın orta aşamalarında tipiktir ve ortamın nispeten düşük pH koşullarını gösterir (Tardy 1997).

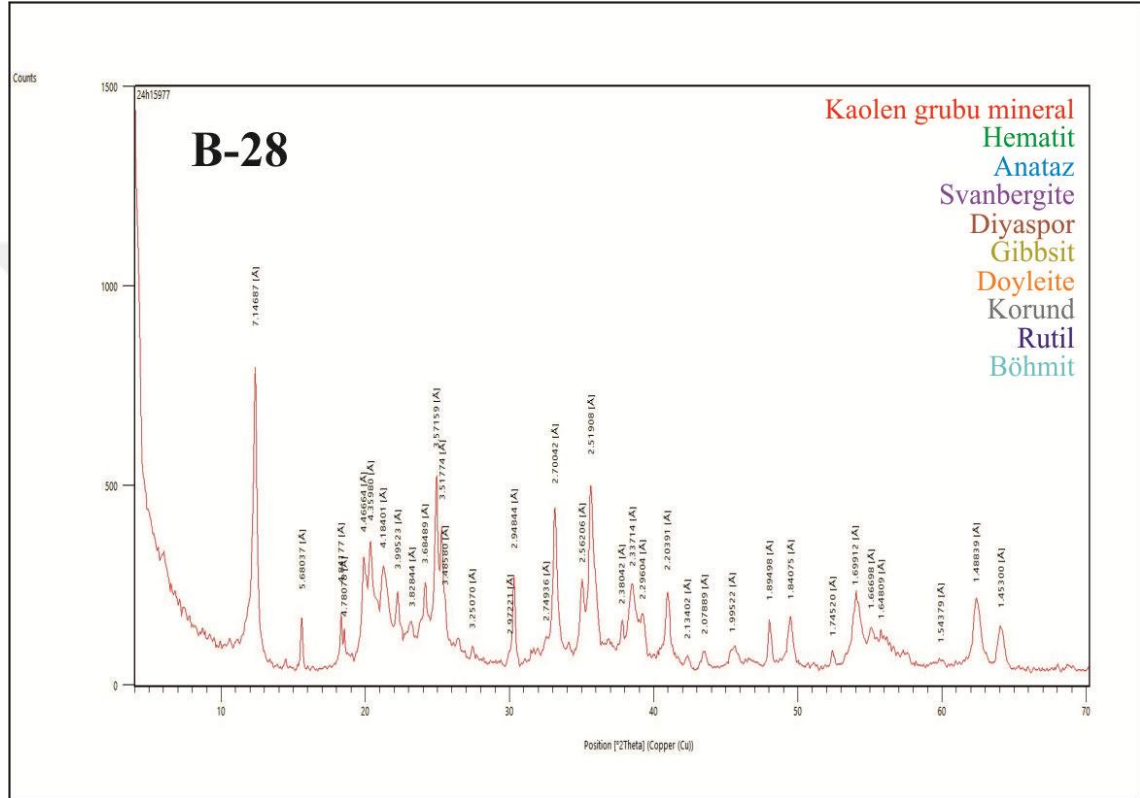
Korund (Al_2O_3), oldukça yüksek derecede kristalleşmiş ve su içermeyen alümina fazıdır. Korundun varlığı, olağandışı koşulların (yüksek sıcaklık veya metamorfik etkiler) etkili olduğunu gösterebilir. Boksitlerde nadiren görülen bu faz, alüminyum bakımından zengin ve hidrotermal olarak değişime uğramış alanlarda oluşabilir.

Sonuç olarak, B-19 numunesi, oldukça olgunlaşmış ve çok bileşenli bir boksit profilini temsil etmektedir. Hem alüminyumun (böhmit, diaspor, korund), hem demirin (hematit), hem de fosforun (svanbergit) zenginleşmiş olduğu bu örnek, aynı zamanda jeokimyasal olarak kompleks bir gelişim sürecini yansıtmaktadır. Kuzey Açık Boksit Ocağı'na ait bu örnek, ekonomik ve mineralojik açıdan dikkat çekici bir yapıya sahiptir.

B-28 numunesinde böhmit, diaspor ve gipsit gibi alüminyum hidroksitleri bir arada bulunmaktadır (Şekil 4.13). Gipsit ($\text{Al}(\text{OH})_3$), genellikle tropikal ve nemli iklim koşullarında düşük sıcaklıkta oluşan bir boksit fazıdır ve ortamın düşük silika aktivitesine işaret ederken; böhmit ve diaspor, daha dirençli ve ileri evre boksitleşmeyi temsil eder (Valetton 1972). Bu birliktelik, farklı jeokimyasal zonların bir arada olduğunu ve boksitleşmenin yatay ya da düşey yönde değişiklikler gösterebileceğini göstermektedir.

Kaolen grubu mineralleri, ayrışma sırasında feldspatların kil minerallerine dönüşümünü göstermektedir. Bunların varlığı, kayaçta silikat ayrışmasının etkili olduğunu ve boksitleşme öncesi yoğun bir lateritleşme süreci yaşandığını göstermektedir.

Hematit ve anataz gibi demir ve titanyum mineralleri, boksitleşme sürecinde silika ve diğer mobil elementlerin uzaklaştırılması sonucunda ortamda kalıcı hale gelen kalıntı fazlardır. Özellikle hematit, yüksek oksidasyon potansiyelinin bir göstergesi olarak, yüzeyle temas eden, iyi drene olmuş bir laterit profilini işaret eder.



Şekil 4.13. B-28 numunesine ait XRD diyagramı

Svanbergit, fosfatça zenginleşmiş ortamlarda gelişen nadir minerallerden biridir ve bu örnekteki varlığı, boksitleşme sürecine fosfor katkısının olduğunu ve muhtemelen çevresel koşullarda fosfatlı çözeltilerin etkili olduğunu düşündürür (Tardy 1997).

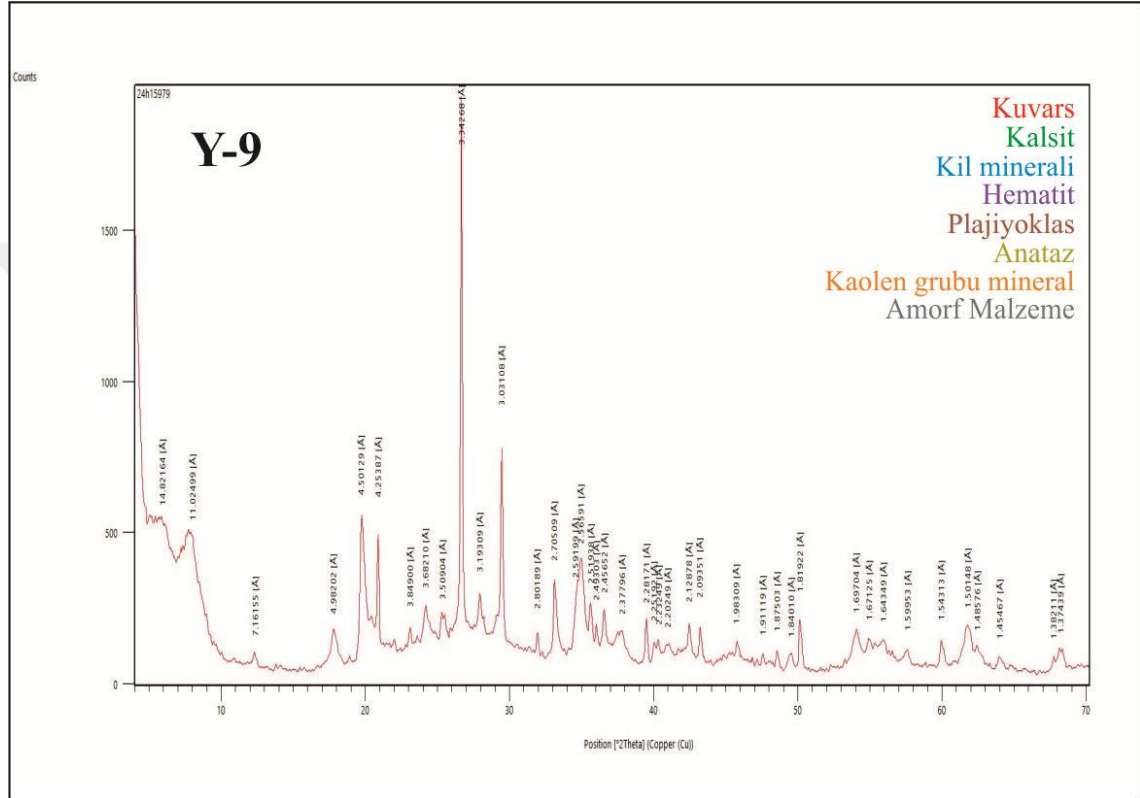
Korund (Al_2O_3), kristal su içermeyen bir alümina fazı olup yüksek sıcaklık ve basınca işaret eder. Bu fazın varlığı, ya derin gömülme koşullarında gelişen metamorfik bir süreç ya da hidrotermal kökenli yeniden kristalleşmenin etkisiyle açıklanabilir.

Rutil (TiO_2) ise titanyumun kararlı fazlarından biridir. Anataz gibi rutil de ayrışmaya dayanıklıdır, ancak daha stabil bir formdur ve genellikle daha ileri evre laterit profillerinde gözlenir.

Doyleit, gibbsit benzer yapıda, ancak daha nadir gözlenen bir alüminyum hidroksittir. Doyleit'in varlığı, mineral oluşum koşullarının oldukça özgül çevresel

faktörlere bağlı olduğunu göstermektedir. Bu da numunenin mineralojik çeşitliliğini zenginleştirmektedir.

Genel olarak değerlendirildiğinde, B-28 numunesi çok sayıda alümina fazını (gibsit, böhmit, dijaspor, doyleit, korund) ve ayrıca demir, titanyum, fosfat içerikli fazları aynı anda barındıran, yüksek derecede gelişmiş bir boksit örneğidir. Bu çeşitlilik, Kuzey Açık Boksit Ocağı'nda karmaşık bir jeokimyasal geçmişin izlerini taşımakta ve örneğin ekonomik değerini artıran mineral birlikteliklerine işaret etmektedir.



Şekil 4.14. Y-9 numunesine ait XRD diyagramı

Y-9 numunesine ait XRD analizinde belirlenen başlıca mineraller: kuvars, kalsit, kil mineralleri, hematit, plajiyoklas, kaolen grubu mineralleri ve masif malzeme şeklindedir (Şekil 4.14). Bu mineral topluluğu, boksitli seviyelere ana kayaç olarak hizmet eden ve ayrışma süreçlerine doğrudan maruz kalmış bir yankayaç karakteristiği sergilemektedir.

Numunedeki kuvars, oldukça dirençli bir silikat mineralidir ve genellikle çözünebilir bileşenlerin uzaklaştırılmasıyla birlikte ortamda kalıntı olarak varlığını sürdürür. Kuvarsın varlığı, ayrışmaya karşı dirençli litolojik bir temel materyalin işaretidir.

Kalsit (CaCO_3), karbonatlı çimentolanma veya birincil karbonat kayaçların ayrışma ürünleri olarak değerlendirilebilir. Özellikle düşük sıcaklık ve zayıf asidik çözültülerle etkileşim sırasında karstik süreçlerle çözülebilir. Kalsitin varlığı, ortamda

zaman zaman karbonatça zengin fazların çökelmiş olabileceğini veya epigenetik kalsitleşmenin geliştiğini düşündürmektedir.

Kil mineralleri ve kaolen grubu mineralleri, feldspatlar gibi silikat minerallerinin kimyasal ayrışması sonucu oluşan ikincil minerallerdir. Bu mineraller, ortamda lateritik ayrışmanın başladığını ancak henüz ileri evre boksitleşmeye dönüşmediğini gösterir. Özellikle kaolen mineralleri, boksitleşme sürecinin erken evrelerini temsil eder ve silisli çözeltilerin etkili olduğu ortamların ürünüdür.

Plajiyoklas, genellikle volkanik veya plütonik kayalarda yaygın bulunan bir feldspat grubudur. Bu mineralin varlığı, yankayaç olarak kullanılan birimlerin plajiyoklasça zengin, muhtemelen andezitik ya da dasitik bileşimde volkanik kökenli olabileceğine işaret etmektedir. Aynı zamanda boksitleşmeye uğramamış veya yalnızca yüzeysel ayrışma göstermiş litolojik bir yapıyı da yansıtabilir.

Hematit, normalde boksitleşmiş profillerde daha yaygın gözlenirken, bu yankayaç örneğinde yer alması, belki de çevresel koşullar nedeniyle sınırlı bir oksidasyonun meydana geldiğini veya hematitin bölgesel çökelimle birikmiş olabileceğini düşündürmektedir.

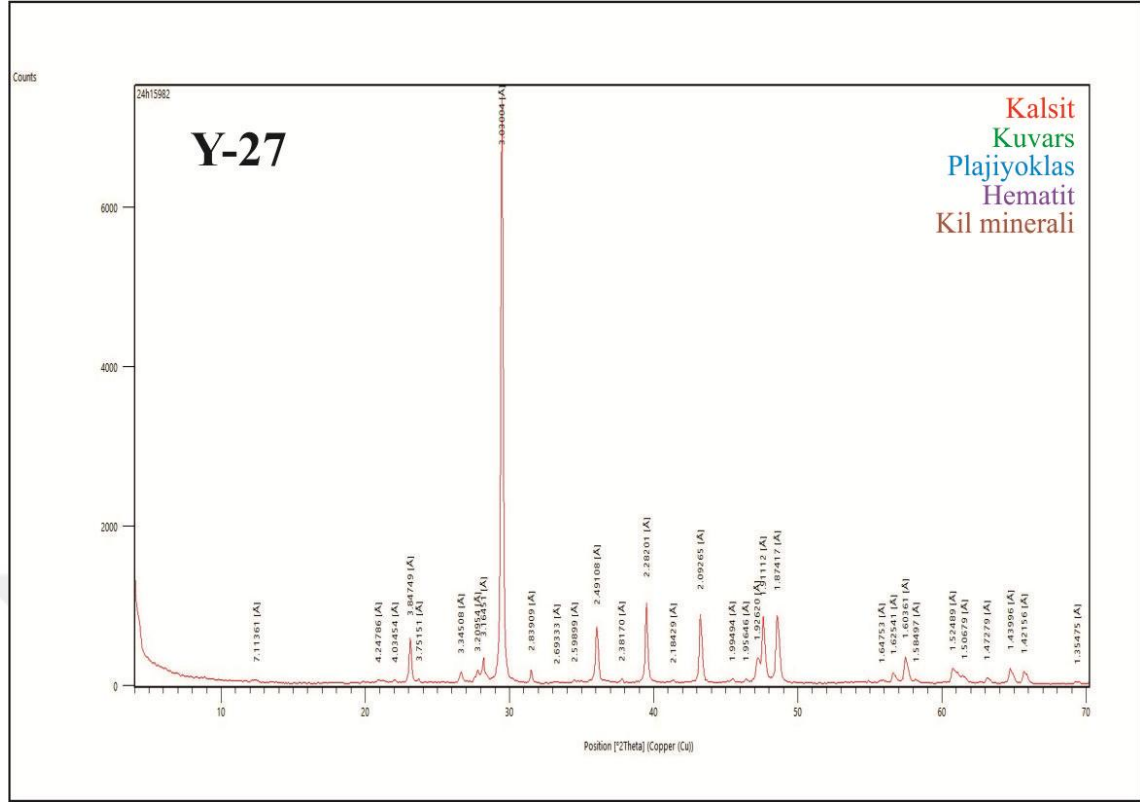
Masif malzeme tespiti, XRD ile kristal yapı gösteremeyen, ancak doğal süreçlerle oluşmuş silika, demir oksit jelleri ya da organik içerikli materyalleri işaret etmektedir. Bu durum, numunenin ayrışma geçmişinde bir süreklilik olduğunu ve bazı bileşenlerin kristalleşmeden çökelmiş olabileceğini gösterir.

Sonuç olarak Y-9 numunesi, boksitli seviyelerin altında yer alan, boksitleşmeye öncülük eden alterasyon süreçlerinin izlerini taşıyan bir yankayaç örneği olarak değerlendirilebilir. Bu örnek, özellikle silis ve kalsiyum açısından zengin fazlar içermesi nedeniyle boksitleşme zonunun mineralojik geçişlerini anlamada önemli bir rol üstlenmektedir.

Y-27 numunesine uygulanan XRD analizinde kalsit, kuvars, plajiyoklas, hematit ve kil mineralleri içermektedir (Şekil 4.16). Bu mineralojik bileşim, boksitleşmenin etkili olmadığı, ancak ayrışmanın belirli evrelerine maruz kalmış bir yankayaç karakteri ortaya koymaktadır.

Numunede belirlenen kalsit, karbonat esaslı bir mineral olup, genellikle tortul ortamlarda veya düşük sıcaklıkta oluşan hidrotermal koşullarda çökelen bir fazdır. Kalsitin varlığı, analiz edilen kayada karbonatlı bir bileşenin hakim olduğunu veya karbonatlı bir birimin çökelim sonrası dönemde epigenetik yollarla mineralizasyon geçirdiğini düşündürmektedir. Bu durum, boksitleşme sürecine dirençli karbonatlı bir ana kayaç varlığını işaret eder.

Kuvars, aşırı dayanıklı bir silikat minerali olarak, kimyasal ayrışma süreçlerinde en son bozunuma uğrayan fazlardan biridir. Kuvarsın bu örnekteki varlığı, silisli bir kaynak kaya ya da altere olmuş magmatik/tortul bir kayaç temelinin varlığına işaret etmektedir. Bu durum, boksitleşme süreci öncesi kayacın zengin bir silikat bileşimi içerdiğini düşündürmektedir.



Şekil 4.15. Y-27 numunesine ait XRD diyagramı

Plajiyoklas, genellikle magmatik kayalarda görülen feldspat grubundan bir mineraldir ve kimyasal ayrışma altında kil minerallerine dönüşme eğilimindedir. Y-27 numunesinde plajiyoklasın halen kristal yapıda bulunması, bu kayaç üzerinde ayrışmanın sınırlı kaldığını veya boksitleşme koşullarının zayıf düzeyde gerçekleştiğini göstermektedir.

Hematit, bu numune düşük oranlarda belirlenmiştir ve muhtemelen bölgesel oksidasyon süreçlerinin veya çevreleyen boksitli seviyelerle temas halinde kısmi bir alterasyonun ürünü olarak düşünülmektedir. Oksijen açısından zengin ortamlarda oluşan bu demir oksit fazı, aynı zamanda ileriki boksitleşme potansiyelini de işaret eder.

Kil mineralleri, plajiyoklas gibi silikat minerallerinin ayrışması sonucunda ortaya çıkar. Bu fazların varlığı, numunenin yüzeysel veya orta düzeyde bir kimyasal ayrışma geçmişi yaşadığını ortaya koymaktadır. Ancak bu ayrışma, yüksek dereceli lateritik boksitleşmeye dönüşecek ölçüde gelişmiş değildir.

Sonuç olarak, Y-27 numunesi, Kuzey Açık Boksit Ocağı'nda boksitleşme süreçlerinin henüz ileri düzeyde etkili olmadığı, ancak ayrışmanın ilk evrelerini geçirmiş bir yankayaç örneği olarak değerlendirilmektedir. Mineralojik bileşimi, ana kayacın karbonatlı ve silisli unsurlar içerdiğini, bu bağlamda boksit oluşumuna uygun koşulların sınırlı düzeyde sağlandığını ortaya koymaktadır.

4.3.1.1. XRD verilerine dayalı mineralojik analiz

Bu çalışmada, Isparta-Yalvaç havzasında yer alan Güney ve Kuzey Açık Boksit Ocaklarından alınan temsili numunelerin mineralojik bileşimleri detaylı olarak incelenmiştir. XRD analizleri sonucunda elde edilen veriler, boksitleşmenin farklı evrelerini ve bu süreçleri kontrol eden jeokimyasal ortam koşullarını ortaya koymaktadır.

Boksit numunelerine ait xrd verilerinin yorumu Çizelge 4.1’de ayrıntılı olarak yer almaktadır. Güney Açık Boksit Ocağı’ndan elde edilen B-1, B-5, B-7, B-10 ve B-11 numuneleri, başta dijaspor, böhmit ve hematit olmak üzere, boksitlerin karakteristik ana fazlarını içermektedir. Bu mineraller, yoğun alüminyum oksihidroksit (AlOOH) içeriği ve lateritik ayrışma ortamının varlığını işaret etmektedir (Valeton and Wilke 1993). Özellikle hematit ve götit fazlarının yoğun gözlemlenmesi, oksidatif koşulların baskınlığını ve demir oksitlenmesi süreçlerinin etkinliğini göstermektedir (Bardossy ve Aleva 1990). Ayrıca kaolinit ve kaolen grubu mineralleri, silikatlı kayaların asidik ayrışması sonucu gelişen kil fazlarını temsil etmektedir (Mechati vd. 2021). Numunelerde tespit edilen anataz ve ilmenit, tropikal iklim koşulları altında gerçekleşen lateritleşme sürecinin derinliğini ve sürekliliğini desteklemektedir. B-7 numunesinde belirlenen apatit ve jips, fosfatlanma ve evaporitik süreçlere işaret ederek hidrotermal etkinlik veya ikincil çökelme koşullarıyla ilişkili olabileceğini düşündürmektedir.

Kuzey Açık Boksit Ocağı’ndan alınan B-19 ve B-28 numuneleri, mineral çeşitliliği bakımından daha zengindir. Bu numunelerde saptanan svanbergit ve korund gibi nadir mineraller, sırasıyla fosfatlı çökelme ortamları ve ileri dereceli ayrışma veya yüksek sıcaklık koşulları ile ilişkilendirilmektedir (Vasconcelos ve Conroy 2003). Özellikle B-28 numunesinde belirlenen gipsit ve doyleit, tropikal koşullarda gelişen olgunlaşmış ayrışma süreçlerini ve yoğunlaşmış alüminyum hidroksit fazlarını göstermektedir (Tardy 1997). Aynı numunede bulunan rutil, anataz ve ilmenit, titanyum fazlarının ayrışma ortamındaki kararlılığını ortaya koymaktadır.

Çizelge 4.1. Boksit numunelerine ait XRD verilerinin yorumu

Numune Kodu	Tespit Edilen Mineraller	Akademik Yorum
B-1	Hematit, diyaspor, kaolinit, anataz, böhmit, ilmenit, kil mineralleri (çok az), manyetit (çok az)	Güney Açık Boksit Ocağı'ndan alınan bu numunede, yüksek Al içeriği diyaspor ve böhmit varlığı ile doğrulanmaktadır. Hematit, oksidatif koşulların egemenliğini gösterirken, anataz ve ilmenit gibi Ti mineralleri lateritleşme sürecinin belirginliğini yansıtır. Manyetit ise düşük miktarda manyetik katkıyı işaret eder.
B-5	Hematit, diyaspor, kaolinit, anataz, kil mineralleri, klorit mineralleri, ilmenit, götit, manyetit (çok az)	Zengin bir mineralojik bileşime sahip olan bu örnek (Güney Açık Boksit Ocağı), ileri derecede alterasyona uğramış, demir oksit fazlarının (hematit-götit) yaygın olduğu bir boksit zonuna işaret eder. Kloritler, kısmen metamorfik bir katkıya ya da alterasyon evresine işaret edebilir.
B-7	Kaolinit, hematit, kalsit, böhmit, diyaspor, apatit, ilmenit, jips, manyetit, kil mineralleri	Güney Açık Boksit Ocağı örneği olan B-7, özellikle fosfat minerali apatit ve evaporitik bileşen jips ile dikkat çeker. Bu durum hidrotermal etkiler ya da ikincil fosfatlanma süreçlerine işaret edebilir. Kalsit varlığı karbonat katkısı, kaolinit ise asidik ayrışma ortamını gösterir.
B-10	Böhmit, hematit, diyaspor, kaolinit, anataz, ilmenit, kil mineralleri, manyetit (çok az)	Güney Açık Boksit Ocağı'ndan elde edilen bu örnekte, tipik lateritik boksit mineralleri (böhmit, diyaspor, hematit) yoğunluktadır. Anataz ve ilmenit gibi Ti mineralleri, tropikal ayrışmanın derinliğini ve sürekliliğini ortaya koyar.
B-11	Diyaspor, hematit, böhmit, kaolinit, anataz, götit, manyetit, ilmenit, kil mineralleri (çok az)	Güney Açık Boksit Ocağı'na ait bu örnek, özellikle diyaspor ve götit fazlarının birlikte varlığı ile boksitleşmenin farklı evrelerine işaret eder. Anataz ve ilmenit, titanyumun kalıcılığını; kaolinit ise kil fazının dönüşümünü göstermektedir.
B-14	Diyaspor, hematit, böhmit, kaolen grubu mineraller, anataz	Bu numune (Güney Açık Boksit Ocağı), yoğun Al oksihidroksit fazları ve kaolen grubu ile olgunlaşmış bir laterit profiline işaret etmektedir. Anataz varlığı ayrışma ortamının asidik doğasını pekiştirir.
B-19	Böhmit, hematit, svanbergit, diyaspor, anataz, kaolen grubu mineraller, korund	Kuzey Açık Boksit Ocağı'ndan alınan bu örnek, svanbergit ve korund gibi daha nadir minerallerle zenginleşmiştir. Svanbergit, fosfatlı çökelme koşullarına; korund ise yüksek sıcaklık ya da ileri dereceli ayrışmaya işaret eder.
B-28	Kaolen grubu mineraller, hematit, anataz, svanbergit, diyaspor, gibsit, doyleit, korund, rutil, böhmit	Kuzey Açık Boksit Ocağı'na ait bu örnek, geniş bir mineral çeşitliliği gösterir. Gibsit ve doyleit gibi Al-hidroksit fazları, tropikal koşullarda gelişmiş ayrışmanın göstergesidir. Svanbergit ve rutil varlığı, özgül çevresel koşullara işaret eder.

Her iki saha örneklerinde iz miktarda tespit edilen manyetit, düşük düzeyde manyetik mineral katkısını ve redoks koşullarındaki yerel değişimleri göstermektedir (Nieto vd. 1997). Ayrıca B-5 örneğinde gözlenen klorit, muhtemelen metamorfik kökenli katkılara veya alterasyon evrelerinin varlığına işaret etmektedir.

Sonuç olarak, elde edilen mineralojik veriler, Yalvaç bölgesindeki boksitleşmenin jeokimyasal ortam koşulları, alterasyon süreçleri ve çökelme ortamı hakkında kapsamlı bilgi sunmaktadır. Hem Güney hem de Kuzey Ocağı numunelerinde gözlenen farklı mineral toplulukları, boksitleşmenin evrimsel süreçlerini ve paleoklimatik etkileri anlamada önemli ipuçları sağlamaktadır.

Diyasporun kristallik derecesi ve termodinamik stabilitesi yüksek olması, özellikle orta-yüksek sıcaklıkta oluşum koşullarını desteklemektedir (Bárdossy ve Aleva 1990). Böhmitin yaygınlığı ise orta sıcaklık ve nem koşullarının varlığına işaret etmektedir (Valeton 1972). **Ana Alüminyum Fazlarının Dağılımı (Böhmit & Diyaspor):** Numunelerde yaygın olarak böhmit ($\gamma\text{-AlO(OH)}$) ve diyaspor ($\alpha\text{-AlO(OH)}$) fazlarının birlikte veya ayrı ayrı tespit edilmesi, bölgede hidrotermal etkiden ziyade lateritik boksitleşme süreçlerinin baskın olduğunu göstermektedir.

Manyetit ise genellikle primer mineral olup yetersiz alterasyon ya da az oksidatif ortam göstergesidir. Hematit ve götit oranlarının değişimi, ayrışma sürecinin ilerleme derecesiyle ilişkilidir (Aleva 1994). **Demir Oksit ve Hidroksit Fazları (Hematit, Götite, Manyetit):** Tüm numunelerde tespit edilen hematit (Fe_2O_3), tipik olarak boksitlerin ayrışma zonlarında birikmiş demir oksit fazını temsil etmektedir. Götite (FeO(OH)) özellikle nemli-tropikal ayrışma koşullarında baskındır ve Kuzey Açık Ocak'ta bazı örneklerde gözlenmiştir.

Kil minerallerinin varlığı ise bazı bölgelerde boksitleşmenin tamamlanmadığı veya ara evrede durduğu şeklinde yorumlanabilir (Valeton 1972; Bardossy ve Aleva 1990). **Kil ve Kaolen Grubu Mineralleri:** XRD verileri, örneklerin büyük kısmında kaolinit ve diğer kaolen grubu minerallerin varlığını ortaya koymaktadır. Kaolinit, feldspatların ayrışmasıyla oluşur ve lateritik ayrışma ortamlarının önemli bir göstergesidir.

İlmenit (FeTiO_3) ve rutil (TiO_2), daha az altere olmuş fazları yansıtırken, apatit ve svanbergit gibi fosfat mineralleri ise özellikle boksitlerin üst seviyelerinde fosfor birikimine işaret eder (Karadağ vd. 2006). **İkincil ve Aksesuar Mineraller (Anataz, İlmenit, Rutil, Apatit, Kalsit):** Anataz (TiO_2) fazı, titanyumun stabil kristal formu olarak pek çok numunede tespit edilmiştir. Bu fazın varlığı, boksitleşme sırasında yoğun ayrışmaya uğrayan Ti içeren minerallerin bir göstergesidir.

Kalsit ve kuvars özellikle yan kayaç örneklerinde tespit edilmiş olup, karbonatlı ya da silisli sedimanter ana kaya karakterini ortaya koyar.

4.3.1.2. Yankayaçların Mineralojik Özellikleri

Yankayaç örneklerinde yaygın olarak kuvars, kalsit, plajiyoklas ve kil mineralleri gözlenmiştir (Çizelge 4.2). Bu mineraller, bölgede boksit oluşumuna zemin hazırlayan karbonatlı ve silikatlı tortul/magmatik kayaçların varlığını kanıtlar niteliktedir. Ayrışma derecesi düşük olan bu örneklerde boksitleşme evresine geçiş sınırlıdır.

Çizelge 4.2. Yan kayaç numunelerine ait XRD verilerinin yorumu

Numune Kodu	Tespit Edilen Mineraller	Akademik Yorum
Y-9	Kuvars, kalsit, kil mineralleri, hematit, plajiyoklas, kaolen grubu minerali, masif faz	Feldspatik ve karbonatlı sedimanter kökenli bir ana kayaya işaret eder. Kuvars ve plajiyoklas, silisiklastik kökeni gösterir. Hematit varlığı oksidatif alterasyonu, kil ve kaolen mineralleri ise asidik ayrışma süreçlerini yansıtır. Masif faz, silika jellerin veya tam kristalize olmamış fazların göstergesidir.
Y-27	Kalsit, kuvars, plajiyoklas, hematit, kil minerali	Karbonatlı bir sedimanter kaya kökenini ve silisiklastik bileşimi yansıtır. Hematit, oksidatif alterasyon sürecini ortaya koyar. Kil mineralleri ayrışmanın sonucudur ve boksitleşme süreçleriyle ilişkili olabilir.

4.3.1.3. Genel Değerlendirme

Bu çalışmada, Güney ve Kuzey Açık Boksit Ocakları'ndan alınan boksit (B) ve yankayaç (Y) numunelerinin XRD (X-ışını kırınımı) analizleri ayrıntılı şekilde değerlendirilmiştir. Boksit numunelerinde yaygın olarak gözlemlenen mineraller arasında böhmite, dijaspor, hematit, kaolinit, anataz, ilmenit ve manyetit dikkat çekmektedir. Özellikle böhmite ve dijaspor gibi alüminyum hidrat mineralleri, bu yatakların yüksek derecede lateritik ayrışma süreçlerine maruz kaldığını ve bu süreçlerin sıcaklık, pH ve drenaj koşulları gibi çevresel parametrelerle şekillendiğini göstermektedir (Bardossy ve Aleva 1990; Patel vd. 2013).

Aşağıda, XRD verileri kapsamında yorumlanan başlıca mineralleri ve bu minerallerin jeolojik-anlam bilimsel yorumlarını özetleyen görsel bir tablo sunulmuştur (Çizelge 4.3). Bu tablo, her bir mineralin oluşum koşulları ve yer aldığı ortam hakkında bilgi verir.

Çizelge 4.3. XRD verilerine göre başlıca mineraller ve yorumlamaları

Mineral	Yorumu
Böhmite	Alüminyum fazı – Orta sıcaklıkta oluşum
Dijaspor	Yüksek sıcaklıkta kristalin Al fazı
Hematit	Oksidatif koşullarda Fe zenginleşmesi
Götite	Nemli ortamlarda Fe oksihidroksit
Kaolinit	Lateritik ayrışmanın göstergesi
Anataz	Ti zenginleşmesi, ayrışmanın göstergesi
Rutil	Az altere olmuş Ti minerali
İlmenit	Primer Fe-Ti minerali
Apatit	Fosfor birikimi, alterasyon zonu
Kalsit	Karbonatlı ana kayaç göstergesi
Kuvars	Silisli ana kayaç göstergesi

Hematit, götit ve manyetit gibi demir oksit/hidroksit minerallerinin varlığı, boksitlerin oksidatif koşullarda oluştuğuna ve demir bakımından zenginleştirildiğine işaret eder. Ayrıca anataz, ilmenit ve rutil gibi titan minerallerinin varlığı, ayrışma sırasında titanyumun dirençli minerallerde konsantre olduğunu göstermektedir (Valeton and Wilke 1993; Arık 2007).

Yankayaçlara ait örneklerde (Y-9 ve Y-27), kuvars, plajiyoklas, kalsit gibi primer minerallerin varlığı, bu birimlerin karbonatlı ve silikatlı ana kayalardan türediğini ortaya koymaktadır. Özellikle kuvars ve plajiyoklas varlığı, kayaların feldspatik ve silikatlı nitelikte olduğunu; kalsit ve masif fazların varlığı ise karbonatlı çökel ortamların etkisini düşündürmektedir.

Bu bulgular, Sağırköy-Kırkbaş Köyü çevresindeki boksit oluşumlarının karmaşık bir jeokimyasal geçmişe sahip olduğunu ve farklı alterasyon evrelerinden geçerek şekillendiğini göstermektedir. Aynı zamanda bu değerlendirme, boksitlerin ekonomik önemi ve zenginleştirme potansiyelinin anlaşılması açısından da temel bir veri sağlamaktadır.

4.3.2. FT-IR Analizi

FT-IR (Fourier Transform Infrared) spektroskopisi, mineral bileşimlerini karakterize etmek için yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir (Ali vd. 2021). Boksit yataklarında yer alan ana minerallerin kimyasal yapısını anlamak, bu minerallerin özelliklerini belirlemek ve oluşum süreçlerini çözümlemek için FT-IR analizi oldukça etkili bir araçtır.

Boksitlerdeki alüminyum oksit mineralleri (özellikle gibsit, böhmit ve diyaspör) FT-IR spektroskopisi ile detaylı bir şekilde incelenebilir. Gibsit, böhmit ve diyaspör, FT-IR spektrumunda farklı titreşimsel özellikler gösterir, bu da her bir mineralin kendine özgü yapısal özelliklerinin belirlenmesine olanak tanır. Analiz ölçümü, 4000-450 cm^{-1} arasındaki spektrum dalga numaralarında gerçekleştirilmiştir. Gibsit, böhmit ve diyaspör minerallerine ait FT-IR spektrumları, her bir mineralin karakteristik titreşim bandı ile ayrılır. Gibsit için, 3400 cm^{-1} civarında geniş bir O-H bağlanma bandı gözlemlenirken, böhmit 3800 cm^{-1} civarındaki su ve hidroksil gruplarına ait titreşim bantları ile belirginleşir (Aquino vd. 2011). Diyaspör minerali ise 3700-3600 cm^{-1} civarındaki hidroksil grubu bandı ile tanınır.

Örnek olarak, boksit örneklerindeki O-H bağlarının FT-IR spektrumundaki titreşim bantları, boksitlerin içerdikleri su miktarını ve mineral olgunluk seviyelerini belirlemede yardımcı olabilir. Bu özellik, boksitlerin nemli iklim koşullarında ve lateritik ortamda nasıl evrimleştiğini anlamak için önemlidir (Aquino vd. 2011; Ali vd. 2021).

FT-IR analizinde boksit minerallerinin karakteristik titreşim bantları ve dalga numaraları belirlenmiştir. Gibsit, böhmit ve diyaspör minerallerinin FT-IR spektrumları şu şekilde tanımlanabilir:

Gibsit ($\text{Al}(\text{OH})_3$): 3400 cm^{-1} civarındaki geniş O-H bağlanma bandı.

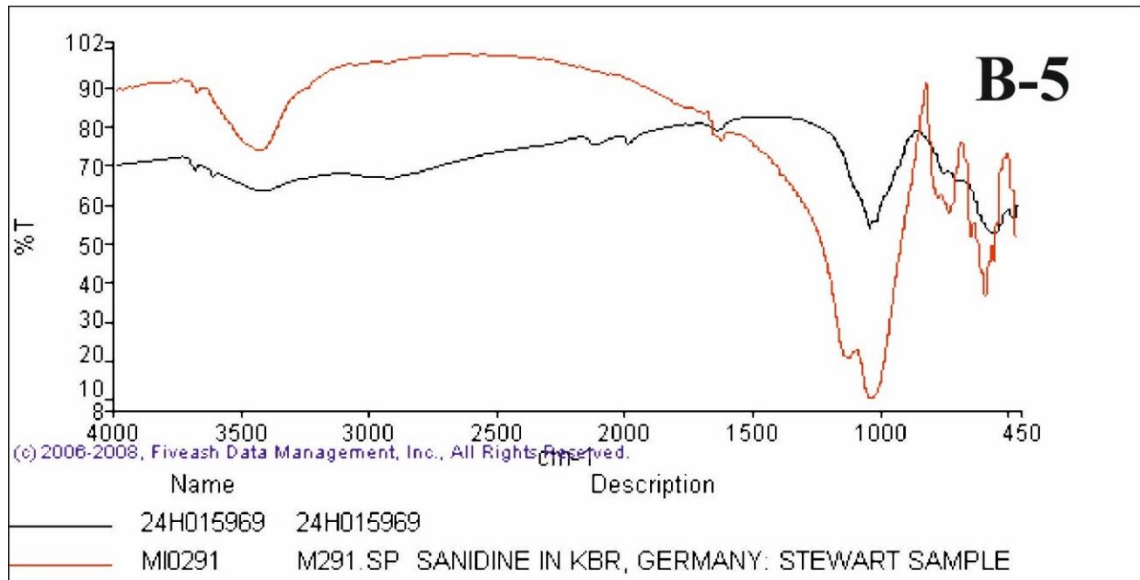
Böhmit ($\text{AlO}(\text{OH})$): 3800 cm^{-1} civarında su ve hidroksil gruplarına ait titreşim bantları.

Diyaspor ($\text{AlO}(\text{OH})$): $3700\text{-}3600\text{ cm}^{-1}$ civarında hidroksil grubu bandı.

Bu spektrumlar, boksit minerallerinin kimyasal yapılarındaki farklılıkları belirlemede oldukça etkilidir. FT-IR spektrumlarında görülen her bir pik, boksitlerin kimyasal bağlarının veya fonksiyonel gruplarının titreşim hareketlerine işaret eder. FT-IR analizinden elde edilen grafik verilerinde, siyah spektrum boksit örneklerine ait spektrumları temsil etmekte, kırmızı spektrum ise boksit minerallerinin standart dalga titreşim bandını göstermektedir. Grafikler boksit yataklarının mineralojik çeşitliliğini ve bu minerallerin kimyasal yapılarını açık bir şekilde ortaya koymaktadır.

Özetle, FT-IR analizi, boksit minerallerinin kimyasal bileşenlerini belirlemede ve bu minerallerin mineralojik özelliklerini ayrıntılı bir şekilde çözümlemekte kritik bir rol oynar. Sağır Köy ve Kırkbaş Köyü boksit yataklarının analizinde FT-IR, bu yatakların oluşum süreçlerine dair derinlemesine bilgi sağlar. FT-IR (Fourier Transform Infrared) spektroskopisi, mineralojik analizlerde yaygın olarak kullanılan güçlü bir tekniktir. Bu yöntem, numunelerin infraret ışık ile etkileşime girerek, moleküllerindeki titreşimsel hareketleri belirler. Boksitler, özellikle alüminyum oksit minerallerinden oluşan ve alüminyum üretiminde ana hammadde olarak kullanılan kayalardır. Boksitlerin mineralojik bileşimindeki farklılıklar, FT-IR analizi ile ayrıntılı bir şekilde incelenebilir. FT-IR spektroskopisi, boksitlerdeki alüminyum oksit (gibsit, böhmite ve diyaspor) ve diğer bileşenlerin kimyasal yapılarındaki farklılıkları ortaya koymada etkin bir araçtır.

Boksit örneklerinden elde edilen FT-IR spektrumları, minerallerin yapısal özelliklerini detaylandırmak için kullanılır. Spektrum üzerinde görülen her bir pik, belirli bir kimyasal bağın veya fonksiyonel grubun titreşim hareketine işaret eder. Örneğin, 3400 cm^{-1} civarındaki bant, boksitlerdeki su içeriği ile doğrudan ilişkilidir ve bu özellik, boksitlerin olgunluk düzeyini belirlemek için önemli bir gösterge olabilir.

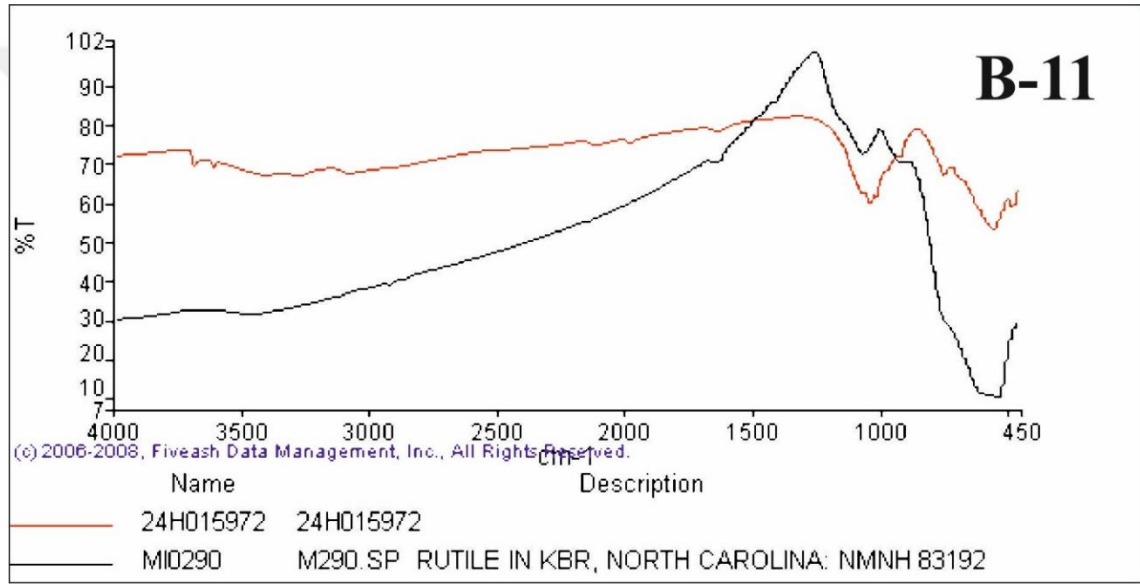


Şekil 4.16. BT-5 Boksit numuneleri FT-IR spektrumları

B-5 numunesine ait FT-IR spektrumu, özellikle 3695 cm^{-1} ve 3620 cm^{-1} civarında yer alan keskin absorpsiyon bantlarıyla dikkat çekmektedir (Şekil 4.16). Bu bantlar, kaolinit mineraline özgü Al-OH gerilme titreşimlerini yansıtmaktadır. Kaolinitin bu

belirgin spektral imzası, numunedeki yüksek kristallenmiş Al-silikat fazlarının varlığını doğrulamaktadır (Madejová 2003). Spektrumda ayrıca $\sim 1630 \text{ cm}^{-1}$ civarındaki absorpsiyon bandı, yapısal suyun (H–O–H bükülme titreşimi) varlığını göstermektedir.

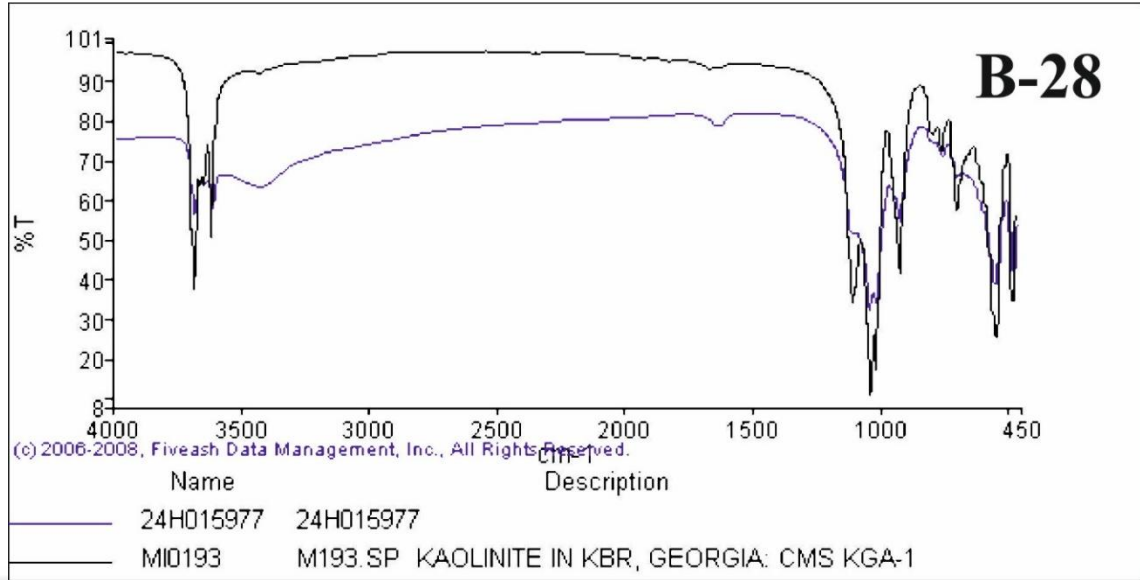
1000–1100 cm^{-1} aralığında yer alan geniş ve yoğun absorpsiyon grubu, Si–O–Si ve Si–O–Al gerilme titreşimlerinden kaynaklanmaktadır. Bu durum, numunedeki rezidüel silikat fazları, özellikle kuvars ve feldspat kalıntıları açısından önemli ipucu sunmaktadır (Farmer 1974). Ayrıca 900–950 cm^{-1} bandındaki absorpsiyonlar, Al–OH bükülme titreşimleri ile ilişkilendirilmiş ve numunede düşük oranda diyapor veya böhmite gibi boksit minerallerinin varlığına işaret etmektedir. Spektral veriler ışığında B-5 numunesi, boksitleşme sürecine selektif olarak maruz kalmış, ancak kısmen rezidüel feldspatik ve silikat fazlarını koruyan bir ara zon örneği olarak değerlendirilmektedir. Bu durum, boksitleşmenin feldspatça zengin ana kaya üzerinde geliştiği ve kaolinitleşme ile birlikte kısmi silikat yıkımının sürdüğü bir zonu temsil etmektedir.



Şekil 4.17. BT-11 Boksit numuneleri FT-IR spektrumları

B-11 örneğine ait FT-IR spektrumu, mineraloji açısından önemli fonksiyonel grupların tanımlanmasına olanak tanımıştır. Spektrumda geniş bant karakteriyle öne çıkan $\sim 3420 \text{ cm}^{-1}$ civarındaki absorpsiyon, hidroksil gruplarına (–OH) karşılık gelmektedir. Bu bant, yapısal su içeren minerallerin (örneğin gibbsit veya kaolinit) varlığını göstermektedir (Şekil 4.17). Ayrıca $\sim 1640 \text{ cm}^{-1}$ 'de yer alan belirgin sinyal, H–O–H bükülme titreşimi olarak değerlendirilmiş, bu da adsorbe su veya yüzey nemini işaret etmektedir.

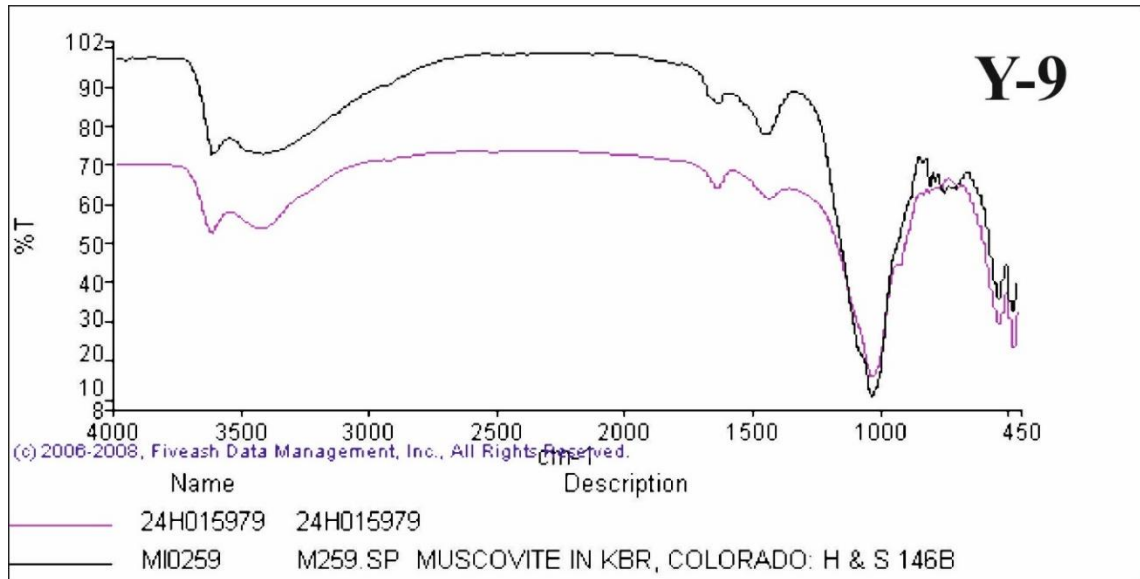
1000–1100 cm^{-1} bandında gözlenen güçlü absorpsiyon pikleri, silikat minerallerine özgü Si–O–Si gerilme titreşimlerinden kaynaklanmaktadır. Bu sinyaller, bölgedeki alterasyon süreçlerine bağlı olarak gelişen kil minerallerinin varlığını doğrulamaktadır. Buna bağlı olarak, bu spektrum özellikle boksitleşme sürecine eşlik eden silikat yıkımı hakkında önemli ipuçları vermektedir.



Şekil 4.18. BT-28 Boksit numuneleri FT-IR spektrumları

B-28 örneğinin FT-IR spektrumu, özellikle yüksek frekanslı bölgelerde ($3700\text{--}3600\text{ cm}^{-1}$) yer alan çok sayıda dar ve belirgin pik ile dikkat çekmektedir (Şekil 4.18). Bu pikler, Al-OH bağlarıyla ilişkili titreşim modlarını yansıtır ve gibbsit gibi alüminyum hidroksit minerallerinin karakteristik spektral imzasını taşır. Bu spektrumda ayrıca $950\text{--}1100\text{ cm}^{-1}$ bandında gözlenen absorpsiyonlar, Al-O-H ve Si-O gerilme titreşimlerine işaret etmektedir. Özellikle bu bölgedeki yoğunluk, hem alüminyum açısından zengin fazların, hem de rezidüel silikat yapıların birlikte bulunduğuna işaret eder.

Spektral veriler, analiz edilen örneğin, muhtemelen alterasyonla zenginleşmiş bir lateritik profilin üst zonuna karşılık geldiğini düşündürmektedir. Buradaki hidroksil zenginliği, boksitleşme sürecinde gibsit oluşumunun baskın olduğunu göstermektedir.

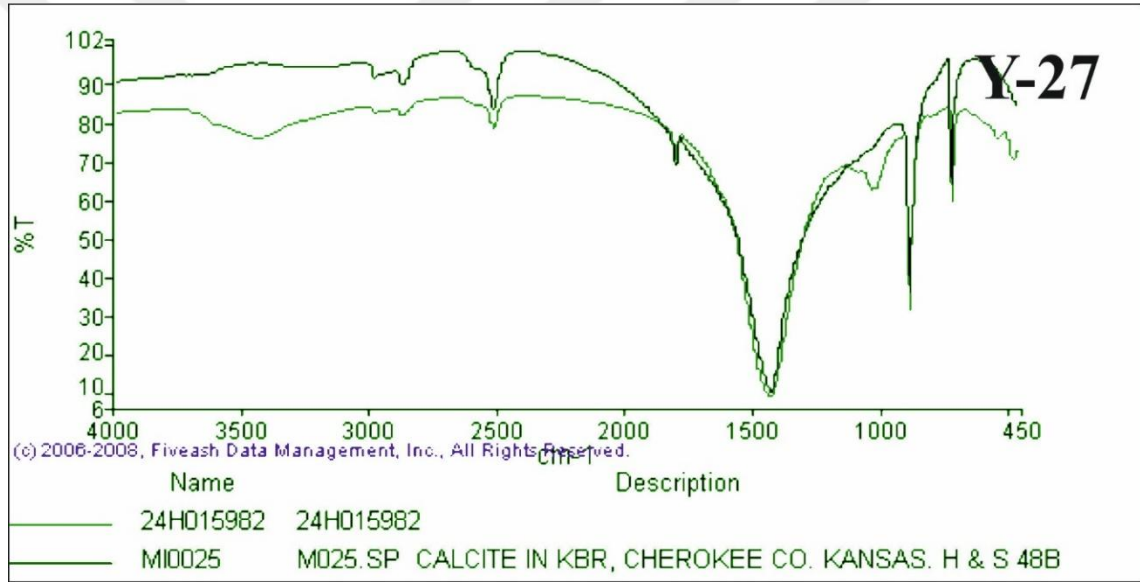


Şekil 4.19. Y-9 yan kayaç numuneleri FT-IR spektrumları

Y-9 numunesine ait FT-IR spektrumu, 3695 cm^{-1} ve 3620 cm^{-1} 'deki belirgin absorpsiyon bantlarıyla yüksek kristallenmiş kaolinit varlığını ortaya koymaktadır (Şekil 4.19). Bu absorpsiyonlar, Al–OH gerilme titreşimleri ile ilişkilidir ve numunedeki kaolinit fazının baskın olduğunu göstermektedir (Frost ve Vassallo 1996).

Spektrumda $\sim 1630\text{ cm}^{-1}$ bandında gözlenen absorpsiyon, yapısal suyun (H–O–H bükülme titreşimi) varlığını doğrulamaktadır. $1000\text{--}1100\text{ cm}^{-1}$ bandında gözlenen güçlü pikler, rezidüel silikat mineralleri (kuvars ve feldspat) ile ilişkili Si–O–Si titreşimlerinden kaynaklanmaktadır (Farmer 1974). Bu durum, Y-9 numunesinin boksitleşmeye tam maruz kalmamış, ancak alterasyona uğramış yan kayaç niteliği taşıdığını göstermektedir.

Spektral veriler, Y-9 örneğinin ana kayaç litolojisini temsil ettiğini ve kaolinitleşmiş volkanosedimanter/feldspatik özellik taşıdığını ortaya koymaktadır. Bu bulgular, bölgedeki boksitleşmenin yan kayaçların alterasyonu üzerinde şekillendiğini ve bu alterasyonun selektif silikat yıkımı ve kaolinitleşme ile sınırlı kaldığını göstermektedir.



Şekil 4.20. Y-27 yan kayaç numuneleri FT-IR spektrumları

Y-27 örneğinin FT-IR verileri, özellikle hidrosilli minerallerin kristal yapısındaki OH gruplarına özgü ayrılmış piklerle tanımlanmıştır (Şekil 4.20). Yaklaşık 3695 ve 3620 cm^{-1} gibi dalga sayılarında yer alan keskin pikler, kaolinitin özgül spektral imzaları olarak yorumlanmıştır. Bu durum, analiz edilen numunede yüksek kristallenmiş bir kaolinit fazının varlığına işaret etmektedir.

$\sim 1630\text{ cm}^{-1}$ 'deki bant, daha önceki örneklerde olduğu gibi yapısal suyun varlığını doğrulamaktadır. $1000\text{--}1100\text{ cm}^{-1}$ aralığındaki geniş pik grubu ise silikat yapılarının ve muhtemelen rezidüel kuvars veya feldspat tanelerinin varlığına işaret etmektedir.

Buna ek olarak, $900\text{--}950\text{ cm}^{-1}$ bölgesinde gözlenen absorpsiyonlar, Al–OH bükülme titreşimleri ile ilişkilendirilmiştir ve dijaspor gibi yüksek sıcaklıkta stabil olan boksit minerallerinin varlığı açısından ipucu verebilir. Bu nedenle, bu örnek daha çok

boksit profilinin alt zonuna veya yüksek derecede dönüşüme uğramış bir zonu temsil etmektedir.

Tüm FT-IR spektrumu birlikte değerlendirildiğinde, tüm örneklerde yüksek oranda hidroksilli fazların varlığına işaret eden absorpsiyonlar belirgindir. Bu durum, boksit oluşumu sırasında gelişen lateritik alterasyon süreçlerinin güçlü etkisini ortaya koymaktadır. Kaolinit, gibbsit ve muhtemel diyaspor gibi minerallerin varlığı, spektrumların farklı bölgelerinde gözlenen piklerle desteklenmiştir. Alınan spektral yanıtlar, profillerdeki zonal değişimlerin FT-IR ile etkin şekilde ayrıştırılabildiğini göstermektedir. Özellikle hidroksil içeriği ve silikat yapılar, alterasyon düzeyi ve mineralleşme tipi açısından önemli bilgiler sunmuştur.

4.3.2.1. FT-IR spektral bulguları

Bu çalışmada, Sağır Köy ve Kırkbaş Köyü (Yalvaç/Isparta) sahasına ait boksit örnekleri üzerinde gerçekleştirilen Orta Kızıl Ötesi (MIR) bölgesindeki ATR-FT-IR analizleri, boksitleşmeye eşlik eden kil minerallerinin, hidroksil fazlarının ve silikat artıklarının ayrıntılı bir şekilde belirlenmesini sağlamıştır. Spektral veriler, her örnek için farklı yoğunluklarda olmakla birlikte ortak bazı mineralojik bileşenleri ve ayrışma süreçlerine bağlı evrimsel aşamaları ortaya koymaktadır.

4.3.2.1.1. Hidroksil (–oh) ve suya bağlı titreşimler

Her üç spektrumda da $\sim 3420 \text{ cm}^{-1}$ bandında gözlenen güçlü ve geniş absorpsiyon, hidroksil gruplarının varlığını açıkça ortaya koymaktadır. Bu sinyal, özellikle gibbsit ($\gamma\text{-Al(OH)}_3$) ve kaolinit ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$) gibi yapısal su içeren minerallerle ilişkilidir. Bunun yanı sıra $\sim 1640 \text{ cm}^{-1}$ civarında tespit edilen bant, H–O–H bükülme titreşimine karşılık gelmekte olup, numunelerde adsorbe suyun veya yüzey neminin varlığına işaret etmektedir. Bu bulgular, boksit örneklerinin çoğunun yüksek derecede hidratlanmış mineral fazlar içerdiğini ve bölgedeki alterasyon süreçlerinin nemli ve tropikal iklimsel koşullara bağlı olarak geliştiğini düşündürmektedir.

4.3.2.1.2. Silikat ve alüminosilikat fazlar

$\sim 1000\text{--}1100 \text{ cm}^{-1}$ aralığında belirgin şekilde tespit edilen absorpsiyon pikleri, Si–O–Si gerilme titreşimlerine karşılık gelmektedir. Bu bölgedeki sinyallerin yoğunluğu ve genişliği örnekler arasında değişkenlik göstermekle birlikte, özellikle spektrum 3'te daha baskın şekilde görülmektedir. Bu durum, söz konusu örnekte rezidüel silikat fazların (örneğin kuvars, ayrışmamış plajiyoklas) daha belirgin olduğunu göstermektedir. Aynı zamanda bu sinyaller, kaolinit, illit gibi kil minerallerinin varlığına da işaret etmekte olup, silikat yıkımı ve Al zenginleşmesinin devam ettiği geçiş zonları hakkında bilgi sunmaktadır.

4.3.2.1.3. Al–OH titreşimleri ve gibbsit ayırtı edilebilirliği

FT-IR spektrumlarında $920\text{--}950 \text{ cm}^{-1}$ civarında zayıf-orta şiddette gözlenen bantlar, tipik olarak Al–OH bükülme titreşimlerine karşılık gelmektedir. Bu titreşimler, özellikle gibbsit varlığının doğrudan göstergesi olup, ileri evre boksitleşmenin bir ürünüdür. Saha örneklerinden bazıları bu bölgede daha keskin sinyaller göstermekte, bu da gibbsitçe zengin zonların belirli stratigrafik seviyelerde yoğunlaştığını göstermektedir.

Ayrıca, 620–750 cm^{-1} aralığında kaydedilen zayıf bantlar, Al–O–H ve Si–O–Al bağ yapılarına işaret etmekte, bu da kil minerallerinin kristal kafes yapısındaki karmaşık bağlanmalarla uyumludur.

4.3.2.1.4. Karbonat ve diğer düşük yoğunluklu fazlar

Bazı spektrumlarda ~1400–1450 cm^{-1} civarında zayıf ancak ayırt edilebilir bantlar gözlemlenmiştir. Bu absorpsiyonlar, karbonat fazlarına (örneğin dolomit, kalsit) işaret edebilir. Bu tür fazların düşük yoğunlukla görülmesi, boksitleşme öncesi karbonatlı ana kayaların kısmen korunmuş zonlarını veya yukarıdan sızan karbonatlı suların etkisini yansıtır olabilir.

4.3.2.1.5. Genel yorum ve jeolojik anlam

Sağır Köy–Kırkbaş Köyü (Yalvaç/Isparta) çalışma sahasında yapılan FT-IR analizleri, hem boksit örnekleri (B-serisi) hem de yan kaya örnekleri (Y-serisi) üzerinde gerçekleştirilmiştir. Analiz sonuçları, boksitleşme sürecinin bölgedeki ana kaya (yan kaya) litolojisi ile yakından ilişkili olduğunu ortaya koymaktadır.

Boksit örneklerinde (B-5, B-11, B-28) belirlenen gibbsit, kaolinit, dijaspor, rezidüel kuvars ve feldspat birlikteliği, bölgedeki boksitleşmenin rezidüel ve lateritik karakterde geliştiğini göstermektedir. Özellikle B-28 numunesinde yoğun gibbsit varlığı, üst zon boksitlerinin tipik özelliğidir. B-11 ve üçüncü örnekteki kaolinit zenginliği ve rezidüel silikat fazları ise ara zon ve alt zon özellikleri taşımaktadır (Bárdossy ve Aleva 1990; Madejová 2003).

Yan kaya örnekleri (Y-9) ise, FT-IR spektrumlarında 3695 ve 3620 cm^{-1} 'deki belirgin kaolinit pikleri ve 1000–1100 cm^{-1} aralığındaki yoğun Si–O titreşimleri ile karakterizedir. Bu bulgular, ana kayanın feldspatik volkanik veya volkanosedimanter karakter taşıdığını ve alterasyon sürecine bağlı olarak kaolinitleşme ve killeşme süreçlerinin etkili olduğunu göstermektedir (Öncel ve Söğüt 2008). Y-9 örneğinde tespit edilen yüksek kristallenmiş kaolinit, boksitleşme öncesi veya boksitleşme süreciyle eş zamanlı gelişen silisli alterasyonun göstergesidir. Ayrıca rezidüel kuvars ve feldspat fazlarının varlığı, ana kayanın özgün mineralojik mirasını ortaya koymaktadır.

Bu veriler birlikte değerlendirildiğinde, bölgedeki boksitleşmenin, feldspatça zengin volkanik/volkanosedimanter ana kaya üzerinde geliştiği, yan kayaların kısmen altere, kaolinitleşmiş, ancak tamamen boksitleşmemiş olduğu, boksitleşmenin selektif (seçici) gelişerek ana kaya dokusunu ve minerallerini yer yer koruduğu, boksitleşmenin ilerlemiş olduğu zonlarda gibbsit zenginleşmesi, daha alt zonlarda ise kaolinit + rezidüel silikat birlikteliği görüldüğü ortaya konulmaktadır.

Jeolojik olarak, Sağır Köy–Kırkbaş Köyü sahasındaki boksit oluşumları, volkanik-feldspatik ana kaya üzerinde, lateritik alterasyonun uzun süreli etkisiyle, sıcak ve nemli paleoklimatik koşullarda, rezidüel tipte gelişmiş zonal boksit profillerine karşılık gelmektedir (Bárdossy ve Aleva 1990; Öncel ve Söğüt 2008).

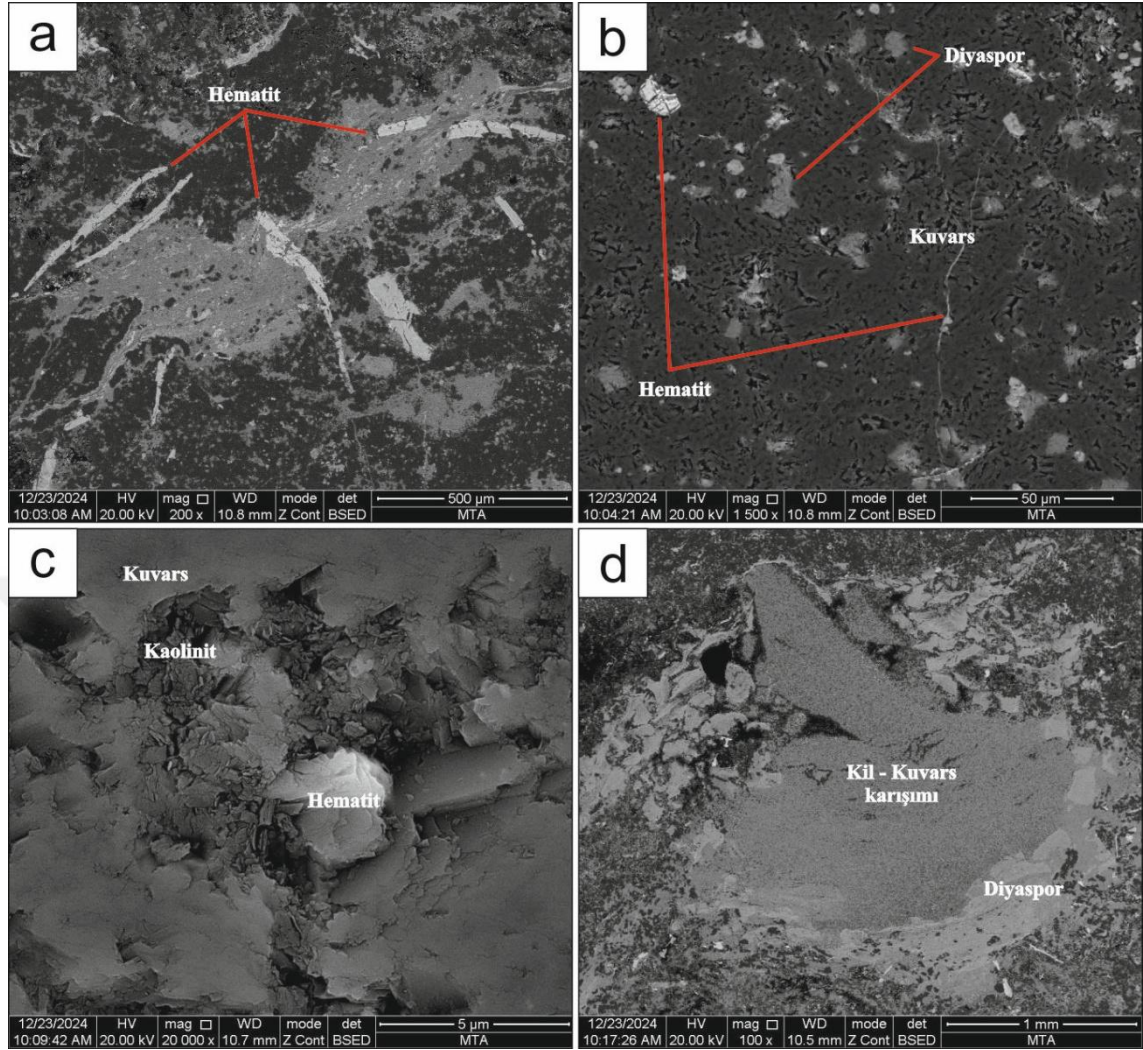
4.3.3. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) Analizi

Boksit, mineral olarak değil, en az bir tür alüminyum hidroksit içeren masif bir kayaç olarak tanımlanmaktadır. Boksitler genellikle %10-30 oranında demir (Fe) içeriğine sahip olup, hematit (Fe_2O_3), manyetit (Fe_3O_4), götit ($\text{FeO}(\text{OH})$) ve limonit ($\text{FeO}(\text{OH}) \cdot n\text{H}_2\text{O}$) gibi demir oksit ve hidroksit mineralleri ile birlikte bulunurlar (Yalçın ve Gültekin 2001; Gu vd. 2013). İçerdikleri demir oksit miktarına bağlı olarak farklı renklerde gözlemlenmektedirler. Örneğin, hematit açısından zengin boksitler kırmızı, limonit içerenler ise sarı renkte olmaktadır (Mutakyahwa vd. 2003). Açık beyaz renkte gözlemlenen boksitlerin düşük demir içeriğine sahip olduğu bilinmektedir.

Boksit yataklarında yaygın olarak bulunan bir diğer mineral ise kaolendir. Özellikle silis içeriği yüksek boksitlerin tabanında, kil minerallerinin yoğunlaştığı bir tabaka yer almaktadır (Dill, 2001). İklimsel ve çevresel koşullara bağlı olarak, ılıman ve asidik ortamlarda ayrışma ürünü olarak kil oluşurken, sıcak ve nemli, alkalın ortamlarda çökelme ürünü olarak boksit oluşmaktadır (Bardossy ve Aleva 1990). Boksitin bileşiminde ana minerallerin yanı sıra, rutil (%2-4 TiO_2), vanadyum (V), galyum (Ga), fosfor (P), mangan oksit (MnO_2) ve flor (F) gibi daha az miktarda bulunan elementler de tespit edilmiştir (Yalçın 2005).

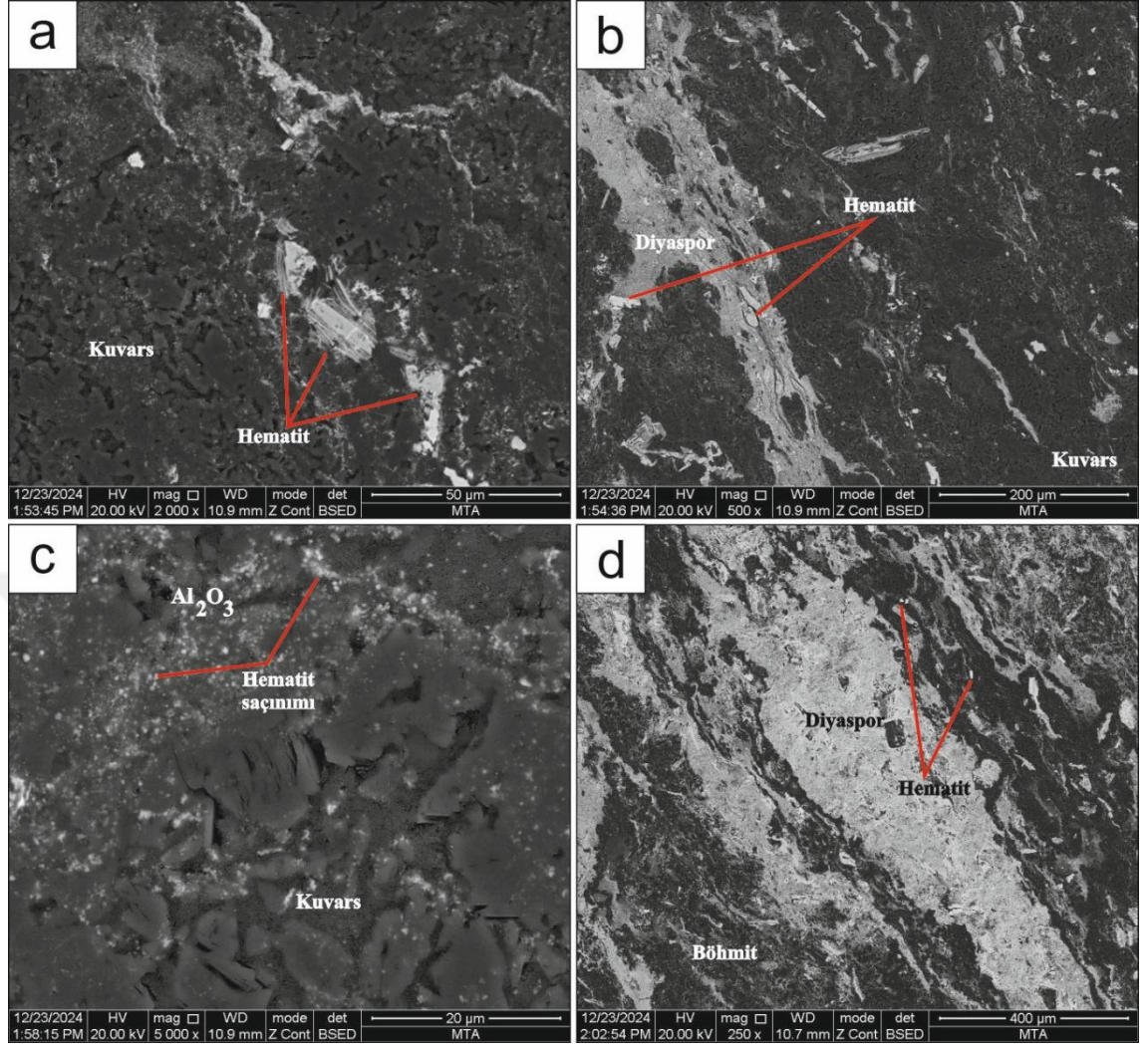
Çalışma kapsamında, 4 boksit ve 2 yan kayaç örneğine yönelik olarak yapılan SEM analizleri, mineral fazların mikroyapısal özelliklerinin belirlenmesinde önemli katkılar sunmuştur. Yüksek çözünürlüklü bu analiz yöntemi ile numunelerdeki minerallerin yüzey morfolojisi ve birbirleriyle olan sınır ilişkileri detaylı biçimde gözlemlenmiştir. Elde edilen görüntüler sayesinde özellikle ağır minerallerin (örneğin hematit) yüksek atom numarası nedeniyle parlak beyazımsı-gri tonlarda, silikat ve kil minerallerinin ise daha soluk tonlarda ayırt edilmesi mümkün olmuştur. Bu sayede hem primer hem de ikincil süreçlerin etkisiyle oluşan minerallerin varlığı ve tekstürel ilişkileri, yorumlanabilir bir yapıya kavuşturulmuştur. Analizler, boksitlerin oluşumunda lateritik ayrışma, alterasyon ve yer yer hidrotermal etkilerin birlikte rol oynadığını göstermiştir.

B-5 numaralı boksit örneğinde elde edilen SEM görüntülerinin değerlendirilmesi sonucunda, örneğin mineralojik bileşiminde hematit, dijaspor, kuvars, kaolinit ve kil-kuvars karışımı gibi çeşitli fazların bulunduğu anlaşılmıştır (Şekil 4.21). Görüntülerde, hematit fazlarının parlak tonlarda ve genellikle düzensiz taneler şeklinde boksit matrisine dağılmış olduğu gözlemlenmiştir. Dijaspor fazları ise daha açık gri tonlarda ve tabakalı kristal morfolojisi ile ayırt edilmiştir. Kuvars mineralleri düzgün kenarlı, yer yer kil fazlarıyla sınır oluşturan yapılar halinde tanımlanmıştır. Kaolinit ve kil-kuvars karışımı fazlar ise daha mat tonlarda ve ince taneli yaygın bir matriks dokusu şeklinde yer almakta olup, boksit oluşum sürecine dair ayrışma ve ikincil çökelme etkilerini yansıtmaktadır. Bu mineral birlikteliği, B5 numunesinde hem lateritik süreçlerin hem de yer yer hidrotermal koşulların etkili olduğunu, ayrıca silisik katkıların da yer aldığı çok evreli bir boksitlenme sürecini işaret etmektedir.

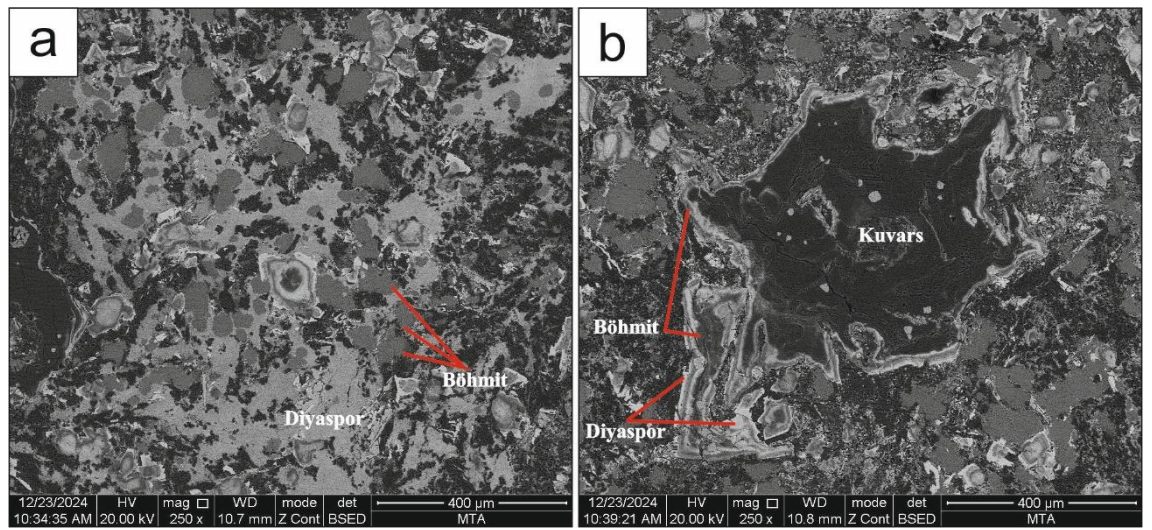


Şekil 4.21. B-5 örneğine ait SEM çekimleri

B-11 numaralı boksit örneğine ait SEM görüntülerinin değerlendirilmesi sonucunda, özellikle hematit fazının belirgin ve yaygın bir saçınım gösterdiği dikkat çekmektedir (Şekil 4.22). Bu durum, örnekteki demir oksit içeriğinin oldukça yüksek olduğunu ve hematitin, matris içinde baskın bir faz olarak yer aldığını ortaya koymaktadır. Ayrıca, kuvars mineralleri belirgin kenarlı, genellikle izole kristaller şeklinde gözlemlenmiş ve boksit matrisine gömülü halde tanımlanmıştır. Diyaspor ve böhmite fazları ise hem yapısal hem de optik kontrast bakımından ayırt edilebilir biçimde gözlenmiş; bu iki alümina minerali, boksitleşme sürecinin farklı evrelerini yansıtan tamamlayıcı bileşenler olarak değerlendirilmektedir. Diyaspor genellikle lameller yapıdayken, böhmite daha ince ve lifsi formlarda dağılmıştır. Bu bileşenlerin birlikte varlığı, B11 numunesinin gelişiminin hem yüksek sıcaklık ve basınca işaret eden diyasporik evreleri hem de daha yüzeysel ve düşük sıcaklıklı koşulları yansıtan böhmite süreçleri içerdiğini düşündürmektedir. Mineral dağılımı ve tekstürel ilişkiler, B11 numunesinde hem oksidatif ortam koşullarının hem de silisik katkının etkili olduğunu ve çok aşamalı bir boksit oluşumunu yansıttığını göstermektedir.

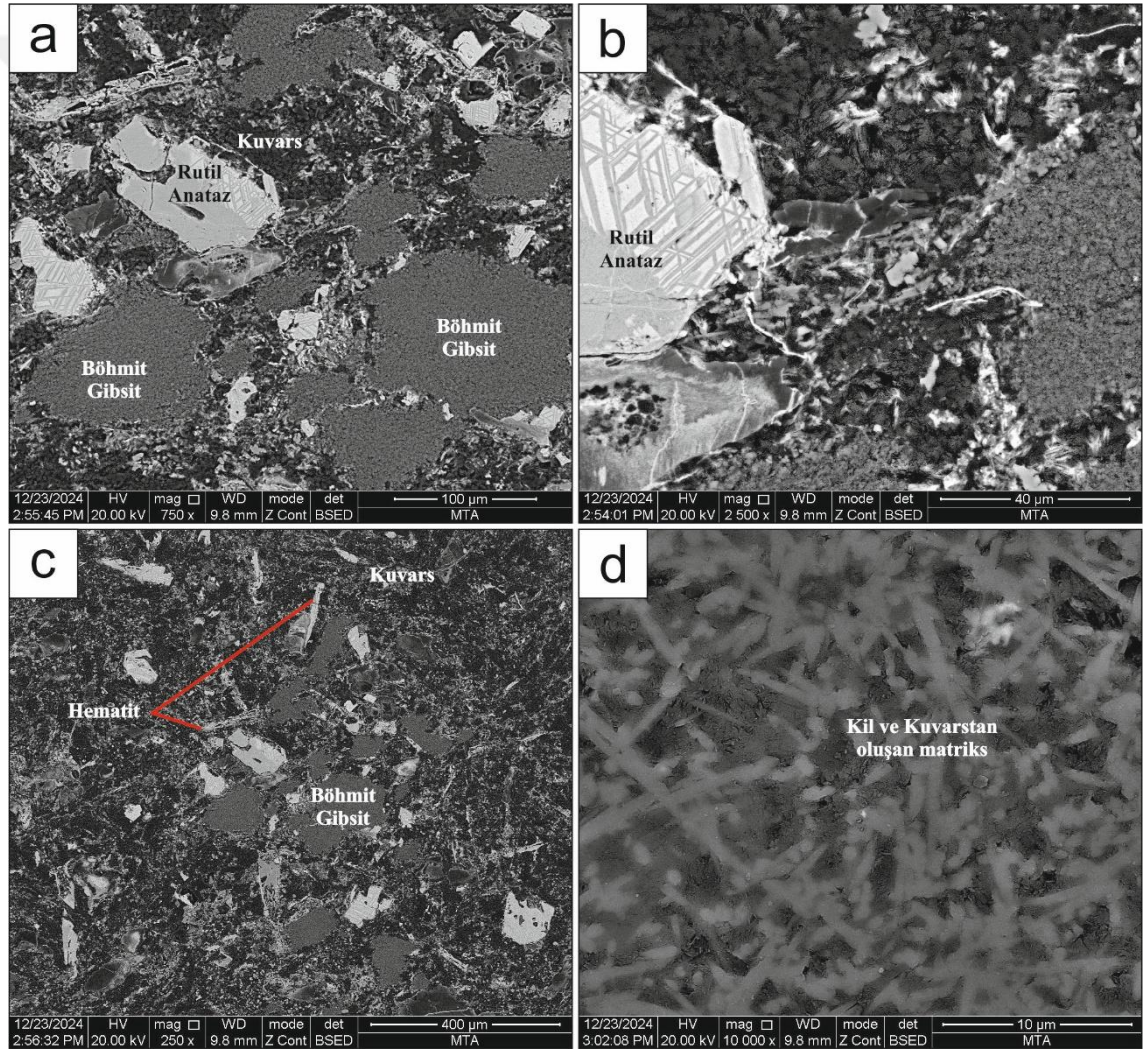


Şekil 4.22. B-11 örneğine ait SEM çekimleri



Şekil 4.23. B-19 örneğine ait SEM çekimleri

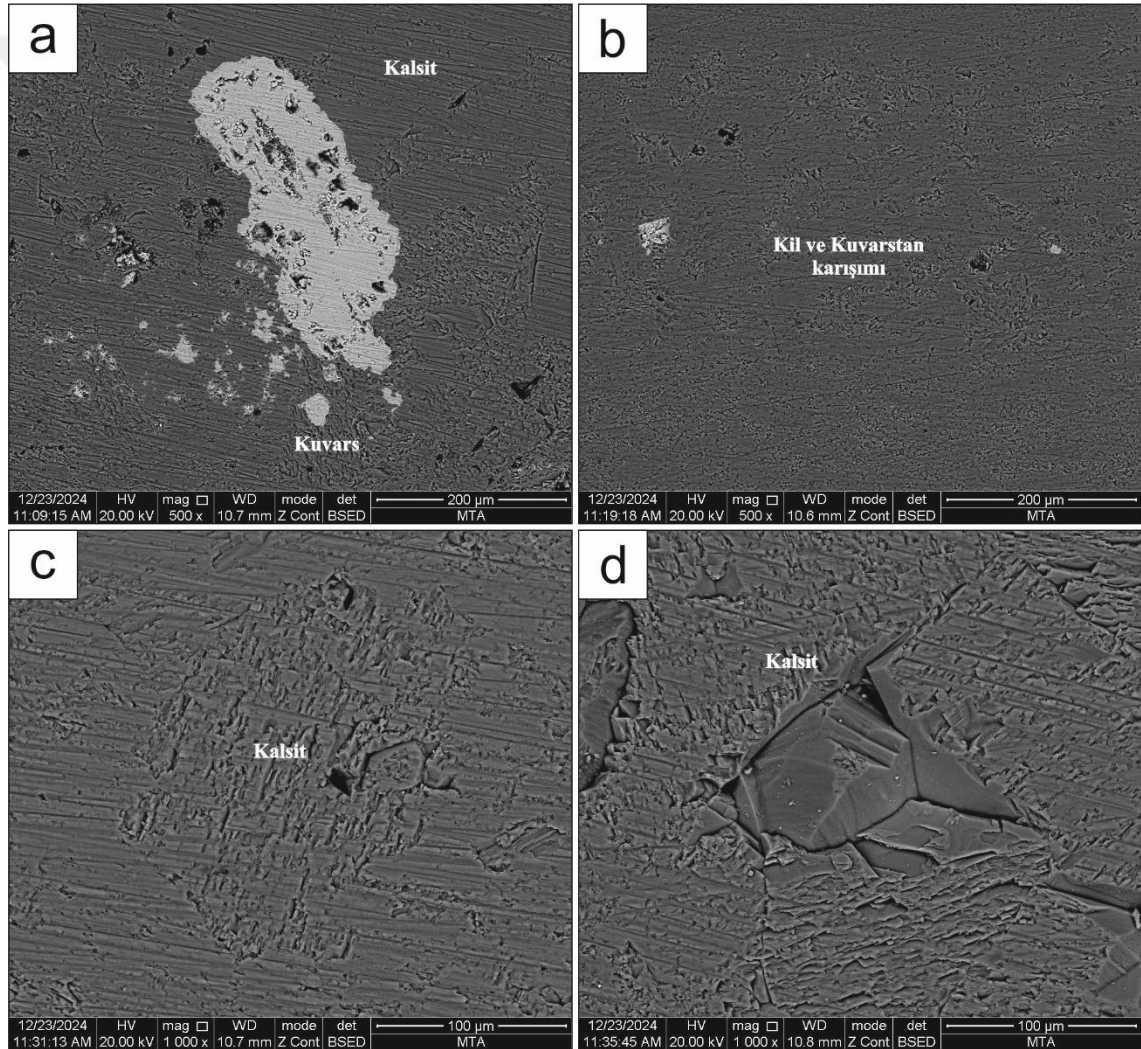
B-19 numaralı boksit örneğine ait SEM görüntüleri incelendiğinde, örneğin mineralojik bileşiminde böhmite, diaspore ve kuvars minerallerinin belirgin olarak yer aldığı tespit edilmiştir (Şekil 4.23). Görsellerde böhmite fazı, ince taneli ve lifsi morfolojisi ile daha düşük atom numarasına sahip olmasından ötürü soluk gri tonlarda tanımlanabilmektedir. Diaspor mineralleri ise lameller ya da platy yapılar şeklinde, yer yer böhmite ile iç içe geçmiş ya da kenar temaslı olarak gözlenmiştir. Bu iki alüminyum hidroksit mineralinin birlikte varlığı, B19 numunesinin hem yüksek sıcaklık ve basınca maruz kalmış diasporelik evreyi hem de daha yüzeysel, düşük sıcaklıkta gerçekleşmiş böhmite bir evreyi yansıttığını göstermektedir. Kuvarsın varlığı, muhtemelen primer silisik bileşenli kayalardan türemiş olup, boksitleşme sürecine ikincil katkı sunduğunu düşündürmektedir. Bu mineral birlikteliği, B19 örneğinde çok evreli boksitleşme, alterasyon süreçlerinin çeşitliliği ve bölgesel jeokimyasal koşulların etkisiyle zenginleşmiş bir mineralojik yapının oluştuğuna işaret etmektedir.



Şekil 4.24. B-28 örneğine ait SEM çekimleri

B-28 numaralı boksit örneğinin SEM görüntüleri detaylı olarak incelendiğinde, örnekte oldukça dikkat çekici faz dönüşümleri ve kompleks mineral birliktelikleri tespit

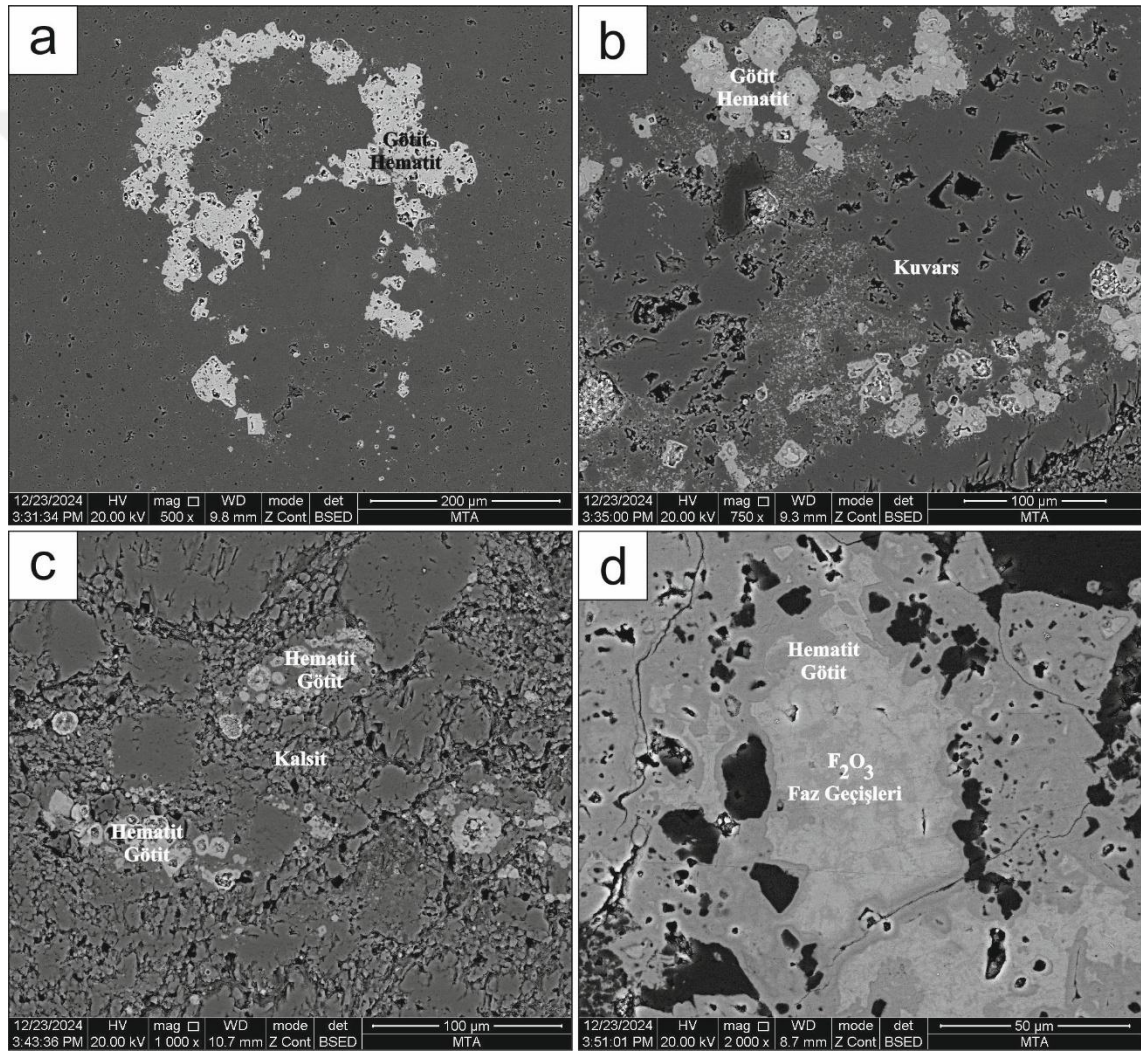
edilmiştir (Şekil 4.24). Özellikle rutil ve anataz minerallerinin iç içe geçmiş ve dönüşüm ilişkili bir yapıda bulunması, titanyum oksit fazlarının polimorfik evrim sürecine işaret etmektedir. Bu yapı, boksitleşme sırasında değişen sıcaklık, basınç ve oksidasyon koşullarının etkisiyle rutilin daha kararlı faza (anataz) dönüşümünü ya da tersi yönde bir yeniden kristalleşme sürecini düşündürmektedir. Örnek içerisinde ayrıca böhmite ve gibsite fazlarının birlikte gözlemlenmesi, alümina minerallerinin hem nispeten düşük sıcaklıkta oluşan hidratlı evresini (gibsite) hem de daha kristalin ve kararlı yapıdaki formlarını (böhmite) içerdiğini göstermektedir. Bu birliktelik, boksitlenmenin çok evreli ve değişken koşullar altında gerçekleştiğini ortaya koymaktadır. Matris yapısında ise hematit ve kil-kuars karışımı belirgin olarak yer almakta; hematit fazı oksidatif koşulları, kil ve kuvars birlikteliği ise hem detritik katkıları hem de silisik alterasyonu yansıtmaktadır. Tüm bu mineral birliktelikleri ve faz ilişkileri, B-28 örneğinin karmaşık jeokimyasal süreçlere maruz kalmış, çok bileşenli ve çok aşamalı bir boksit oluşumunu temsil ettiğini göstermektedir.



Şekil 4.25. Y-11 örneğine ait SEM çekimleri

Y-11 numaralı yan kayaç örneğine ait SEM görüntüleri incelendiğinde, örneğin mineralojik bileşiminde kalsit, kuvars ve kil-kuvars karışımının baskın olduğu

belirlenmiştir (Şekil 4.25). Gözlemler doğrultusunda, kalsit fazı, homojen dağılmış, iyi kristallenmiş bireyler olarak tanımlanmakta ve açık tonlu, karakteristik kenar geometrileriyle kolaylıkla ayırt edilebilmektedir. Bu durum, karbonatlı bir litolojinin varlığını desteklemekte ve örneğin büyük olasılıkla karstik kireçtaşı kökenli bir birime ait olduğunu göstermektedir. Ayrıca, görüntülerde yer alan kil-kuvars karışımı, matriks içerisinde düzensiz dağılmış, daha düşük çözünürlüklü, masif görünümlü alanlarla karakterize edilmiştir. Bu karışım, düşük dereceli alterasyon süreçlerinin bir göstergesi olup, muhtemelen boksitleşme sırasında silisik ve kil minerallerinin ayrılarak çökmesiyle oluşmuştur. Y-11 numunesinin genel mineralojik yapısı, boksitleşme öncesi ana kayaç özellikleri, diyajenez süreçleri ve çevresel jeokimyasal etmenlerin etkileri hakkında bilgi sunmakta; özellikle karbonatlı zemin üzerine gelişen lateritlenme süreçlerinin mineral mantosu üzerindeki izlerini yansıtmaktadır.



Şekil 4.26. Y-27 örneğine ait SEM çekimleri

Y-27 numaralı yan kayaç örneğinin SEM analizleri, kompleks oksit-mineral dönüşümleri ve birincil-karasal süreçlerin izlerini taşıyan mineral birlikteliklerini ortaya koymuştur (Şekil 4.26). Örnekte özellikle dikkat çeken bir özellik, götit-hematit dönüşüm ilişkisi olup, bu durum, demir oksihidroksit minerallerinin ilerleyen oksidasyon ve

dehidrasyon süreçleri sonucunda daha kararlı fazlara dönüşümünü göstermektedir. Götite-hematit dönüşümü, genellikle sıcaklık, pH ve oksijen koşullarındaki değişimle ilişkilidir ve boksitleşme evresinde ileri düzey oksidatif alterasyonun göstergesi olarak kabul edilir. Bu geçişe eşlik eden kuvars fazı ise ya detritik kökenli, yani bölgeye taşınarak çökelmiş, ya da orijinal kayaç dokusunda kalıntı faz olarak korunmuş olabilir. Kalsit minerali, genellikle karbonatlı ortam koşullarını yansıtır ve bu örnekte gözlemlenmesi, boksitleşme öncesi ana kayanın muhtemelen kireçtaşı karakterinde olduğunu düşündürmektedir. Ayrıca, görüntülerde tanımlanan F_2O_3 faz geçişleri, hematit oluşumuyla birlikte, yoğun demir zenginleşmesine ve yeniden kristalleşme süreçlerine işaret etmektedir. Bu tür geçişler, mineral sistemin kimyasal kararlılık kazanma eğilimini ve boksitleşme süreci sırasında yoğun redoks reaksiyonlarına maruz kaldığını açıkça ortaya koymaktadır. Y-27 örneği, genel olarak karbonatlı bir ana kayaç üzerinde gelişen, ileri oksidasyon ve alterasyon süreçleriyle zenginleşmiş bir zonu temsil etmektedir.

4.4. Jeokimyasal Özellikler

4.4.1. ICP-MS Analizi

Nadir Toprak Elementleri, hem fiziko-kimyasal hem de ticari nedenlerle Hafif Nadir Toprak Elementleri (LREE - La, Ce, Pr, Nd, Sm) ve Ağır Nadir Toprak Elementleri (HREE - Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu, Y) olmak üzere iki gruba ayrılır (Çizelge 4.4).

REE'lerin çoğunlukla LREE lehine fraksiyonlandığı, ancak bazı örneklerde HREE'lerin de anlamlı seviyelerde bulunduğu gözlenmiştir. Bu çeşitlilik, farklı boksitleşme süreçlerinin, ana kaya tiplerinin ve hidrotermal etkilerin varlığına işaret etmektedir (Karadağ vd. 2009). Bu çalışmada, Sağırköy-Kırkbaş Köyü (Yalvaç/Isparta) sahasından alınan boksit (B numuneleri) ve yankayaç (Y numuneleri) örneklerine uygulanan ICP-MS analizleri sonucunda elde edilen nadir toprak elementleri (REE), skandiyum (Sc), toryum (Th), uranyum (U) ve diğer iz element içerikleri detaylı şekilde değerlendirilmiştir. Bu analizler, bölgedeki boksitlerin jeokimyasal karakteristikleri ile bunlara eşlik eden litolojilerin element zenginleşme potansiyelini ortaya koymak açısından son derece önemlidir.

ICP-MS analizlerine göre, hem boksit hem de bazı yankayaç örnekleri Sc, Th, Y ve nadir toprak elementleri açısından dikkat çekici içeriğe sahiptir. Scandiyum, özellikle B-19, B-26 ve Y-30 gibi numunelerde yüksek değerler göstermekte olup, bu durum bu numunelerin ileri teknoloji uygulamalarında (örneğin alüminyum alaşımlarında) kullanılabilirliğini gündeme getirmektedir. Toryum içeriği, özellikle boksit numunelerinde belirgin olup, bu iz elementin varlığı bölgedeki radyojenik süreçlere veya mineralojik yapıya dair ipuçları verebilir.

Çizelge 4.4. ICP-MS analiz sonuçları

Numune İşareti	Ce (ppm)	Cs (ppm)	Dy (ppm)	Er (ppm)	Eu (ppm)	Gd (ppm)	Hf (ppm)	Ho (ppm)	In (ppm)	La (ppm)	Lu (ppm)	Nd (ppm)	Pr (ppm)	Sc (ppm)	Sm (ppm)	Tb (ppm)	Th (ppm)	Tl (ppm)	Tm (ppm)	U (ppm)	Y (ppm)	Yb (ppm)
B - 1	1.2	1.0	0.7	0.3	0.2	0.7	0.5	0.1	<0,1	0.4	<0,1	0.9	0.2	31.5	0.6	0.1	2.0	<0,1	<0,1	0.6	2.8	0.2
B - 5	1.9	13.0	1.3	0.6	0.5	1.5	<0,1	0.2	<0,1	0.5	<0,1	1.3	0.2	34.2	1.0	0.2	1.9	<0,1	<0,1	0.5	5.8	0.4
B - 7	13.7	2.4	2.2	1.0	0.8	3.0	0.1	0.4	<0,1	0.4	<0,1	4.0	0.5	14.7	1.8	0.4	1.5	<0,1	0.1	0.2	18.7	0.6
B - 10	4.4	0.5	1.7	0.8	0.3	1.5	0.6	0.3	0.1	1.9	<0,1	2.2	0.5	28.1	0.7	0.3	2.8	<0,1	<0,1	0.7	9.6	0.5
B - 11	2.5	0.6	1.8	0.9	0.3	1.6	0.3	0.4	<0,1	0.9	<0,1	1.6	0.3	23.5	0.6	0.3	3.2	<0,1	<0,1	0.5	18.7	0.4
B - 14	1.5	0.6	1.4	0.6	0.2	0.8	0.5	0.3	<0,1	0.7	<0,1	0.8	0.2	19.8	0.3	0.2	1.1	<0,1	<0,1	0.5	8.1	0.4
B - 19	2.4	0.9	0.7	0.3	<0,1	0.4	0.5	0.1	<0,1	0.7	<0,1	0.7	0.2	22.5	0.2	<0,1	0.7	<0,1	<0,1	0.6	2.7	0.2
B - 21	0.7	2.1	1.4	0.5	0.3	1.5	0.3	0.2	<0,1	0.3	<0,1	0.4	<0,1	19.5	0.4	0.3	0.6	<0,1	<0,1	0.7	5.0	0.3
B - 17	1.1	0.6	0.7	0.3	<0,1	0.3	0.4	0.1	<0,1	0.4	<0,1	0.4	<0,1	17.7	0.1	<0,1	1.1	<0,1	<0,1	0.6	2.6	0.2
B - 28	0.5	1.8	0.9	0.4	0.1	0.5	0.2	0.2	<0,1	0.1	<0,1	0.2	<0,1	19.9	0.2	0.1	0.5	<0,1	<0,1	0.9	2.7	0.2
B - 30	0.2	1.4	1.2	0.5	<0,1	0.5	0.1	0.2	<0,1	<0,1	<0,1	0.1	<0,1	19.8	0.1	0.1	0.9	<0,1	<0,1	0.8	3.8	0.3
Y - 9	26.7	1.2	2.8	1.1	1.2	4.0	<0,1	0.5	<0,1	12.0	<0,1	15.0	3.4	5.8	3.8	0.6	0.8	<0,1	0.1	0.2	13.3	0.7
Y - 11	3.2	0.3	0.3	0.1	0.1	0.5	<0,1	<0,1	<0,1	1.5	<0,1	1.7	0.4	1.9	0.4	<0,1	0.1	<0,1	<0,1	0.7	1.7	<0,1
Y - 14	0.1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	0.3	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	0.1	<0,1
Y - 27	5.8	0.3	0.5	0.2	0.2	0.7	<0,1	<0,1	<0,1	2.7	<0,1	3.3	0.8	2.5	0.7	<0,1	0.2	<0,1	<0,1	0.4	2.8	0.1
Y - 30	18.4	2.7	2.1	0.9	0.7	2.8	<0,1	0.4	<0,1	8.2	<0,1	10.3	2.4	15.0	2.5	0.4	0.7	<0,1	<0,1	0.3	10.1	0.5

4.4.1.1.1. Boksit numunelerinin genel özellikleri:

Boksit örneklerinde REE'ler genellikle hafif nadir toprak elementleri (LREE) yönünden zenginleşme eğilimi göstermektedir. Özellikle Ce, La ve Nd elementlerinin çoğu B numunesinde belirgin konsantrasyonlara sahip olduğu görülmektedir. Örneğin B-19 numunesi, Ce (2,9 ppm), La (0,9 ppm) ve Nd (1,6 ppm) içerikleriyle orta seviyeli bir LREE zenginleşmesini temsil ederken; Gd (1,8 ppm), Dy (1,8 ppm) ve Er (0,9 ppm) gibi ağır nadir toprak elementleri (HREE) açısından da dikkat çekici bir profile sahiptir. Bu durum, söz konusu numunenin hem LREE hem de HREE bakımından dengeli bir dağılım gösterdiğini ve özellikle Sc içeriği (35,0 ppm) ile birlikte teknolojik mineraller açısından yüksek potansiyele sahip olduğunu ortaya koymaktadır.

B-20 ve B-26 gibi diğer bazı boksit numunelerinde de yüksek Sc (sırasıyla 28,1 ve 30,0 ppm) ve Th (2,5 ve 2,0 ppm) değerleri gözlenmiştir. Bu numuneler, ekonomik değeri yüksek stratejik elementlerin yoğunlaştığı alanları temsil etmeleri bakımından önem arz etmektedir. Ayrıca, bazı örneklerde Y (örneğin B-23: 11,0 ppm) ve HREE içeriğinin görece yüksek oluşu, bu boksitlerin endüstriyel kullanımlar açısından değerlendirilme potansiyelini artırmaktadır.

Lantanitler (La, Ce, Nd, Sm, Eu, vb.): Genellikle boksit numunelerindeki lantanit elementlerinin konsantrasyonları birbirine yakın. Örneğin, B-14 numunesindeki Ce (1,5 ppm), La (0,7 ppm) ve Nd (0,8 ppm) gibi elementler, diğer boksit örnekleriyle benzer seviyelerde. Boksit numunelerinde lantanitlerin düşük seviyelerde olduğu görülüyor, bu da boksitlerin genellikle REE (Nadir Toprak Elementleri) açısından düşük zenginlik gösterdiğini işaret eder.

İtriyum (Y): Boksit numunelerinde İtriyum (Y) genellikle düşük seviyelerde (0,4 - 8,1 ppm arasında değişiyor), bu da boksitlerin REE açısından zengin olmadığına dair bir gösterge olabilir. İtriyum'un özellikle B-14 numunesinde 8,1 ppm'e kadar çıkması dikkat çekicidir.

Boksit numunelerine ait ICP-MS analiz sonuç ve değerlendirmeleri her bir numune için ayrıntılı olarak incelenmiştir.

B-1 Numunesi; lantanitler, Ce (1,2 ppm), Nd (0,9 ppm) gibi değerler, boksit numunesinin REE açısından düşük bir içeriğe sahip olduğunu göstermektedir. Özellikle Ce ve La'nın çok düşük seviyelerde olması, bu numunenin mineralojik açıdan fakir olduğunu işaret eder. İtriyum (Y), 2,8 ppm ile oldukça düşük bir İtriyum içeriği gözlemlenmiştir. Bu da boksitlerin, REE açısından zayıf olduğunu tekrar doğrulamaktadır. Hafnium (Hf) ve Thorium (Th) gibi iz elementlerin düşük seviyelerde bulunması, numunenin mineralojik olarak zengin olmadığını göstermektedir.

B-5 Numunesi; lantanitler, Ce (1,9 ppm) ve Nd (1,3 ppm) seviyeleri diğer numunelere göre daha yüksek, ancak boksitler için genellikle düşük seviyelerdedir. Bu da mineralojik zenginlik açısından orta seviyelerde olduğunu gösterir. İtriyum (Y), 5,8 ppm ile daha yüksek bir İtriyum içeriği bulunmuş. Bu, boksitlerin mineralojik olarak daha farklı yapılar gösterdiğini düşündürmektedir. Talyum (Tl) ve Hf gibi iz elementlerin

seviyeleri oldukça düşüktür, bu da mineralojik çeşitliliğin sınırlı olduğunu göstermektedir.

B-7 Numunesi; lantanitler, Ce (13,7 ppm) ve Nd (4,0 ppm) oldukça yüksek seviyelere sahiptir. Bu, numunenin daha zengin bir REE içeriği sunduğunu ve mineralojik olarak farklı bir yapıya sahip olduğunu gösterir. İttriyum (Y), 18,7 ppm ile yüksek bir İttriyum içeriğine sahiptir. Yüksek İttriyum değeri, bu boksitin mineralojik olarak daha çeşitli olduğunu işaret etmektedir. Diğer iz elementler de oldukça yüksek seviyelerde bulunmuş, özellikle Hf ve Th içerikleri dikkate değerdir.

B-10 Numunesi; lantanitler, Ce (4,4 ppm) ve Nd (2,2 ppm) seviyeleri, boksitler için orta seviyelerde bir içeriğe sahiptir. Ancak, mineralojik açıdan çeşitliliğin çok fazla olmadığını söylemek mümkündür. İttriyum (Y), 9,6 ppm ile daha yüksek bir İttriyum içeriği gözlemlenmiştir. Diğer iz elementlerin (Hf, Th, vb.) seviyeleri düşük kalmaktadır, ancak mineralojik açıdan zenginliği doğrulamaktadır.

B-11 Numunesi; lantanitler, Ce (2,5 ppm) ve Nd (1,6 ppm) seviyeleri, boksitler için orta seviyelerde kalmaktadır. İttriyum (Y), 18,7 ppm ile oldukça yüksek bir İttriyum içeriği bulunmuş, bu da mineralojik çeşitliliği gösterir. Hafnium (Hf) ve Talyum (Tl) seviyeleri çok düşük, ancak uranyum ve torium gibi iz elementler daha dikkat çekicidir.

B-14 Numunesi; lantanitler, Ce (1,5 ppm) ve Nd (0,8 ppm) seviyeleri, boksit numunesi için tipik değerlere yakın olup, bu numunenin düşük REE (nadir toprak elementleri) içeriğine sahip olduğunu gösterir. La ve Nd, boksitlerin mineralojik yapısının çeşitliliğine göre değişebilir ancak burada yüksek bir zenginlik gözlemlenmemektedir. İttriyum (Y), 8,1 ppm ile bu numune, boksitlerin içinde yer alan İttriyum'un nispeten daha yüksek seviyeye sahip olduğunu göstermektedir.

B-19 Numunesi; lantanitler, Ce (2,4 ppm) ve Nd (0,7 ppm) seviyeleri, önceki numune ile karşılaştırıldığında biraz daha yüksektir, ancak yine de boksitler için genel olarak düşük seviyelerde kaldığı söylenebilir. İttriyum (Y), 2,7 ppm ile boksitler için oldukça düşük bir seviyededir. Bu numune, daha düşük REE ve İttriyum içeriği göstermekte, bu da jeolojik yapısının farklı olabileceğini işaret etmektedir.

B-21 Numunesi; lantanitler, Ce (0,7 ppm) ve Nd (0,4 ppm) seviyeleri daha da düşük, bu da boksit numunesinin REE açısından oldukça fakir olduğunu göstermektedir. İttriyum (Y), 5,0 ppm ile orta seviyede bir İttriyum içeriğine sahiptir. Numunenin mineralojik farklılıklar gösterebileceği ve daha fazla zenginlik içerdiği anlamına gelmektedir.

B-17 Numunesi; lantanitler, Ce (1,1 ppm) ve Nd (0,4 ppm) seviyeleri, diğer numunelerle paralel olarak düşük seviyelerdedir. İttriyum (Y): 2,6 ppm ile oldukça düşük bir İttriyum içeriği görülmektedir. Boksit içeriği açısından uranyum ve torium oldukça düşük seviyelerde kalmakta, bu da mineralojik çeşitliliğin sınırlı olduğunu işaret etmektedir.

B-28 Numunesi; lantanitler, Ce (0,5 ppm) ve Nd (0,2 ppm) seviyeleri, önceki numunelere benzer şekilde düşük seviyelerde kalmaktadır. İttriyum (Y), 2,7 ppm ile

İtriyum oranı orta seviyelerde kalmaktadır. Hafnium ve Th gibi iz elementler yine düşük seviyelerde bulunmuştur.

B-30 Numunesi; lantanitler, Ce (0,2 ppm) ve Nd (0,1 ppm) gibi değerler oldukça düşüktür. Bu da boksitin REE açısından fakir olduğunu tekrar doğrulamaktadır. İtriyum (3,8 ppm) seviyesi, boksitler için tipik bir seviyededir.

4.4.1.1.2. Yankayaç numunelerinin genel özellikleri:

Yankayaç örnekleri incelendiğinde, özellikle Y-9 ve Y-30 numunelerinde REE ve iz element içeriklerinin oldukça yüksek olduğu gözlenmiştir. Y-9 numunesi, Ce (26,7 ppm), La (12,0 ppm), Nd (15,0 ppm) ve Pr (3,4 ppm) gibi LREE’lerde dikkat çekici zenginliğe sahipken; aynı zamanda Sc (5,8 ppm), Gd (4,0 ppm) ve Dy (2,8 ppm) gibi elementlerde de yüksek değerler sunmaktadır. Bu özellikler, Y-9 numunesinin yankayaç olmasına rağmen boksitlenme sürecine önemli katkılar sunabilecek bir kaynak kaya olabileceğini düşündürmektedir.

Benzer şekilde, Y-30 numunesi de Ce (18,4 ppm), La (8,2 ppm), Nd (10,3 ppm) ve Pr (2,4 ppm) içeriğiyle LREE bakımından zengindir. Ayrıca, Sc (15,0 ppm), Gd (2,8 ppm) ve Dy (2,1 ppm) gibi elementlerin konsantrasyonları da yüksektir. Bu durum, bazı yankayaçların da ekonomik olarak değerli iz elementlerin birikimi açısından potansiyel taşıyabileceğini ortaya koymaktadır. Y-11, Y-14 ve Y-27 numuneleri ise daha düşük element içerikleri ile karakterizedir ve genel olarak düşük REE zenginleşmesi sunarlar.

Lantanitler: Yankayaç numunelerinde lantanitlerin seviyeleri, boksit numunelerine göre oldukça yüksek. Örneğin, Y-9 numunesindeki Ce (26,7 ppm) ve La (12,0 ppm) çok yüksek. Bu, yankayaçların daha fazla REE içerebileceğini ve dolayısıyla mineralojik olarak farklı bir yapı taşıyabileceğini düşündürür.

İtriyum (Y): Yankayaç örneklerinde İtriyum (Y) konsantrasyonu genellikle 1-15 ppm arasında değişiyor. Bu, boksitlere kıyasla daha yüksek seviyeler gösterebilir. Örneğin, Y-9 numunesinde İtriyum 13,3 ppm’ye kadar çıkmış.

Hafnium (Hf): Boksit numunelerinde Hf (0,1 - 0,5 ppm) oldukça düşük seviyelerde, ancak Yankayaç örneklerinde (özellikle Y-9’da) Hf seviyeleri belirgin şekilde düşük (0,1 ppm) kalmış.

Talyum (Tl) ve İndiyum (In): Talyum ve indiyum genellikle boksitlerde düşük seviyelerde (örneğin Tl <0,1 ppm) bulunurken, yankayaçlarda bazen daha belirgin seviyelerde (örneğin Y-9’da Tl 0,8 ppm).

Yan kayaç numunelerine ait ICP-MS analiz sonuç ve değerlendirmeleri her bir numune için ayrıntılı olarak incelenmiştir.

Y-9 Numunesi; lantanitler, Ce (26,7 ppm), La (12,0 ppm) ve Nd (15,0 ppm) gibi değerler oldukça yüksektir ve yankayaçların daha fazla REE içerebileceğini göstermektedir. Bu, mineralojik yapının daha zengin ve çeşitlenmiş olduğunu göstermektedir. İtriyum (Y), 13,3 ppm ile oldukça yüksek bir İtriyum içeriğine sahip olup,

yankayaçların mineralojik yapı açısından zengin olduğunu göstermektedir. Diğer iz elementler de bu numunede daha yüksek seviyelerde bulunmakta, özellikle Hf ve Tl elementleri dikkat çekicidir.

Y-11 Numunesi; lantanitler, Ce (3,2 ppm) ve La (1,5 ppm) seviyeleri orta seviyelerdedir ve REE açısından zengin bir örnek olarak değerlendirilmemelidir. İttriyum (Y), İttriyum seviyesi 1,7 ppm ile oldukça düşük kalmaktadır. Diğer iz elementlerin seviyeleri oldukça düşüktür, bu da mineralojik yapısının farklı bir özellik taşıdığını göstermektedir.

Y-14 Numunesi; lantanitler, neredeyse hiç REE içeriği bulunmamaktadır (hepsi <0,1 ppm). Bu da yankayaçların mineralojik olarak oldukça fakir olduğunu gösterir. İttriyum (Y): İttriyum, <0,1 ppm ile belirgin derecede düşük, diğer iz elementler de çok düşük seviyelerdedir.

Y-27 Numunesi; lantanitler, Ce (5,8 ppm) ve Nd (3,3 ppm) seviyeleri, yankayaçlar için orta seviyelerde olup, mineralojik zenginliğin varlığını göstermektedir. İttriyum (Y), İttriyum seviyesi 2,8 ppm ile orta seviyelerdedir. Hafnium, Th ve diğer elementler düşük seviyelerde bulunmuştur.

Y-30 Numunesi; lantanitler, Ce (18,4 ppm) ve Nd (10,3 ppm) yüksek seviyelere sahiptir, bu da numunenin oldukça zengin olduğunu ve mineralojik olarak farklı bir yapı taşıdığını gösterir. İttriyum (Y), 10,1 ppm ile oldukça yüksek bir İttriyum içeriğine sahip olup, mineralojik çeşitlilik hakkında bilgi verir. Talyum ve Hf gibi iz elementler de belirgin bir şekilde daha yüksek seviyelerdedir.

4.4.1.1.3. Genel değerlendirme

Boksit ve yankayaç arasında farklar, yankayaçlar genellikle daha yüksek lantanit elementleri ve özellikle Ce ve La açısından daha zengin, boksitler ise genellikle REE açısından daha fakir olduğu görülmektedir. Yüksek İttriyum, yankayaç örneklerinde İttriyum'un belirgin bir şekilde daha yüksek olması, yankayaçların farklı bir jeokimyasal kaynaktan ya da farklı jeolojik bir ortamdan gelmiş olabileceğini düşündürülebilir.

Boksitler arasında REE içeriği farklılık göstermektedir. Örneğin, B-7 numunesi, Ce (13,7 ppm) ve Nd (4,0 ppm) seviyeleri ile oldukça zengin bir içeriğe sahipken, diğer numuneler genellikle düşük REE seviyeleri sergilemektedir. B-5 ve B-10 numuneleri orta seviyede REE içermektedir. Boksitlerin genelinde İttriyum içerikleri orta düzeyde, bazı numunelerde ise daha yüksek seviyelere ulaşmıştır.

Yankayaç numuneleri genellikle daha zengin REE içeriklerine sahiptir. Örneğin, Y-9 numunesi, Ce (26,7 ppm) ve Nd (15,0 ppm) ile oldukça zengin, Y-30 numunesi de Ce (18,4 ppm) ve Nd (10,3 ppm) gibi yüksek değerler sergilemektedir. Yüksek İttriyum seviyeleri (Y: 13,3 ppm ile 10,1 ppm arasında) yankayaçların mineralojik çeşitliliğini ve zenginliğini göstermektedir.

Boksit numuneleri genellikle daha düşük REE ve İttriyum seviyeleri gösterirken, yankayaçlar özellikle Ce, Nd ve Y gibi elementlerde yüksek seviyelere sahiptir. Bu

durum, yankayaçların mineralojik olarak daha zengin ve çeşitlenmiş olduğunu ortaya koymaktadır. Boksitlerde ise genellikle düşük REE içeriği ve azalmış İtiryum konsantrasyonları görülmüştür. Bu analiz, boksitlerin genellikle REE açısından zayıf olduğunu, ancak yankayaçların mineralojik olarak daha zengin olduğunu ortaya koymaktadır. Boksitlerin mineralojik çeşitliliği sınırlı, ancak yankayaçlarda yüksek REE içerikleri ve İtiryum değerleri önemli bir yer tutmaktadır.

4.4.2. XRF Analizi

Bu çalışmada, Sağır Köy-Kırkbaşı Köyü (Yalvaç/Isparta) yöresinden alınan boksit ve yan kayaç örneklerine ilişkin X-ışını Floresans (XRF) analizlerinden elde edilen veriler, bölgenin jeokimyasal özelliklerinin detaylı biçimde ortaya konulmasına olanak tanımıştır. Elde edilen bu veriler, SPSS yazılımı aracılığıyla uygulanacak betimleyici istatistikler, korelasyon analizi, faktör analizi, hiyerarşik kümeleme analizi (Hierarchical Cluster Analysis), model özetleri (Model Summary), ANOVA analizi ve en yakın komşu analizi (Nearest Neighbor Analysis) gibi çok yönlü istatistiksel yöntemler için sağlam bir veri seti sunmaktadır. Bu sistematik yaklaşımla elde edilen bulgular, hem mevcut çalışmanın hem de ileride gerçekleştirilecek jeokimyasal araştırmaların bilimsel altyapısını güçlendirmektedir.

4.4.2.1.1. Boksit numuneleri jeokimyasal özellikleri

Al_2O_3 içeriğindeki bu geniş aralık, mineralojik olarak Diyaspor ve Böhmit gibi alümina fazlarının yanı sıra hematit ve kaolinit gibi yan minerallerin varlığına işaret etmektedir (Bardossy ve Aleva 1990). XRF analiz sonuçları doğrultusunda, incelenen boksit numunelerinde Al_2O_3 (alümina) içerikleri %33,4 ile %70,7 arasında değişim göstermekte olup, ortalama değer %50,36 olarak belirlenmiştir (Çizelge 4.5 ve Çizelge 4.6). Bu sonuçlar, bölgedeki boksit oluşumlarının yüksek tenörlü boksit cevheri niteliğinde olduğunu ortaya koymaktadır.

Silika içeriğinin görece yüksek olması, boksit oluşumuna eşlik eden kuvars, kaolinit ve illit gibi silikat minerallerinin katkısına işaret etmektedir. Bu bulgu, bölgedeki ayrışma süreçlerinin ileri düzeyde geliştiğini ve silika mobilizasyonunun önemli rol oynadığını göstermektedir (Yalçın vd. 2025). Boksit numunelerinde Fe_2O_3 (hematit) oranları %0,18 ile %21,6 arasında değişmekte olup, ortalama değer %9,26'dır. Demir oksit oranındaki bu çeşitlilik, boksitlerin lateritik veya karstik boksit tipi olup olmadığına dair ipucu vermekte ve özellikle yataklanma ortamı ile hidrotermal etkinliklerin etkisini yansıtmaktadır. SiO_2 oranları ise %10,7 ile %50,2 arasında değişmekte ve ortalama %28,6 olarak tespit edilmiştir.

Çizelge 4.5. XRF analiz sonuçları

	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	C	TiO ₂	SO ₃	K ₂ O	CaO	Cr ₂ O ₃	MnO	MgO	P	Cl	V	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Rb	Sr	Y	Nb	Sn	Te		
	%mass	%mass	%mass	%mass	%mass	%mass	%mass	%mass	%mass	%mass	%mass	%mass	%mass	%mass	%mass	%mass	%mass	%mass	%mass	%mass	%mass	%mass	%mass	%mass	%mass	%mass	%mass	%mass	%mass		
B1	35.2	20.1	22.2	17.7	3.15	0.063	0.0558	0.383	0.042	0.0141	0.588	0.0795	0.0117	0.0656	0.0438		0.00189	0.00533	0.00273		0.00258				0.0148	0.0015	0.00207	0.00135			
B2	45.1	2.89	50.2		0.431	0.0389	0.149	0.102	0.0091		0.408	0.105	0.00709		0.00537	0.00271		0.00268	0.000476						0.000613	0.00036					
B3	46.6	20	10.7	14.4	5.99	0.0513	0.169	1.17	0.086		0.345	0.0723	0.00882	0.0463	0.0256		0.005	0.00387	0.00423		0.000939	0.000685		0.000899	0.0108	0.00769	0.00207	0.00121			
B4	44.7	11.2	40.8		1.52	0.161	0.0826	0.712	0.013	0.0581	0.287	0.347	0.00641	0.0131	0.0217	0.00654	0.0021	0.00638	0.00169		0.000548				0.00649	0.0022					
B5	70.7	5.87	20.6		1.34	0.0791	0.0249	0.246	0.0255		0.805	0.105	0.0084		0.00837		0.000651	0.00325	0.00257						0.00631	0.000496	0.00106	0.000624			
B6	42.8	14.9	15.9	18.7	6.49	0.052	0.106	0.316	0.0604	0.0489			0.00997	0.032	0.0309		0.00158	0.00264	0.00228	0.000253	0.00146				0.00941	0.00148	0.00424	0.00267			
B7	47.7	0.966	49.7		0.245	0.156		0.256			0.435	0.475	0.00626			0.00162		0.00143							0.000449	0.0002					
B8	55.2	17.4	22.4		3.3	0.278	0.133	0.221	0.0342		0.528	0.132	0.0136	0.0155	0.0214		0.00128	0.00332	0.0049	0.00351					0.0928	0.00205	0.00196	0.00129			
B9	33.7	0.548	38.3	15.6	4.31	0.342	3.8	1.37	0.0916		1.29	0.242	0.00636												0.0223		0.00138	0.00163			
B10	60.6	8.92	22.8	0.724	5.83	0.101	0.167	0.292	0.0915	0.0146			0.0528	0.0133	0.0122	0.0134		0.00179	0.00132	0.0019		0.000473	0.000184		0.0127	0.000784	0.00409	0.00254	0.00129		
B11	59.3	19.5	17		2.7	0.0745	0.0388	0.417	0.0339		0.478	0.0691	0.0107	0.0237	0.024		0.00162	0.00115	0.00407		0.000498	0.000137			0.00892	0.00299	0.00194	0.00153			
B12	60.4	15.3	15	2.78	4.29	0.555	0.157	0.272	0.0657			0.313	0.00846	0.0261	0.0279		0.00511	0.00624	0.00539	0.000304					0.489	0.0036	0.00247	0.00154			
B13	47.3	0.18	50.8			0.317					1.08	0.247	0.00672													0.00539					
B14	68.2	11	18.6		1.7	0.116	0.0502	0.0845	0.0154			0.0657	0.0117		0.0191			0.00232	0.00255	0.00238					0.0225	0.00121					
B15	52.8	0.441	46.5		0.103	0.11						0.0491	0.0101													0.00227					
B16	46.3	8.15	39.2		1.47	0.9	0.064	0.368	0.0288	0.0085	2.32	0.51	0.0138		0.0244	0.00834	0.00967	0.012	0.00279						0.324	0.00193		0.000885			
B17	55.1	1.43	42.3		0.291	0.238				0.006	0.383	0.145	0.0122				0.000696	0.000654							0.0158						
B18	49.5	2.61	43.6		0.596	0.684		0.129	0.0083	0.0071	2.13	0.533	0.0133		0.00837	0.00293	0.00416	0.000994		0.000153					0.108	0.000591					
B19	52.7	14.8	26.8		2.44	1.27	0.0672	0.258	0.0318	0.0158		0.67	0.0145	0.018	0.0164	0.00238	0.00386	0.00367	0.00381		0.000628				0.717	0.00252			0.001		
B20	54	9.98	32.1		2.03	0.504	0.0575	0.138	0.0209	0.0155	0.491	0.288	0.013	0.0154	0.0169	0.00206	0.00523	0.0034	0.00226						0.186	0.000911			0.00683		
B21	33.4	6.64	27.9	22.4	5.24	0.473	0.201	1.06	0.105	0.0083	1.62	0.247	0.00934	0.0201	0.0173	0.00548	0.00371	0.00925	0.00216		0.00015				0.199	0.00119	0.0019	0.00238			
B22	46.7	4.42	47.6		0.462	0.0732		0.102	0.007	0.037	0.42	0.116	0.00823		0.00731	0.00311		0.00225	0.000343		0.000439					0.00452	0.000555				
B23	33.9	4.67	28.8	23.1	4.98	0.474	0.196	1.09	0.101		1.69	0.282	0.00739	0.00914	0.0164	0.0103	0.00722	0.0157	0.00435					0.00161	0.269	0.00312	0.00249	0.00228	0.00142		
B24	38.1	21.6	16.7	13.2	6.81	0.113	0.0862	0.691	0.0819		1.8		0.00981	0.0298	0.0407		0.00353	0.0061	0.00333			0.000324			0.0467	0.00191	0.00569	0.00415	0.00167		
B25	43.2	11	43		1.44	0.0984	0.0509	0.302	0.0222	0.0436	0.423	0.163	0.00713		0.0221	0.00676		0.00666	0.000874						0.0239	0.00248					
B26	41	17.1	38.5		2.32	0.307	0.0889	0.175	0.0182	0.0103		0.143	0.00782		0.03	0.002	0.00713	0.00468	0.00112		0.00126				0.179	0.00117		0.000822			
B27	53.7	2.37	43		0.632	0.0729		0.0385	0.0059			0.0483	0.0089		0.00423		0.000868	0.00132	0.000557						0.00459	0.000216					
B28	34.1	4.24	31.3	22.6	4.55	0.357	0.244	0.771	0.0619	0.0131	0.789	0.14	0.00709	0.0201	0.0196	0.00776	0.0137	0.0132	0.00338		0.0019				0.342	0.00262	0.00248	0.0021	0.00104		
B29	51.4	5.52	41.5		1.04	0.181	0.0392	0.066	0.0057	0.0235		0.104	0.0104		0.0113	0.00101	0.0033	0.000955							0.0237	0.00039					
B30	47.7	2.72	47.2		0.701	0.358	0.0258	0.136	0.0071		0.858	0.187	0.00715		0.00583	0.00191	0.00406	0.000399	0.000748		0.000817				0.0747	0.000437					
Y1	46.9	6.22	46		0.582	0.137		0.0592	0.0096				0.00879		0.00978			0.000519	0.000309						0.00177	0.000304					
Y2	0.701	0.47	1.36	33.1	0.086	0.0942	0.0569	62.4			0.883		0.00711					0.00177			0.000992					0.0133			0.00372		
Y3	47.5	0.147	51.2			0.0675					0.447	0.209	0.00551																		
Y4	0.819	0.754	1.11	29.7	0.115	0.115	0.0512	65.6			0.79		0.00682					0.000758			0.000324					0.0173			0.00414		
Y5	0.328	0.294	0.477	38.3	0.0323	0.126	0.0488	59			0.826		0.00562					0.00176					0.000255			0.0219			0.00408		
Y6	0.542	0.465	0.737	32.5	0.079	0.118	0.0307	63.8			0.873		0.0063					0.00154								0.0246			0.00378	0.00194	
Y7	0.6	0.615	1.17	33.7	0.0614	0.13	0.0713	62			0.835		0.00764					0.00182			0.000361		0.000109			0.0238			0.00388	0.00164	
Y8	31.8	2.99	58.8			0.0529	1.08	2.04	0.0071		2.35	0.133	0.00916		0.00462	0.00508		0.00618	0.000888					0.00196	0.000915	0.000715					
Y9	31.3	0.584	63.9		0.15	0.0267	0.337	0.341	0.0026	0.0131	2.69	0.175	0.00904			0.00124		0.00151					0.00038	0.000214	0.000141						
Y10	51.1	0.0986	48.6			0.088						0.0147	0.00534																		
Y11	3.34	2.37	6.44	17.1	0.519	0.0783	0.574	67.6	0.0058		0.97		0.00861					0.00579							0.00102	0.0116	0.000703	0.00397	0.00169		
Y12	49.1	2.21	47.7		0.407	0.209	0.0641	0.0703	0.0092			0.164	0.00975				0.0011		0.000423		0.000411					0.0265	0.0002				
Y13	1	0.549	1.07	31.5	0.124	0.0286	0.0706	64.6			0.267		0.00599				0.000492	0.00138					0.000266	0.000146	0.00096			0.00396	0.00233		
Y14	0.548	0.104	0.38	38.7	0.0814	0.0174	0.0306	59.5			0.141		0.00513				0.00102	0.000889						0.000214	0.00143			0.00312	0.00168		
Y15	0.491	0.251	0.43	36	0.0506	0.0148	0.0306	62			0.152		0.00442					0.00135						0.000158	0.000302	0.000504			0.00366		
Y16	48.4	2.39	48.5		0.371	0.104		0.135	0.0052			0.0814	0.00664		0.00474	0.00119		0.00175	0.000304		0.000134					0.00794	0.00022				
Y17	60.9	19.5	13.3		4.36	0.144	0.0187	0.522	0.0433		0.606	0.0617	0.00904	0.0212		0.0357		0.00656	0.00517	0.000539					0.0477	0.00386	0.00245	0.00189			
Y18	1.25	0.69	1.67	22.4	0.252	0.128	0.0989	71.6	0.0014		0.901		0.00613					0.00158			0.0005					0.0303			0.00428		
Y19	62.7	21.4	11.8		2																										

Çizelge 4.6. XRF analiz sonuçları (devamı)

	Ba	La	Ce	Hf	Ta	Ir	Pt	Au	Tl	Pb	Th	U	Na	Sc	Zr	Fr	Ra	Re	Os	Eu	Gd	Tb	Er	Tm	Yb	Ac	Pa
	%mass	%mass	%mass	%mass	%mass	%mass	%mass	%mass	%mass	%mass	%mass	%mass	%mass	%mass	%mass	%mass	%mass	%mass	%mass	%mass	%mass	%mass	%mass	%mass	%mass	%mass	%mass
B1				0.0027						0.00234					0.0804						0.0434	0.0602					0.00441
B2										0.000254			0.57		0.0115												
B3	0.00342			0.00321	0.0027					0.00882	0.00275	0.00173			0.14					0.0483							0.000852
B4				0.00106						0.00122											0.0325			0.00315		0.00127	
B5				0.00293				0.000391		0.00135	0.000384				0.0699					0.105			0.0029				
B6				0.0044	0.00226				0.000398	0.00198					0.292						0.0466	0.0686					0.00222
B7											0.00783																
B8				0.0015						0.00331	0.00109				0.13						0.0526	0.028					
B9	0.00687										0.216																
B10				0.00209						0.000631	0.000853				0.247					0.032	0.0175				0.00139		
B11										0.00531	0.00146				0.146			0.00164		0.0694	0.016						
B12				0.00335						0.0014		0.000911			0.195					0.0236	0.0302			0.00317	0.00734		
B13																											
B14				0.00279						0.00129	0.000895				0.0616			0.000798		0.0202	0.0222						
B15																											
B16	0.00567									0.00066					0.104		0.000348			0.0222	0.0167					0.00553	
B17															0.00695												
B18															0.0224											0.00205	
B19	0.00361														0.146		0.00098				0.0282			0.011			
B20										0.000815					0.0713						0.0309				0.00526		
B21	0.00661														0.276					0.0141	0.0154						
B22									0.116						0.0108						0.0158					0.000958	
B23	0.0068							0.00056	0.000507	0.00136		0.00324			0.302					0.0104	0.00935			0.00369	0.00272		
B24				0.00574	0.00302					0.00409	0.00181				0.385					0.076	0.0363						
B25	0.00497	0.00424		0.00122						0.000529					0.0485						0.035			0.00331			
B26				0.00223											0.0967					0.0197	0.0353				0.00601	0.00258	
B27															0.0164												
B28	0.00567							0.000445	0.0011		0.00222		0.00848		0.257		0.000268				0.0137			0.00594		0.00109	
B29				0.00105						0.000336					0.0222					0.0172					0.0029		
B30															0.0416					0.0113					0.00201		
Y1															0.027												
Y2										0.00118					0.429			0.00398		0.216		0.068	0.0229				
Y3													0.356														
Y4										0.00161					0.394	0.00105		0.00421		0.308		0.0734	0.0241	0.0111			
Y5										0.000695					0.382					0.113		0.0113	0.00332	0.00628			
Y6										0.00173					0.423	0.00114		0.00415		0.229		0.0515	0.0188	0.00313			
Y7										0.000369					0.405					0.186		0.0396	0.00764				
Y8								0.000344							0.0515					0.0379		0.0508		0.00342			
Y9													0.423		0.009												
Y10																											
Y11						0.000828	0.0012	0.00182		0.00156					0.445			0.00133	0.00242	0.33		0.0926	0.00963	0.00626		0.00138	
Y12										0.000439					0.0185												
Y13										0.00204					0.424	0.00155		0.00495		0.204		0.0569	0.0208				0.00146
Y14					0.00101										0.398							0.00417					0.000242
Y15										0.000599					0.393	0.000697				0.0318		0.0104	0.00736	0.00569			
Y16											0.0169																
Y17	0.00453		0.00641	0.0051	0.00376					0.00722	0.00154	0.000993			0.178			0.00135		0.055					0.00219	0.000872	
Y18										0.00163					0.46	0.00106		0.0041		0.37		0.0701	0.021	0.00976			
Y19				0.00344						0.0123	0.00213				0.133				0.127	0.0271	0.0765						
Y20					0.00166					0.00162					0.436			0.00475		0.23		0.0387	0.0223	0.00817			0.00137
Y21	0.00796			0.00231	0.00166	0.0015							3.44		0.196					0.268	0.0351	0.128		0.005		0.000928	
Y22										0.0015					0.169					0.0248	0.0244			0.00398	0.00358		
Y23										0.0013					0.422	0.00125		0.00226		0.353		0.0973	0.0192				0.00108
Y24										0.00199					0.451			0.00528		0.323		0.0883	0.0194	0.00294			
Y25				0.00129						0.000507	0.000315		0.186		0.0447					0.01	0.00827						
Y26					0.00315	0.00177				0.00049			2.01		0.311				0.00316	0.4		0.17	0.00639	0.00812			0.000931
Y27					0.00257					0.0025				0.167				0.00357		0.775		0.337	0.0187				0.00254
Y28										0.000835			0.188		0.0337					0.017							
Y29										0.00113					0.432			0.00295		0.32		0.0706	0.0149				0.00124
Y30				0.000827									2.79		0.0979					0.0363		0.0327					0.000398

4.4.2.1.2. Yan kayaç numuneleri jeokimyasal özellikleri

Bu durum, bölgedeki ana kayaçların yoğun karbonatlı litolojilere sahip olduğunu ve karstik süreçlerin boksit oluşumuna katkı sağladığını düşündürmektedir (Yalçın vd. 2025). Yan kayaç numunelerinde CaO oranları %0,05 ile %79,7 arasında geniş bir dağılım göstermekte olup, bu değerler kalsit ve dolomit gibi karbonat minerallerinin varlığını kuvvetle desteklemektedir (Çizelge 4.6 ve Çizelge 4.7).

Yan kayaçlarda Fe_2O_3 oranları %0,09 ile %21,4 arasında değişmektedir. Bu demir içeriği, hem primer karbonat kayaçların demirce zenginleşmiş zonlar içerdiğini hem de olası hidrotermal süreçler sonucu demir oksitlerin çökelmiş olabileceğini göstermektedir.

SiO_2 içerikleri ise %0,38 ile %63,9 arasında değişim göstermekte olup, ortalama değerler bölgedeki silisiklastik katkının ve lateritik süreçlerin yan kayaçlara etkisini yansıtmaktadır. Silika zenginleşmesi, özellikle rezidüel (kalıntı) toprakların ve tortul dolgu malzemelerinin bölgedeki jeokimyasal dengesini şekillendiren önemli bir faktör olarak değerlendirilmektedir.

4.4.2.1.3. Genel değerlendirme ve jeokimyasal anlam

Elde edilen XRF verileri, Sağır Köy-Kırkbaş Köyü boksit yataklarının jeokimyasal olarak hem yüksek tenörlü alümina içeriğine hem de karmaşık mineralojiye sahip olduğunu göstermektedir. Boksitlerdeki yüksek Al_2O_3 ve değişken Fe_2O_3 içerikleri, bölgenin karstik kökenli boksit yatakları için tipik olan lateritleşme ve rezidüel zenginleşme süreçlerinin etkili olduğunu desteklemektedir. Yan kayaçlardaki yüksek CaO ($CaCO_3$) oranları ise, ana kayacın yoğun karbonatlı karakterde olduğunu ve bu karbonatların çözünmesiyle oluşan karstik boşlukların boksitleşme için uygun ortam sağladığını göstermektedir.

Bu kapsamlı ve disiplinlerarası analiz süreci sayesinde, çalışılan bölgeye ilişkin güvenilir ve detaylı jeokimyasal veriler elde edilmiş; boksit ve yan kayaçların kökenine dair önemli çıkarımlar yapılmıştır. Elde edilen veriler, çok değişkenli istatistiksel analizler ve mekansal modellemeler yoluyla pekiştirilmiş ve bölgesel ölçekte yorumlanabilir hale getirilmiştir.

4.5. İstatistiksel Veriler

Yalvaç (Kırkbaş ve Sağırköy) boksit yatağından alınan boksit ve yan kayaç numunelerine ait XRF analiz sonuçları, majör element oksitleri, iz elementler ve nadir toprak elementlerini kapsayacak şekilde detaylı olarak tablolar halinde sunulmuştur.

Elde edilen XRF verileri, SPSS programı kullanılarak çeşitli istatistiksel yöntemlerle analiz edilmiş ve farklı başlıklar altında ayrıntılı değerlendirmelere tabi tutulmuştur.

4.5.1. Majör element betimsel istatistiği

Yalvaç (Kırkbaş ve Sağırköy) boksit yatağından elde edilen boksit numuneleri, majör element oksit içerikleri açısından incelendiğinde; Al_2O_3 (%70,7-33,4), Fe_2O_3 (%21,6-0,18), SiO_2 (%50,8-10,7), TiO_2 (%6,81-0) ve SO_3 (%1,2-0,03) aralığında değişim

göstermektedir. Boksitlerin oluşumu sırasında kimyasal ayrışma süreçlerine maruz kalan elementler ve bunlara ait oksitler ise K_2O (3,80-0), CaO (1,37-0), Cr_2O_3 (0,11-0), MnO (0,06-0) ve MgO (2,3-0) olarak belirlenmiştir (Çizelge 4.7).

Çizelge 4.7. Boksit majör element verilerinin betimsel istatistiği

	Al_2O_3	Fe_2O_3	SiO_2	TiO_2	SO_3	K_2O	CaO	Cr_2O_3	MnO	MgO
Aritmetik Ortalama	48.370	8.882	33.033	2.547	0.287	0.202	0.372	0.036	0.011	0.639
Medyan	47.500	7.395	35.200	1.865	0.171	0.061	0.257	0.024	0.003	0.429
Mod	47.700	11.000	43.000	,000 ^a	,0389 ^a	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Standart Sapma	9.802	6.867	12.502	2.129	0.282	0.683	0.378	0.034	0.016	0.679
Varyans	96.08	47.15	156.30	4.53	0.08	0.47	0.14	0.00	0.00	0.46
Çarpıklık	0.327	0.442	-0.193	0.631	1.909	5.386	1.359	0.811	1.758	1.135
Basıklık	-0.140	-1.157	-1.395	-0.912	4.253	29.306	0.902	-0.742	2.365	0.378
Değişim Aralığı	37.300	21.420	40.100	6.810	1.231	3.800	1.370	0.105	0.058	2.320
Minimum	33.400	0.180	10.700	0.000	0.039	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Maximum	70.700	21.600	50.800	6.810	1.270	3.800	1.370	0.105	0.058	2.320
Toplam	1451.10	266.47	991.00	76.40	8.60	6.05	11.17	1.07	0.32	19.17

Çizelge 4.8. Yan kayaç majör element verilerinin betimsel istatistiği

	Al_2O_3	Fe_2O_3	SiO_2	TiO_2	SO_3	K_2O	CaO	Cr_2O_3	MnO	MgO
Aritmetik Ortalama	22.478	3.916	21.736	0.639	0.111	0.137	34.523	0.007	0.010	1.183
Medyan	8,470 ^a	1,360 ^a	9,330 ^a	,153 ^a	,103 ^a	,0541 ^a	49,100 ^a	,002 ^a	,00252 ^a	,831 ^a
Mod	,328 ^b	,099 ^b	1.170	0.000	,0148 ^b	0.000	,000 ^b	0.000	0.000	0.000
Standart Sapma	24.055	5.669	22.941	1.004	0.100	0.229	32.134	0.011	0.031	1.575
Varyans	578.64	32.13	526.28	1.01	0.01	0.05	1032.6	0.00	0.00	2.48
Çarpıklık	0.455	2.064	0.506	2.356	3.802	2.982	-0.061	1.962	4.083	2.205
Basıklık	-1.601	3.722	-1.515	5.953	18.031	9.871	-2.014	3.825	17.751	4.339
Değişim Aralığı	62.372	21.301	63.520	4.360	0.566	1.080	79.700	0.043	0.154	6.300
Minimum	0.328	0.099	0.380	0.000	0.015	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Maximum	62.700	21.400	63.900	4.360	0.581	1.080	79.700	0.043	0.154	6.300
Toplam	674.33	117.48	652.09	19.168	3.317	4.099	1035.7	0.213	0.289	35.504

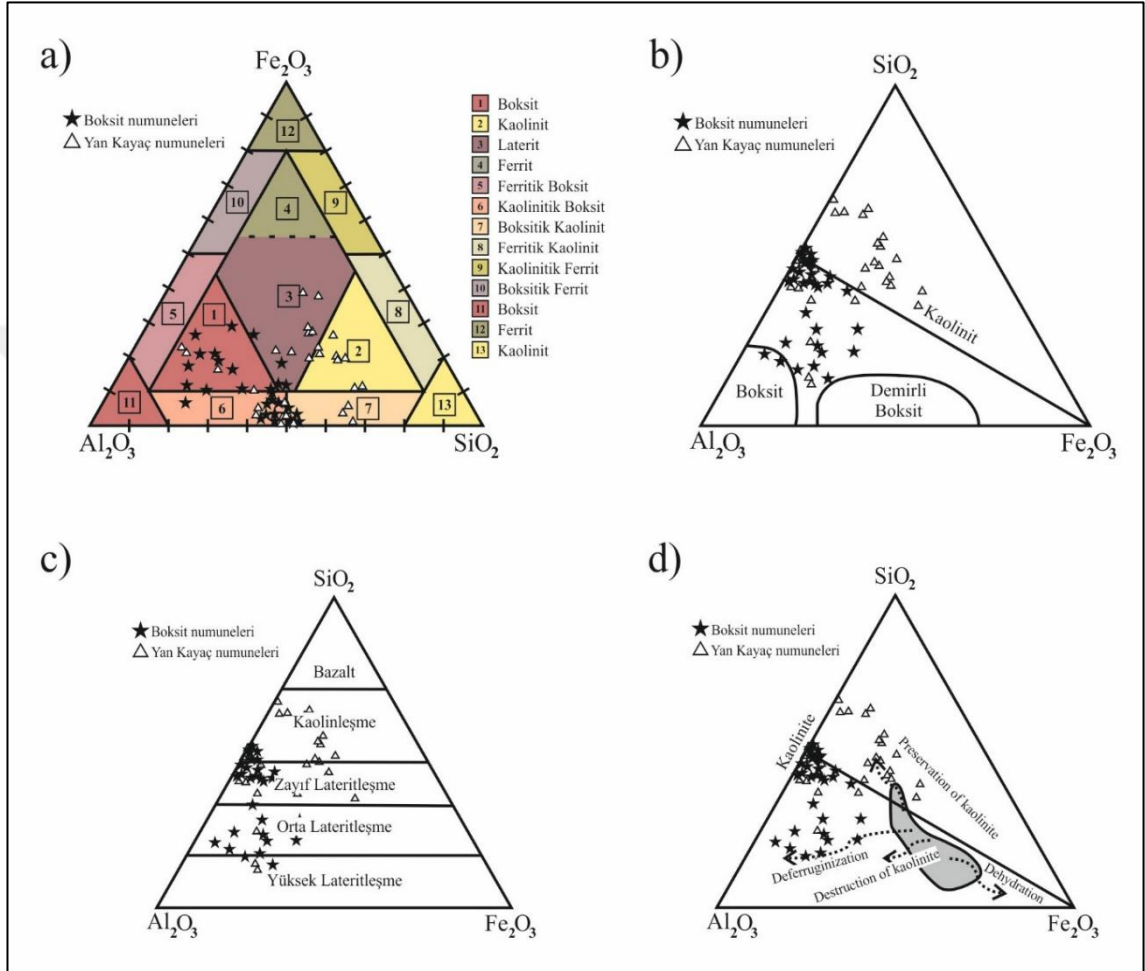
b. Birden fazla mod mevcuttur.

Aynı bölgede alınan yan kayaç numunelerinin majör element oksit içerikleri ise CaO (79,7-0), Al_2O_3 (%62,7-0,32), Fe_2O_3 (%21,4-0,18), SiO_2 (%63,9-0,099), TiO_2 (%4,36-0) ve SO_3 (%0,58-0,01) değerleri arasında değişmektedir. Kimyasal ayrışma süreçleri sırasında değişime uğrayan elementler ve oksitler ise K_2O (1,08-0), Cr_2O_3 (0,04-0), MnO (0,15-0) ve MgO (6,3-0) olarak tespit edilmiştir (Çizelge 4.8).

4.5.2. Üçgen diyagramlar

Boksit oluşumunda Diaspor ve Böhmite gibi yüksek alümina fazlarının baskın olduğunu ve kaolinitik fazların da katkıda bulunduğunu göstermektedir (Bardossy ve Aleva 1990). Yan kayaç numunelerinin ise daha geniş bir alana yayıldığı, özellikle "Kaolinit", "Laterit" ve "Ferrit" bölgelerinde yoğunlaştığı görülmektedir. Bu bulgu, yan kayaçların silis ve demir oksit bakımından zenginleşmiş, ayrışma düzeyi yüksek

birimlerden oluştuğuna işaret etmektedir (Tardy 1997). Şekil 4.27a'da sunulan Al_2O_3 – Fe_2O_3 – SiO_2 üçlü diyagramı, bölgeden elde edilen boksit ve yan kayaç numunelerinin mineralojik sınıflamasını ortaya koymaktadır. Boksit numunelerinin büyük çoğunluğunun, Al_2O_3 açısından zengin ve düşük SiO_2 ile Fe_2O_3 içeriklerine sahip olduğu ve "Boksit", "Kaolinitik Boksit" ve "Boksitik Kaolinit" alanlarında yoğunlaştığı gözlenmektedir.



Şekil 4.27. Al_2O_3 – Fe_2O_3 – SiO_2 üçgen diyagramlarında boksit ve yan kayaç numunelerinin dağılımları **a)** Mineral sınıflaması (Aleva 1994) **b)** Boksit sınıflandırması (Boulange vd. 1996) **c)** Lateritleşme derecesi (Schellman 1986) **d)** Beauvais (1993) tarafından tanımlanan jeokimyasal ayrışma yolları ve boksitleşme süreci (Tardy, 1997)

Alterasyon süreçlerinde hem boksitleşme hem de kaolinitleşmenin eşzamanlı olarak gerçekleşebilir (Bardossy ve Aleva 1990). Şekil 4.27b'de yer alan diyagramda, numunelerin boksit türlerine göre dağılımı gösterilmiştir. Boksit numuneleri, "Kaolinit" alanında toplanarak, bölgedeki alterasyon süreçlerinde hem boksitleşme hem de kaolinitleşmenin eşzamanlı olarak etkin olduğunu desteklemektedir. "Boksit" ve "Demirli Boksit" alanlarında da örnekler bulunduğu bölgede hem yüksek alümina hem de belirli düzeyde Fe_2O_3 içeren boksitlerin varlığını ortaya koymaktadır. Yan kayaçların ise genelde "Kaolinit" alanında toplandığı gözlenmektedir.

Boksit numunelerinin "Zayıf Lateritleşme" ve "Kaolinleşme" alanlarında yoğunlaşması, boksitleşmenin tam anlamıyla ilerlemediği, alterasyonun erken evrelerinde durduğu veya kaolinit fazının baskın olduğu ortamlara işaret etmektedir (Tardy vd. 1989). Şekil 4.27c'de, lateritleşme derecesi esas alınarak numune dağılımları değerlendirilmiştir. Boksit ve yan kayaç numuneleri genelde "Zayıf Lateritleşme" ve "Kaolinleşme" alanlarında yoğunlaşmaktadır. Bu dağılım, çalışma alanındaki ana kayaçların lateritleşme süreçlerine maruz kalma derecesinin düşükten orta seviyeye kadar değiştiğini göstermektedir. Yan kayaç numunelerinin de benzer alanlarda yer alması, bu birimlerin henüz ileri düzey çözünme ve mobilizasyon süreçleri geçirmediğini ve özellikle silis ve alüminyum bakımından daha zenginleşmiş fazlara dönüşmediğini düşündürmektedir.

Bölgedeki boksitleşmenin homojen olmadığını ve lateritleşmenin litoloji, drenaj koşulları ve iklimsel faktörler gibi çevresel parametrelerden etkilenecek mekansal farklılıklar gösterdiğini ortaya koymaktadır (Valeton 1972; Bardossy ve Aleva 1990). Sonuç olarak, Şekil 4.27c'de gözlenen bu dağılım paternleri, hem boksit hem de yan kayaçların, kısmi lateritleşme ve sınırlı alterasyon süreçleri ile evrimleştiğini ve bölgesel ölçekte heterojen bir ayrışma geçmişine sahip olduklarını göstermektedir. Bu bulgular, bölgedeki boksitleşme süreçlerinin paleojeomorfolojik ve paleoklimatik faktörlerle yakından ilişkili olduğuna işaret etmektedir.

Numunelerde alterasyon süreçlerinin daha sınırlı kaldığını ve kaolinit stabilitesinin korunduğunu düşündürmektedir (Tardy 1997). Yan kayaç numuneleri "Kaolinitin Korunumu" ve "Kaolinitleşme" yollarında konumlanmakta, bu da bu numunelerde alterasyon olduğunu göstermektedir. Şekil 4.27d ise kaolinit stabilitesi ve alterasyon yollarına odaklanmaktadır. Boksit numunelerinin büyük bölümü "Kaolinit Degradasyonu" ve "Kaolinit Destruksiyonu" yollarında yer almakta, bu da kaolinitin ayrışarak alümina zenginleşmesine neden olduğunu göstermektedir. Bu bulgular, boksitleşme sürecinde kaolinitin çözünürlüğünün artışı ve yeniden kristallenmesinin bölgedeki jeokimyasal evrime katkı sağladığını desteklemektedir.

İnceleme alanına ait oluşturulan dört adet üçgen diyagramın ortak yorumuyla, Sağır Köy-Kırkbaş Köyü yöresindeki boksit ve yan kayaçların jeokimyasal ve mineralojik açıdan heterojen bir yapıya sahip olduğu; boksitleşme süreçlerinin yoğun lateritleşme, kaolinit çözünmesi ve karbonat çözünmesi gibi çoklu süreçlerle şekillendiği anlaşılmaktadır.

4.5.3. İz element betimsel istatistiği

Boksit cevherlerinde bulunan iz elementler genel olarak Nb, V, Cr, Ga, Y, Zr, Th vb.'dir (Gu vd. 2013; Yalçın vd. 2016; Sidibe ve Yalçın 2019). Boksit numunelerine ait iz element ve nadir toprak elementlerine (REE) ilişkin temel istatistiksel verileri içermektedir (Çizelge 4.9).

Çizelge 4.9. Boksit iz element verilerinin betimsel istatistiği

	Aritmetik Ortalama	Medyan	Mod	Standart Sapma	Varyans	Çarpıklık	Basıklık	Değişim Aralığı	Min	Max	Toplam
P	0.198	0.142	,0000 ^a	0.168	0.028	1.272	1.120	0.670	0.000	0.670	5.931
Cl	0.010	0.009	,0071 ^a	0.003	0.000	0.410	-1.140	0.008	0.006	0.015	0.290
V	0.012	0.000	0.000	0.016	0.000	1.706	3.226	0.066	0.000	0.066	0.347
Co	0.016	0.017	0.000	0.012	0.000	0.430	-0.280	0.044	0.000	0.044	0.482
Ni	0.002	0.001	0.000	0.003	0.000	1.390	0.933	0.010	0.000	0.010	0.066
Cu	0.003	0.002	0.000	0.003	0.000	1.624	3.243	0.014	0.000	0.014	0.091
Zn	0.004	0.004	0.000	0.004	0.000	1.450	2.005	0.016	0.000	0.016	0.132
Ga	0.002	0.002	0.000	0.002	0.000	0.371	-0.890	0.005	0.000	0.005	0.059
Ge	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	3.716	12.814	0.000	0.000	0.000	0.001
As	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	2.039	3.937	0.003	0.000	0.003	0.011
Se	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	3.054	8.983	0.001	0.000	0.001	0.002
Br	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	5.477	30.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Rb	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	4.133	17.240	0.002	0.000	0.002	0.003
Sr	0.107	0.022	,0004 ^a	0.170	0.029	2.210	5.128	0.717	0.000	0.717	3.223
Y	0.001	0.001	0.000	0.002	0.000	2.234	7.370	0.008	0.000	0.008	0.045
Nb	0.001	0.000	0.000	0.002	0.000	1.348	1.330	0.006	0.000	0.006	0.034
Sn	0.001	0.001	0.000	0.001	0.000	1.083	0.888	0.004	0.000	0.004	0.029
Te	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	2.416	4.400	0.002	0.000	0.002	0.005
Ba	0.001	0.000	0.000	0.003	0.000	1.331	0.017	0.007	0.000	0.007	0.044
La	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	5.477	30.000	0.004	0.000	0.004	0.004
Hf	0.001	0.000	0.000	0.002	0.000	1.298	0.978	0.006	0.000	0.006	0.034
Ta	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	2.886	6.959	0.003	0.000	0.003	0.008
Au	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	3.862	14.387	0.001	0.000	0.001	0.001
Tl	0.004	0.000	0.000	0.021	0.000	5.477	29.997	0.116	0.000	0.116	0.117
Pb	0.001	0.000	0.000	0.002	0.000	2.792	8.480	0.009	0.000	0.009	0.031
Th	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	1.522	1.197	0.003	0.000	0.003	0.015
U	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	2.986	8.565	0.003	0.000	0.003	0.008
Na	0.019	0.000	0.000	0.104	0.011	5.477	30.000	0.570	0.000	0.570	0.570
Sc	0.000	0.000	0.000	0.002	0.000	5.477	30.000	0.008	0.000	0.008	0.008
Zr	0.113	0.076	0.000	0.110	0.012	0.870	-0.287	0.385	0.000	0.385	3.404
Ra	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	4.324	20.030	0.001	0.000	0.001	0.002
Re	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	4.318	19.149	0.002	0.000	0.002	0.002
Eu	0.017	0.000	0.000	0.027	0.001	1.895	3.158	0.105	0.000	0.105	0.505
Gd	0.016	0.016	0.000	0.015	0.000	0.354	-1.161	0.047	0.000	0.047	0.490
Tb	0.004	0.000	0.000	0.016	0.000	3.689	12.517	0.069	0.000	0.069	0.129
Tm	0.001	0.000	0.000	0.002	0.000	3.406	13.562	0.011	0.000	0.011	0.027
Yb	0.001	0.000	0.000	0.002	0.000	1.503	0.888	0.007	0.000	0.007	0.041
Ac	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	2.989	9.192	0.004	0.000	0.004	0.011
Pa	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	3.759	13.280	0.001	0.000	0.001	0.002

a. Birden fazla mod mevcuttur.

Her bir element için aritmetik ortalama, medyan, mod, standart sapma, varyans, çarpıklık, basıklık, değişim aralığı, minimum ve maksimum değerler ile toplam miktar belirtilmiştir. Yüksek ortalama ve toplam değerlere sahip elementler, P (fosfor), ortalama 0,198 ve toplam 5,931 ile oldukça yüksek değer göstermektedir. Sr (Stronsiyum), ortalama 0,107, toplam 3,223'dür. Zr (zirkonyum), ortalama 0,113, toplam 3,404'dür.

Belirgin dağılım ve çarpıklık birçok element (örneğin, Tl, Tb, Na, Sc, La) için çarpıklık ve basıklık değerleri çok yüksek çıkmış. Bu, verilerin simetrik dağılmadığını ve uç değerlere sahip olabileceğini gösterir. Özellikle Tl (Talliyum) ve Na (Sodyum) için basıklık 29,997 ve 30 gibi oldukça uç bir değerdedir, bu da yoğun bir merkezlenme ve birkaç uç değer olduğunu gösterir.

Sıfır veya ihmal edilebilir düzeyde olanlar, bazı elementlerin (örneğin Ge, Ir, Pt, Ce, Fr, Os) ortalama ve toplam değerleri sıfır ya da sıfıra çok yakındır. Bu elementler muhtemelen tespit limitinin altında veya boksitlerde yok denecek kadar azdır.

Nadir toprak elementleri (REE), La, Ce, Eu, Gd, Tb, Er, Tm, Yb, Sc gibi REE'lerin çoğu çok düşük miktarlarda bulunmuş, ancak Eu (0,017), Gd (0,016) gibi bazıları anlamlı düzeylerde tespit edilmiştir.

Dağılım genişliği, Sr ve Na gibi elementlerin değişim aralığı oldukça geniştir (sırasıyla 0,717 ve 0,57), bu da boksit içerisindeki yoğunluklarının örnekler arasında ciddi farklılık gösterebildiğini belirtir.

Bu elementlerin ayrışma sırasında rezidüel fazlarda konsantre olma eğilimi ile açıklanabilir (McLennan 1989; Taylor ve McLennan 1985). Ayrıca, Sr ve Ba gibi daha mobil elementlerde görülen düşük konsantrasyonlar, lateritik süreçler sırasında bu elementlerin yıkanarak ortamdan uzaklaştırıldığını göstermektedir (Nesbitt ve Young 1982; İnce vd. 2021). Boksit örneklerine ilişkin iz element içerikleri, SPSS programı aracılığıyla istatistiksel olarak değerlendirilmiş ve temel istatistiksel parametreler (minimum, maksimum, ortalama ve standart sapma) hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar, bölgedeki boksitleşme süreçlerinin kimyasal ayrışma derecesi ve element mobilitesi hakkında önemli ipuçları sunmaktadır. Özellikle Cr, V, Zr ve Hf gibi yüksek alan gücüne sahip elementlerin (HFSE) örneklerde belirgin şekilde zenginleştiği gözlemlenmiştir.

Lateritik profillerde elementlerin mikroölçekli yeniden dağılımı, özellikle Fe ve Al oksihidroksit fazları ile ilişkili olduğu görülmüştür (Eggleton vd. 1987). Standart sapma değerlerinin özellikle bazı elementlerde (örneğin V, Cr, Nb) yüksek olması, örnekler arasında heterojen bir dağılımın bulunduğunu ve bu heterojenitenin hem mineralojik farklılıklar hem de mikroçevresel ayrışma koşullarına bağlı gelişmiş olabileceğini düşündürmektedir.

Boksit örneklerinde iz elementlerin bu şekildeki davranışı, sadece cevherin kalitesini belirlemede değil, aynı zamanda ekonomik olarak kazanılabilir iz element potansiyelinin değerlendirilmesinde de kritik önemdedir. Çalışmada elde edilen bu istatistiksel veriler, boksit oluşumuna etki eden jeokimyasal süreçlerin detaylandırılması ve bölgesel cevherleşme modellerinin geliştirilmesine katkı sunmaktadır.

Çizelge 4.10. Yan kayaç iz element verilerinin betimsel istatistiği

	Aritmetik Ortalama	Medyan	Mod	Standart Sapma	Varyans	Çarpıklık	Basıklık	Değişim Aralığı	Min	Max	Toplam
P	0.039	0.000	0.000	0.077	0.006	2.085	3.641	0.292	0.000	0.292	1.162
Cl	0.008	0.007	0.009	0.003	0.000	3.486	15.564	0.019	0.004	0.023	0.239
V	0.002	0.000	0.000	0.006	0.000	2.770	6.713	0.023	0.000	0.023	0.066
Co	0.004	0.000	0.000	0.008	0.000	2.777	8.373	0.036	0.000	0.036	0.116
Ni	0.001	0.000	0.000	0.001	0.000	2.355	4.520	0.005	0.000	0.005	0.020
Cu	0.001	0.000	0.000	0.003	0.000	3.255	11.828	0.014	0.000	0.014	0.038
Zn	0.003	0.002	0.000	0.003	0.000	1.221	0.618	0.010	0.000	0.010	0.085
Ga	0.001	0.000	0.000	0.001	0.000	2.506	5.773	0.005	0.000	0.005	0.022
Ge	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	3.660	12.207	0.001	0.000	0.001	0.001
As	0.001	0.000	0.000	0.002	0.000	2.401	4.831	0.006	0.000	0.006	0.026
Br	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	2.218	4.200	0.000	0.000	0.000	0.001
Rb	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	3.093	10.844	0.002	0.000	0.002	0.006
Sr	0.025	0.016	0.000	0.055	0.003	5.095	27.109	0.311	0.000	0.311	0.743
Y	0.001	0.000	0.000	0.001	0.000	1.890	2.969	0.004	0.000	0.004	0.019
Nb	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	2.421	5.295	0.002	0.000	0.002	0.008
Sn	0.002	0.002	0.000	0.002	0.000	-0.159	-1.831	0.004	0.000	0.004	0.065
Te	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	1.680	1.068	0.002	0.000	0.002	0.012
Ba	0.000	0.000	0.000	0.002	0.000	4.108	16.979	0.008	0.000	0.008	0.012
Ce	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	5.47723	30	0.006	0.000	0.006	0.006
Hf	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	3.070	9.431	0.005	0.000	0.005	0.013
Ta	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	2.225	4.015	0.004	0.000	0.004	0.014
Ir	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	3.19254	9.3727	0.002	0.000	0.002	0.004
Pt	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	5.47723	30	0.001	0.000	0.001	0.001
Au	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	5.209	27.734	0.002	0.000	0.002	0.002
Pb	0.001	0.001	0.000	0.002	0.000	3.513	13.674	0.012	0.000	0.012	0.043
Th	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	3.742	13.527	0.002	0.000	0.002	0.004
U	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	5.477	30.000	0.001	0.000	0.001	0.001
Na	0.313	0.000	0.000	0.853	0.727	2.975	8.029	3.440	0.000	3.440	9.393
Sc	0.006	0.000	0.000	0.030	0.001	5.477	30.000	0.167	0.000	0.167	0.167
Zr	0.239	0.254	0.000	0.186	0.034	-0.138	-1.865	0.460	0.000	0.460	7.180
Fr	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.80893	1.7501	0.002	0.000	0.002	0.007
Re	0.001	0.000	0.000	0.002	0.000	0.864	-1.024	0.005	0.000	0.005	0.043
Os	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	3.7756	13.456	0.003	0.000	0.003	0.006
Eu	0.165	0.120	0.000	0.181	0.033	1.385	2.789	0.775	0.000	0.775	4.965
Gd	0.003	0.000	0.000	0.009	0.000	2.831	7.014	0.035	0.000	0.035	0.095
Tb	0.052	0.039	0.000	0.070	0.005	2.564	8.922	0.337	0.000	0.337	1.564
Er	0.008	0.004	0.000	0.009	0.000	0.59961	-1.4269	0.024	0.000	0.024	0.241
Tm	0.003	0.000	0.000	0.004	0.000	1.103	-0.144	0.011	0.000	0.011	0.076
Yb	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	4.015	16.006	0.004	0.000	0.004	0.006
Pa	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	1.594	2.201	0.003	0.000	0.003	0.012

Yan kayaç örneklerine ait iz elementlerin istatistiksel dağılımı Çizelge 4.10'da görülmektedir. Yan kayaçların kimyasal bileşiminde çok düşük konsantrasyonlara sahip elementler çoğunluktadır. Birçok elementin ortalama değeri sıfıra yakın olup, bazı elementlerde ise çarpıklık (skewness) ve basıklık (kurtosis) değerleri oldukça yüksektir.

Bu da dağılımın normalden oldukça sapmış olduğunu ve bazı örneklerde zenginleşme olduğunu işaret etmektedir.

Alkali ve toprak alkali elementler, Na (0,313 wt%) ve Sr (0,025 wt%) nispeten yüksek değerlere sahiptir. Na'nın yüksekliği feldspat, plajiyoklas veya sodyumlu kil minerallerinden (örneğin, montmorillonit) kaynaklanabilir. Sr ise karbonat veya plajiyoklas türü minerallerin ayrışmasından etkilenmiş olabilir. Sr'nin yüksek çarpıklık (5,095) ve basıklık (27,109) değeri, lokal zenginleşmeleri göstermektedir.

Nadir toprak elementleri (REE), Eu (0,165 ppm), Tb (0,052 ppm), Er (0,008 ppm) ve Gd (0,003 ppm) gibi elementler belirli miktarlarda tespit edilmiştir. Eu'nun çarpıklık ve basıklık değerleri (1,385; 2,789) orta düzey varyasyon ve zenginleşme potansiyelini gösterir. Tb (Terbium) dikkat çekici şekilde yüksek (ortalama: 0,052 ppm) ve dağılımı (çarpıklık: 2,564) REE zenginliği için ipucu olabilir. REE'lerin toplam zenginliğine bakıldığında, boksitlere kıyasla yan kayaçlarda daha az REE birikimi olduğu görülmektedir, bu da ayrışma sırasında REE'lerin boksitte tutulduğunu gösterebilir.

Yüksek alan güçlü katyonlar (HFSE), Zr (0,239 ppm) ve Hf (0 ppm) olarak görülmekte ve Zr, özellikle zirkon mineraliyle ilişkili olup dayanıklı fazların varlığını işaret etmektedir. Zr'nin basıklık değeri negatif (-1,865) olup, dağılımın platikurtik (yayvan) olduğunu göstermektedir. Nb ve Ta gibi elementlerin varlığı az, ama bazı örneklerde çıkıyor. Bu elementler de lateritleşme ortamlarında taşınmaya dirençlidir ve genellikle zirkon, ilmenit gibi aksesuar minerallerde bulunurlar.

Geçiş metalleri, V, Co, Ni, Cu, Zn gibi elementlerin çoğu çok düşük düzeyde kalmış, bu da yan kayaçların ekonomik açıdan metal içerme potansiyelinin sınırlı olduğunu göstermektedir. Zn'nin çarpıklık değeri oldukça düşük (1,221) ve basıklığı 0,618; bu da nispeten homojen bir dağılım olduğunu ortaya koymaktadır.

Diğer elementler, Cl (0,008 ppm) ve P (0,039 ppm) gibi uçucu elementlerin varlığı dikkat çekmektedir. P'nin kayada bulunması fosfat minerallerini veya biyojenik kökenli katkıları işaret edebilir. Pb, As, Ga ve Ge gibi iz elementlerin düşük ama bazı örneklerde gözlenebilir düzeyde çıkması, hidrotermal etkilerle veya ayrışma süreçleriyle yoğunluk kazanmış olabileceklerini düşündürmektedir.

Yan kayaçlar, REE açısından sınırlı zenginleşmeye sahip, ancak Tb, Eu, Zr gibi elementler lokal olarak yüksek olabilir. Bu da bazı örneklerin farklı mineralojik bileşim gösterdiğini düşündürmektedir. Zr, Sr, Na, Pb, Cl gibi elementlerin değişen yoğunlukları, bölgede ayrışmanın heterojen olduğunu göstermektedir. Çarpıklık ve basıklık değerleri, örnekler arasında önemli derecede heterojenlik olduğunu göstermekte, bu da mineralojiye bağlı olarak değişken element konsantrasyonlarını ifade eder.

Genel olarak REE'ler ve HFSE (ör. Zr, Hf, Nb) açısından boksitlerin daha zengin olması beklenir. Eğer boksit tablosuyla karşılaştırsak, bu fark REE'lerin lateritleşme sırasında boksit fazına geçerek zenginleştiğini doğrulayabilir. Yan kayaçların bu tür elementlerde düşük kalması, kayaçların ayrışmadan önceki özgün bileşimini yansıtabilir.

Boksit ve bunlara eşlik eden yankayaç örneklerinin karşılaştırmalı iz element ve nadir toprak elementi (REE) içerikleri, ayrışma süreçlerinin mineralojik ve jeokimyasal

evrimini anlamada kritik rol oynamaktadır. Bu çalışmada elde edilen veriler, boksitlerde REE ve yüksek alan gücü katyonlarının (HFSE; örn. Zr, Hf) konsantrasyonlarının genel olarak yankayaçlara göre daha yüksek olduğunu göstermektedir.

Lateritleşme sürecinde REE'lerin çözünebilen fazlardan ayrılarak kil mineralleri ve Al-hidroksit fazlarında (gibsit, böhmite) tutunduğunu göstermektedir (Bardossy ve Aleva 1990; Eggleton vd. 1987). Pozitif Eu anomalisi, oksik koşullarda ayrışma sürecinin etkili olduğunu düşündürmektedir (Taylor ve McLennan 1985). Yan kayaç örneklerinde özellikle Eu (ort. 0,165 ppm), Tb (ort. 0,052 ppm) ve Na (ort. 0,344 wt%) gibi elementlerin görece yüksek değerleri, ayrışma sırasında mobilite kaybına uğrayarak sabitlenen elementlerin varlığını işaret etmektedir.

Boksitlerdeki REE'lerin düşüklüğü boksitleşme sırasında selektif olarak boksit fazına taşındığını ve burada sabitlendiğini göstermektedir (Panahi vd. 2000). İnceleme alanına ait boksitlerdeki REE içerikleri de düşüktür; örneğin Gd (ort. 0,016 ppm) ve Tb (ort. 0,004 ppm) gibi değerler oldukça sınırlıdır.

İstatistiksel dağılımlar incelendiğinde, boksit örneklerinde çarpıklık (skewness) ve basıklık (kurtosis) değerlerinin genellikle 1'e yakın veya düşük olması, REE ve iz elementlerin homojen dağıldığını göstermektedir (Yalçın vd 2020). Bu durum, daha gelişmiş bir ayrışma profiline ve stabil mineral fazlara işaret eder (Rollinson, 1993). Ayrıca, yankayaç örneklerinde Sr (çarpıklık: 5,095; basıklık: 27,109) gibi uç değerlere rastlanması, element dağılımında belirgin bir heterojenliği ortaya koymaktadır. Bu istatistiksel farklılık, boksitleşme sürecinin jeokimyasal etkisini net şekilde yansıtmaktadır.

Zr ve Hf gibi dayanıklı iz elementlerin boksitlerde görece yüksek olması (Zr ort.: 0,113 wt%; Hf ort.: 0,001 wt%) zirkon gibi rezistan minerallerin çözünebilirliğinin düşük olmasıyla ilişkilidir (Valeton and Wilke 1993). Bu tür elementlerin görece yüksek bolluğu, bazı boksit yataklarının ekonomik olarak REE ikincil kaynak potansiyeline sahip olabileceğini de gündeme getirmektedir (Karadağ vd. 2009; Bing vd. 2017). Jeokimyasal farklılıklar yalnızca mineraloji değil, aynı zamanda ayrışma koşulları, sıvı-kayaç etkileşimi ve element mobilitesi gibi faktörlerin bir sonucudur (Henderson 1984; Tardy 1997). Sonuç olarak, iz element ve REE içeriklerinin karşılaştırmalı analizi, boksitlerin gelişmiş lateritik süreçlerle oluştuğunu ve bu süreçlerin özellikle REE'ler üzerinde önemli bir seçici etkiye sahip olduğunu ortaya koymaktadır.

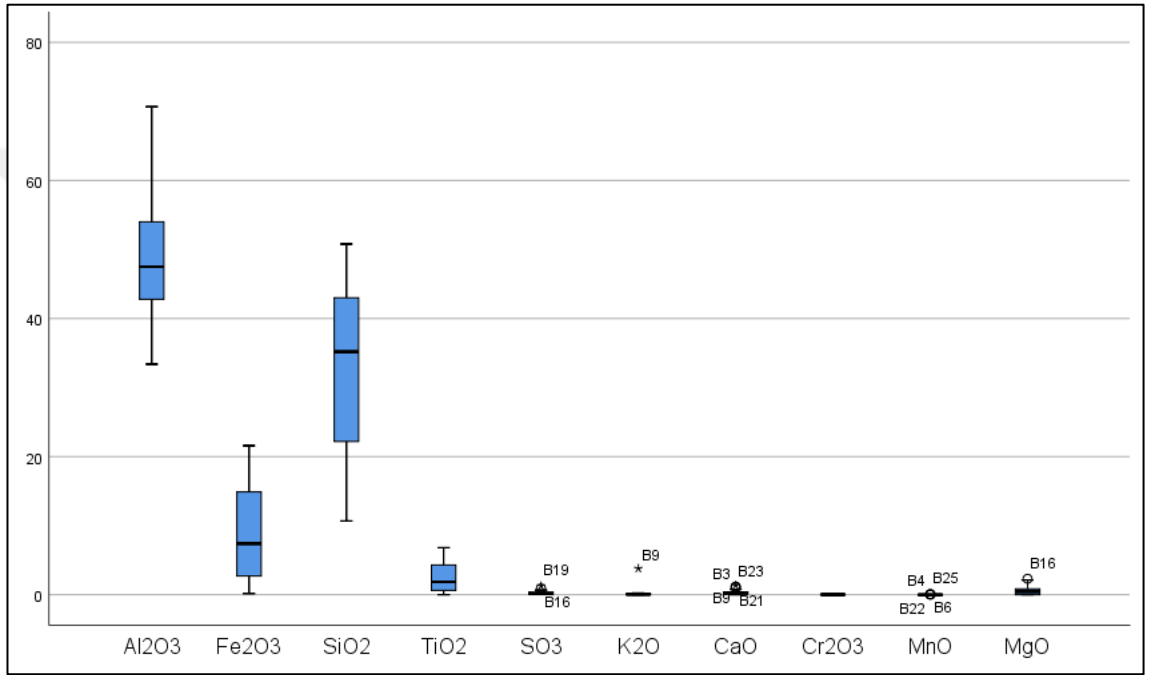
4.5.4. Box-plot analizi

Boksit ve yankayaç örneklerinde temel oksit bileşenlerinin varyasyonları, IBM SPSS Statistic 26.0 programı kullanılarak oluşturulan box-plot grafikleri ile değerlendirilmiştir. Box-plot analizleri, elementlerin istatistiksel dağılımlarını, aşırı uç verilerini ve medyan gibi temel parametreleri görselleştirme imkanı sunmaktadır.

Boksit numunelerine ait Al_2O_3 , Fe_2O_3 , SiO_2 , TiO_2 , SO_3 , K_2O , CaO , Cr_2O_3 , MnO ve MgO oksitlerinin istatistiksel dağılımları yer almaktadır (Şekil 4.28). Al_2O_3 içeriği, boksit örneklerinde baskın olup, yaklaşık %40 ila %70 aralığında değişim göstermektedir. Medyan değer yaklaşık %50 civarında olması, lateritik ayrışmanın Al açısından zenginleşmeye neden olduğunu göstermektedir.

Fe_2O_3 ve SiO_2 içerikleri ise sırasıyla %0 ila %20 ve %15 ila %50 aralığında dağılım göstermektedir. Fe_2O_3 için düşük medyan değeri, demirin daha az mobilize olduğu ya da erken ayrışma evrelerinde kaldığını düşündürmektedir. TiO_2 , SO_3 , K_2O , CaO , Cr_2O_3 , MnO ve MgO değerleri düşük seviyelerde seyretmektedir. Bu elementlerin düşük varyasyonları, hareketsiz karakterde olduklarını ve boksitleşme sürecinde önemli mobilizasyon göstermediklerini ortaya koymaktadır.

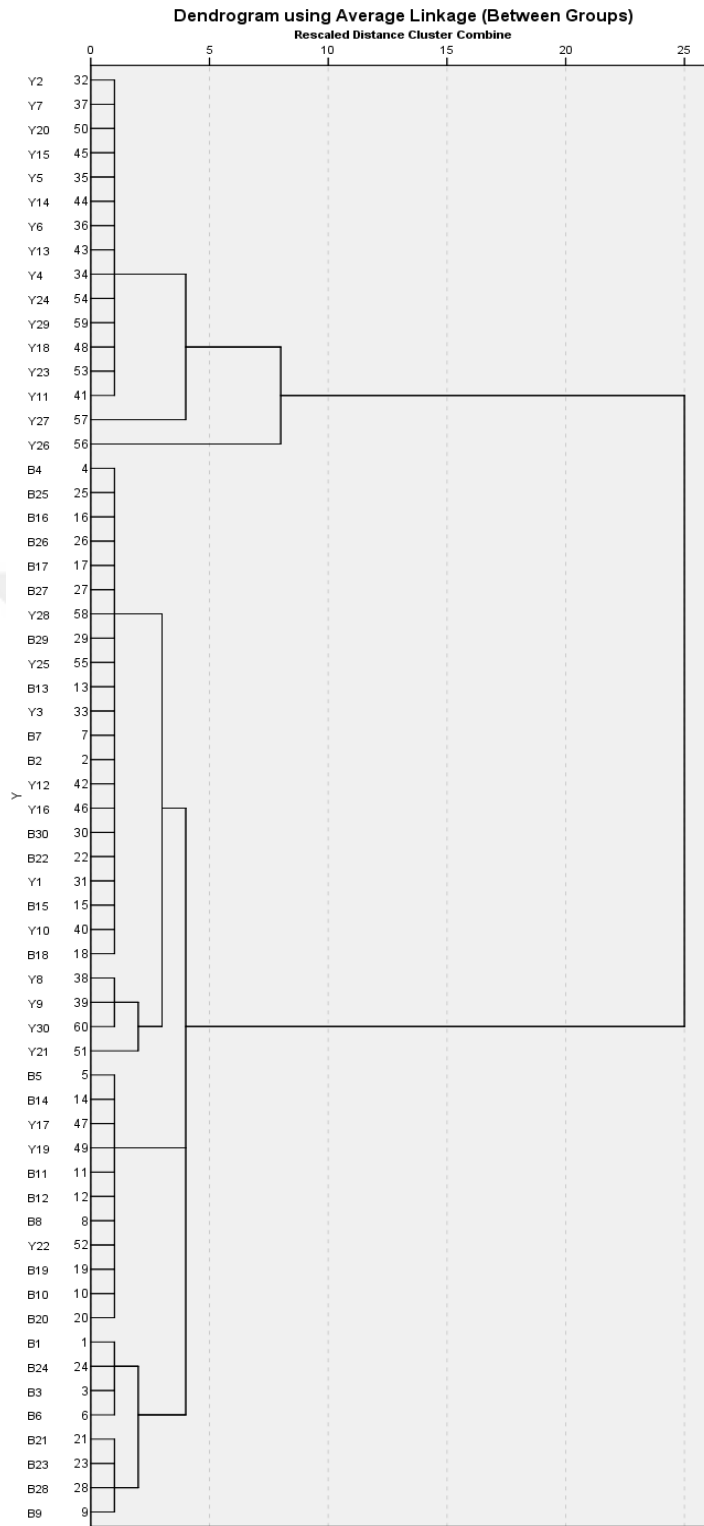
Yoğun lateritik ayrışmanın sonucunda Al zenginleşmesi ve silis ile demirin kısmen uzaklaştırılmasını işaret etmektedir (Bárdossy ve Aleva 1990; Valetton 1972). Özetle, boksit numuneleri yüksek Al_2O_3 içeriği, düşük Fe_2O_3 ve yüksek SiO_2 oranlarıyla rezidüel birikim karakteri sergilemektedir.



Şekil 4.28. Boksit örneklerinin majör element box-plot analizi

Şekil 4.29'da yankayaç numunelerinin aynı oksitlere ait istatistiksel dağılımları sunulmuştur. Al_2O_3 içeriği oldukça geniş bir varyasyon göstermektedir (%0 ila %15). Bu durum, boksitleşme öncesi ana kayaçta alümina taşıyan minerallerin heterojen dağılımını yansıtmaktadır. Medyan değerinin düşük olması, Al açısından fakirleşmiş zonların da varlığına işaret etmektedir.

SiO_2 içeriği boksit numunelerine kıyasla daha yüksek varyasyon göstermekte ve medyan değeri yüksektir. Bu durum, ana kayaçta silikatlı minerallerin (ör. feldispat, kuvars) yaygınlığını göstermektedir. CaO içerikleri dikkat çekicidir. CaO , %40 ila %80 gibi oldukça geniş bir aralıkta değişmektedir. Bu, kireçtaşı veya dolomit türü karbonatlı kayaçların ana kayaçta önemli yer tuttuğunu ortaya koymaktadır. Fe_2O_3 , TiO_2 , K_2O , Cr_2O_3 , MnO , MgO içerikleri genelde düşük seviyede seyretmektedir. Ancak bazı elementlerde (ör. MgO ve MnO) aykırı değer varlığı, lokal zenginleşme bölgelerine işaret etmektedir.



Şekil 4.30. Boksit ve Yan kayaç örneklerinin dendrogram diyagramı

4.5.6. Pearson korelasyon analizi

Majör element oksitlerin ve iz elementlerin Pearson korelasyon analizi Çizelge 4.11, 4.12 ve 4.13’de yer almaktadır.

Çizelge 4.11. Majör element oksitlerin ve iz elementlerin Pearson korelasyon analizi

	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	TiO ₂	SO ₃	K ₂ O	CaO	Cr ₂ O ₃	MnO	MgO	P	Cl	V	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Rb	Sr	Y	Nb	Sn
Al ₂ O ₃	1																										
Fe ₂ O ₃	0.476	1																						(+) (-)	0.900 - 0.999		
SiO ₂	0.583	-0.095	1																					(+) (-)	0.800 - 0.899		
TiO ₂	0.378	0.701	-0.099	1																				(+) (-)	0.700 - 0.799		
SO ₃	0.275	0.203	0.110	0.228	1																			(+) (-)	0.600 - 0.699		
K ₂ O	-0.065	-0.114	0.131	0.196	0.043	1																		(+) (-)	0.500 - 0.599		
CaO	-0.915	-0.433	-0.757	-0.439	-0.274	-0.074	1																				
Cr ₂ O ₃	0.299	0.511	-0.029	0.935	0.281	0.346	-0.410	1																			
MnO	-0.051	0.158	0.220	0.082	-0.065	0.039	-0.100	0.069	1																		
MgO	-0.270	-0.054	0.200	-0.039	-0.013	0.196	0.060	0.065	0.514	1																	
P	0.425	0.130	0.395	0.137	0.830	0.078	-0.468	0.210	-0.022	-0.034	1																
Cl	0.461	0.552	0.103	0.311	0.343	-0.073	-0.397	0.200	0.142	0.128	0.233	1															
V	0.269	0.768	-0.184	0.729	0.113	-0.059	-0.316	0.609	0.076	-0.107	0.079	0.364	1														
Co	0.490	0.888	-0.022	0.758	0.238	-0.122	-0.513	0.596	0.039	-0.139	0.200	0.427	0.783	1													
Ni	0.092	0.052	0.382	0.190	0.380	0.043	-0.313	0.319	0.374	0.383	0.459	0.084	0.001	0.217	1												
Cu	0.357	0.539	-0.004	0.567	0.464	-0.089	-0.369	0.473	-0.033	0.026	0.309	0.331	0.407	0.633	0.414	1											
Zn	-0.001	0.356	0.010	0.437	0.345	-0.010	-0.130	0.485	0.349	0.434	0.255	0.229	0.292	0.429	0.779	0.631	1										
Ga	0.526	0.836	-0.106	0.754	0.402	-0.090	-0.472	0.650	0.040	-0.032	0.290	0.535	0.710	0.800	0.251	0.741	0.541	1									
Ge	0.264	0.465	-0.185	0.335	0.007	-0.053	-0.154	0.161	-0.028	-0.116	-0.060	0.413	0.342	0.423	-0.149	0.467	0.145	0.543	1								
As	-0.050	0.361	-0.302	0.154	-0.076	-0.105	0.159	0.013	-0.044	-0.049	-0.194	0.293	0.311	0.280	-0.138	0.358	0.235	0.286	0.618	1							
Se	0.162	0.457	-0.158	0.457	-0.132	-0.026	-0.144	0.414	-0.087	-0.057	-0.101	0.098	0.487	0.345	-0.143	0.094	-0.028	0.373	-0.062	-0.037	1						
Br	-0.443	-0.218	-0.439	-0.226	-0.182	-0.076	0.457	-0.213	-0.140	-0.101	-0.246	-0.282	-0.123	-0.222	-0.196	-0.188	-0.218	-0.207	-0.084	-0.125	0.046	1					
Rb	-0.184	-0.040	0.089	0.056	-0.093	0.219	0.052	0.174	0.135	0.367	-0.040	-0.026	0.018	-0.085	0.379	-0.006	0.430	0.089	-0.094	-0.033	0.145	-0.074	1				
Sr	0.212	0.305	-0.018	0.344	0.884	-0.038	-0.218	0.372	-0.035	-0.053	0.664	0.238	0.251	0.338	0.380	0.552	0.444	0.543	0.092	-0.032	-0.090	-0.127	-0.020	1			
Y	0.360	0.771	-0.079	0.676	0.252	-0.055	-0.362	0.599	0.161	0.047	0.218	0.310	0.676	0.674	0.293	0.626	0.530	0.832	0.363	0.253	0.599	-0.192	0.260	0.396	1		
Nb	0.263	0.631	-0.180	0.905	0.028	0.092	-0.306	0.812	0.088	0.023	-0.056	0.264	0.694	0.658	0.041	0.420	0.360	0.661	0.351	0.167	0.440	-0.139	0.039	0.171	0.521	1	
Sn	-0.760	-0.096	-0.832	0.095	-0.144	0.026	0.763	0.089	-0.029	0.109	-0.419	-0.208	0.066	-0.115	-0.199	-0.056	0.069	-0.064	0.032	0.052	0.069	0.409	0.021	-0.016	-0.090	0.234	1

Çizelge 4.12. Majör element oksitlerin ve iz elementlerin Pearson korelasyon analizi 2

	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	TiO ₂	SO ₃	K ₂ O	CaO	Cr ₂ O ₃	MnO	MgO	P	Cl	V	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Rb	Sr	Y	Nb	Sn
Te	-0.418	-0.154	-0.423	0.075	-0.121	-0.027	0.405	0.098	-0.149	-0.034	-0.235	-0.154	-0.034	-0.087	-0.016	-0.007	0.087	-0.082	-0.110	-0.086	0.067	0.242	0.135	-0.020	-0.101	0.190	0.545
Ba	0.054	0.138	0.117	0.445	0.376	0.403	-0.229	0.602	0.350	0.272	0.306	0.075	0.183	0.218	0.629	0.438	0.616	0.349	0.065	0.028	0.050	-0.143	0.259	0.378	0.428	0.248	0.011
La	0.046	0.090	0.107	-0.011	-0.058	-0.031	-0.079	0.003	0.180	-0.052	0.039	-0.072	-0.069	0.134	0.285	-0.089	0.117	-0.039	-0.033	-0.066	-0.032	-0.043	-0.048	-0.042	0.135	-0.072	-0.129
Ce	0.149	0.256	-0.096	0.190	-0.031	-0.039	-0.078	0.099	-0.055	-0.032	-0.049	0.010	0.144	0.285	-0.077	0.486	0.113	0.317	0.620	0.447	-0.032	-0.043	-0.048	-0.018	0.266	0.184	0.027
Hf	0.369	0.740	-0.155	0.662	-0.129	-0.067	-0.323	0.463	0.164	-0.041	-0.151	0.353	0.607	0.742	-0.145	0.377	0.198	0.624	0.595	0.344	0.314	-0.184	-0.049	-0.004	0.523	0.695	0.033
Ta	-0.097	0.402	-0.232	0.387	-0.178	-0.041	0.090	0.259	0.280	0.265	-0.251	-0.001	0.323	0.275	-0.116	0.259	0.264	0.274	0.338	0.410	0.345	0.075	0.127	-0.118	0.442	0.466	0.188
Ir	-0.213	0.041	0.039	-0.037	-0.114	0.091	0.139	-0.021	0.706	0.583	-0.172	0.079	-0.066	-0.187	0.127	-0.046	0.341	-0.025	-0.056	-0.070	-0.053	-0.073	0.265	-0.078	0.102	0.034	0.166
Pt	-0.188	-0.079	-0.143	-0.074	-0.069	0.105	0.232	-0.071	-0.055	0.006	-0.102	-0.009	-0.069	-0.111	-0.077	-0.089	0.084	-0.111	-0.033	-0.066	-0.032	-0.043	0.305	-0.054	-0.034	-0.072	0.198
Au	-0.140	-0.097	-0.102	-0.025	-0.048	0.134	0.166	0.030	-0.088	0.054	-0.055	-0.026	-0.084	-0.097	0.084	-0.051	0.226	-0.018	-0.053	-0.105	-0.051	-0.069	0.532	-0.016	0.008	-0.019	0.163
Tl	0.066	-0.038	0.138	-0.075	-0.071	-0.044	-0.081	-0.062	0.145	-0.052	-0.002	-0.025	-0.068	-0.028	0.093	-0.086	-0.049	-0.081	-0.032	-0.018	-0.032	-0.044	-0.047	-0.059	-0.046	-0.070	-0.128
Pb	0.125	0.566	-0.413	0.356	-0.113	-0.093	0.022	0.208	-0.194	-0.097	-0.213	0.433	0.433	0.386	-0.204	0.390	0.138	0.577	0.627	0.566	0.523	0.031	0.069	-0.057	0.593	0.360	0.182
Th	0.313	0.765	-0.218	0.624	-0.191	-0.077	-0.276	0.425	0.022	-0.152	-0.146	0.422	0.811	0.720	-0.176	0.279	0.095	0.605	0.448	0.404	0.595	-0.089	-0.010	-0.151	0.608	0.631	0.027
U	0.080	0.153	-0.064	0.476	0.166	0.005	-0.159	0.538	-0.078	0.003	0.122	-0.083	0.314	0.281	0.458	0.580	0.579	0.506	0.156	0.122	0.238	-0.090	0.435	0.350	0.579	0.372	0.060
Na	-0.125	0.000	0.268	-0.073	-0.164	0.083	-0.042	-0.022	0.726	0.823	-0.174	0.113	-0.085	-0.159	0.234	-0.063	0.241	-0.045	-0.068	-0.102	-0.066	-0.090	0.206	-0.110	0.062	-0.024	-0.012
Sc	-0.184	-0.002	-0.139	-0.099	-0.034	-0.043	0.284	-0.088	-0.054	0.057	-0.083	-0.070	0.063	-0.105	-0.059	-0.065	0.161	-0.102	-0.035	0.551	-0.033	-0.045	0.118	-0.030	0.012	-0.063	-0.126
Zr	-0.770	-0.145	-0.825	0.082	-0.113	0.062	0.769	0.094	-0.039	0.096	-0.395	-0.241	0.010	-0.153	-0.156	-0.054	0.084	-0.077	0.012	0.013	0.036	0.431	0.064	0.021	-0.093	0.193	0.987
Fr	-0.500	-0.274	-0.441	-0.245	-0.153	-0.063	0.557	-0.232	-0.077	-0.056	-0.254	-0.276	-0.173	-0.275	-0.191	-0.210	-0.192	-0.255	-0.082	-0.037	-0.079	0.218	-0.023	-0.118	-0.250	-0.180	0.494
Ra	0.112	0.152	0.030	0.102	0.724	-0.028	-0.119	0.100	0.029	-0.044	0.553	0.273	0.114	0.145	0.253	0.288	0.200	0.270	-0.050	0.014	-0.047	-0.065	-0.073	0.749	0.192	-0.043	-0.050
Re	-0.644	-0.279	-0.626	-0.315	-0.205	-0.094	0.759	-0.311	-0.183	-0.034	-0.361	-0.273	-0.205	-0.322	-0.289	-0.247	-0.170	-0.303	-0.051	0.220	-0.043	0.320	-0.056	-0.168	-0.253	-0.217	0.587
Os	-0.221	0.004	-0.083	-0.046	-0.087	0.063	0.223	-0.058	0.237	0.347	-0.144	0.007	-0.098	-0.156	-0.009	-0.012	0.244	-0.062	-0.047	-0.048	-0.045	-0.061	0.204	-0.065	0.045	0.001	0.216
Eu	-0.672	-0.159	-0.567	-0.275	-0.221	-0.049	0.789	-0.268	0.117	0.281	-0.415	-0.139	-0.199	-0.361	-0.219	-0.244	0.121	-0.251	-0.046	0.427	-0.055	0.102	0.159	-0.182	-0.130	-0.141	0.515
Gd	0.354	0.739	0.032	0.570	0.267	-0.078	-0.406	0.419	0.430	-0.078	0.227	0.449	0.605	0.755	0.265	0.323	0.359	0.563	0.218	0.093	0.067	-0.199	-0.121	0.369	0.424	0.500	-0.086
Tb	-0.547	-0.047	-0.371	-0.199	-0.220	-0.007	0.601	-0.213	0.276	0.364	-0.360	-0.003	-0.063	-0.251	-0.123	-0.213	0.218	-0.193	0.035	0.547	-0.124	-0.016	0.246	-0.183	-0.070	-0.075	0.300
Er	-0.805	-0.393	-0.685	-0.396	-0.225	-0.089	0.900	-0.374	-0.138	0.020	-0.408	-0.346	-0.282	-0.449	-0.298	-0.335	-0.164	-0.423	-0.134	0.184	-0.128	0.341	-0.018	-0.185	-0.344	-0.280	0.686
Tm	-0.409	-0.089	-0.339	-0.153	0.178	0.005	0.429	-0.115	0.183	0.161	0.028	-0.128	-0.109	-0.218	0.055	-0.131	0.114	-0.043	-0.094	-0.151	-0.137	0.221	0.205	0.267	0.014	-0.133	0.431
Yb	0.265	0.261	0.076	0.308	0.531	-0.056	-0.267	0.284	-0.042	-0.066	0.406	0.125	0.150	0.401	0.353	0.711	0.446	0.443	0.186	0.023	-0.086	-0.146	-0.054	0.626	0.318	0.178	-0.100
Ac	0.054	0.384	0.020	0.224	-0.083	-0.051	-0.160	0.115	0.181	-0.133	-0.012	0.068	0.532	0.509	0.000	0.061	0.071	0.104	0.054	0.224	-0.064	-0.088	-0.098	-0.034	0.069	0.197	-0.057
Pa	-0.456	-0.055	-0.356	-0.076	-0.175	0.000	0.505	-0.078	0.151	0.242	-0.293	-0.155	-0.029	-0.179	-0.049	0.056	0.276	-0.079	0.023	0.466	0.049	0.257	0.253	-0.076	0.124	-0.033	0.278

Çizelge 4.13. Majör element oksitlerin ve iz elementlerin Pearson korelasyon analizi 3

	Te	Ba	La	Ce	Hf	Ta	Ir	Pt	Au	Tl	Pb	Th	U	Na	Sc	Zr	Fr	Ra	Re	Os	Eu	Gd	Tb	Er	Tm	Yb	Ac	Pa
Te	1																											
Ba	-0.003	1																							(+) (-)	0.900 - 0.999		
La	-0.057	0.242	1																						(+) (-)	0.800 - 0.899		
Ce	-0.057	0.216	-0.017	1																					(+) (-)	0.700 - 0.799		
Hf	-0.019	0.078	0.040	0.395	1																				(+) (-)	0.600 - 0.699		
Ta	0.017	0.160	-0.051	0.481	0.533	1																			(+) (-)	0.500 - 0.599		
Ir	0.020	0.201	-0.029	-0.029	0.009	0.384	1																					
Pt	0.282	-0.056	-0.017	-0.017	-0.072	-0.051	0.318	1																				
Au	0.308	0.028	-0.027	-0.027	-0.061	-0.082	0.278	0.923	1																			
Tl	-0.055	-0.054	-0.017	-0.017	-0.072	-0.051	-0.029	-0.017	-0.026	1																		
Pb	0.064	0.052	-0.042	0.353	0.492	0.385	-0.071	0.019	0.008	-0.074	1																	
Th	-0.044	-0.013	-0.060	0.234	0.747	0.434	-0.101	-0.060	-0.081	-0.059	0.659	1																
U	0.199	0.501	-0.035	0.195	0.136	0.165	-0.059	-0.035	0.160	-0.030	0.260	0.150	1															
Na	-0.117	0.226	-0.035	-0.035	0.051	0.248	0.701	-0.035	-0.056	-0.036	-0.135	-0.122	-0.073	1														
Sc	-0.049	-0.042	-0.018	-0.018	-0.076	0.309	-0.030	-0.018	-0.028	-0.018	0.074	-0.063	-0.011	-0.037	1													
Zr	0.563	0.053	-0.102	0.001	-0.013	0.162	0.162	0.215	0.195	-0.131	0.148	-0.037	0.099	-0.027	-0.138	1												
Fr	0.290	-0.140	-0.042	-0.042	-0.180	-0.128	-0.071	-0.042	-0.067	-0.043	0.048	-0.149	-0.088	-0.088	-0.044	0.488	1											
Ra	-0.032	0.313	-0.025	-0.025	-0.108	-0.077	-0.043	-0.025	-0.041	-0.025	-0.081	-0.090	0.077	-0.053	-0.014	-0.025	-0.063	1										
Re	0.347	-0.181	-0.064	0.050	-0.203	0.067	-0.070	0.049	0.003	-0.065	0.168	-0.143	-0.107	-0.133	0.235	0.594	0.591	-0.096	1									
Os	0.128	-0.079	-0.024	-0.024	-0.102	0.284	0.766	0.599	0.544	-0.024	-0.024	-0.084	-0.050	0.291	-0.025	0.218	-0.060	-0.036	-0.021	1								
Eu	0.199	-0.119	-0.081	-0.032	-0.136	0.327	0.368	0.211	0.171	-0.082	0.183	-0.139	-0.128	0.170	0.600	0.496	0.372	-0.115	0.696	0.348	1							
Gd	-0.100	0.191	0.236	-0.091	0.564	0.079	0.049	-0.091	-0.120	0.058	0.078	0.465	-0.001	0.049	-0.089	-0.112	-0.227	0.189	-0.310	-0.129	-0.255	1						
Tb	0.080	-0.078	-0.066	-0.066	-0.060	0.399	0.440	0.151	0.118	-0.067	0.123	-0.040	-0.138	0.290	0.723	0.278	0.206	-0.100	0.487	0.360	0.905	-0.089	1					
Er	0.325	-0.228	-0.069	-0.069	-0.293	0.053	0.020	0.096	0.044	-0.070	0.067	-0.243	-0.143	-0.097	0.248	0.695	0.654	-0.103	0.933	0.092	0.775	-0.370	0.569	1				
Tm	0.023	0.062	0.068	-0.073	-0.166	0.059	0.381	0.279	0.308	-0.073	-0.059	-0.219	-0.008	0.146	-0.077	0.445	0.282	0.323	0.310	0.390	0.372	-0.029	0.238	0.397	1			
Yb	-0.020	0.214	-0.057	0.103	0.120	-0.090	-0.097	-0.057	-0.034	-0.055	-0.029	-0.139	0.396	-0.118	-0.038	-0.082	-0.142	0.156	-0.198	-0.081	-0.226	0.335	-0.224	-0.232	-0.101	1		
Ac	-0.115	-0.114	-0.034	-0.034	0.321	0.022	-0.058	-0.034	-0.055	0.139	-0.148	0.429	-0.071	-0.071	-0.036	-0.107	-0.085	-0.052	-0.130	-0.049	-0.155	0.547	0.040	-0.139	-0.118	0.085	1	
Pa	0.159	0.103	-0.060	0.158	-0.038	0.483	0.330	0.285	0.227	-0.060	0.205	-0.038	0.147	0.197	0.586	0.285	0.184	-0.021	0.439	0.313	0.702	-0.213	0.693	0.465	0.106	-0.051	-0.121	1

Isparta/Yalvaç Kırkbaş ve Sağırköy boksit yataklarına ait 30 boksit ve 30 yan kayaç örneğinin XRF verilerinden elde edilen majör oksit ve iz element içerikleri üzerinde yapılan Pearson korelasyon analizi sonucunda, ana oksitler ile boksiti oluşturan iz ve nadir toprak elementleri arasındaki korelasyon ilişkileri belirlenmiştir.

Al_2O_3 ile CaO (-0,915) arasında yüksek mertebeden çok yüksek negatif korelasyon ilişkisi; TiO_2 ile Cr_2O_3 (0,935); TiO_2 ile Nb (0,905); Sn ile Zr (0,987); Re ile Er (0,933), Eu ile Tb (0,905) arasında yüksek mertebeden çok yüksek pozitif korelasyon ilişkisi vardır.

Al_2O_3 ile C (-0,811) ve Al_2O_3 ile Er (-0,805); arasında yüksek mertebeden yüksek negatif korelasyon ilişkisi; Fe_2O_3 ile Co (0,888) ve Fe_2O_3 ile Ga (0,836); SiO_2 ile Sn (-0,832) ve SiO_2 ile Zr (-0,825); C ile Sn (0,849) ve C ile Zr (0,868); SO_3 ile P (0,830) ve SO_3 ile Sr (0,884); Cr_2O_3 ile Nb (0,812); MgO ile Na (0,823); Co ile Ga (0,800); Ga ile Y (0,832) arasında yüksek mertebeden yüksek pozitif korelasyon ilişkisi vardır.

Al_2O_3 ile Sn (-0,760) ve Al_2O_3 ile Zr (-0,770); SiO_2 ile C (-0,755) ve SiO_2 ile CaO (-0,757) arasında yüksek mertebeden orta negatif korelasyon ilişkisi; Fe_2O_3 ile TiO_2 (0,701), Fe_2O_3 ile V (0,768), Fe_2O_3 ile Y (0,771), Fe_2O_3 ile Hf (0,740), Fe_2O_3 ile Th (0,765), Fe_2O_3 ile Gd (0,739); C ile CaO (0,761); TiO_2 ile V (0,729), TiO_2 ile Co (0,758) ve TiO_2 ile Ga (0,754); SO_3 ile Ra (0,724); CaO ile Sn (0,763), CaO ile Zr (0,769), CaO ile Re (0,759) ve CaO ile Eu (0,789); MnO ile Ir (0,706), MnO ile Na (0,726), V ile Co (0,783) ve V ile Ga (0,710); Co ile Hf (0,742), Co ile Th (0,720) ve Co ile Gd (0,755); Ni ile Zn (0,779); Cu ile Ga (0,741) ve Cu ile Yb (0,711); Sr ile Ra (0,749); Hf ile Th (0,747); Ir ile Na (0,701) ve Ir ile Os (0,766); Sc ile Tb (0,723); Eu ile Er (0,775) ve Eu ile Pa (0,702) arasında yüksek mertebeden orta pozitif korelasyon ilişkisi vardır.

Al_2O_3 ile Re (-0,644) ve Al_2O_3 ile Eu (-0,672) arasında yüksek mertebeden negatif korelasyon ilişkisi; Fe_2O_3 ile Nb (0,631); SiO_2 ile Re (-0,626) ve SiO_2 ile Er (-0,685); C ile Er (0,666); TiO_2 ile Y (0,676), TiO_2 ile Hf (0,662) ve TiO_2 ile Th (0,624); CaO ile Tb (0,601); Cr_2O_3 ile V (0,609), Cr_2O_3 ile Ga (0,650) ve Cr_2O_3 ile Ba (0,602); P ile Sr (0,664); V ile Nb (0,694), V ile Hf (0,607) ve V ile Gd (0,605); Co ile Cu (0,633), Co ile Y (0,674) ve Co ile Nb (0,658); Ni ile Ba (0,629); Cu ile Zn (0,631) ve Cu ile Y (0,626); Zn ile Ba (0,616); Ga ile Nb (0,661), Ga ile Hf (0,624) ve Ga ile Th (0,605); Ge ile As (0,618), Ge ile Ce (0,620) ve Ge ile Pb (0,627); Sr ile Yb (0,626); Y ile Th (0,608); Nb ile Hf (0,695) ve Nb ile Th (0,631); Sn ile Er (0,686); Pb ile Th (0,659); Sc ile Eu (0,600); Zr ile Er (0,695); Fr ile Er (0,654); Re ile Eu (0,696); Tb ile Pa (0,693) arasında yüksek mertebeden pozitif korelasyon ilişkisi vardır.

Al_2O_3 ile Fr (-0,500) ve Al_2O_3 ile Tb (-0,547); SiO_2 ile Eu (-0,567); CaO ve Co (-0,513) arasında yüksek mertebeden zayıf negatif korelasyon ilişkisi; Fe_2O_3 ile Cr_2O_3 (0,511), Fe_2O_3 ile Cl (0,552), Fe_2O_3 ile Cu (0,539) ve Fe_2O_3 ile Pb (0,566); C ile Br (0,556), C ile Te (0,511) ve C ile Re (0,549); TiO_2 ile Cu (0,567) ve TiO_2 ile Gd (0,570); SO_3 ile Yb (0,531); CaO ve Fr (0,557) ve CaO ve Pa (0,505); Cr_2O_3 ile Co (0,596), Cr_2O_3 ile Y (0,599) ve Cr_2O_3 ile U (0,538); MnO ile MgO (0,514); MgO ile Ir (0,583); P ile Ra (0,553); Cl ile Ga (0,535); V ile Ac (0,532); Co ile Ac (0,509); Cu ile Sr (0,552) ve Cu ile U (0,580); Zn ile Ga (0,541), Zn ile Y (0,530) ve Zn ile U (0,579); Ga ile Ge (0,543), Ga ile Sr (0,543) Ga ile Pb (0,577), Ga ile U (0,506) ve Ga ile Gd (0,563); Ge ile Hf

(0,595); As ile Pb (0,566), As ile Sc (0,551) ve As ile Tb (0,547); Se ile Y (0,599), Se ile Pb (0,523) ve Se ile Th (0,595); Rb ile Au (0,532); Y ile Nb (0,521), Y ile Hf (0,523) ve Y ile Pb (0,593); Nb ile Gd (0,500); Sn ile Te (0,545), Sn ile Re (0,587) ve Sn ile Eu (0,515); Te ile Zr (0,563); Ba ile U (0,501); Hf ile Ta (0,533) ve Hf ile Gd (0,533); Pt ile Os (0,599); Au ile Os (0,544); Sc ile Pa (0,586); Zr ile Re (0,594); Fr ile Re (0,591); Gd ile Ac (0,547); Tb ile Er (0,569) arasında yüksek mertebeden zayıf pozitif korelasyon ilişkisi vardır.

4.5.7. Regresyon analizi

Regresyon analizleri, özellikle boksitli seviyeler ile birlikte değerlendirmeye alınan yanca kayalarındaki elementel değişimlerin jeokimyasal süreçler bağlamında anlaşılmasına önemli katkılar sunmaktadır (Rollinson, 1993). Bu çalışmada, XRF analizleri ile elde edilen majör oksit ve iz element içerikleri, SPSS istatistik yazılımı kullanılarak değerlendirilmiş ve aralarındaki anlamlı korelasyon ilişkileri doğrusal regresyon analizleri ile test edilmiştir. Her bir regresyon modeli, açıklanabilir varyans oranı (R^2) ve ANOVA (Varyans Analizi) sonuçları ile istatistiksel olarak yorumlanmıştır.

SPSS ortamında yapılan korelasyon analizleri sonucu yüksek düzeyde pozitif veya negatif korelasyon gösteren element çiftleri belirlenmiş, bu çiftler için doğrusal regresyon modelleri oluşturulmuştur. Çizelge 4.14’de modellere ilişkin açıklanabilir varyans oranları (R^2) verilmiştir.

Çizelge 4.14. Açıklanabilir varyans oranları

Bağımsız Değişken	Sabit Değişken	r	R^2
Al ₂ O ₃	CaO	-0.915	0.838
TiO ₂	Cr ₂ O ₃	0.935	0.874
TiO ₂	Nb	0.905	0.820
Sn	Zr	0.987	0.974
Eu	Tb	0.905	0.819

Elde edilen yüksek değerler, regresyon modellerinin istatistiksel anlamlılık düzeyinin oldukça yüksek olduğunu göstermektedir (Loughnan 1969; Faure ve Mensing 2005). R^2 değerlerinin 0.80’in üzerinde olması, bağımsız değişkenin bağımlı değişkenin varyansını büyük ölçüde açıklayabildiğini göstermektedir. Özellikle Sn–Zr ilişkisine ait regresyon modelinde $R^2 \approx 0.974$ değeri, bu iki elementin birlikte hareket ettiğini ve benzer jeokimyasal kontrol mekanizmalarına tabi olduğunu açıkça göstermektedir.

Al₂O₃–CaO modeli, lateritik ayrışma sürecinde CaO’nun mobilize olurken Al₂O₃’ün sabit kalıp zenginleşmesiyle açıklanabilir (Çizelge 4.15, Çizelge 4.16). $R^2 \approx 0.838$ değeri, bu ilişkinin yüksek derecede açıklanabilir olduğunu göstermektedir.

TiO₂–Cr₂O₃ ve TiO₂–Nb modelleri (Çizelge 4.17, Çizelge 4.18, Çizelge 4.19, Çizelge 4.20), ayrışmaya dirençli ağır minerallerin (ilmenit, rutil, kromit) benzer koşullarda taşındığını ve birlikte çökelerek jeokimyasal olarak korele hareket ettiklerini düşündürmektedir.

Sn–Zr modeli (Çizelge 4.21, Çizelge 4.22), zirkon ve kasiterit gibi minerallerle bağlantılı olarak her iki elementin de birlikte yer değiştirdiğini ve çökelme süreçlerinde benzer davranış sergilediğini desteklemektedir.

Eu–Tb modelinde (Çizelge 4.23, Çizelge 4.24) elde edilen $R^2 \approx 0.819$ değeri, nadir toprak elementlerinin (REE) benzer jeokimyasal davranış gösterdiğini ve çoğu zaman aynı mineral fazlarda birlikte yer aldığını ortaya koymaktadır (Henderson 1984).

XRF analizlerinden elde edilen veriler ışığında yapılan regresyon ve ANOVA analizleri, elementler arası ilişkilerin sadece istatistiksel değil, aynı zamanda jeolojik bağlamda da yorumlanmasına olanak sağlamıştır. Elde edilen yüksek determinasyon katsayıları, sahadaki jeokimyasal davranışların güvenilir bir şekilde modellenebileceğini göstermektedir. Özellikle Sn–Zr, TiO_2 – Cr_2O_3 ve Al_2O_3 –CaO ilişkileri, bölgedeki ayrışma, taşıma ve çökelme süreçlerinin anlaşılması açısından önemli ipuçları sunmaktadır. Bu analizler, boksit yataklarının oluşum koşullarının modellenmesinde destekleyici veri seti olarak değerlidir.

Çizelge 4.15. Al_2O_3 -CaO lineer dağılım varyansı

Model Summary				
Model	R	R^2	Adjusted R^2	Std. Error of the Estimate
1	,915a	0.838	0.835	9.097029141
a. Dependent Variable: Al_2O_3				
b. Predictors: (Constant): CaO				

Çizelge 4.16. Al_2O_3 -CaO lineer dağılım hata oranı

ANOVA ^a						
Model		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
1	Regression	24823.114	1	24823.144	299.956	,000 ^b
	Residual	4799.844	58	82.756		
	Total	29622.959	59			
a. Dependent Variable: Al_2O_3						
b. Predictors: (Constant): CaO						

Çizelge 4.17. TiO_2 - Cr_2O_3 lineer dağılım varyansı

Model Summary				
Model	R	R^2	Adjusted R^2	Std. Error of the Estimate
1	,935 ^a	0.874	0.872	0.6840163115
a. Dependent Variable: TiO_2				
b. Predictors: (Constant): Cr_2O_3				

Çizelge 4.18. TiO₂-Cr₂O₃ lineer dağılım hata oranı

ANOVA ^a						
Model		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
1	Regression	188.097	1	188.097	402.021	,000 ^b
	Residual	27.137	58	0.468		
	Total	215.234	59			
a. Dependent Variable: TiO ₂						
b. Predictors: (Constant): Cr ₂ O ₃						

Çizelge 4.19. TiO₂-Nb lineer dağılım varyansı

Model Summary				
Model	R	R ²	Adjusted R ²	Std. Error of the Estimate
1	,905 ^a	0.820	0.817	0.8179610516
a. Dependent Variable: TiO ₂				
b. Predictors: (Constant): Nb				

Çizelge 4.20. TiO₂-Nb lineer dağılım hata oranı

ANOVA ^a						
Model		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
1	Regression	176.429	1	176.429	263.696	,000 ^b
	Residual	38.805	58	0.669		
	Total	215.234	59			
a. Dependent Variable: TiO ₂						
b. Predictors: (Constant): Nb						

Çizelge 4.21. Sn-Zr lineer dağılım varyansı

Model Summary				
Model	R	R ²	Adjusted R ²	Std. Error of the Estimate
1	,987 ^a	0.974	0.974	0.0002574673
a. Dependent Variable: Sn				
b. Predictors: (Constant): Zr				

Çizelge 4.22. Sn-Zr lineer dağılım hata oranı

ANOVA ^a						
Model		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
1	Regression	0.000	1	0.000	2213.404	,000 ^b
	Residual	0.000	58	0.000		
	Total	0.000	59			
a. Dependent Variable: Sn						
b. Predictors: (Constant): Zr						

Çizelge 4.23. Eu-Tb lineer dağılım varyansı

Model Summary				
Model	R	R ²	Adjusted R ²	Std. Error of the Estimate
1	,905 ^a	0.819	0.816	0.0637496074
a. Dependent Variable: Eu				
b. Predictors: (Constant): Tb				

Çizelge 4.24. Eu-Tb lineer dağılım hata oranı

ANOVA ^a						
Model		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
1	Regression	1.065	1	1.065	262.069	,000 ^b
	Residual	0.236	58	0.004		
	Total	1.301	59			
a. Dependent Variable: Eu						
b. Predictors: (Constant): Tb						

4.5.8. Enterpolasyon haritaları

Boksit numunelerinde en yüksek yüzeysel yayılım gösteren majör oksit bileşeni Al₂O₃ olup, enterpolasyon haritalarında bu oksidin yoğunlaştığı alanlar, boksitleşmenin en ileri düzeye ulaştığı zonlar olarak tanımlanmıştır (Şekil 4.31). Al₂O₃'ün yüzeysel oranı bazı bölgelerde %70'in üzerine çıkarken, yankayaçlarda bu oran oldukça düşüktür. Bu durum, boksit yataklarının oluşum süreçlerinde etkili olan lateritik ayrışmanın bölgesel etkisini açıkça ortaya koymaktadır.

Fe₂O₃, TiO₂ ve SiO₂ gibi diğer majör oksitler de hem boksit hem de yan kayaçlarda değerlendirilmiş; özellikle Fe₂O₃'ün boksit sahasında yer yer artış gösterdiği, bunun da hematit varlığına işaret ettiği görülmüştür (Şekil 4.31, Şekil 4.32). SiO₂ ve CaO dağılımı ise genel olarak yan kayaçlarda daha yaygındır; bu durum, kil minerallerinin ve silisli fazların özellikle primer kayaçlarda daha baskın olduğunu göstermektedir.

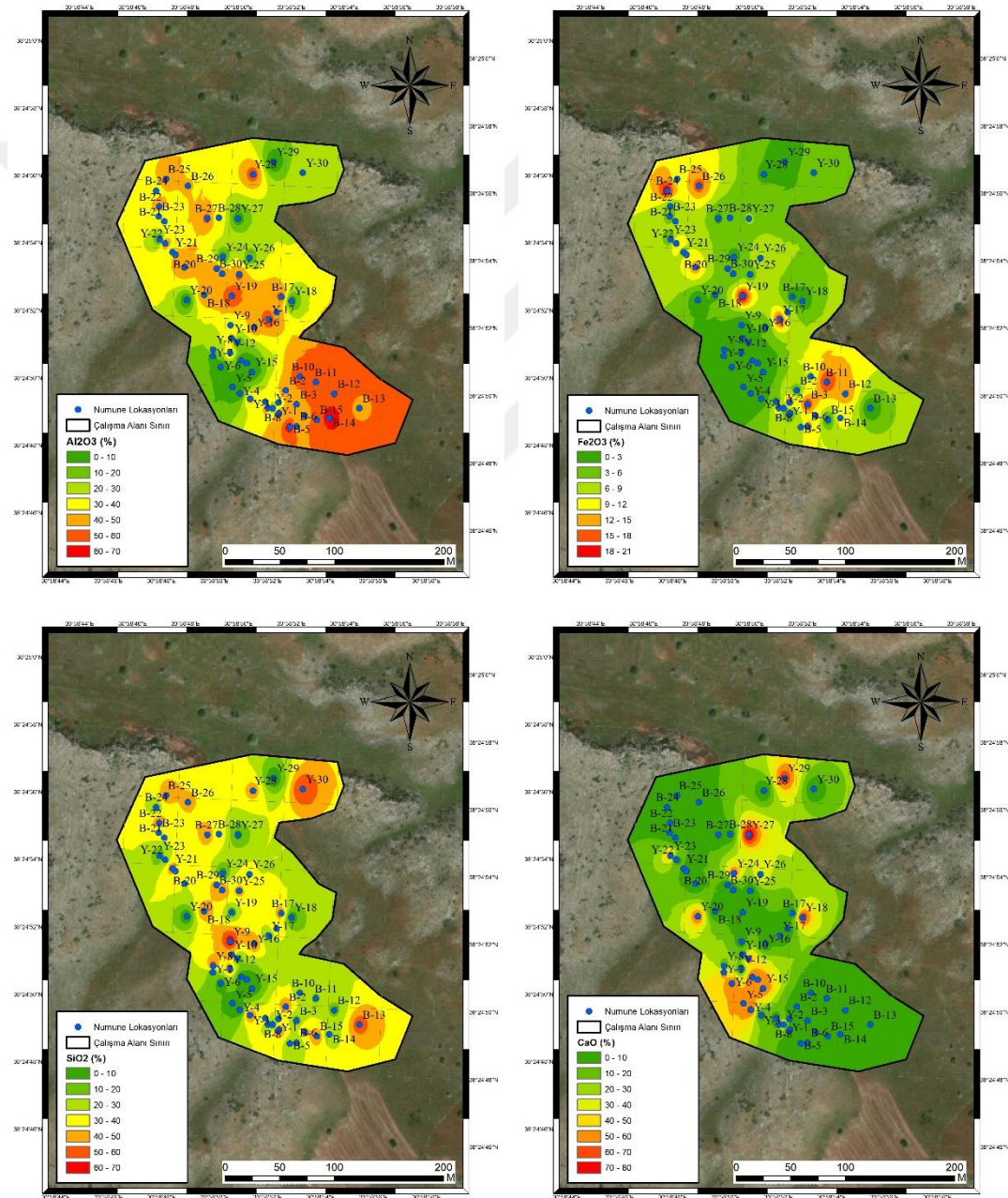
İz element analizleri kapsamında özellikle Zn, P, Co, Cu, Ga, As, Sn, Hf, Gd, V, Zr ve Sr gibi elementlerin mekansal dağılımları haritalanmış, boksit ve yan kayaçlar arasında karşılaştırmalı analizler yapılmıştır (Şekil 4.34, Şekil 4.35, Şekil 4.36, Şekil 4.37). Örneğin, Ga (galyum) boksit sahalarında yüksek değerler göstermekte ve bu durum, Al bakımından zengin laterit profillerin ekonomik potansiyeline işaret etmektedir. Zr ve Hf gibi detritik kökenli elementler, genellikle yankayaçlarda daha yoğunluklu bulunmuş, bu da bölgedeki çökelme süreçlerinin ve kaynak kaya katkılarının belirlenmesine olanak sağlamıştır.

Cr₂O₃ gibi ultrabazik kaynaklı element ve bileşikler ise boksit sahasında sınırlı düzeyde kalmış, bu da boksitlerin oluşum ortamının mafik/ultramafik bir kaynaktan ziyade daha felsik karakterde olduğunu düşündürmektedir (Şekil 4.33).

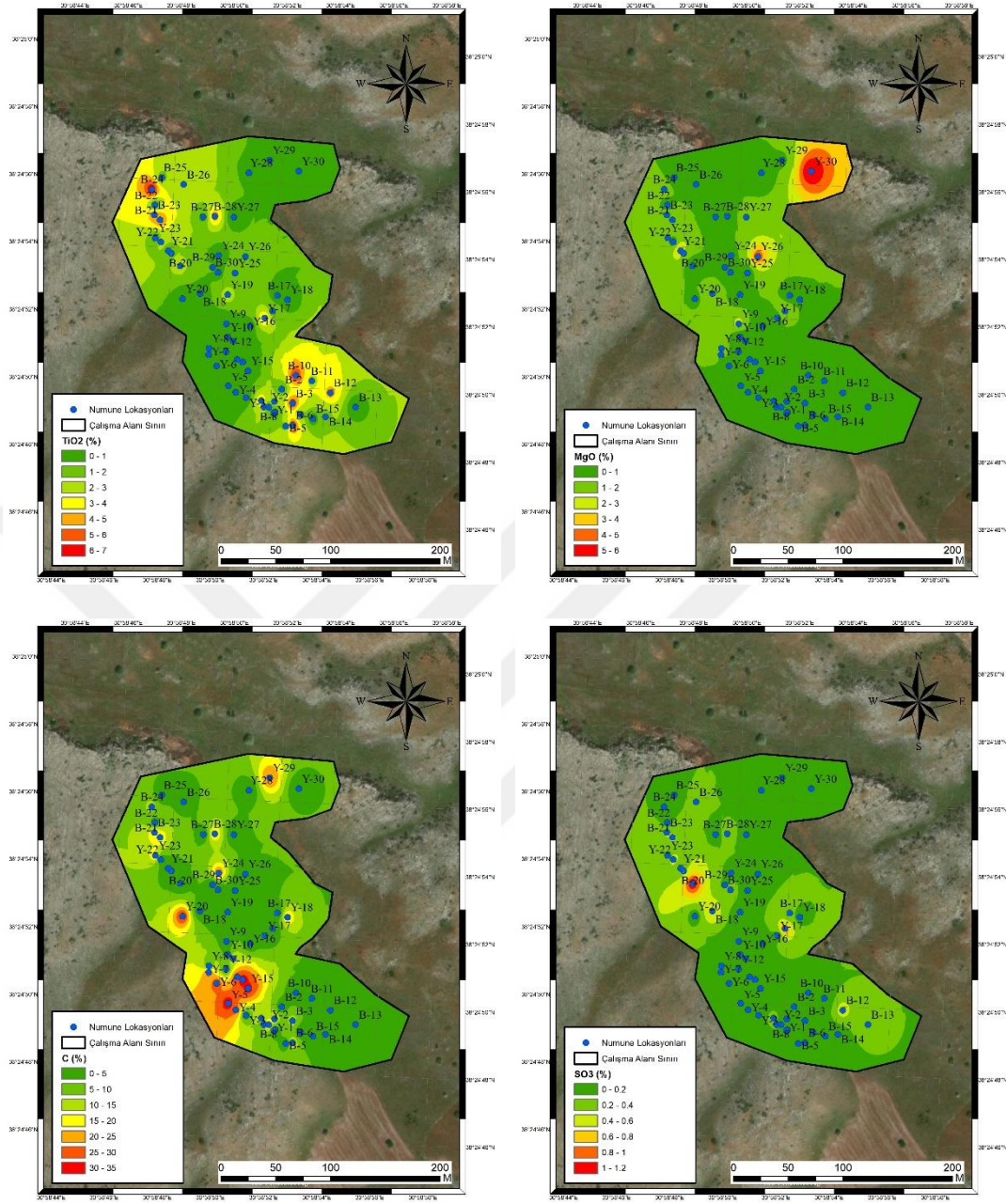
Enterpolasyon haritaları üzerinden yapılan değerlendirmelerde, bazı elementlerin mekansal olarak lokal yoğunlaşmalar gösterdiği belirlenmiştir. Bu anomaliler, özellikle Al₂O₃, Ga ve Fe₂O₃ açısından dikkat çekici olup, hem ekonomik madenleşme

potansiyelinin belirlenmesinde hem de kökensel değerlendirmelerde kritik bilgi sağlamaktadır. IDW tabanlı haritalarda gözlenen bu anomaliler, bölgedeki mineralojik ve jeokimyasal evrim süreçlerini yansıtan önemli göstergelerdir.

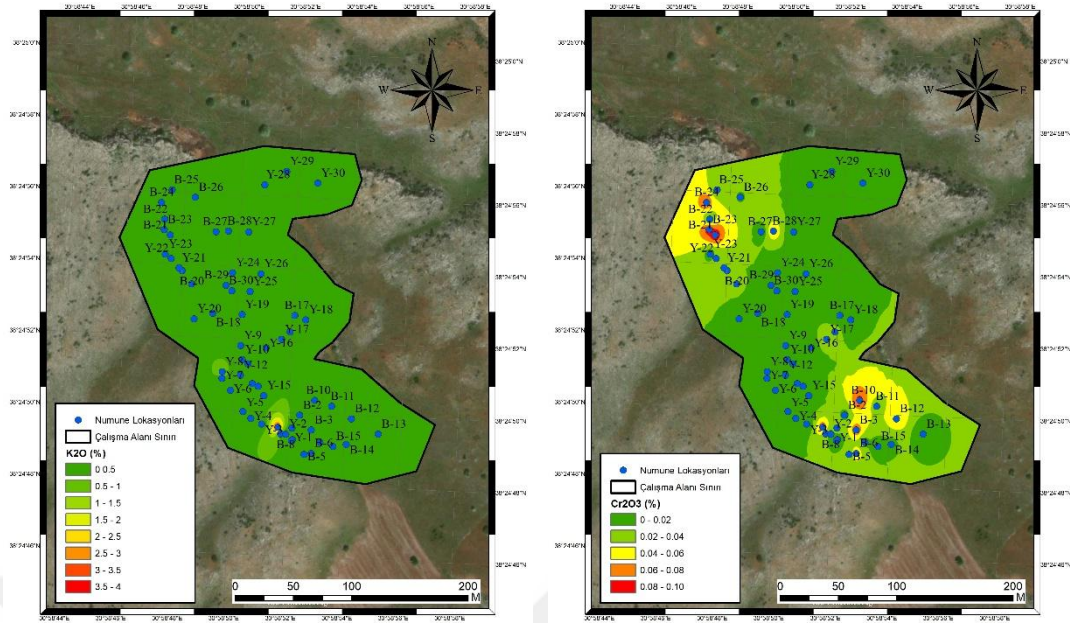
IDW enterpolasyonu ile elde edilen haritalar, XRF verilerinin sadece sayısal olarak değil, mekansal olarak da analiz edilmesine imkan tanıyarak, boksit ve yan kayaçlar arasındaki jeokimyasal farkların net bir şekilde ortaya konulmasına katkı sağlamıştır. Bu yöntem sayesinde, bölgedeki element zenginleşmeleri ve dağılımları görselleştirilerek, potansiyel madenleşme alanları daha detaylı olarak değerlendirilmiştir. Çalışmanın ilerleyen bölümlerinde yapılacak mineraloji ve petrografi değerlendirmeleri ile birlikte entegre edilerek daha kapsamlı yorumlara ulaşılmasını mümkün kılacaktır.



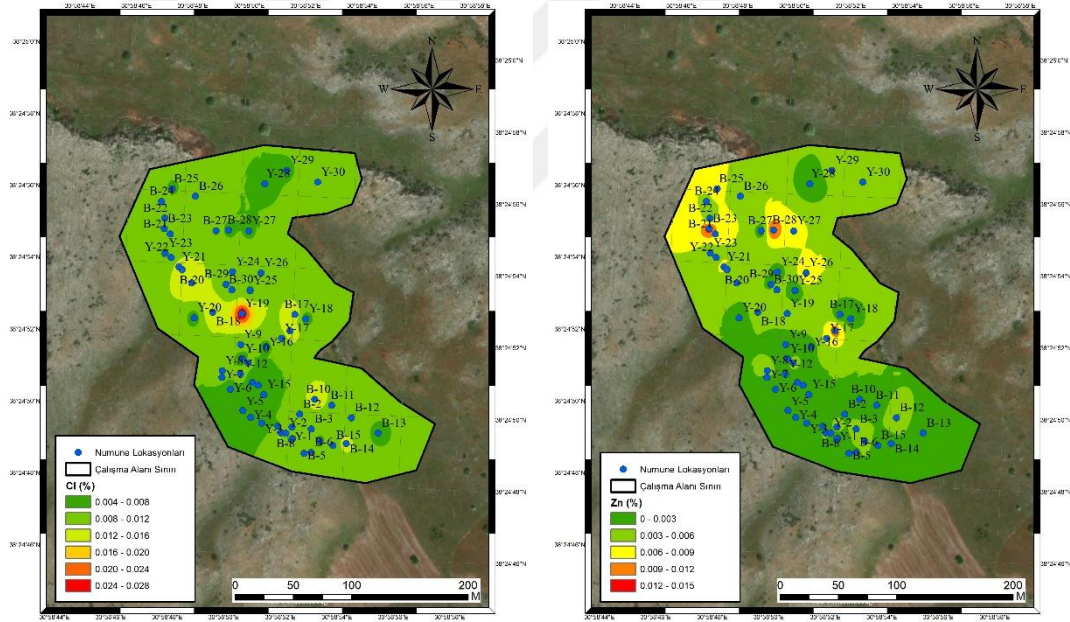
Şekil 4.31. Majör oksit bölgesel dağılım haritaları



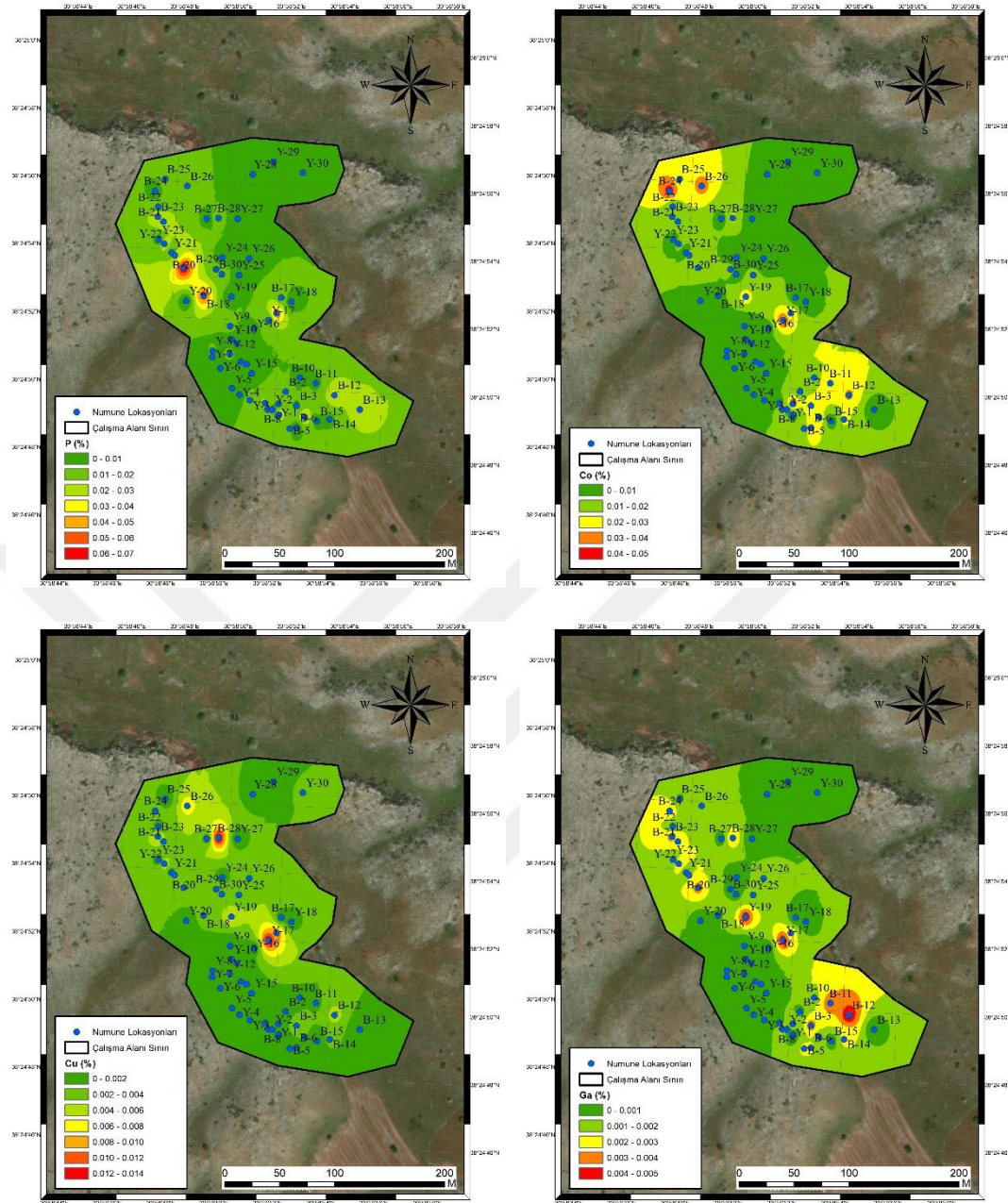
Şekil 4.32. Majör oksit bölgesel dağılım haritaları 3



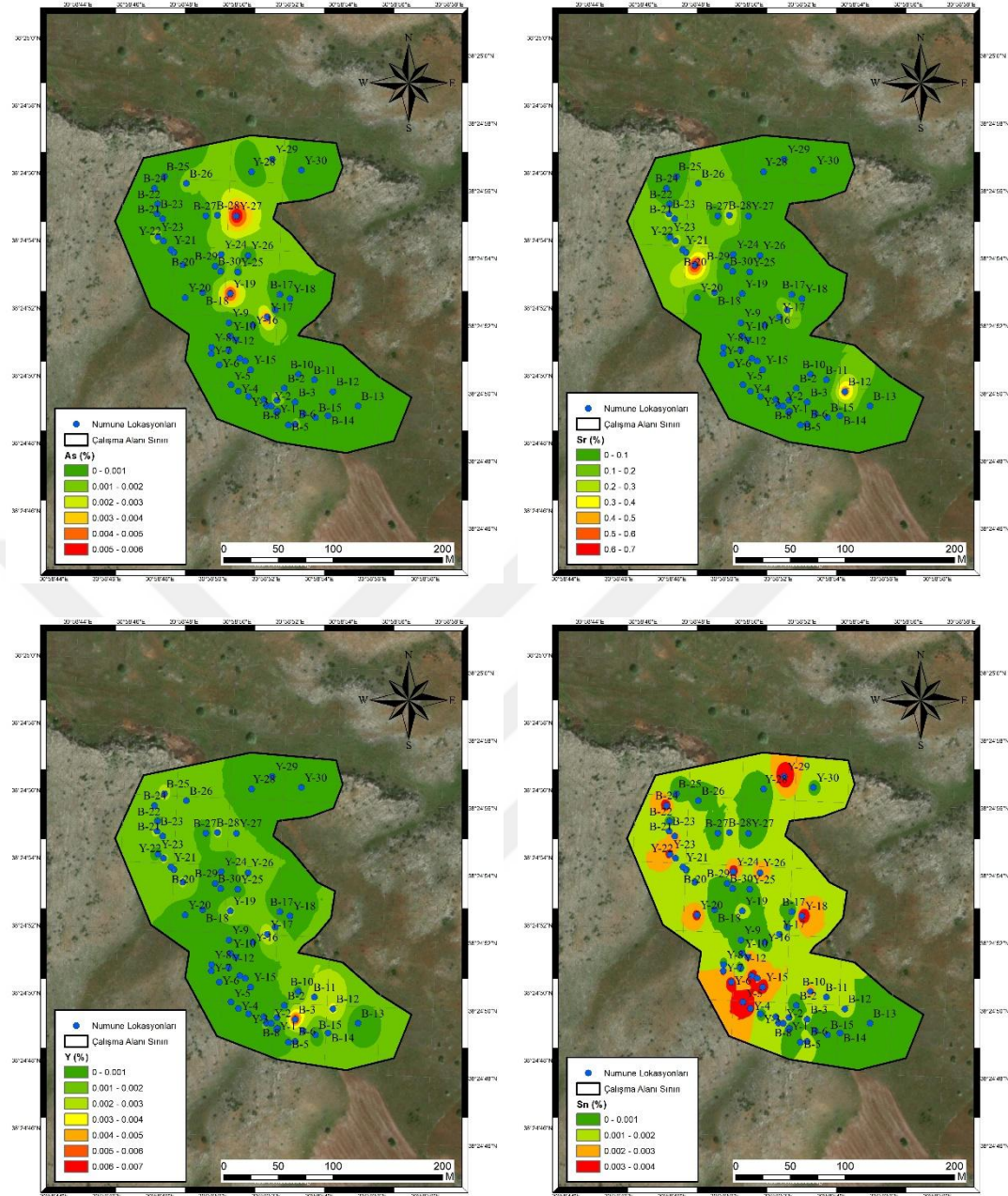
Şekil 4.33. Majör oksit bölgesel dağılım haritaları 4



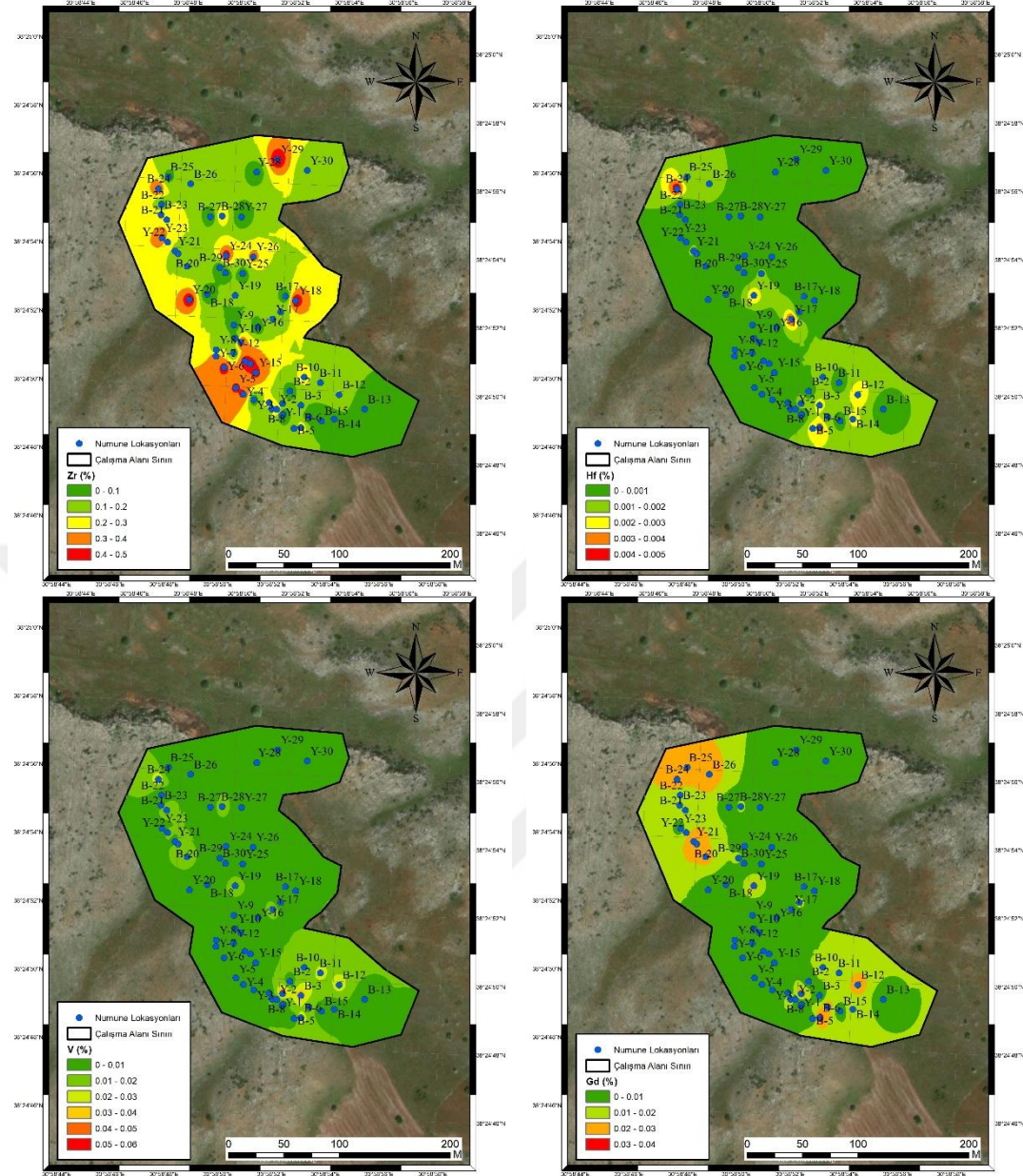
Şekil 4.34. İz element bölgesel dağılım haritaları 1



Şekil 4.35. İz element bölgesel dağılım haritaları 3



Şekil 4.36. İz element bölgesel dağılım haritaları 4



Şekil 4.37. İz element bölgesel dağılım haritaları 5

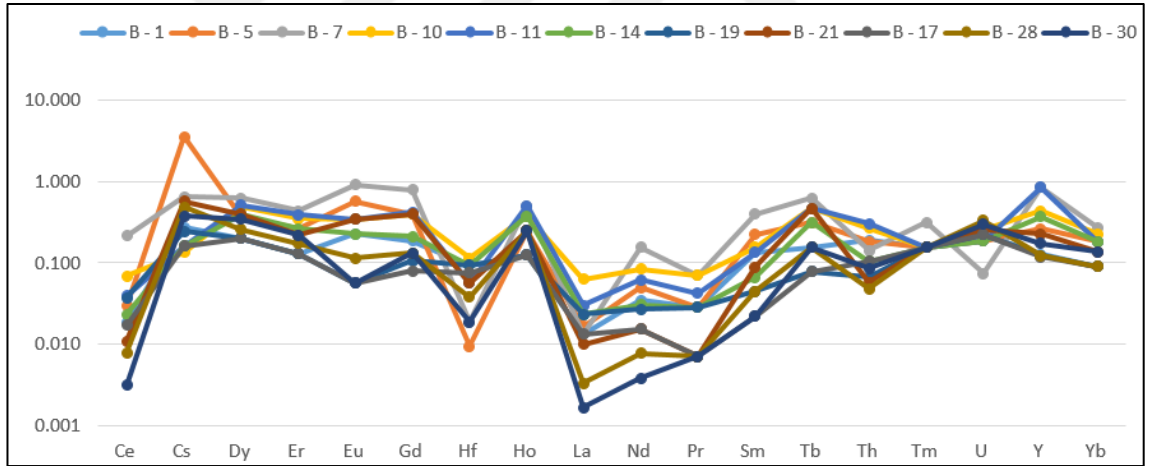
4.5.9. Örümcek diyagramları

Boksit örneklerinin örümcek diyagramları (B-1, B-5, B-7, B-10, B-11, B-14, B-17, B-19, B-21, B-28, B-30) iz element içeriklerinin logaritmik ölçekte karşılaştırmasını göstermektedir. Yatay eksen elementler (REE ve bazı HFSE: Ce, Cs, Dy, Er, Eu, Gd, Hf, Ho, La, Nd, Pr, Sm, Tb, Th, Tm, U, Y, Yb), dikey eksen ise logaritmik ölçekte normalize edilmiş değerler (UCC ya da kondrit'e göre) yer almaktadır. ICP-MS cihazının ölçüm hassasiyeti 0,1 ppm olduğundan, 0,1 ppm'in altında kalan değerler örümcek diyagramlarında sapmalara neden olduğundan en düşük değer 0,05 ppm olarak kabul edilmiştir.

Boksit örneklerindeki iz element içerikleri Üst Kıtasal Kabuk/ Upper Continental Crust (UCC) bileşimlerine göre normalize edilmiştir (Şekil 4.38). Logaritmik eksen sayesinde elementlerin zenginleşme veya fakirleşmeleri net bir şekilde görülmektedir.

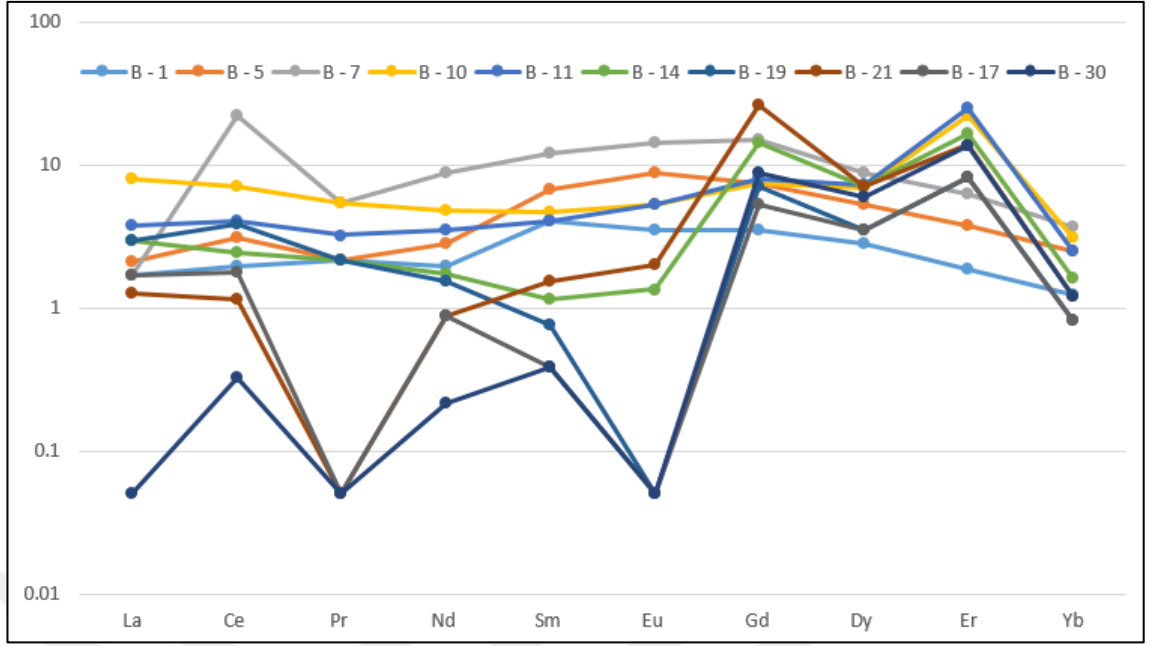
Eu'nun genellikle plajiyoklazla ilişkili olarak davranmasından kaynaklanır; plajiyoklaz ayrıştıkça Eu da sistemden uzaklaşabilir (Özer ve Yalçın 2020; Kırat 2022). Elementler arasında La, Ce, Nd, Pr gibi LREE'lerde (hafif nadir toprak elementleri) bazı örneklerde belirgin zenginleşmeler gözlenmektedir (özellikle B-1 ve B-7 örneklerinde). HREE'ler (Dy, Er, Yb, vb.) daha dengeli bir dağılım göstermekte, bu da LREE'ye göre daha az mobil olduklarını veya ayrışma sürecinde farklı davrandıklarını göstermektedir. Bazı örneklerde (örneğin B-21 ve B-30 gibi), Eu değerinde belirgin düşüş (negatif Eu anomalisi) gözlenmektedir.

Logaritmik eksen de değerlerin 0.01–1 arasında yoğunlaşması, örneklerin çoğunun iz element açısından düşük zenginleşmiş olduğunu gösterir (Özer 2020; Kırat 2022). Hf ve Th elementleri nispeten daha yüksek değerlere sahip olması elementlerin alterasyona karşı dirençli olduklarını ve ortamda hareketsiz kaldıklarını düşündürmektedir. Cs gibi elementlerde özellikle B-5 örneğinde çok yüksek bir sıçrama gözlemlendiğinden; bu bir analitik sapma, lokal zenginleşme veya kil mineraliyle ilişkili olabilir. U (Uranyum) içeriği tüm örneklerde dengeli seyretmekte ancak bazı örneklerde (B-30) az miktarda zenginleşmiştir.



Şekil 4.38. Boksit örneklerinin (UCC) normalize edilmiş örümcek diyagramı (Upper Continental Crust değerleri Taylor ve McLennan 1981'dan alınmıştır)

Boksit örneklerinin Sun ve McDonough (1989)'un kondrit normalizasyon değerlerine göre hazırlanmış olan örümcek diyagramı Şekil 4.39'da yer almaktadır. Logaritmik eksen de değerler, kondrite göre zenginleşme veya fakirleşmeyi gösterir.



Şekil 4.39. Boksit örneklerinin kondrite göre normalize edilmiş örümcek diyagramı (normalleştirilme değerleri: Sun ve Mc Donough 1989)

La, Ce, Pr, Nd gibi LREE'ler çoğu örnekte 1'in üzerinde yoğunlaşmaktadır. Bu durum bahsi geçen elementlerde kondrite göre zenginleşmeler olduğunu göstermektedir.

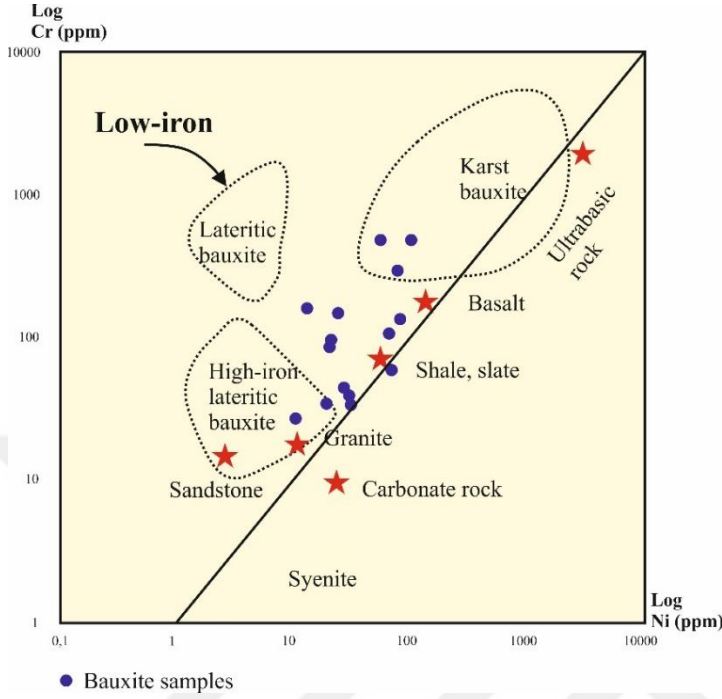
Negatif Eu anomalisi, Eu^{2+} iyonunun plajiyoklaz gibi feldispat minerallerine bağlanarak sistemden ayrılması ile ilişkilidir (Özer 2020; Kırat 2022). B-7 örneği özellikle LREE bakımından oldukça zengindir. Buna karşın B-17 ve B-30 örnekleri LREE açısından görece daha fakirdir (özellikle La ve Ce değerlerinde belirgin düşüklük). Bu dağılım, bazı boksit örneklerinin LREE taşıyıcı fazları (örn. monazit, allanite) içerdiğini gösterebilir. Grafiklerde B-11, B-17, B-30 gibi örneklerde negatif Eu anomalisi (düşüş) gözlenmektedir.

HREE'lerin kaynak kayaca bağlı olarak daha az mobil olduğunu göstermektedir (Özer 2020; Kırat 2022). Gd, Dy, Er, Yb gibi elementler genellikle daha düz ve dengeli bir dağılım göstermektedir. Bu, HREE'lerin kristal yapılarına daha sıkı bağlı olması ve ayrışma süreçlerine karşı daha dirençli olmalarından kaynaklanabilir.

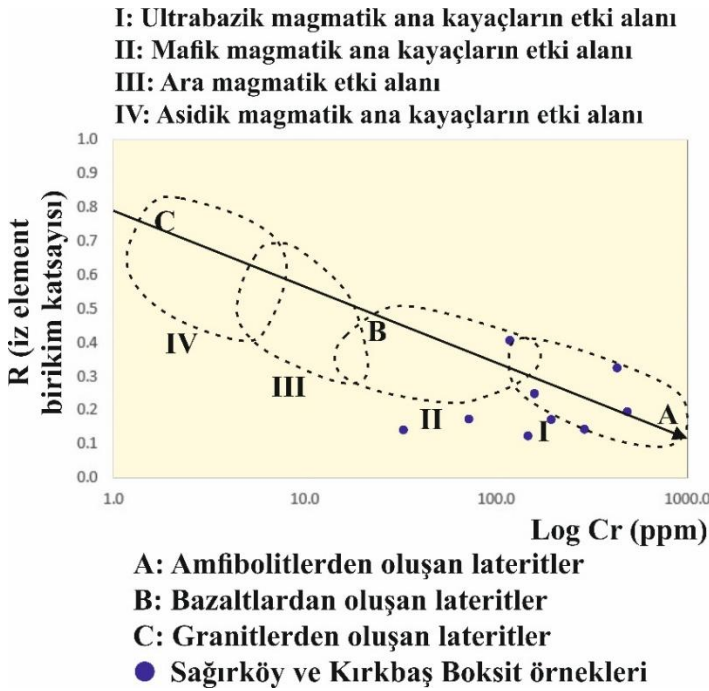
4.5.10. Boksitlerin oluşumunu belirleyen grafikler

Bu durum, yerel stratigrafik konumun ve ana kayacın özelliklerinin, boksitleşme sürecinde önemli rol oynadığını ortaya koymaktadır. Ayrıca Log Cr-R ikili diyagramı boksitlerin magmatik kökenli olup, özellikle ultrabazik ve mafik kayalarla güçlü bir ilişkisi bulunduğunu desteklemektedir (Nyamsari ve Yalçın 2017), Kırbaş ve Sağırköy boksitlerinin oluşumunu belirleyen grafikler Şekil 4.40 (Ni-Cr diyagramı) ve Şekil 4.41'de (Cr-Eser element katsayıları) yer almaktadır. Yalvaç (Kırbaş ve Sağırköy) boksitlerine ait jeokimyasal veriler, Log Cr-Ni diyagramı incelendiğinde, yatakların karstik ortamdan yüksek demir içerikli lateritik boksit ortamına kadar geliştiğini ve oluşum süreçlerinde ultrabazik, bazalt, şeyl kaynaklı malzemenin etkili olduğunu

göstermektedir. Bu veriler, bölgedeki boksitleşme sürecinin hem litolojik hem de jeokimyasal olarak ultrabazik ve mafik kökenli kayaların ayrışmasına bağlı olarak geliştiğini ortaya koymaktadır.

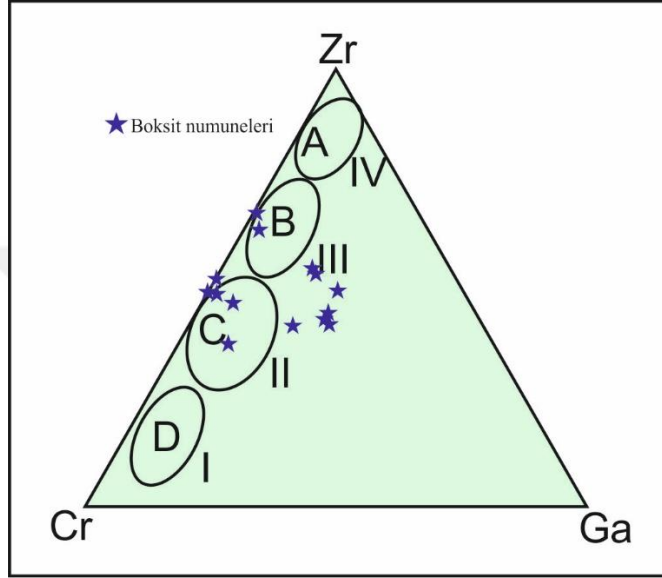


Şekil 4.40. Ni–Cr logaritmik dağılımını diyagramı (Schroll ve Sauer 1968; Nyamsari ve Yalçın 2017; Atakoğlu ve Yalçın 2021)



Şekil 4.41. Cr–Eser element katsayıları logaritmik dağılımını diyagramı (Özlü 1983; Nyamsari ve Yalçın 2017; Nyamsari vd. 2020; Atakoğlu ve Yalçın 2021)

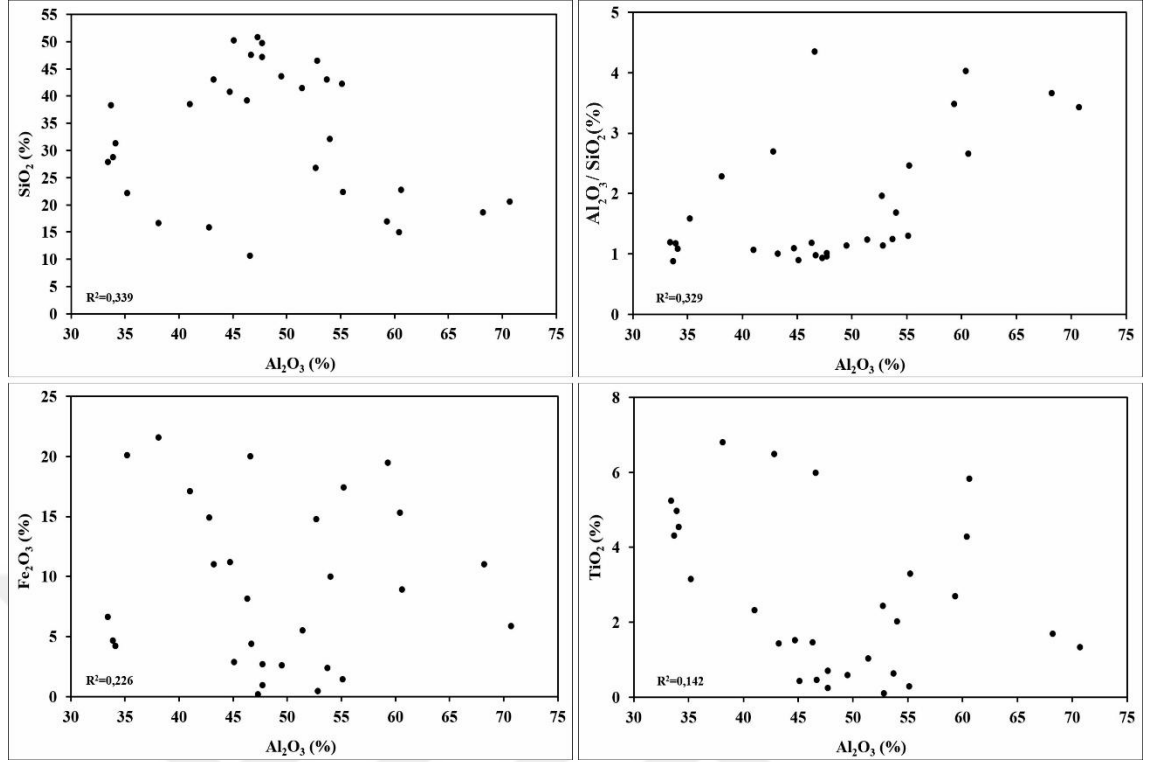
Ga-Zr-Cr üçlü diyagramına göre yalnızca mevcut mineral bileşimlerini tanımlamakla kalmaz, aynı zamanda köken kayalar ve jeokimyasal dönüşüm süreçleri hakkında da bilgi verir (Özlü 1983). Zr (zirkonyum), Cr (krom) ve Ga (galyum) elementlerinin iz element dağılımları, petrojenez süreçlerine ilişkin önemli ipuçları sağlamaktadır. Şekil 4.42’de sunulan üçlü diyagramda, A’dan D’ye doğru sıralanan ultrabazik, bazik, ara ve asidik magmatik kayalara ait Zr, Cr ve Ga konsantrasyon değerleri, bu elementlerin kayaların bileşimine göre nasıl değişim gösterdiğini ortaya koymaktadır.



Şekil 4.42 Ga-Zr-Cr üçlü grafiği, Hacıalabaz formasyonunda incelenen karstik boksitlerdeki elementlerin konsantrasyonları kullanılarak Özlü, 1983’ten değiştirilerek hazırlanmıştır. (A, B, C, D: ultrabazik, bazik, nötr ve asidik magmatik kayalar; I, II, III, IV: ultramafik, mafik, nötr ve asidik karakterli öncül kayalar)

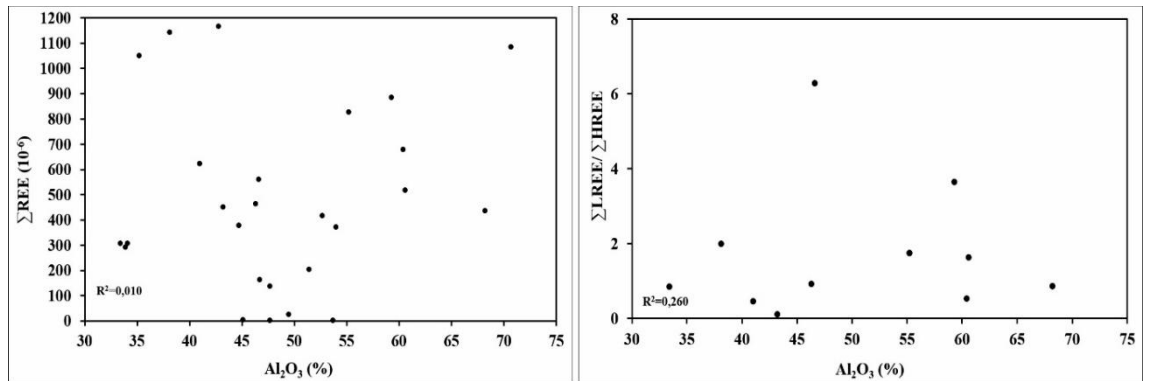
Zr, Cr ve Ga’nın nispi konsantrasyonları, lateritik süreçler sonucu oluşan boksitlerin kökenine dair anlamlı veriler sunabilir (Brimhall ve Dietrich 1987). Diyagram üzerinde belirtilen I-IV aralığı, sırasıyla ultramafik, mafik, nötr ve asidik karakterli öncül kayaların etkisini temsil etmekte olup, bu alanların her biri farklı jeodinamik ortamlarda gelişen kaynak kaya tipolojilerine işaret eder.

Kırkbaş ve Sağırköy sahalarından alınan boksit örneklerinin söz konusu üçlü diyagram üzerindeki dağılımı incelendiğinde, örneklerin çoğunlukla bazik; yer yer nötr bileşim özellikleri gösterdiği anlaşılmaktadır. Bu dağılım, söz konusu boksitlerin kökeninde mafik karakterli öncül kayaların etkisinin belirgin olduğunu göstermektedir. Bununla birlikte, bazı örneklerin ara ve killi bileşimli kaynakların etkisi altında gelişmiş olabileceği de göz ardı edilmemelidir.



Şekil 4.43. Boksit örneklerinin Harker diyagramlarıyla gösterimi

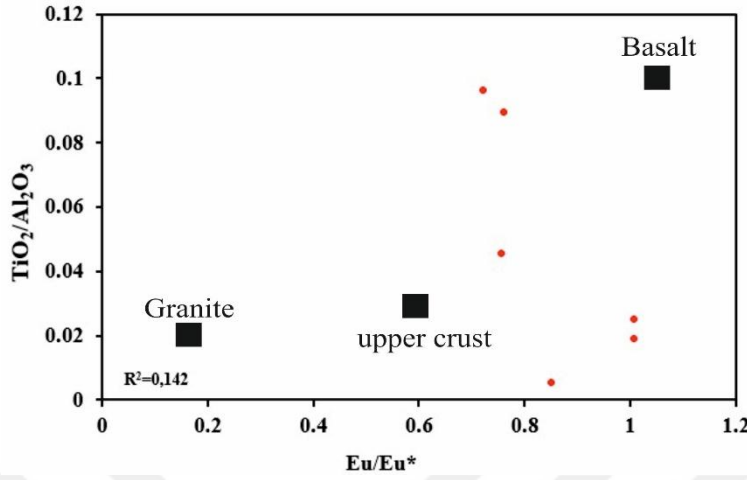
Şekil 4.43’de X ekseninde Al_2O_3 (alüminyum oksit) ve Y ekseninde boksit oluşumunda eşlik eden başlıca oksitlerin (% SiO_2 , % Fe_2O_3 , % TiO_2) ve bir oran göstergesinin ($A/S = Al_2O_3/SiO_2$) yer aldığı diyagramları içermektedir. Bu grafikler, boksitleşme sürecindeki ayrışma, taşıma ve zenginleşme mekanizmaları hakkında önemli ipuçları sunmaktadır. (Harker 1909; Jinwen vd. 2025). Al_2O_3/SiO_2 ile orta derecede korelasyon göstermekte fakat demiroksit Fe_2O_3 ve TiO_2 ile çok zayıf korelasyon göstermektedir.



Şekil 4.44. Al_2O_3 ile nadir toprak elementleri arasındaki korelasyonları gösteren diyagramlar

Şekil 4.44’de X ekseninde Al_2O_3 (alüminyum oksit) ve Y ekseninde ise boksit oluşumunda eşlik ΣREE (toplam nadir toprak elementleri konsantrasyonu) ve Hafif / ağır nadir toprak elementleri oranı ($\Sigma LREE/\Sigma HREE$) yer almaktadır (Jinwen vd. 2025). Al_2O_3 (alüminyum oksit) ve ΣREE arasında çok zayıf ve neredeyse hiç ilişki olmayan

derecede bir korelasyona raslanılmıştır. Al_2O_3 (alüminyum oksit) ve $\sum\text{LREE}/\sum\text{HREE}$ arasında ise çok zayıf derecede korelasyon görülmektedir.



Şekil 4.45. Boksit örneklerinde Eu/Eu^* ile $\text{TiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ arasındaki korelasyon diyagramı

Şekil 4.45’de boksit örneklerinde nadir toprak elementi olan evropiyum (Eu) anomalisinin (Eu/Eu^*) ve $\text{TiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ oranının karşılaştırılmasını göstermektedir (Jinwen vd. 2025). Eu/Eu^* oranı, evropiyum anomalisi olarak bilinir. Bu oran, normalleştirilmiş Eu değerinin, komşu elementler olan Sm (samaryum) ve Gd (gadolinyum) ile kıyaslanmasıyla elde edilir. $\text{Eu}/\text{Eu}^* < 1 \rightarrow$ negatif Eu anomalisi, oksitleyici koşullarda Eu^{2+} çözünür hale gelerek ve sistemden uzaklaştığını gösterir. $\text{Eu}/\text{Eu}^* > 1 \rightarrow$ pozitif Eu anomalisi ise indirgen koşullarda Eu zenginleştiğini gösterir (Jinwen vd. 2025).

4.6. Alüminyum Boksitin Çevre ve İnsan Sağlığı Üzerindeki Etkileri

Sağırköy ve Kırkbaş yöresi gibi boksit içeren jeolojik birimlerin bulunduğu alanlarda yer altı suyu, toprak ve hava kalitesine yönelik toksikolojik risk analizleri, hem jeoloji hem de halk sağlığı disiplinlerinin iş birliğiyle yürütülmelidir. Tıbbi jeoloji disiplini, çevresel etmenlerin insan sağlığı üzerindeki etkilerini jeolojik ve jeokimyasal bağlamda değerlendirmeyi amaçlamaktadır. Bu çerçevede, alüminyum (Al) elementi; hem doğal süreçler hem de insan faaliyetleri sonucu çevreye salınmakta ve çeşitli maruziyet yollarıyla insan sağlığını tehdit edebilmektedir. Alüminyumun çevresel döngüsünün izlenmesi, özellikle içme suyu, gıda, toprak ve hava gibi maruziyet ortamlarında hassas analitik yöntemlerle gerçekleştirilmelidir.

Epidemiyolojik çalışmalar da çevresel alüminyum maruziyeti ile Alzheimer gibi nörodejeneratif hastalıklar arasında potansiyel bir bağlantı olduğunu desteklemektedir (Smith vd. 1995; Smith 1994). Christopher Exley (2017) ise alüminyumun Alzheimer hastalığının birincil etiyolojik faktörlerinden biri olduğunu ileri sürerek, özellikle yer altı suları ve toprak bileşimi üzerinden maruziyetin önemi üzerinde durmuştur. Bu bağlamda, bölgesel jeokimyasal süreçlerin ve alüminyumun çevresel dolaşımının haritalanması, tıbbi jeoloji açısından kritik bir gerekliliktir.

Günlük yaşantıdaki alüminyum maruziyeti yollarına ışık tutan bir diğer önemli çalışma ise Mohammad ve arkadaşları (2011) tarafından gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada, sebze çözeltilerinde alüminyum kaplarda gerçekleşen korozyon süreçleri değerlendirilmiş ve özellikle asidik ortamların korozyon oranlarını artırarak diyetssel alüminyum alımını ciddi boyutlara ulaştırabileceği saptanmıştır. Bu bulgular, jeokimyasal maruziyetin yalnızca endüstriyel değil, evsel kullanım pratikleriyle de bağlantılı olduğunu ortaya koymakta ve halk sağlığı risk değerlendirmelerinde geniş kapsamlı yaklaşımların gerekliliğine işaret etmektedir.

Günümüzde özellikle boksit yataklarına dayalı jeolojik birimlerin halk sağlığı üzerindeki etkileri, tıbbi jeoloji kapsamında disiplinler arası bir yaklaşımla ele alınmaktadır. Van Dyke ve ark. (2013) tarafından Kanada’da yürütülen bir çalışmada, içme suyundaki alüminyum konsantrasyonlarının Alzheimer hastalığı insidansı ile pozitif ilişkisi belirlenmiştir. Benzer biçimde, Liu ve ark. (2020) prenatal maruziyetin mitokondriyal DNA düzeyinde genetik etkiler doğurabileceğini vurgulamış, bu da boksitli sahalarda çevresel maruziyetin yalnızca fiziksel değil, biyolojik düzeyde de izlenmesi gerektiğini göstermiştir. Diğer yandan, Willhite ve ark. (2014) alüminyumun farklı kimyasal formlarının toksisite düzeylerinin farklılaştığını, özellikle solunabilir partikül fraksiyonlarının kritik öneme sahip olduğunu belirtmiştir. Ashkenazi (2021) ise alüminyumun teknolojik ilerlemeye katkılarına karşın, çevresel ve biyolojik etkilerin sistematik olarak göz ardı edildiğini ifade ederek bu maddeye yönelik çok disiplinli denetim mekanizmalarının gerekliliğini ortaya koymuştur. Choi ve arkadaşları (2014) tarafından geliştirilen çok işlevli Schiff bazı türevi sensör, Al(III) ve Zn(II) gibi iyonları floresan, Fe(II) ve Fe(III) gibi iyonları ise kolorimetrik yollarla tespit edebilme özelliğiyle öne çıkmaktadır. Bu tür sensörler, alüminyumun çevresel izini belirlemek amacıyla yeraltı suyu, nehir suyu ve toprak çözeltilerinde analitik olarak kullanılabilir. Al(III)'e karşı yüksek seçiciliği olan bu tür duyarlı sensör sistemleri, özellikle madencilik faaliyetlerinin çevresel etkilerini izlemeye yönelik uygulamalarda tıbbi jeoloji açısından stratejik öneme sahiptir (Choi vd. 2014).

Son yıllarda yapılan deneysel çalışmalarda ise DHA, D vitamini ve probiyotik takviyelerinin alüminyum kaynaklı bilişsel bozuklukları azaltabileceği gösterilmiştir (Faccinnetto-Beltrán vd. 2021). Bu da alüminyumun toksik etkilerinin yalnızca çevresel maruziyetle değil, aynı zamanda organizma içi biyolojik yanıtlarla da şekillendiğini ortaya koymaktadır. Yapay zeka tabanlı karar ağaçları (Decision Tree based approach for classifying) gibi yöntemler ise, toksik metal maruziyetlerinin modellenmesinde ve sağlık risklerinin sınıflandırılmasında yeni ufuklar açmaktadır (Dhanasekaran 2025; Patel 2021).

Alüminyumun uzun süreli maruziyetinin nörotoksik etkilerine dair çarpıcı bulgular ise Fang ve arkadaşlarının (2022) çalışmasında gözlemlenmiştir. Alüminyuma mesleki olarak maruz kalan işçilerde, uzun kodlamayan RNA’lardan 1. RNA 51A’nın ekspresyon düzeyinde anlamlı artışlar saptanmış ve bu artış bilişsel bozulmalarla korelasyon göstermiştir. Bu durum, alüminyumun nörodejeneratif süreçlerde biyomoleküler bir belirteç üzerinden izlenebileceğini ve bu yaklaşımın erken teşhis ile halk sağlığı stratejilerinin şekillendirilmesinde kullanılabileceğini göstermektedir.

İçme suyu gibi doğrudan maruziyet ortamlarında ise García-Ávila ve arkadaşlarının (2023) kırsal bölgelerde gerçekleştirdiği çalışmada, alüminyum bazlı koagülantlarla arıtılmış sularda insan sağlığına yönelik risklerin altı çizilmiştir. Bu çalışmada, arıtma sonrası suyun jeokimyasal içeriğinde alüminyumun kabul edilebilir sınırların üzerine çıkabildiği ve uzun vadeli nörotoksik etkiler başta olmak üzere çeşitli sağlık sorunlarına yol açabileceği ifade edilmiştir. Bu bağlamda, özellikle kırsal su arıtım yöntemlerinde jeokimyasal değerlendirme süreçlerinin sıkılaştırılması gerektiği tıbbi jeoloji açısından önemlidir.

Su kaynaklarındaki alüminyum eğilimlerini uzun vadeli verilerle değerlendiren Tomperi ve arkadaşları (2023), istatistiksel eğilim analizlerinin su kalitesinin izlenmesinde etkin bir araç olduğunu göstermiştir. Bu yaklaşım, özellikle yer altı suyunda alüminyum birikiminin doğal ya da antropojenik kökenli olup olmadığının ayırımında önemli bir metodolojik katkı sunmakta; çevresel risklerin erken teşhisinde kullanılabilecek güçlü bir araç olarak dikkat çekmektedir.

İlerlemiş hastalıklarda karar verme süreçlerinin zaman yönetimi ile entegrasyonu üzerine odaklanan Dickson ve arkadaşları (2023), “time saved” hesaplamalarının ilerleyici bilişsel bozulmalarda erken müdahale kararlarının alınmasında önemli bir araç olduğunu vurgulamaktadır. Bu yaklaşım, çevresel alüminyum maruziyeti gibi sinsi ilerleyen nörotoksik etkilerin zaman ekseninde modellenmesi açısından tıbbi jeolojiye dolaylı katkılar sunmaktadır.

Çevresel toksinlerin nörolojik sağlık üzerindeki etkileri ise giderek artan bilimsel ilgiye konu olmaktadır. Gerardo ve arkadaşları (2023), iz elementlerin (özellikle alüminyum, kurşun, çinko, demir ve manganez gibi) bilişsel fonksiyonlar üzerindeki etkilerini sistematik bir biçimde incelemiş; çinko ve demirin nörolojik işlevleri destekleyici rol oynarken, aşırı alüminyum ve kurşun maruziyetinin bilişsel gerilemeye neden olabileceğini vurgulamışlardır. Bu durum, özellikle yaşlı bireylerde çevresel faktörlerin nörodejeneratif süreçlerdeki rolünü ön plana çıkarmaktadır. Benzer şekilde, Killin ve arkadaşlarının (2023) yürüttüğü sistematik derlemede, demans gelişiminde çevresel risk faktörlerinin (hava kirliliği, toksik metaller ve düşük kaliteli içme suyu) belirleyici olduğu vurgulanmıştır. Bu çalışmada, özellikle alüminyum gibi çevresel toksinlerin uzun süreli maruziyet sonucu oksidatif stres ve kronik inflamasyon mekanizmaları üzerinden nörodejeneratif hastalık riskini artırabileceği ifade edilmiştir. Bu bağlamda, tıbbi jeoloji araştırmaları, bölgesel çevresel maruziyet profillerinin belirlenmesi ve bu verilerin halk sağlığı politikalarıyla bütünleştirilmesi açısından hayati öneme sahiptir.

Alüminyum, çevresel ve endüstriyel maruziyet yoluyla insan vücuduna girebilen ve özellikle merkezi sinir sistemi üzerinde nörotoksik etkiler gösteren bir metal elementtir. Redgrove ve arkadaşlarının (2023) çalışmasında, reçeteli bebek mamalarında yüksek düzeyde alüminyum kontaminasyonu saptanmış; bu durum, mineralojik kökenli hammaddeler ve endüstriyel işlemlerle gıda zincirine alüminyumun dahil olabileceğine işaret etmiştir. Ayrıca, Alotaibi ve arkadaşları (2024), Chamuangone zengini pirinç kepeği yağı takviyesinin, alüminyum kaynaklı bilişsel bozukluk modelinde nöroprotektif etkiler sağladığını ortaya koymuş; bu da çevresel maruziyetin etkilerini azaltmada doğal antioksidanların önemini vurgulamıştır. Benzer şekilde, Rai ve arkadaşları (2021), doğal

flavonoid naringenin'in alüminyum toksisitesinin yol açtığı oksidatif stres ve nöronal dejenerasyonu azalttığını göstermiştir. Hücresel düzeyde ise, Sanajou ve arkadaşlarının (2023) in vitro çalışmalarında, tip 2 diyabet tedavisinde kullanılan metformin'in alüminyumun nörotoksik etkilerine karşı koruyucu rol oynadığı bulunmuştur. Öte yandan, madencilik endüstrisinde sıkça rastlanan silikozis hastalığı bağlamında Jorgenson ve Sandlos (2020), alüminyumun hem toksik hem de terapötik etkilerinin mesleki hastalıklarda rol oynadığını ortaya koyarak, tıbbi jeolojide mineral maruziyetleri ile iş sağlığı arasındaki karmaşık ilişkiye dikkat çekmiştir. İçme suyundaki alüminyumun kontrolü ise Edzwald'ın (2019) çalışmasında çevresel ve halk sağlığı açısından kritik bir önlem olarak tanımlanmıştır. Klotz ve arkadaşları (2017) ise, alüminyum maruziyetinin solunum, cilt ve gastrointestinal sistem üzerindeki olumsuz etkilerini kapsamlı şekilde değerlendirerek, multidisipliner tıbbi jeoloji yaklaşımlarının gerekliliğine vurgu yapmıştır. Ayrıca, Khan ve arkadaşlarının (2023) deneysel araştırması, Erqember bitkisinin fito-kimyasal bileşenlerinin alüminyum klorür kaynaklı nörotoksiteyi hafiflettiğini göstermiş, bu da doğal biyolojik müdahalelerin çevresel toksinlere karşı geliştirilebileceğine işaret etmektedir. Tüm bu bulgular, alüminyumun jeolojik kökenli çevresel maruziyetinin nörolojik sağlık üzerindeki risklerini anlamada ve koruyucu tedbirler geliştirmede tıbbi jeoloji disiplininin önemli bir rol oynadığını göstermektedir.

Alüminyum ve çeşitli iz elementlerin çevresel ortamlardan insan vücuduna geçişi, özellikle gıda, su ve hava gibi temel maruziyet yolları üzerinden gerçekleşmekte ve halk sağlığı açısından giderek önem kazanan bir konu haline gelmektedir. Tıbbi jeoloji disiplini, bu tür elementlerin yer kabuğundaki doğal dağılımı ile insan sağlığı arasındaki ilişkiyi inceleyerek, çevresel maruziyetin sağlık üzerindeki etkilerini değerlendirmede önemli bir çerçeve sunmaktadır (Willhite vd. 2023).

Farmasötik, endüstriyel ve tüketici ürünleri yoluyla gerçekleşen farklı alüminyum formlarına maruziyetin sağlık etkileri ise Willhite ve arkadaşlarının (2023) çalışmasında ayrıntılı olarak ele alınmıştır. Bu incelemede, metalik alüminyum, alüminyum oksitler, hidroksitler ve çözünür tuzlarının toksikokinetiği ve biyoyararlanımı değerlendirilmiş; özellikle nanoparçacık boyutundaki formların geleneksel türlere göre daha farklı toksikolojik davranışlar sergileyebileceği ve bu durumun yeni değerlendirme kriterlerine ihtiyaç duyduğunu ortaya koymuştur.

Teknolojik gelişmeler, tıbbi jeoloji alanında çevresel verilerin daha hassas ve hızlı toplanmasını da mümkün kılmaktadır. Betha (2023) tarafından geliştirilen Raspberry Pi tabanlı açık kaynaklı Endüstriyel Nesnelerin İnterneti (IIoT) ağ geçidi sistemi, çevresel ve jeokimyasal verilerin gerçek zamanlı takibini sağlayarak, alüminyum gibi toksik elementlerin bölgesel dağılımının izlenmesine olanak tanımaktadır. Bu tür düşük maliyetli, ölçeklenebilir çözümler; hem bilimsel veri üretimini hızlandırmakta hem de halk sağlığı risklerine karşı erken uyarı sistemlerinin geliştirilmesini desteklemektedir.

Son olarak, Gündüz (2023) tarafından yapılan kapsamlı derleme, yapay zeka ve makine öğrenimi algoritmalarının kompozit malzeme analizlerindeki uygulamalarını ortaya koymakla birlikte, bu teknolojilerin çevresel jeokimyasal verilerin işlenmesinde de kullanılabileceğini göstermiştir. Özellikle alüminyum ve diğer toksik elementlerin mekansal dağılım modellerinin çıkarılması, risk tahmini yapılması ve maruziyet yönetim

stratejilerinin geliştirilmesinde yapay zeka destekli analizlerin büyük potansiyel taşıdığı anlaşılmaktadır.

Stahl ve arkadaşları (2024), alüminyumun gıda ile temas eden materyallerden gıdaya migrasyonunu ele aldıkları çalışmalarında, bu metalin özellikle asidik ve tuzlu gıdalarla temasında serbest kalma eğiliminin arttığını ve bu durumun haftalık tolere edilebilir alım düzeylerini (TWI) aşabilecek bir maruziyet yaratabileceğini ortaya koymuşlardır. Bu bulgular, gıda ambalajlarının ve kaplarının içeriğindeki alüminyumun kronik sağlık etkileri açısından dikkate alınması gerektiğini göstermektedir. Bu değerlendirme, alüminyumun yalnızca migrasyonla değil, aynı zamanda doğal su kaynakları yoluyla da insan vücuduna alınabileceğine dair bulgularla desteklenmektedir. Kumar ve arkadaşları (2024) tarafından Hindistan'daki Ken–Betwa havzasında yürütülen çalışmada, baş su kaynaklarının jeokimyasal analizleri sonucunda alüminyum ve diğer ağır metallerin doğal arka plan seviyeleri tespit edilmiş; bu değerlerin, bazı durumlarda halk sağlığı açısından risk oluşturabilecek düzeylerde olabileceği belirtilmiştir. Bu durum, jeolojik yapıların yerel su kimyası üzerinde doğrudan etkili olduğunu ve çevresel maruziyetin bölgesel farklılıklar gösterebileceğini ortaya koymaktadır.

Alüminyum oksit nanopartiküllerinin sinir sistemi üzerindeki toksik etkileri, özellikle hafıza kaybı ve nörodejeneratif hastalıklar bağlamında giderek artan bir araştırma konusu haline gelmiştir. Soukhakari ve ark. (2025) tarafından fare modellerinde yapılan çalışmalar, curcumin'in hipokampustaki p38 sinyal yolunu düzenleyerek alüminyum oksit nanopartiküllerinin yol açtığı hafıza bozukluklarını anlamlı biçimde iyileştirdiğini göstermiştir. Bu bulgu, alüminyumun beyin dokusu üzerindeki moleküler hasar mekanizmalarını hedef alan terapötik yaklaşımların geliştirilmesi açısından önemlidir. Benzer şekilde, Mazurek ve Włodarczyk-Stasiak (2024) tarafından yapılan bir başka çalışmada, günlük beslenme alışkanlıkları kapsamında çay infüzyonlarına eklenen meyve sularının alüminyum alımını etkilediği ve bunun sağlık risklerini değiştirebileceği ortaya konmuştur. Bu durum, tıbbi jeolojinin gıda kaynaklı metal maruziyetinin biyoyararlanımı ve risk değerlendirmesi alanındaki uygulamalarına ışık tutmaktadır.

Bu kapsamlı literatür değerlendirmesi, alüminyumun çevresel kaynakları ve maruziyet yollarının sadece kimyasal ya da jeolojik değil, aynı zamanda biyolojik ve sağlık temelli veri setleriyle birlikte değerlendirilmesi gerektiğini açıkça ortaya koymaktadır. Özellikle duyarlı sensör sistemleri, biyobelirteç temelli epidemiyolojik çalışmalar, evsel maruziyet senaryoları, kırsal su arıtım teknolojileri ve zamansal eğilim analizleri, alüminyumun tıbbi jeoloji bağlamında çok yönlü izlenebilmesine olanak tanımaktadır. Bu nedenle, jeokimyasal analizlerin biyomedikal bulgularla entegre edildiği multidisipliner yaklaşımların geliştirilmesi, hem bölgesel risk haritalarının oluşturulması hem de halk sağlığını önemseyen politikaların şekillendirilmesi açısından kritik önem arz etmektedir.

Sonuç olarak, Tıbbi jeoloji perspektifinden yapılan bu çok yönlü değerlendirme, alüminyum başta olmak üzere çeşitli iz elementlerin insan sağlığı üzerindeki etkilerini anlamada çevresel, jeolojik ve teknolojik parametrelerin bütün olarak ele alınmasının önemini vurgulamaktadır. Gerek doğal kaynaklardan gelen maruziyet gerekse gıda, su ve ambalaj materyalleri gibi insan kaynaklı geçiş yolları, özellikle hassas gruplarda ciddi

sağlık sorunlarına yol açabilmektedir. Bu bağlamda, multidisipliner yaklaşımlarla geliştirilecek erken uyarı sistemleri, yapay zeka destekli veri analiz yöntemleri ve düzenli çevresel izlemelerle sağlık risklerinin minimize edilmesi mümkün olabilecektir.

Sağırköy ve Kırkbaş yöresi gibi boksit içeren alanlarda yaşayan bireyler, özellikle içme suyunda, gıdada ve havada alüminyum maruziyetine karşı dikkatli olmalıdır. Bölgedeki içme suyu kalitesi düzenli olarak analiz edilmelidir. Bölgede tozlu ortamlarda maske kullanımı, özellikle çocuklar ve yaşlılar gibi hassas gruplar için önemlidir. Maruz kalındığında, nörolojik belirtiler (unutkanlık, baş dönmesi vb.) gözlenirse sağlık kuruluşlarına başvurulmalı ve gerekiyorsa oksidatif stres azaltıcı takviyeler (D vitamini, probiyotikler gibi) destekleyici olarak değerlendirilmelidir. Ayrıca, yerel yönetimlerin jeokimyasal risk haritalaması yapması, halk sağlığına yönelik önleyici adımlar açısından hayati önem taşımaktadır.

4.7. Sürdürülebilir Madencilik ve Çevresel Yönetim

Isparta/Yalvaç boksit yatakları için sürdürülebilir madencilik uygulamaları büyük önem taşımaktadır. Bu, yalnızca ekonomik yararın artırılmasını değil, aynı zamanda çevreye duyarlı bir üretim sürecinin benimsenmesini de içerir. Sürdürülebilir madencilik uygulamaları şu şekilde özetlenebilir:

Atık Yönetimi ve Geri Dönüşüm: Kırmızı çamur gibi zararlı atıkların geri dönüşümü ve uygun şekilde depolanması.

Toprak Koruma ve Erozyon Kontrolü: Madencilik alanlarında toprak erozyonunun önlenmesi için uygun toprak koruma tekniklerinin uygulanması.

Su Kaynakları Yönetimi: Su tüketiminin azaltılması ve su kirliliği risklerinin minimize edilmesi için su yönetim stratejilerinin geliştirilmesi.

Biyolojik Çeşitlilik ve Rehabilitasyon: Madencilik sonrası alanların rehabilite edilmesi ve bölgedeki biyolojik çeşitliliğin korunması (Sverdrup vd. 2015).

Boksit madenciliği faaliyetlerinin çevresel etkilerinin azaltılması amacıyla sürdürülebilir madencilik uygulamalarının benimsenmesi gerekmektedir. Bu uygulamalar arasında, atıkların geri dönüştürülmesi, toprak koruma tekniklerinin kullanılması, su kaynaklarının yönetimi ve rehabilitasyon projelerinin uygulanması bulunmaktadır. Ayrıca, karbon ayak izinin azaltılması için teknolojik yenilikler ve enerji verimliliği ön plana çıkabilir. Isparta/Yalvaç ve çevresi için bu tür sürdürülebilir uygulamalar, sadece çevreyi korumakla kalmayacak, aynı zamanda bölgedeki ekonomik kalkınmayı da sürdürülebilir kılacaktır.

Isparta/Yalvaç boksit yataklarının jeolojik çerçevesi, ekonomik kalkınma açısından bölgeye büyük katkılar sağlamakta olup, aynı zamanda çevresel zorlukları da beraberinde getirmektedir. Bu zorlukların üstesinden gelmek ve sürdürülebilir bir madencilik yaklaşımı benimsemek, bölgenin hem ekonomik hem de çevresel açıdan uzun vadeli fayda sağlamasına yardımcı olacaktır. Sürdürülebilir madencilik uygulamaları ile çevreyi koruyarak, bölgenin alüminyum üretim kapasitesini artırmak mümkün olacaktır (Azapagic, 2004).

4.7.1. Çevresel etkiler

Isparta/Yalvaç ve Şarkikaraağaç bölgesindeki boksit yataklarının çevresel etkileri, yalnızca bölgeye özgü değil, aynı zamanda bölgesel ve küresel ölçekte de dikkate alınması gereken bir sorundur. Bu etkilerin minimize edilmesi için sürdürülebilir madencilik yöntemlerinin geliştirilmesi gerekmektedir. Ayrıca, boksit madenciliği sonrası rehabilitasyon çalışmalarının titizlikle yapılması, çevresel zararın önlenmesinde kritik bir rol oynamaktadır.

Boksit madenciliği, çevresel anlamda çeşitli olumsuz etkiler doğurabilir. Kırkbaş ve Sağırköy bölgesindeki madencilik faaliyetlerinin çevresel etkilerini değerlendirmek, sürdürülebilir madencilik anlayışının önemini ortaya koymaktadır. Özellikle boksit çıkarımı sırasında toprak erozyonu, su kirliliği ve biyolojik çeşitlilikte azalma gibi çevresel sorunlar ön plana çıkmaktadır.

Boksit madenciliği, çevresel açıdan çeşitli olumsuz etkiler doğurabilir. Bu etkiler, toprak erozyonu, su kirliliği ve biyoçeşitlilik kaybı gibi konuları kapsar. Kırmızı çamur atıkları, boksitlerin işlenmesi sırasında oluşan ve çevreye zarar verebilen zararlı atıklardır. Kırmızı çamurun depolanması, özellikle su kaynaklarının kirlenmesi riskini doğurabilir (Yalçın ve İlhan 2013). Çevre dostu atık yönetimi stratejilerinin uygulanması, bu tür zararlı etkilerin minimize edilmesine yardımcı olacaktır.

Boksit çıkarma işlemleri sırasında, toprak yüzeyinin açılması, toprak yapısının bozulmasına ve erozyon riskine yol açabilir. Madencilik faaliyetleri sırasında kullanılan kimyasal maddeler, bölgedeki su yollarını kirletebilir ve yeraltı su kaynaklarını etkileyebilir. Bu nedenle, çevresel yönetim stratejilerinin güçlendirilmesi gereklidir.

Madencilik faaliyetlerinin yoğun olduğu bölgelerde, doğal yaşam alanları zarar görebilir. Boksit çıkarma işlemleri, bölgedeki flora ve fauna türleri üzerinde olumsuz etkiler yaratabilir. Bu nedenle, madencilik faaliyetlerinin ardından yapılan rehabilitasyon projeleri ile bölgenin doğal yapısının eski haline getirilmesi önemlidir (Yalçın vd. 2025).

4.7.2. Ekonomik etkiler

Boksit, alüminyumun ana cevheri olup, alüminyum oksit minerallerini içeren tortul kayaçlardan oluşur. Sanayi ve metalurji sektöründe kritik bir hammadde olması nedeniyle ekonomik açıdan büyük öneme sahiptir. Alüminyum üretiminin %90'ı boksit cevherlerinden sağlanmakta olup, inşaat, otomotiv, havacılık ve ambalaj endüstrilerinde yaygın olarak kullanılmaktadır.

Çizelge 4.25. Al_2O_3/SiO_2 modülüne (oranına) göre boksit sınıflaması

Al_2O_3/ SiO_2 (%)	Boksit Sınıflaması
> 20	Yüksek Alüminyumlu Cevher
11 - 20	Alüminyum Cevheri
4 - 10	Silisli Cevher
< 4	Yüksek Silisli Cevher

Al_2O_3/SiO_2 oranına göre boksit sınıflaması Çizelge 4.25'de yer almaktadır (Tutmez 2018; Yalcin 2022). Sağırköy-Kırkbaş köyü boksitleri için minimum $Al_2O_3/$

SiO₂ (%) oranı değeri 0,88 (yüksek silisli cevher), maksimum değer 4,36 (silisli cevher), ortalama değer 1,79 (yüksek silisli cevher) olarak tanımlanmıştır. Silisli boksitler, doğrudan ekonomik işletilebilirlik açısından daha az tercih edilir. Ancak cevherin genel mineralojisi ve bölgesel altyapı gibi faktörlere bağlı olarak, zenginleştirme veya özel kullanım amaçlı kısmi değerlendirme mümkün olabilir.

Isparta/Yalvaç boksit yatakları, bölgedeki ekonomik kalkınmayı doğrudan etkilemektedir. Boksit madenciliği, bu bölgede çok önemli bir endüstriyel faaliyet olup, alüminyum üretimi için hammaddelerin temin edilmesinde temel kaynak olarak kullanılmaktadır. Alüminyum üretimi, inşaat, otomotiv, enerji ve makine sanayileri gibi pek çok sektörde kritik öneme sahiptir.

Şarkikaraağaç ve çevresindeki boksit yatakları, Türkiye'nin en önemli alüminyum üretim kaynaklarından biridir. Bölgedeki boksit yataklarının çıkarılması, Türkiye'nin alüminyum ihtiyacını karşılamada önemli bir rol oynamaktadır. Bunun yanı sıra, boksit madenciliği, bölgedeki istihdamı artırmakta ve yerel ekonomiye katkı sağlamaktadır. Alüminyum üretimi, otomotiv, inşaat ve elektrik sektörlerinde geniş bir kullanım alanına sahiptir ve bu da boksit madenciliğinin ekonomik önemini daha da artırmaktadır.

Kırkbaş ve Sağırköy boksit yatakları, Isparta ilinin ekonomik yapısında önemli bir rol oynamaktadır. Türkiye'nin alüminyum ihtiyacını karşılayan boksit yatakları, ülke ekonomisine büyük katkılar sağlamaktadır. Boksit madenciliği, yerel ekonomiyi doğrudan etkilemekte olup, madencilik faaliyetleri ile istihdam yaratılmaktadır. Bölgedeki boksit çıkarım faaliyetleri, inşaat, otomotiv ve enerji sektörlerinde kullanılan alüminyum üretimi için önemli bir hammadde kaynağı sağlamaktadır.

Boksit madenciliği, yerel iş gücü ve bölgesel kalkınma açısından da büyük fırsatlar sunmaktadır. Bununla birlikte, madenciliğin yerel ekonomiye katkısı, yalnızca doğrudan istihdam sağlamakla sınırlı kalmamaktadır. Altyapı geliştirme projeleri, taşımacılık ve lojistik hizmetleri gibi dolaylı sektörler de ekonomik fayda sağlamaktadır. Örneğin, Taşköprü Boksit Madeni, bölgedeki en büyük boksit üretim tesislerinden biridir ve alüminyum sanayisine yıllık yüksek kaliteli hammadde temin etmektedir (MYBD 2019).

Alüminyum sanayisinin gelişimi, Türkiye'nin boksit yataklarından elde edilen hammaddelerle iç üretimin artırılmasını sağlamaktadır. Türkiye, alüminyum ithalatını azaltarak dışa bağımlılığını ortadan kaldırmayı hedeflemektedir. Bu durum, boksit madenciliğinin ekonomik kalkınma üzerindeki etkisini artırmaktadır.

Şarkikaraağaç ilçesi başta olmak üzere, Isparta'nın farklı bölgelerinde ekonomik olarak değerlendirilebilecek boksit yatakları bulunmaktadır. Türkiye'nin en önemli otokton boksit yatakları arasında sayılan bu oluşumlar, yapılan rezerv çalışmaları sonucunda ticari açıdan işletilebilir miktarda olduğu belirlenmiştir. Ancak, rezervlerin verimi ve cevher kalitesi yataktan yatağa farklılık gösterebilmektedir. Örneğin, Şarkikaraağaç bölgesindeki bazı yataklar yüksek oranda Al₂O₃ içeriğine sahipken, bazı bölgelerde daha fazla Fe₂O₃ içeren lateritik profiller görülmektedir (Öncel 1995).

Boksit yataklarının ekonomik değeri, büyük ölçüde içerdiği alüminyum oksit (Al₂O₃) oranına bağlıdır. Yüksek kaliteli boksit yataklarında, alüminyum oksit oranı genellikle %40-%60 arasında değişir ve bu, alüminyum üretiminde kullanılabilirliğini

artırır. Yatakların içeriğinde bulunan diğer mineraller (silika, demir oksit, titanyum oksit vb.) de ekonomik değeri etkileyebilir. Yüksek demir ve silika içeren yataklar, genellikle daha düşük kaliteye sahip olup, işlenmesi zor olabilir ve bu durum üretim maliyetlerini artırır. Boksit yataklarının, özellikle alüminyum oksit açısından yüksek kalitede olması, boksit üretiminin maliyet etkinliğini artırarak, alüminyum endüstrisinin sürdürülebilirliğine katkı sağlar.

Boksit yataklarının ekonomisinde önemli bir diğer faktör ise yatakların büyüklüğü ve derinliğidir. Yataklar ne kadar büyükse, o kadar çok mineral kaynağı sağlanabilir. Derin yataklar ise, daha fazla işleme ve madencilik altyapısı gerektirir, bu da ek maliyetler oluşturur. Ancak, büyük boksit yataklarının uzun vadeli ekonomik getirileri daha yüksek olabilir. Bu nedenle, yatakların büyüklüğüne bağlı olarak, ekonomik değeri artan ya da azalan yataklar söz konusu olabilir. Bu tür yataklar için yapılan jeolojik ve jeokimyasal analizler, yatakların ekonomik potansiyelini belirlemede önemli rol oynar.

Boksit üretiminin ekonomik sürdürülebilirliği, yatakların ulaşılabilirliğine bağlıdır. Yataklar, uygun ulaşım altyapısına sahip bölgelerde yer alıyorsa, taşıma ve işleme maliyetleri daha düşük olur. Ancak, uzak ve dağlık alanlarda yer alan boksit yatakları, hem nakliye hem de işleme açısından daha yüksek maliyetler yaratabilir. Bu nedenle, boksit yataklarının bulunduğu bölgedeki ulaşım altyapısının kalitesi, yatakların ekonomik değerini doğrudan etkiler. Boksit yataklarının taşınması, büyük miktarda malzemenin ve ağır ekipmanların kullanıldığı karmaşık bir süreçtir. Yatakların bulunduğu bölgeye ulaşım kolaylığı, alüminyum üreticilerinin üretim maliyetlerini doğrudan etkiler. Gelişmiş ulaşım altyapısına sahip ülkelerde, boksitlerin taşınması daha ekonomik olurken, gelişmekte olan bölgelerde bu maliyetler daha yüksek olabilir. Ayrıca, yatakların işlenmesi sırasında enerji maliyetleri de dikkate alınmalıdır. Yüksek kaliteli boksit yataklarının bulunduğu bölgelerde, işleme süreçlerinin verimli olması, toplam üretim maliyetlerini önemli ölçüde azaltabilir (Rao ve Dey 2014).

Alüminyum, modern endüstrinin vazgeçilmez bir bileşeni olup, otomotiv, havacılık, inşaat ve elektrik sektörlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Alüminyumun talebi, özellikle gelişen sanayi ülkelerinde hızla artmaktadır. Boksit üreticileri, küresel alüminyum talebine cevap verebilmek için yüksek kaliteli boksit yataklarının bulunabilirliğine büyük önem verirler. Özellikle Asya, Avrupa ve Kuzey Amerika pazarlarındaki alüminyum talebi, boksit yataklarının ekonomik değerini doğrudan etkiler. Yüksek alüminyum talebi, boksit yataklarının işlenmesi ve üretimi için ekonomik bir teşvik oluşturur (Putzolu vd. 2018).

Alüminyum, hafifliği, dayanıklılığı ve korozyon direnci nedeniyle birçok sektörde kullanılmaktadır. Otomotiv ve havacılık sektöründe, uçak ve araç gövdelerinde hafiflik avantajı sağlar. İnşaat malzemeleri sektöründe, pencereler, kaplamalar ve yapı elemanlarında tercih edilir. Elektrik ve elektronik sektöründe, iletkenliği yüksek olduğu için kablo üretiminde kullanılır. Ambalaj endüstrisinde, alüminyum folyo ve içecek kutularında yaygın olarak yer almaktadır. Ayrıca, boksit cevheri refrakter malzemeler, aşındırıcılar ve kimyasal bileşenlerin üretiminde de değerlendirilmektedir (Rao ve Dey 2014).

Bunun yanı sıra, alüminyumun çevre dostu bir metal olarak bilinir olması, dünya genelinde artan çevre bilinci ile birlikte boksit üretimini daha değerli hale getirmiştir. Bu nedenle, çevre dostu üretim süreçleri ve sürdürülebilir işleme teknikleri, alüminyum

üreticilerinin maliyetlerini azaltırken, boksit yataklarının ekonomik değerini artırır. Boksit yataklarının ekonomik potansiyelinin değerlendirilmesinde, alüminyumun sanayideki yerinin analiz edilmesi de önemli bir faktördür (Pradhan vd. 2023).

Türkiye’de çıkarılan boksitler, çoğunlukla Konya’nın Seydişehir ilçesinde bulunan alüminyum tesislerinde işlenmektedir. Bu tesislerde, boksit cevheri Bayer süreci kullanılarak alümina (Al_2O_3) elde edilmekte ve daha sonra Hall-Héroult yöntemiyle elektroliz edilerek saf alüminyum üretimi gerçekleştirilmektedir (Rao ve Dey 2014).

Çizelge 4.26. Endüstride kullanılabilir nitelikteki boksit cevheri kriterleri

Özellik	Tercih Edilen Değer	Kırkbaş-Sağırköy Boksitleri
Al_2O_3 (%)	> 45	48,37
SiO_2 (%)	< 5	33,03
Fe_2O_3 (%)	< 25	8,88
TiO_2 (%)	< 4	2,54

Boksit cevheri, genellikle kırmızı, kahverengi, sarımsı veya gri renktedir. Bu renk farklılıkları, içerdiği demir oksit oranına bağlıdır. Sertliği 2.5–3.5 arasında değişir ve yoğunluğu 2.4–2.6 g/cm³ civarındadır. Gözeneklilik özelliği, sıvıların ve gazların taşınmasını kolaylaştırır; bu durum, hem oluşum sürecinde hem de zenginleştirme işlemlerinde önemlidir (Yalçın ve İlhan 2013). Çizelge 4.26’da endüstride kullanılabilir nitelikteki bir boksit cevherine ait değerler (ana oksit bileşen yüzdeleri) yer almaktadır.

Kırkbaş-Sağırköy boksitlerinin endüstride kullanılabilirliği; Al_2O_3 (%48,37) oranı, %45’in üzerinde olup oldukça yüksek kaliteli bir alümina içeriğine işaret eder. Fe_2O_3 (%8,88) değeri, %25 sınırının oldukça altındadır; bu da düşük demir içeriği sayesinde rafinasyon açısından avantaj sağlar. TiO_2 (%2,54) oranı da %4’ün altında olup uygun seviyededir. SiO_2 (%33,03) oranı, ideal olan %5’in çok üzerindedir. Bu, cevherin yüksek silis içeriği nedeniyle işlenmesini zorlaştırabilir ve ekonomik verimliliği azaltabilir. Yüksek silis, Bayer prosesi sırasında kırmızı çamur üretimini artırabilir.

Bu parametreler, cevherin işlenebilirliğini, Bayer prosesi verimini ve çevresel etkileri doğrudan etkiler. Boksit, yalnızca alüminyum üretimi için değil; aynı zamanda galyum (Ga), skandiyum (Sc) gibi nadir elementlerin kazanımı açısından da stratejik bir hammadde olarak değerlendirilmektedir. Bu elementlerin ileri teknoloji (örneğin LED, lazer, batarya) alanlarında kullanılması, boksitin kritik cevher statüsünü güçlendirmektedir (USGS 2023).

4.8. Boksit Yataklarının Yeryüzündeki Dağılımı

Boksit, dünya genelinde alüminyum üretiminin ana hammaddesi olan ve büyük ekonomik öneme sahip bir kayadır. Alüminyum oksit mineralleri (gibsit, böhmite, diaspore) açısından zengin olan boksit yatakları, genellikle tropikal ve subtropikal iklim koşullarında lateritleşme süreçleriyle veya karbonat platformlarında gelişen çökeltme süreçleriyle oluşmaktadır (Bárdossy ve Aleva 1990; Tardy 1997). Bu çalışma, boksit yataklarının jeolojik oluşum aşamalarını, farklı yatak tiplerini ve dünya, Türkiye ve Isparta bölgesindeki önemli boksit yataklarını detaylı bir şekilde incelemektedir.

Boksit yatakları, dünya üzerinde belirli bölgelere yayılmıştır. En yaygın boksit yatakları tropikal ve subtropikal iklim bölgelerinde bulunur. Afrika, Güneydoğu Asya, Brezilya, Avustralya, Kuzey Amerika ve Karayipler bu yatakların en fazla bulunduğu bölgelerdir. Avusturalya, dünyanın en büyük boksit üreticisi olup, boksit yatakları Batı Avustralya, Queensland ve Northern Territory gibi bölgelerde yaygındır. Bu bölgelerdeki yataklar, özellikle gibbsit minerali bakımından zengindir (Putzolu vd. 2018). Afrika, Gine, Boksit Madeni, Batı Afrika'daki boksit yatakları açısından önemli bir kaynaktır. Bu yataklar, laterit tipi boksit yataklarıyla tanınır (Retallack 2010). Brezilya, Amazônia bölgesinde yoğunlaşan boksit yatakları, yüksek gibbsit içeriği ile dikkat çeker. Ayrıca Pará eyaleti, Alüminyum üretiminde önemli bir yere sahiptir. Güneydoğu Asya, Malezya, Endonezya ve Vietnam, boksit üretiminin önemli olduğu diğer tropikal bölgeler arasındadır (Sverdrup vd. 2015).

Boksit yatakları, sadece alüminyum üretiminin temel kaynağı değil, aynı zamanda ekonomik açıdan büyük bir öneme sahiptir. Alüminyum, modern sanayideki en temel metallardan biri olup, otomotiv, havacılık, elektronik ve inşaat sektörlerinde geniş bir kullanım alanına sahiptir. Dünyanın en büyük alüminyum üreticisi olan Avustralya, Brezilya ve Gine, boksit yataklarıyla tanınan başlıca ülkeler arasındadır. Boksit yataklarının dünya çapındaki ticareti, alüminyum üretiminin büyüklüğü göz önüne alındığında oldukça önemlidir. Alüminyum üretim tesislerinin çoğu, büyük boksit yataklarına yakın bölgelerde kurulmuştur. Boksit ticareti aynı zamanda uluslararası enerji ticareti ile de doğrudan ilişkilidir, çünkü alüminyum üretimi enerji yoğun bir süreçtir.

Alüminyum üretimi, boksitlerden çıkarılan alüminyum oksit (Al_2O_3), genellikle bayer süreci adı verilen bir kimyasal işlemle alüminyum metaline dönüştürülür. Boksit yataklarından elde edilen bu mineral, alüminyum üretimi için temel bir hammadde kaynağıdır. Alüminyum üretiminde boksit, üretim sürecinin ilk adımıdır ve bu süreçte yüksek sıcaklıklarda, sıvılaştırma ve elektroliz işlemleri gerçekleştirilir. (Retallack 2010).

Boksit, ayrıca bazı ülkelerde stratejik bir kaynak olarak kabul edilmektedir. Örneğin, Çin, alüminyum üretimi için boksit ithalatına büyük bağımlılık duyan bir ülkedir ve bu nedenle boksit yataklarının bulunduğu bölgelerdeki jeopolitik gelişmeleri dikkatle izler. Çin, boksit ve alüminyum üretiminde başta Asya olmak üzere dünyanın diğer bölgelerinde de aktif bir şekilde yer almaktadır. Boksit yataklarının ekonomik önemi, özellikle gelişmekte olan ülkeler için büyüktür. Boksit madenciliği, bu ülkelerde iş olanakları yaratırken, aynı zamanda dışa bağımlılığı azaltarak yerel ekonomileri güçlendirir. Ülkeler için boksit çıkarımı, sadece yerel sanayiye hammadde sağlamakla kalmaz, aynı zamanda ihracat gelirleri elde etmelerini sağlar. Örneğin, Avustralya, Gine, Brezilya ve Jamaika gibi ülkeler, boksit ihracatından büyük ekonomik kazançlar elde etmektedir (Putzolu vd. 2018).

Alüminyum, düşük yoğunluğu, yüksek dayanıklılığı ve yüksek işlenebilirliği sayesinde, birçok farklı sektörde yaygın olarak kullanılmaktadır. Alüminyum, yenilikçi teknolojilerin gelişmesiyle birlikte yeni kullanım alanları bulmaktadır. Güneş enerjisi panelleri, rüzgar türbinleri ve elektrikli araç bataryaları gibi alanlarda, alüminyumun kullanımı her geçen gün artmaktadır. Bu sektörlerde alüminyum, hem işlevsel hem de çevresel açıdan önemli avantajlar sunmaktadır. Boksit yataklarının sürdürülebilir bir şekilde işletilmesi, bu yenilikçi teknolojilerin gelişimi için kritik bir rol oynamaktadır. Otomotiv sektörü, alüminyumun en fazla kullanıldığı alanlardan biridir. Alüminyum,

araçların hafifletilmesi ve yakıt verimliliğinin artırılması amacıyla geniş çapta kullanılmaktadır. Ayrıca uçak sanayii de alüminyumun en yoğun kullanıldığı alanlardan biridir. Elektrikli araçlar üretiminde de alüminyum, batarya sistemlerinin hafifletilmesi amacıyla sıklıkla tercih edilmektedir. İnşaat sektöründe de alüminyum, dayanıklı ve uzun ömürlü özellikleri sayesinde tercih edilmektedir. Binalarda, köprülerde ve altyapı projelerinde alüminyumun kullanımı artmıştır. Ayrıca, ambalaj sanayiinde de alüminyum, gıda ve içecek paketleme ürünlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır (Georgitzikis vd. 2021).

Boksit madenciliği, yerel ekosistemler üzerinde bazı olumsuz çevresel etkiler yaratabilir. Özellikle açık ocak madenciliği yöntemiyle boksit çıkarımı, toprak kaymaları, su kirliliği ve habitat tahribatına yol açabilir. Madencilik faaliyetlerinin çevre üzerindeki bu olumsuz etkilerini azaltmak amacıyla çevre dostu uygulamalar ve geri dönüşüm süreçleri geliştirilmiştir. Ayrıca, boksit işleme sırasında çıkan atıklar (termit veya kırmızı çamur olarak adlandırılan atıklar) çevreye zarar verebilecek potansiyel tehlikeler taşımaktadır. Bu yüzden, alüminyum üreticileri atık yönetimi ve çevresel sürdürülebilirlik konularına büyük önem vermektedir (Sverdrup vd. 2015).

4.8.1. Isparta bölgesi boksit yatakları

Isparta'da boksit yatakları özellikle Yalvaç ve Şarkikaraağaç çevresinde bulunur. Bu yataklar, Üst Jura yaşlı karbonat kayalar ile ilişkilidir ve karstlaşma sürecinin etkisiyle oluşmuştur.

Bölgedeki boksitler, kireçtaşları üzerinde gelişmiş olup, yer yer dolomit ve sist birimleriyle ilişkilidir. Gibsit, böhmite ve hematit içerikleri yüksektir. Yan kayaç olarak kireçtaşı ve dolomit yaygındır (Öncel 1995). Isparta'daki boksit yatakları, alüminyum üretimi için değerlendirilmektedir. Ancak rezerv miktarı bakımından Seydişehir yataklarına göre daha sınırlıdır.

Boksit yatakları, dünya genelinde farklı jeolojik süreçlerle oluşan değerli cevher yataklarıdır. Lateritik boksitler tropikal ve subtropikal bölgelerde, karstik boksitler ise karbonat platformlarında gelişmektedir. Türkiye'deki boksit yataklarının büyük kısmı karstik kökenlidir ve özellikle Toros Kuşağı'nda yoğunlaşmıştır. Isparta bölgesi de bu kapsamda değerlendirilebilir ve gelecekte yapılacak detaylı jeokimyasal ve mineralojik çalışmalarla ekonomik potansiyeli daha iyi anlaşılabilir.

Boksit, başta alüminyum olmak üzere çeşitli metallerin üretiminde kullanılan stratejik bir cevher olup, dünya ekonomisinde önemli bir yer tutmaktadır. Küresel ölçekte, mevcut boksit rezervlerinin uzun yıllar boyunca dünya çapındaki talebi karşılayabilecek kapasitede olduğu bilinmektedir. Boksit yatakları genellikle yüzeye yakın konumlanmış olup, çoğunlukla 0–2 metre derinlikte bulunmaktadır. Bu nedenle, dünya genelindeki boksit yataklarının yaklaşık %80'inde açık ocak madenciliği yöntemi uygulanmaktadır (USGS, 2023).

Isparta ili sınırlarında, Şarkikaraağaç ile Yalvaç ilçeleri arasında yer alan alandaki laterit oluşumlarında mineralojik açıdan böhmite, hematit, götit, dijaspor, anataz, manyetit, kuvars ve kaolinit gibi mineraller belirlenmiştir. Bu lateritlerin kimyasal bileşimleri incelendiğinde başlıca bileşenlerin Al_2O_3 , Fe_2O_3 , SiO_2 ve TiO_2 olduğu görülmektedir. Bölgede toplanan boksit örneklerinin analiz sonuçlarına göre %43 Al_2O_3 ,

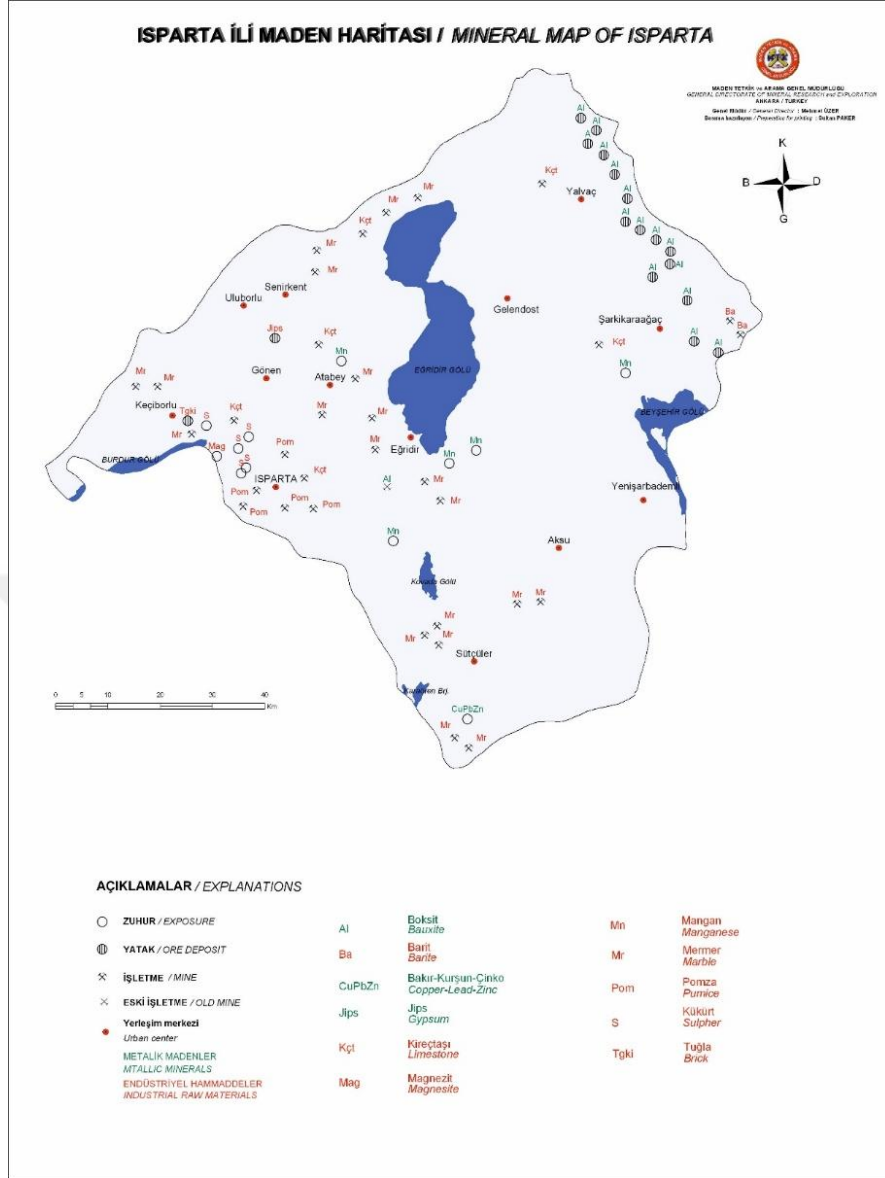
%29 toplam demir oksit (Fe oksitleri) ve %10 SiO₂ içerikleri tespit edilmiştir. Lateritik kuşağın oluşumu, Geç Jura dönemindeki tropikal iklim koşulları altında (20°C'nin üzerindeki sıcaklıklarla birlikte mevsimsel yağış döngüsü) gerçekleşmiştir. Paleozoyik sonrasında bölgenin penneplenleşmesi ve Geç Jura'da sığ lagüner ortamdan karasal şartlara geçişi, lateritleşme süreçleri için oldukça elverişli bir zemin oluşturmuştur. Lateritlerin ana kayaçların üzerinde konumlanması, oluşum sırasında bölgedeki morfolojinin oldukça düz bir yapıda olduğunu göstermektedir (Öncel ve Söğüt, 2008).

Yapılan çalışmalarda, lateritlerde Al₂O₃ ile Fe₂O₃ arasında belirgin düzeyde negatif bir korelasyon olduğu saptanmıştır. Aynı örnek içinde her iki oksit belirli bir düzeye kadar birlikte artış gösterebilirken, bazı örneklerde yalnızca birinin belirgin bir artış olduğu görülmektedir. Genel olarak bu iki oksidin birbirinden bağımsız davranabildiği ve bu durumun da güçlü bir negatif korelasyona işaret ettiği ifade edilmektedir (Öncel ve Söğüt, 2008).

Isparta ilinde yer alan boksit yatakları MTA haritasında Şekil 4.46'da görülmektedir.

Isparta bölgesinde boksit oluşumu, Üst Kretase yaşlı karbonatlar üzerinde gelişmiş ve lateritik ayrışma süreçleri ile şekillenmiştir. Gerek mineralojik bileşim (diaspor-böhmit-hidroksitler), gerekse yerleşim ortamı (karstik boşluklar) yönünden benzerlikler taşıyan bu alanlar, Türkiye'nin lateritik boksit potansiyelini ortaya koymaktadır. Şarkikaraağaç'taki boksit yatakları, Türkiye'nin diğer rezidüel boksit yataklarıyla benzer jeolojik koşullarda oluşmuştur. Özellikle Akdeniz kuşağındaki Akseki (Antalya), Fethiye ve Milas (Muğla) yörelerindeki karstik boksitlerle litolojik ve mineralojik açıdan paralellik göstermektedir (Karadağ vd. 2003).

Jeokimyasal olarak ise, Şarkikaraağaç boksitleri ile Akseki yöresi boksitleri arasında Al₂O₃ içerikleri bakımından büyük benzerlikler mevcuttur (Al₂O₃ > %50). Ancak Fe₂O₃ içerikleri Şarkikaraağaç'ta nispeten daha düşüktür; bu durum, yatakların ayrışma evresinde demir mobilizasyonunun farklı olmasından kaynaklanabilir (Kadioğlu vd. 2005).



Şekil 4.46: Isparta ili maden haritası (MTA 2022)

Şarkikaraağaç (Bölükler, Feletepe, Çatlıköyü, Dedeçam, Üçkardeşler, Hatibinağıl Tepe) sahalarında %24-35 Al_2O_3 , %14-38 Fe_2O_3 tenörlü, 21.776.000 ton görünür + muhtemel, Bağkonak (Kozluca, Sudere) sahasında %34-37.50 Al_2O_3 tenörlü, 17.247.000 ton görünür ve Yalvaç (Süçüllü, Üzümlü T., Hacı Alabazdağı, Başyurt, Kireli) sahalarında da %34-47 Al_2O_3 tenörlü, 54.502.000 ton görünür rezerv sahip alüminyum yatakları mevcuttur. Ayrıca, Şarkikaraağaç, Bağkonak ve Yalvaç sahalarında ise 101.558.400 ton görünür + muhtemel alüminyum rezervi tespit edilmiştir. Sütçüler-Kızıltepe zuhurunda kromit cevherleri bantlı tipte olup, en düşük %5 ve %36 Cr_2O_3 tenörlüdür. Ekonomik potansiyel arz eden bir zuhur değildir. Yankayaç ve kromit sınırı genellikle ilksel ve tektoniktir. Sütçüler-Karakilise sahasında %3.49 Cu, %0.86 Zn tenörlü, 4.000 ton görünür rezerv mevcuttur (MTA 2022).

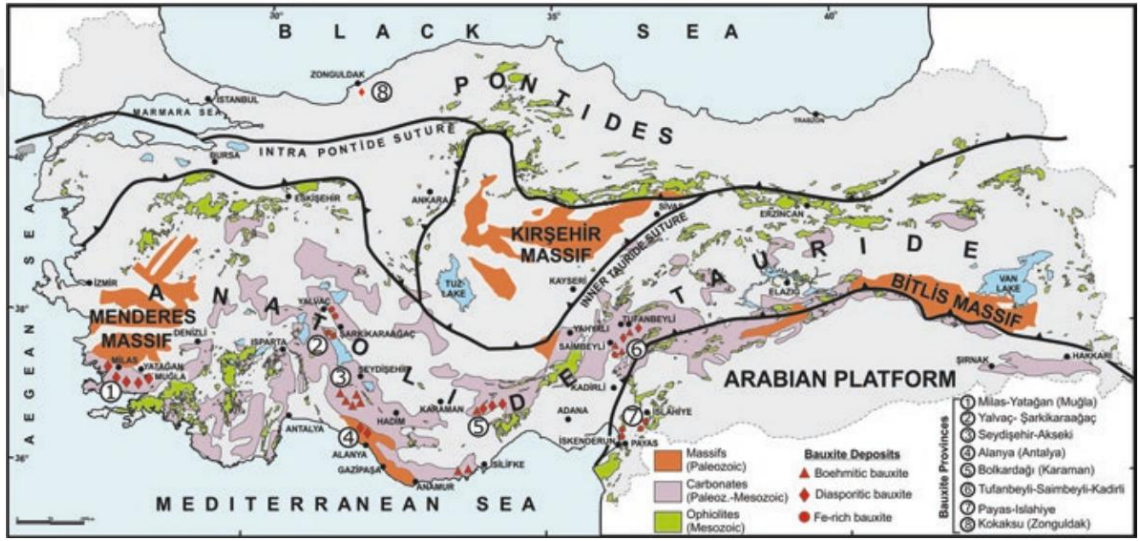
4.8.2. Türkiye’de boksit yatakları

Yalvaç-Şarkikaraağaç (Isparta): Son yıllarda detaylı olarak çalışılan ve bilimsel literatüre giren bu bölgedeki boksit yatakları, yüksek Al_2O_3 içerikleriyle dikkat çekmektedir. Özellikle kırmızı renkli lateritik yapılar, laterit tipi boksit oluşumuna işaret etmektedir (Öncel 1995). Türkiye’deki en büyük boksit rezervlerinden biri Konya’nın Seydişehir ilçesindedir. Bu yatak, 1970’li yıllardan itibaren Eti Alüminyum tesisleri tarafından işletilmeye başlanmıştır. Alüminyum üretimi için ana hammadde kaynağı bu bölgedeki boksitler olmuştur (Özlu 1979). Türkiye’deki boksit yatakları başlıca Akdeniz Bölgesi (Toroslar), İç Anadolu’nun güney kesimleri ve Batı Anadolu’da yer almaktadır. En bilinen yataklar arasında Konya-Seydişehir, Antalya-Akseki, Alanya, Isparta-Yalvaç, Mersin-Gülnar, Muğla-Milas ve Karaman-Ermenek gibi lokaliteler yer almaktadır (Yalçın 2005). Antalya ilinin Akseki ve Alanya ilçeleri boksit açısından zengin bölgeler arasında yer almaktadır. Bu yataklar daha çok böhmit içerikli olup, günümüzde potansiyel araştırmaları devam etmektedir (Yalçın 2005). Türkiye’deki boksit yataklarında en yaygın mineraller gipsit, böhmit ve dijaspor’dur. İzmir ve Muğla bölgelerindeki yataklar, gipsit bakımından zengin olup, daha düşük sıcaklık ve basınç koşullarında oluşmuşlardır. Diğer bölgelerde ise, böhmit ve dijaspor mineralleri daha yaygındır, bu da bu yatakların daha yüksek sıcaklık ve basınç koşullarında oluştuğunu göstermektedir. (Yalçın 2005). Türkiye’nin boksit yatakları, özellikle Batı Anadolu ve Güneydoğu Anadolu bölgelerinde yoğunlaşmıştır. Türkiye’deki başlıca boksit yatakları şunlardır: İzmir, Muğla, Antalya, Isparta, Balıkesir ve Adana illerinde bulunan yataklar olarak bilinmektedir. İzmir ve Muğla illerinde yer alan boksit yatakları, Türkiye’nin en büyük ve en verimli boksit yataklarıdır. Bu bölgelerdeki boksitler, genellikle gipsit minerali bakımından zengindir ve alüminyum oksit içeriği yüksektir. Bu yataklar, Türkiye’nin alüminyum üretimi için önemli bir kaynak teşkil etmektedir (Yalçın 2005). Balıkesir ve Adana illerinde yer alan boksit yatakları ise daha düşük kaliteli boksitlerdir. Ancak bu yataklar, Türkiye’nin toplam boksit üretiminin önemli bir kısmını karşılamaktadır ve yerel alüminyum üretimi için önemlidir (Yalçın 2005). Türkiye’deki boksit yatakları, alüminyum üreticilerine stratejik bir hammadde kaynağı sunarak, yerli sanayinin büyümesine yardımcı olmaktadır. Ayrıca, boksit üretimi, yerel istihdam yaratmakta ve ülkenin dış ticaret açığının kapanmasına katkıda bulunmaktadır (Yalçın 2005).

Türkiye’deki boksit yatakları, genellikle lateritik yataklar olup, tropikal ve subtropikal iklim koşullarının etkisi altında oluşmuştur (Şekil 4.47). Bu yataklar, silikatlı kayaçların kimyasal ayrışması sonucu alüminyum oksit minerallerinin birikmesiyle meydana gelmiştir. Türkiye’deki boksit yataklarının çoğu, alüminyum oksit içeriği bakımından değişkenlik gösterir ve bu, yatakların işlenebilirliğini etkileyen önemli bir faktördür. Türkiye’deki boksit yatakları, lateritik özellikler gösterir. Bu özellik, tropikal iklim koşullarında silikat kayaçlarının uzun süreli kimyasal ayrışmasına dayalı olarak boksit minerallerinin birikmesinden kaynaklanır. Lateritleşme süreci, özellikle alüminyum oksit mineralleri ve demir oksitlerin yoğunlaşmasını sağlamaktadır. (MTA 2018).

Türkiye, dünya boksit üretiminin küçük bir kısmını karşılamakla birlikte, özellikle kaliteli boksit yataklarıyla dikkat çeker. Türkiye’deki boksit yatakları, özellikle Isparta, Eskişehir, Bartın ve Kayseri gibi illerde yoğunlaşmaktadır. Bu yataklar, alüminyum üretimi için gerekli olan boksit hammaddesinin temin edilmesinde önemli bir yer tutar. Türkiye’deki boksit yatakları, yüksek kaliteli alüminyum oksit içerikleri ile verimli bir

şekilde işlenebilir. Türkiye'deki boksit yataklarının ekonomik potansiyeli, büyük ölçüde yatakların büyüklüğüne, alüminyum oksit içeriklerine ve yerel üretim kapasitesine dayanır. Türkiye, alüminyum üretimi için büyük bir iç pazar potansiyeline sahip olup, boksit yataklarının işlenmesi, yerel sanayilerin güçlendirilmesine ve istihdam yaratılmasına katkı sağlamaktadır. Ancak, Türkiye'deki boksit üretimi, dünya genelindeki diğer üreticilere kıyasla daha sınırlıdır ve üretim verimliliği konusunda bazı iyileştirmeler yapılması gerekmektedir (İMİB 2018). Türkiye'deki boksit yatakları, özellikle Isparta ve Eskişehir illerinde yüksek kaliteli alüminyum oksit içerikleriyle bilinir. Türkiye'deki boksit yatakları genellikle gipsit minerali açısından zengindir ve bu, Türkiye'nin boksit üretiminde büyük bir avantaj sağlar. Bununla birlikte, Türkiye'deki bazı yataklarda demir ve silikat içeriği yüksek olup, bu da üretim sürecini zorlaştırabilir. Türkiye'nin boksit yataklarının mineralojik özelliklerinin belirlenmesi, bu yatakların ekonomik potansiyelini artırmak için önemlidir (MYBD 2019).



Şekil 4.47: Türkiyedeki boksit yatakları (Okay ve Tüysüz 1999; Robertson ve Ustaömer 2009; Hanılçı 2019)

Türkiye'nin boksit üretimi, dünya boksit üretiminin küçük bir kısmını oluşturmaktadır olup, ülke ekonomisi açısından önemli bir kaynak teşkil etmektedir. Türkiye'nin alüminyum üreticileri, yerli boksit kaynaklarını kullanarak alüminyum üretimini artırmakta ve dışa bağımlılığı azaltmaktadır. Türkiye'deki boksit üretimi, yerli sanayinin büyümesine ve iş gücü yaratılmasına önemli katkılar sağlamaktadır. Türkiye'nin boksit üretimi, yıllık ortalama 2-3 milyon ton civarındadır. Bu üretim, yerli alüminyum üretimi için önemli bir hammadde kaynağı sağlar. Türkiye'nin en büyük boksit üreticisi, Eti Alüminyum A.Ş.'dir. Eti Alüminyum, Türkiye'nin boksit üretiminin büyük bir kısmını karşılamakta ve alüminyum endüstrisinin gelişimine katkıda bulunmaktadır (MTA 2018).

Çizelge 4.27. Türkiye ve dünya boksit üretimi

Üretim (Milyar ton)	2013	2014	2015	2016	2017
Türkiye	0.795	1.091	1.05	1.3	1
Dünya	296	258	298	282	308
Oran(%)	0.27	0.42	0.35	0.46	0.32

Türkiye’de ise boksit rezervleri daha sınırlı olmakla birlikte, özellikle Seydişehir, Akseki ve Isparta-Yalvaç bölgelerinde ekonomik açıdan önemli yataklar bulunmaktadır (MTA 2018). Türkiye ve dünya genelindeki boksit üretimine ilişkin veriler Çizelge 4.27’de ayrıca Türkiyede’ki boksit yataklarının özellikleri Çizelge 4.28’de sunulmaktadır.

Çizelge 4.28. Türkiyedeki boksit yataklarının özellikleri (Hanılçı, 2019)

Yatak Bölgesi	Konum (Bölge/ İl)	Ana Kaynak Kayaç	Baskın Boksit Minerali	İlave Mineraller / Özellikler
Seydişehir – Akseki	Konya / Antalya	Santonik karbonatlar	Böhmit	Karstik tip; yoğun olarak boksit; düşük metamorfizma seviyesi
Yalvaç – Şarkikaraağaç	Isparta/ Konya	Jura – Kretase karbonatları	Böhmit, Diyaspor	Hem lateritik hem karstik izler; kısmen metamorfik
Milas – Yatağan	Muğla	Metamorfik zonlar	Diyaspor	Yüksek derecede metamorfik karakter; diyasporitik yapı
Bolkardağı (Karaman)	Karaman	Triyas – Jura karbonatları	Diyaspor nadir böhmit	Karstik tip; büyük yatak; orta düzey metamorfizma
Tufanbeyli – Saimbeyli – Kadirli	Adana / Karaman	Perm – Triyas karbonat dizileri	Diyaspor ve Böhmit	Karstik / Lateritik karışımı tipler
Payas – İslahiye	Hatay / Gaziantep	Üst Kretase karbonatları	Diyaspor zengin Demir	Demir-yoğun; hematit, maghemit, berthierine, rutil içerir
Kokaksu (Zonguldak)	Zonguldak	Karbonifer – Alt Kretase karbonatları	Diyaspor, Böhmit	Pontid bölgesi; düşük dereceli boehmitik boksit

Türkiye’de yer alan boksit yatakları, mineralojik çeşitliliği ve jeokimyasal bileşimiyle dikkat çekmektedir. Ülkemizde işletilebilir boksit rezerv toplamı yaklaşık 63 milyon tondur. En yüksek rezerve sahip bölgeler sırasıyla Seydişehir – Akseki (31 milyon ton), Muğla – Milas – Yatağan (17,5 milyon ton) ve Tufanbeyli – Saimbeyli’dir (9,8 milyon ton) olarak bilinmektedir (MTA 2018).

4.8.3. Dünya genelinde boksit yatakları

Dünya boksit yatakları, genellikle tropikal ve subtropikal iklim kuşaklarında yer alır. Bu yataklar, özellikle Batı Afrika, Güneydoğu Asya, Avustralya, Güney Amerika ve bazı Avrupa ülkelerinde yoğunlaşmıştır. Boksit yatakları, çoğunlukla lateritik topraklarla ilişkilidir ve bu yatakların en büyük rezervleri Avustralya, Brezilya, Çin, Hindistan ve Gine gibi ülkelerde bulunmaktadır (USGS 2021).

Avustralya, dünya çapında en büyük boksit üreticisi ve rezervlerine sahip ülkelerden biridir. Avustralya'da, Batı Avustralya ve Kuzey Queensland gibi bölgelerde büyük ölçekli boksit yatakları bulunmaktadır. Avustralya'nın boksit yatakları, yüksek alüminyum oksit içeriğiyle dikkat çeker ve ülkenin alüminyum üretimi için önemli bir kaynak oluşturur. Avustralya, dünya boksit üretiminin yaklaşık %30'unu karşılamaktadır (OECD 2019). Bu ülkenin boksit üretimi, özellikle alüminyum endüstrisinin büyümesine büyük katkı sağlamaktadır. Avustralya'daki boksit yatakları, düşük maliyetli ve verimli işleme özellikleri ile bilinir (USGS 2021).

Brezilya, dünya boksit üretiminde ikinci sırada yer alır ve ülkenin boksit yatakları, özellikle Pará ve Amapá bölgelerinde yoğunlaşmıştır. Brezilya'daki boksit yatakları, özellikle yüksek kaliteli alüminyum oksit mineralleri içerir ve ülkenin alüminyum üretimi için kritik öneme sahiptir. Ülkedeki boksit yatakları, kaliteli alüminyum oksit içeriği ile tanınır ve Brezilya'nın alüminyum üreticilerine stratejik bir kaynak sunar (Lewis and Rosales 2020).

Çin, dünya boksit üretiminde önemli bir oyuncudur ve özellikle güneydeki Guangxi ve Guizhou bölgelerinde büyük boksit rezervlerine sahiptir. Çin, boksit üretiminin yanı sıra, alüminyum üretim kapasitesinde de dünya lideridir. Ancak, Çin'in boksit yatakları genellikle daha düşük kaliteli olup, bu nedenle daha fazla işleme gerektirir.

Gine, Batı Afrika'da yer alan ve dünya boksit rezervlerinin en büyük kısmına sahip olan ülkelerden biridir. Gine'deki boksit yatakları, yüksek kaliteli alüminyum oksit mineralleri içerir ve bu ülke, dünya boksit üretiminde önemli bir paya sahiptir (USGS, 2021). Gine'deki boksit rezervleri, dünyanın en zengin boksit yataklarından biri olarak kabul edilmektedir. Gine, dünya boksit üretiminde önemli bir yer tutmaktadır ve ülkenin boksit rezervleri, uzun vadede küresel alüminyum endüstrisi için büyük bir kaynak potansiyeline sahiptir. Gine'nin boksit üretimi, dünya pazarındaki arz-talep dengesini etkilemektedir (Sidibe ve Yalçın 2019).

Hindistan, dünya boksit üretiminde büyük bir potansiyele sahip bir diğer ülkedir. Hindistan'daki boksit yatakları, genellikle Odisha ve Gujarat bölgelerinde yer alır. Hindistan, boksit üretiminde artış sağlasa da, mevcut yataklar daha düşük alüminyum oksit içeriğine sahiptir ve bu nedenle daha fazla işleme gerektirir (Rao ve Dey 2014).

Küresel ölçekte boksit rezervleri yaklaşık 30 milyar ton olarak tahmin edilmektedir. En büyük boksit rezervlerine sahip ülkeler sırasıyla Gine (7,4 milyar ton), Avustralya (6 milyar ton), Vietnam (3,7 milyar ton), Brezilya (2,6 milyar ton), Jamaika (2 milyar ton), Endonezya (1 milyar ton), Çin (1 milyar ton), Guyana (0,8 milyar ton), Hindistan (0,8 milyar ton) ve Rusya (0,5 milyar ton) olarak sıralanmaktadır (World Mining Data 2022).

5. TARTIŞMA

Türkiye'de özellikle Toros Kuşağı boyunca, Alanya-Gazipaşa, Akseki-Sarıhacılar, Seydişehir-Beyşehir, Isparta-Şarkikaraağaç ve Yalvaç çevresi geçirmiş olduğu jeolojik süreçler bakımından maden yatakları oluşumu için oldukça uygun bir lokasyondur. Bölgede alüminyum, manganez, kurşun-çinko, barit, kuvarsit, kum-çakıl, krom cevherleşmeleri ve mermercilik faaliyetleri görülmektedir (Kursun ve Yalcin 2020; Atakoglu ve Yalcin 2021; Kurşun 2022). Boksit yataklarının karakteristik özellikleri, sadece jeolojik açıdan değil; ekonomik, çevresel ve teknolojik açılardan da çok boyutlu bir öneme sahiptir. Mineralojik ve jeokimyasal kompozisyonu, yatak tipine göre değişmekte; bu durum madencilik ve zenginleştirme süreçlerine yön vermektedir. Özellikle Isparta/Yalvaç boksitleri, yüksek tenörlü, düşük silisli yapıları ile dikkat çekmekte; bölge açısından stratejik bir kaynak potansiyeli sunmaktadır (Öncel 1995).

Isparta/Yalvaç bölgesindeki boksitlerde yaptığı iz element analizlerinde Krom (Cr) ve Vanadyum (V) konsantrasyonlarının yüksek olduğunu belirlemiş; bu durumun boksitlerin ultramafik kayalardan türediğini göstermesi açısından önemli bir gösterge olduğunu vurgulamıştır (Öncel 1995).

Doğankuzu ve Mortaş bölgesinde ortalama Al_2O_3 içeriğinin %52–57, Fe_2O_3 oranının %18 ve SiO_2 oranının %3–7 olduğunu tespit etmiştir. Bu değerler, yüksek tenörlü lateritik boksitlerin varlığına işaret etmektedir (Öztürk vd. 2002). Kırkbaş-Sağırköy boksitlerinde Al_2O_3 (%70,7-33,4), Fe_2O_3 (%21,6-0,18), SiO_2 (%50,8-10,7) şeklinde SiO_2 oranları lateritik boksitlere oranla daha yüksek seyretmektedir.

Çatköy bölgesindeki boksitlerde böhmite ve dijaspor minerallerinin baskın olduğunu, bu mineralojik çeşitliliğin cevherin işlenebilirliğini doğrudan etkilediğini ve farklı sıcaklık-basınç koşullarına bağlı olarak geliştiğini ortaya koymuştur. Majör oksit bileşenleri %54 Al_2O_3 , % 26 Fe_2O_3 , %5 SiO_2 , % 3 TiO_2 şeklindedir. (Yalçın vd. 2025). Mineral içeriği bakımından Kırkbaş-Sağırköy boksitleriyle benzerlik gösterse de majör oksit bileşen yüzdeleri açısından SiO_2 oranları daha yüksek, Fe_2O_3 oranları daha düşüktür.

Sütlegen/Kaş boksitlerinin böhmite, gibsite ve hematite içeriğiyle dikkat çektiğini ve Ce, Ga, Co gibi REE'ler açısından zenginleştiğini belirtmişlerdir (Özer vd. 2019; Atakoğlu ve Yalçın 2021). Kırkbaş-Sağırköy boksitlerinde La, Ce, Eu, Gd, Tb, Er, Tm, Yb, Sc gibi REE'lerin çoğu çok düşük miktarlarda bulunmuş ancak Eu (0,017), Gd (0,016) gibi bazıları anlamlı düzeylerde tespit edilmiştir.

Ayrancı, Bolkardağ Karaman bölgesi boksit yataklarının karstik dolgu şeklinde oluştuğunu ve mineralojik olarak böhmite ve dijaspor fazlarının öne çıktığını belirtmiştir. Bu yapıların, karbonatlı kayalar içindeki dolin ve mağaralara çökme yoluyla geliştiği vurgulanmıştır (Yalçın ve İlhan 2013). Kırkbaş-Sağırköy boksitlerinde XRD sonuçlarına göre ana bileşenler böhmite ve dijaspor olmak üzere Kaolinit ve hematite de bazı örneklerde yüksek oranda yer almaktadır.

Boksit minerallerinin kökenlerinin belirlenmesinde, yatakların yan kayalarla olan ilişkisi önemli bir rol oynamaktadır. Kırkbaş ve Sağırköy yataklarında, boksitlerin kökeni, mineralojik çeşitliliğe ve yan kaya ile kurduğu ilişkiye bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Bu çalışma kapsamında, Isparta ili, Yalvaç ilçesi sınırlarında yer alan Sağır Köy-Kırkbaş Köyü boksitlerinin jeolojik, jeokimyasal ve kökensel özellikleri

detaylı bir şekilde incelenmiştir. Elde edilen bulgular, Türkiye'nin farklı bölgelerindeki ve dünya genelindeki benzer boksit oluşumlarıyla karşılaştırılarak değerlendirilmiştir.

Jeokimyasal analizlerde kullanılan Chemical Index of Alteration (CIA) ve Alümina–Silika Oranı gibi parametreler, boksitleşme derecesinin belirlenmesinde oldukça yaygındır. Muğla ve Aydın bölgesinde yapılan çalışmalarda CIA değerleri genellikle %85'in üzerindedir. Bu değerler, yüksek dereceli bir lateritleşmeye işaret eder ve alüminyum zenginleşmesinin ileri düzeyde olduğunu gösterir. Aynı zamanda, Fe/Al oranları da yatakların oluşum koşulları hakkında bilgi vermektedir. Daha düşük Fe/Al oranı, daha ileri ayrışma evresini ve daha kaliteli boksitleri gösterir (Nesbitt ve Young 1982, Kinaci ve Ozturk 2023).

Isparta/Şarkikaraağaç civarında yapılan analizlerde, özellikle hematit ve götit gibi demir minerallerinin yüksek oranda bulunduğu belirlenmiştir. Bu elementlerin boksit içeriğindeki varlığı, cevherin kalitesini düşürebilmekte, ancak jeokimyasal kökenini anlamada önemli ipuçları sunmaktadır (Öncel ve Söğüt 2008). Sağır Köy-Kırkbaş Köyü numunelerinde yapılan mikroskobik analizler sonucunda boksitlerinde hematit yan kayaçlarda ise götite rastlanılmıştır.

Çalışma alanı ve yakın çevresini temsil eden Sağır Köy-Kırkbaş Köyü (Yalvaç/Isparta) boksitleri Isparta Şarkikaraağaç ve Yalvaç ilçelerinde bulunan diğer yatakların araştırılması sonucunda rezerv miktarının yüksek olduğu düşünülmektedir. Isparta bölgesini temsil eden yataklar incelendiğinde Yalvaç ve Şarkikaraağaç bölgesi yataklarında Paleozoik birimler üzerinde itilme ile yer alan Jura-Kretase yaşlı kireçtaşları arasında bulunmaktadır. Ayrıca boksit seviyeleri, Üst Kambriyen–Alt Ordovisyen yaşlı Seydişehir Formasyonu'na ait kumtaşı, çamurtaşı ve kireçtaşı ardalanmasıyla birlikte, yamaç birikintileri ve çökel kaya birimlerinin yaklaşık 250 metre güneybatısında konumlanmaktadır. Boksit yataklarının oluşumunu açıklamada, yalnızca Al_2O_3 oranları değil, aynı zamanda eşlik eden silis ve demir oksit içerikleri de oldukça belirleyicidir. Sağır Köy-Kırkbaş Köyü (Yalvaç/Isparta) boksitlerinde gözlenen yüksek silis içeriği, yalnızca klasik lateritik ayrışmayla değil, aynı zamanda çökelme ortamındaki litolojik katkılarla da ilişkilendirilebilir.

Isparta'nın kuzey sınırlarında bulunan Kırkbaş ve Sağırköy boksit yatakları, bölgenin jeolojik özellikleriyle bağlantılı olarak önemli maden kaynakları arasında yer almakta fakat daha öncesinde yapılmış çalışma bulunmamaktadır. Bu yataklar, belirli koşullar altında gelişmiş ve farklı oluşum süreçlerine bağlı olarak çeşitlenmiştir. Kırkbaş ve Sağırköy boksit yatakları, aynı zamanda ikincil olarak rezidüel (aşındırma ve çözünme ile şekillenen) boksitlerin de bulunduğu alanlar olup, bölgenin jeolojik yapısı göz önünde bulundurulduğunda, farklı mineralojik özelliklere sahip boksit mineralleri barındırmaktadır. Boksit yataklarının bulunduğu bölgenin jeolojik yapısı, alüminyum oksit minerallerinin oluşumunu destekleyen karmaşık süreçleri yansıtmaktadır. Bu bağlamda, boksit yataklarının büyük çoğunluğunun, lateritik iklim koşullarında gelişen ve alüminyum zenginliği açısından önemli olan laterit kayaçlarıyla ilişkili olduğu bilinmektedir. Bölgedeki jeolojik formasyonlar, büyük ölçüde Mesozoik ve Senozoyik yaşlı kayaçlardan oluşur. Bu kayaçlar, yer kabuğunun evriminde önemli bir rol oynamış olan volkanik ve tortul süreçlerin bir araya gelmesiyle meydana gelmiştir. Özellikle, bölgenin üst kısımlarındaki kayaçlar, yoğun bir kimyasal ayrışma (aşındırma) sürecinden

geçmiş ve alüminyum oksit minerallerinin zenginleşmesine zemin hazırlamıştır. Bu süreç, daha çok tropikal iklimde sıcak ve nemli koşullarda hızlanır.

Buradaki yataklar, uzun süreli deniz ve kara etkileşimlerinin sonucu olarak şekillenmiş olup, suyun ve yerel çevresel faktörlerin etkisiyle boksit minerallerinin yoğunlaştığı alanlardır. Bu yataklar, alüminyum oksit içeriği yüksek ve işletilebilir nitelikteki cevherlerle doludur (Arık 2007). Isparta bölgesindeki boksit yatakları, genel olarak magmatik olaylarla ilişkili hidrotermal etkilerin yanı sıra sedimanter süreçlerle de gelişen yataklar olarak sınıflandırılabilir. Ayrıca, rezidüel yataklar da bölgedeki diğer yataklarla birlikte alüminyum oksit oranlarının yüksekliğiyle dikkat çeker. Bu yatakların oluşumu, özellikle bölgedeki tektonik hareketlerle bağlantılı olarak farklı kayaç türlerinin ve cevher minerallerinin bir araya gelmesiyle şekillenmiştir. Sağırköy ve Kırkbaş köyü boksit yatakları ise daha çok sedimanter süreçlerle gelişen yataklar arasında yer alır.

Yapılan detaylı değerlendirmeler, Sağır Köy-Kırkbaş Köyü sahasındaki boksitlerin, karstik morfolojiye sahip karbonatlı zeminlerde, tropik-sübtropik iklimsel şartlarında lateritleşme süreci sonucunda oluştuğunu ortaya koymaktadır. Bu durum, çoğu Akdeniz ve Balkan coğrafyasındaki karstik boksitlerle benzerlik arz etmektedir.

6. SONUÇLAR

Isparta ili Yalvaç ilçesinde yer alan Sağır Köy ve Kırkbaş Köyü civarındaki boksit sahalarında detaylı jeolojik, mineralojik ve jeokimyasal incelemeler gerçekleştirilmiştir. Çalışma sahasından 30 adet boksit, 30 adet yan kayaç örneği incelenmiştir. Numunelere XRF, XRD, FT-IR, ICP-MS analizleri ve mikroskobik incelemeler (SEM) uygulanarak, boksitlerin kimyasal bileşimleri, mineralojik fazları ve yapısal-morfolojik özellikleri ortaya konmuştur. Elde edilen veriler ışığında, bölgedeki boksitleşme süreçleri değerlendirilmiş; stratigrafi, tektonik yapı ve litoloji ilişkisi çerçevesinde kökensel yorumlar yapılmıştır.

Çalışma alanı, Afyon L25 ve L26 numaralı 1/100.000 ölçekli paftalar ile L26-a1 ve L25-b2 numaralı 1/25.000 ölçekli paftalar içerisinde yer almakta olup, bölgenin genel jeolojik özellikleri bu haritalar üzerinden değerlendirilmiştir. İnceleme alanındaki boksit oluşumları çoğunlukla Jura-Kretase yaşlı platformal kireçtaşları içerisinde yer almakta olup, bu karbonatlar resifal-lagüner ortamlarda çökelmiş, masif ve çatlaklı yapılarıyla karstik boşlukların gelişimine uygun litolojilerdir.

Yapılan gözlemler ve stratigrafik analizler sonucunda, Hacıalabaz formasyonunun karstik zonları içerisinde gelişmiş boksit seviyelerine ulaşılmıştır. Boksit seviyeleri, ayrıca Üst Kambriyen–Alt Ordovisyen yaşlı Seydişehir Formasyonu’na ait sığ denizel karakterli kumtaşı, kireçtaşı ve çamurtaşı ardalanmasının güneybatısında, yamaç birikintileriyle yakın konumda gelişmiştir. Bununla birlikte, Alt-Orta Miyosen yaşlı silttaşı ve çakıltası birimleri, geç Neojen dönemine ait karasal çökeltme ortamlarını yansıtan kırıntılı istifleri temsil etmektedir. Bu birimler, Holosen yaşlı alüvyon ve yamaç molozlarıyla örtülüdür. Holosen çökelleri, güncel akarsu sistemlerine ait, heterojen ve zayıf çimentolu tortulardan oluşmaktadır.

XRD sonuçlarına göre Sağırköy–Kırkbaş Köyü çevresinden alınan boksit örneklerinde başta böhmite ve diaspore olmak üzere, hematit, kaolinit, anataz, ilmenit ve manyetit gibi çeşitli minerallerin yaygın olarak bulunması, bu boksitlerin yüksek derecede lateritik ayrışma süreçlerine maruz kaldığını göstermektedir. Alüminyum hidrat mineralleri lateritik kökenli gelişimi ortaya koyarken, demir oksit/hidroksit ve titan minerallerinin varlığı ise ayrışmanın oksidatif koşullarda gerçekleştiğini ve demir ile titanyum gibi elementlerin selektif olarak zenginleştirildiğini ortaya koymaktadır. Yankayaç örneklerinde belirlenen kuvars, plajiyoklas ve kalsit mineralleri ise, karbonatlı ve silikatlı ana kayaçların ayrışma sürecine katkısını göstermektedir. Bu veriler, çalışma alanındaki boksitlerin karmaşık bir jeokimyasal evrim geçirdiğini ve farklı alterasyon evreleri ile zenginleştiğini ortaya koymaktadır.

ICP-MS sonuçlarına göre boksit örnekleri arasında nadir toprak elementleri (REE) bakımından belirgin farklılıklar gözlemlenmiştir. Özellikle B-7 numunesi, Ce (13,7 ppm) ve Nd (4,0 ppm) içeriğiyle diğer örneklerle kıyasla daha zengin REE düzeylerine sahiptir. B-5 ve B-10 numunelerinde ise REE seviyeleri orta düzeydedir. Genel olarak boksitlerde itriyum içeriği orta seviyelerde seyretmekle birlikte, bazı örneklerde bu elementin daha yüksek değerlere ulaştığı belirlenmiştir. Yan kayaç örnekleri, REE içeriği bakımından boksitlerden daha zengin bir kimyasal bileşime sahiptir. Y-9 numunesi Ce (26,7 ppm) ve Nd (15,0 ppm), Y-30 numunesi ise Ce (18,4 ppm) ve Nd (10,3 ppm) gibi yüksek REE değerleriyle öne çıkmaktadır. Ayrıca yankayaçlardaki Y (itriyum) içerikleri 13,3 ppm ile

10,1 ppm arasında değişmekte olup, bu durum bu kayaların mineralojik çeşitliliğini ve jeokimyasal zenginliğini yansıtmaktadır.

FT-IR analizleri, boksit örneklerinde (B-5, B-11, B-28) belirlenen gibbsit, kaolinit, diyaspör, kuvars ve feldspat varlığının, boksitleşmenin rezidüel ve lateritik karakterde geliştiğini ortaya koymuştur. Özellikle B-28 numunesindeki yoğun gibbsit varlığı, üst zon boksitlerini; B-11 ve diğer örneklerdeki kaolinit ve silikat fazları ise ara ve alt zon özelliklerini yansıtmaktadır. Yankayaç örneği Y-9'da gözlenen belirgin kaolinit ve Si-O titreşimleri, ana kayanın feldspatik volkanik/volkanosedimanter nitelikte olduğunu ve kaolinitleşme ile killeşme süreçlerinin etkili olduğunu göstermektedir. Rezidüel kuvars ve feldspat fazları ise, ana kaya mineralojisinin korunmuş izlerini yansıtmaktadır.

XRF analizleri, Sağır Köy-Kırkbaş Köyü boksitlerinin yüksek Al_2O_3 ve değişken Fe_2O_3 içerikleri ile karakterize, lateritleşme ve rezidüel zenginleşme süreçlerinin etkili olduğu karstik kökenli yataklar olduğunu ortaya koymuştur. Yan kayalardaki yüksek CaO ($CaCO_3$) oranları, karbonatlı ana kayanın çözünmesiyle oluşan karstik boşlukların boksitleşme için uygun ortam sağladığını göstermektedir. Elde edilen veriler, çok değişkenli istatistiksel ve mekansal analizlerle desteklenmiş; boksitlerin kökenine ve bölgesel jeokimyaya dair güçlü çıkarımlar yapılmıştır.

Çalışma kapsamında incelenen dört adet boksit (B5, B11, B19, B28) ve iki adet yan kayaç (Y-11, Y-27) numunesine ait SEM görüntü analizleri, bölgedeki boksitleşme sürecinin mineralojik düzeyde karmaşık ve çok evreli bir gelişim gösterdiğini ortaya koymuştur. Boksit örneklerinde gözlemlenen diyaspör, böhmite ve gibsite gibi alüminyum oksihidroksit mineralleri, farklı derecelerde alterasyona uğramış zonların varlığına işaret ederken; eşlik eden hematit, kuvars, kil-kuvars karışımları ve yer yer rutil-anataz dönüşümleri, hem primer hem de sekonder minerallerin ortak etkisini göstermektedir. Özellikle hematit ve götit gibi demir oksitlerin saçınımlı ya da matriks içi dağılımı, redoks koşullarının zamansal değişkenliğine işaret etmektedir. Yan kayaç örneklerinde ise kalsit, kuvars ve kil minerallerinin varlığı, boksitleşme öncesi karbonatlı ve silisik litolojilerin etkisini yansıtmaktadır. Y-27 numunesinde gözlenen götit-hematit dönüşümleri ve F_2O_3 zenginleşmeleri, yoğun oksidatif alterasyon süreçlerinin etkinliğini desteklemektedir. SEM analizleri, genel olarak, karstik zemin koşullarında gelişen, lateritik ve hidrotermal etkilerle çeşitlenmiş bir boksitleşme mekanizmasına işaret etmekte; örneklerin mineralojik bileşimi üzerinden oluşum koşulları, alterasyon süreçleri ve zonlanma karakteristiklerinin yorumlanmasına olanak sağlamaktadır.

Yapılan istatistiksel analizler doğrultusunda incelenen boksit örneklerinin XRF analiz sonuçlarına göre, Al_2O_3 içeriği ortalama %48,37 ile ekonomik tenörün üzerinde değerlere ulaşmaktadır. Bu oran, dünya genelinde ekonomik olarak işletilen boksit yataklarında gözlenen %35–60 Al_2O_3 aralığıyla uyumludur.

Çalışmada elde edilen verilere göre, boksit örneklerinde Fe_2O_3 içeriği ortalama %8,88 düzeyinde olup, bazı örneklerde bu oran %21'e kadar ulaşmaktadır. Demir oksitlerin bu düzeydeki varlığı, bölgedeki boksitleşme sürecinde Fe'nin ikincil bir zenginleşme ürünü olarak rol oynadığını göstermektedir. Özellikle yüksek Fe_2O_3 içeriğine sahip örnekler, yer yer demir açısından zenginleşmiş, ferritik ya da hematitik karakterli boksitlerin gelişmiş olabileceğini düşündürmektedir. Bu durum, sadece

alüminyum değil, aynı zamanda demir oksitlerin de çökelme ve taşınım süreçlerine dahil olduğu karmaşık bir boksit oluşumunu işaret etmektedir.

Demir oksit oranındaki bu değişkenlik, bölgedeki boksit yataklarının oluşumunda tek bir jeokimyasal sürecin değil, birden fazla evreden oluşan çok yönlü bir gelişimin etkili olduğunu ortaya koymaktadır. Bu çerçevede, Yalvaç çevresinde gözlemlenen boksit oluşumlarının, karstik zemin koşullarında rezidüel olarak gelişmiş, ancak bazı noktalarda lateritik etkilerle modifiye olmuş polijenetik özellikler taşıdığı anlaşılmaktadır. Aynı zamanda, demirin belirli alanlarda yoğunlaşması, bu elementin yataklanma sürecinde etkili bir faktör olduğunu ve mineralojik dağılımın da bu doğrultuda şekillendiğini göstermektedir. Bu bulgular, jeokimyasal analiz sonuçlarıyla birlikte değerlendirildiğinde, bölgede çok evreli bir boksitleşme geçmişinin söz konusu olduğunu ortaya koymaktadır.

SiO₂ içeriği ortalama %33 olup, bazı örneklerde %50'nin üzerine çıkmaktadır. Silis oranındaki bu yüksek değerler, bölgedeki boksitleşmenin tek tip bir süreçle sınırlı kalmadığını ve özellikle kaolinitik fazların yoğun olduğu, silisce zenginleşmiş boksitlerin varlığını işaret etmektedir. Özellikle %50'nin üzerindeki SiO₂ konsantrasyonları, boksitleşme sürecinde kil minerallerinin (örneğin kaolinit) baskın olarak bulunduğunu ve boksitlerin gelişiminde artık silikat fazlarının önemli ölçüde korunduğunu göstermektedir. TiO₂ oranı %2,54 ortalamaıyla, Türkiye'deki diğer karst boksitlerine kıyasla yüksek sayılabilir. Titanyum özellikle anataz ve rutil mineralleriyle ilişkilidir ve genellikle konsantrasyonun artışı, yoğun lateritleşmeye ve kalıntı tortul süreçlere işaret eder.

Kalsiyum (CaO) ve magnezyum (MgO) içeriği düşük olup, ortalama sırasıyla %0,37 ve %0,64 seviyesindedir. Bu durum, karbonatlı ana kaya olan kireçtaşının büyük ölçüde çözüldüğünü ve artık materyal olarak Al, Fe, Ti ve Si bakımından zenginleşen bir horizonun oluştuğunu göstermektedir. Bu özellik, karstlaşma süreçlerinin ve rezidüel (kalıntı) oluşumların önemini ortaya koyar.

SPSS tabanlı istatistiksel analizler sonucunda, Al₂O₃ ile SiO₂ arasında düşük düzeyde pozitif bir korelasyon ($r = 0,583$) tespit edilmiştir. Bu bulgu, genellikle birbirine zıt davranış sergileyen alümina ve silis bileşenlerinin, çalışılan örneklerde tamamen ayrışmamış bir mineralojik birliktelik içerisinde bulunduğuna işaret etmektedir. Alümina, boksitleşme sürecinde başlıca bir zenginleşme ürünü olarak kabul edilirken, silis çoğunlukla ayrışma sonucunda uzaklaştırılan bir faz olarak değerlendirilir. Ancak bu pozitif korelasyon, bazı örneklerde alümina ile birlikte kil minerallerinin (özellikle kaolinit) de yoğunlaştığını düşündürmektedir.

Bu çalışmada XRF verilerine dayalı olarak gerçekleştirilen regresyon ve varyans analizleri, elementler arasındaki istatistiksel ilişkilerin, sahadaki jeolojik süreçlerle doğrudan bağlantılı olarak değerlendirilebileceğini ortaya koymuştur. Özellikle Al₂O₃–CaO arasında gözlenen ters yönlü ilişki, bölgedeki lateritik ayrışma sürecinin karakteristik bir göstergesi niteliğindedir. Bu bağlamda, CaO'nun mobilize olurken Al₂O₃'ün sabit fazda kalıp zenginleştiği yorumu yapılabilir. Alınan $R^2 \approx 0.838$ değeri, bu ilişkinin yüksek derecede anlamlı ve güvenilir şekilde açıklanabildiğini göstermektedir. TiO₂–Cr₂O₃ ve TiO₂–Nb çiftleri üzerine yapılan değerlendirmeler, ayrışmaya karşı dirençli ağır minerallerin özellikle ilmenit, rutil ve kromit gibi benzer çevresel koşullarda

taşındığını ve aynı çökelme süreçlerine maruz kaldığını düşündürmektedir. Bu tür bir korelasyon, ağır mineral gruplarının jeolojik süreçler boyunca birlikte hareket etme eğiliminde olduğunu ortaya koymaktadır. Benzer şekilde, Sn–Zr ilişkisi de, bu iki elementin kasiterit ve zirkon gibi dayanıklı mineral fazlarla bağlantılı olarak eş zamanlı taşındığını ve çökelme sırasında benzer davranış sergilediğini göstermektedir. Bu durum, bölgedeki jeokimyasal ayrışma ürünlerinin mineralojik olarak da izlenebilirliğine işaret etmektedir. Nadir toprak elementleri açısından değerlendirildiğinde, Eu–Tb arasında elde edilen $R^2 \approx 0.819$ değeri, bu elementlerin benzer jeokimyasal davranışlar sergilediğini ve çoğunlukla aynı mineral fazlar içerisinde birlikte bulunabildiğini göstermektedir. Bu durum, REE’lerin çökelme ve ayrışma süreçlerinde ortak bir evrimsel rota izlediğini desteklemektedir.

Sonuç olarak, gerçekleştirilen istatistiksel analizler, elementler arası ilişkilerin sadece matematiksel korelasyonlarla sınırlı kalmayıp, aynı zamanda bölgenin jeolojik geçmişine ve boksitleşme mekanizmalarına dair önemli ipuçları sunduğunu ortaya koymuştur. Al_2O_3 –CaO, TiO_2 – Cr_2O_3 ve Sn–Zr modelleri, bölgedeki ayrışma, taşıma ve çökelme süreçlerinin anlaşılması açısından oldukça değerlidir. Bu bağlamda, elde edilen yüksek korelasyon ve determinasyon katsayıları, sahadaki jeokimyasal süreçlerin modellenmesi açısından güvenilir bir temel sunmakta olup, boksit yataklarının kökenine ilişkin yorumları destekleyen nitelikte bilimsel veriler sağlamaktadır.

Yalvaç bölgesindeki boksitlerin Al_2O_3 , SiO_2 oranı dikkate alındığında, şu şekilde yorumlanabilir. Ana kaya muhtemelen feldspatça zengin bir kayadır (örneğin, gnays). Bu kayaç, yüzeyde lateritik ayrışmaya uğrayarak ve Al zenginleşmiş, ancak silis tam olarak uzaklaştırılamamıştır. Ayrışma ürünleri, karstik kireçtaşları içindeki boşluklara taşınmıştır. Taşınma sırasında hem Al hem de Si taşıyan mineraller ortamda kalarak, Al_2O_3 bakımından zengin, fakat silis oranı da yüksek bir taşınmış karstik boksit yatağı oluşmuştur.

Hacılabaz formasyonunun kireçtaşı seviyeleri içerisinde yer alan bazalt ara tabakaları ile dayk/sill tipi magmatik sokulumlar, bu bazaltların daha sonra yüzeye çıkmasına ve ayrışmaya uğramasına olanak tanımıştır. Boksitlerin jenezi, yüksek Al_2O_3 içeriği barındırabilen feldispatlar (plajiyoklaz) ile mafik mineraller (piroksen, amfibol) içeren mafik bileşimli bazaltlardan oluştuğu düşünülmektedir.

Elde edilen bulgular, bölgedeki boksit oluşumlarının yalnızca lateritik ayrışma değil, aynı zamanda mineralojik bileşim yönünden zenginleşme ve çok evreli alterasyon süreçlerinin bir sonucu olduğunu ortaya koymaktadır. Bu taşınım sürecinde, özellikle karstik alanlarda gelişen boşlukların, taşınan malzemenin birikimi için elverişli ortamlar sunduğu anlaşılmaktadır. Zamanla bu ortamlarda biriken lateritik materyaller, hem birincil birikim süreçlerinin hem de bölgesel metamorfizmanın etkisiyle kimyasal ve mineralojik açıdan değişime uğrayarak, kaolinitik ve boksitik karakter kazanan, karstik kökenli bir boksit tipi meydana getirmiştir.

7. KAYNAKLAR

- Aleva, G.J.J. 1994. Laterite and Lateritic Weathering. Lecture Notes in Earth Sciences, Vol. 6, Springer.
- Ali, A., Chiang, Y.W., Santos, R. 2021. X-Ray Diffraction Techniques for Mineral Characterization: A Review for Engineers of the Fundamentals, Applications, and Research Directions. doi: 10.20944/preprints202112.0438.v1.
- Alotaibi, B. S., Saleem, U., Farrukh, M., Waseem, S., Chauhdary, Z., Alsharif, I., Alqahtani, W. S., Alanzi, A. R., BinMowyna, M. N., Shah, M. A., et al. 2024. Chamuangone-rich rice bran oil ameliorates neurodegeneration in AlCl₃/D-galactose model via modulation of behavioral, biochemical, and neurochemical parameters. *Frontiers in Nutrition*, 11, 1351282. doi: 10.3389/fnut.2024.1351282
- Altıkulaç, A. 2022. Investigation of radiological and chemical contents of bauxite ore extracted in Turkey. *ACS omega*, 7(44), 39917-39923.
- Alpar, R. 2020. Uygulamalı istatistik ve geçerlik - güvenirlik. Detay Yayıncılık.
- Alpar, R. 2021. Uygulamalı Çok Değişkenli İstatistiksel Yöntemler (6. baskı). Ankara: Detay Yayıncılık.
- Andrew, T. and Robertson, A. H. F. 2002. The Beyşehir-Hoyran-Hadim Nappes: Genesis and emplacement of Mesozoic marginal and oceanic units of the northern Neotethys in southern Turkey. *Journal of the Geological Society*, 159(5), 529-543. doi: 10.1144/0016-764901-157
- Arık, F. 2007. *Yerbilimleri Dergisi* (2006, Sayı 27 (2) 63-85)'nde yayımlanmış olan "Çatmakaya (Seydişehir-Türkiye) boksit yatağının kökenine jeostatistiksel ve jeokimyasal bir yaklaşım" başlıklı (M. M. Karadağ, F. Arık ve A. Öztürk) yazıya ilişkin tartışmaya yanıt. *Yerbilimleri Dergisi*.
- Ashkenazi, D. 2021. How aluminum changed the world: A metallurgical revolution through technological and cultural perspectives. *Journal of Materials Research and Technology*, 15, 1144–1156. doi: 10.1016/j.jmrt.2021.08.001
- Atakoğlu, Ö. Ö., Yalcin, M. G. 2021. Geochemical characterization of the Sutlegen bauxite deposit, SW Antalya. *Mining of Mineral Deposits*, 15(3), 108-121. doi:10.33271/mining15.03.108
- Atakoğlu, Ö. Ö., & Yalcin, M. G. 2021. Explanation of the Sutlegen bauxites to some REE contents by statistical approach and inequality expressions. *Gazi University Journal of Science Part A: Engineering and Innovation*, 8(4), 391-401.
- Aquino, T., Riella, H., Bernardin, A. 2011. Mineralogical and Physical–Chemical Characterization of a Bauxite Ore from Lages, Santa Catarina, Brazil, for Refractory Production. *Mineral Processing & Extractive Metallurgy Review*. 32. 137-149. doi: 10.1080/08827508.2010.531069.
- Azapagic, A. 2004. Developing a framework for sustainable development indicators for the mining and minerals industry. *Journal of Cleaner Production*, 12(6), 639–662. doi: 10.1016/S0959-6526(03)00075-1
- Balcı, V., 2011. Maden Tetkik Arama Genel Müdürlüğü, 1/100.000 ölçekli Türkiye Jeoloji Haritaları, Afyon-L25 Paftası, No:162, Ankara.

- Bardossy, G. 1982. Karst Bauxite Deposits, Elsevier Science Publishers.
- Bardossy, G., and Aleva, G. J. J., 1990, Lateritic Bauxites, *Development in Economic Geology*, 27, 624.
- Batur, B. 2020. Yalvaç-Gelendost (Isparta) Havzası Su Kaynaklarının Hidrojeokimyası Ve Sağlık Risk Değerlendirmesi. Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 131 s., Isparta (yayımlanmamış).
- Beauvais, A., Colin, F. 1993. Formation and transformation processes of iron duricrust systems in tropical humid environment. *Chemical Geology*, 106(1-2), 77-101.
- Becker, J. S. 2007. Inorganic Mass Spectrometry: Principles and Applications. John Wiley & Sons.
- Betha, S.K. 2023. Design and Implementation of an Industrial IoT Gateway using Raspberry Pi and Open Source Frameworks. *International Journal of Industrial Informatics*.
- Bing X., Qiugen L., Siyao H., Xu C., Shuwen L., Zongqi W., Xueyi X., Junlu C., 2017. Contrasting geochemical signatures between Upper Triassic Mo-hosting and barren granitoids in the central segment of the South Qinling orogenic belt, central China: Implications for Mo exploration. *Ore Geology Reviews*, Volume 81, Part 2, Pages 518-534. doi: 10.1016/j.oregeorev.2016.06.006
- Bish, D. L., & Post, J. E. 1993. Modern Powder Diffraction. *Reviews in Mineralogy*, Vol. 20. Mineralogical Society of America.
- Blumenthal, M. 1947. Seydişehir-Beyşehir hinterlandındaki Toros Dağlarının Jeolojisi, *Maden Tetkik ve Arama yayını*, Seri D, No: 2, s. 242.
- Bozkurt, E. and Satır, M. 2000. The southern Menderes Massif (western Turkey): geochronology and exhumation history. *Geological Journal*, 35(3-4), 285–296.
- Bragg, W. H., & Bragg, W. L. 1913. The reflection of X-rays by crystals. *Proceedings of the Royal Society A*, 88(605), 428-438. doi: 10.1098/rspa.1913.0040
- Brimhall, G. H., Dietrich, W. E. 1987. Constitutive mass balance relations between chemical composition, volume, density, porosity, and strain in metasomatic hydrochemical systems: Results on weathering and pedogenesis. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 51(3), 567-587.
- Büyüköztürk, Ş. 2016. Sosyal bilimler için veri analizi el kitabı: İstatistik, araştırma deseni, SPSS uygulamaları ve yorum (22. baskı). Pegem Akademi.
- Cengiz, O., Deniz, A. S., & Kıray, D. 2025. Alt Paleozoyik Yaşlı Sultandede Metasedimanter Kayaçların Jeokimyası, Kökeni ve Tektonik Yerleşimi (Dinek, Şarkikaraağaç-Isparta, GB Türkiye). *Black Sea Journal of Engineering and Science*, 8(1), 58-74. doi: 10.34248/bsengineering.1567146
- Cengiz, O. Aydoğan, M.S. Coşkun Önal, B. 2025. Geochemical evidence of the lateritic bauxite deposits in the Sücüllü-Yalvaç region (NE Isparta Angle, southwestern Türkiye) with emphasis on basic source. *Arabian Journal for Science and Engineering (Minör Revision-İncelemede)*
- Cengiz, O. Uzun, A.S., Bekiyev, M. 2020. Yarıkkaya (Yalvaç-Isparta) kömür yatakları ile ilişkili killerin mineralojik ve jeokimyasal özellikleri. Süleyman Demirel

- Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 24 (3), 566-583, doi: 10.19113/sdufenbed.661112.
- Coşkun, B. 2012. Sücüllü (Yalvaç-Isparta) lateritik Fe ve Al oluşumlarının jeolojik, mineralojik ve jeokimyasal özellikleri ve ekonomik potansiyelinin araştırılması. Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, MSc thesis, 92 s. (in Turkish with English abstract).
- Choi, Y. W., Park, G. J., Na, Y. J., Jo, H. Y., Lee, S. A., You, G. R., & Kim, C. 2014. A single Schiff base molecule for recognizing multiple metal ions: A fluorescence sensor for Zn(II) and Al(III) and colorimetric sensor for Fe(II) and Fe(III). *Sensors and Actuators B: Chemical*, 204, 71–80. doi: 10.1016/j.snb.2014.07.034
- Cullity, B. D., & Stock, S. R. 2001. *Elements of X-Ray Diffraction* (3rd ed.). Prentice Hall
- Çakır, S. E., Yalçın, M. G. 2022. Flood Control of Ulupinar Stream (Kemer/Antalya) and Evaluation of Geological Data. *Gazi University Journal of Science Part A: Engineering and Innovation*, 9(4), 537-544. doi: 10.54287/gujisa.1204005
- Davraz, A., Batur, B. 2020. Yalvaç-Gelendost (Isparta) Havzası Su Kaynaklarının Hidrojeokimyası Ve Kullanılabilirlik Özelliklerinin Belirlenmesi. *Mühendislik Bilimleri Ve Tasarım Dergisi*, 8(4), 1072-1085. doi: 10.21923/jesd.775467
- Demirkol, C. 1977. Yalvaç-Akşehir dolayının jeolojisi. Doçentlik Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Fakültesi Yerbilimleri Bölümü, 107s.
- Dhanasekaran, K. T. 2025. A Decision Tree-Based Approach for Classifying and Characterizing the Failure Type of White Goods.
- Dickson, S. P., Haaland, B., Mallinckrodt, C. H., Dubois, B., O’Keefe, P., Morgan, M., Peters, O., Fernández Santana, A., Harrison, J., Schneeberger, A., & Hendrix, S. 2023. “Time Saved” Calculations to Improve Decision-Making in Progressive Disease Studies. *Journal of Biostatistics & Decision Science*, doi: 10.1016/j.jbi.2023.104258
- Dill, Harald. 2001. The geology of aluminum phosphate and sulphates of the alunite group minerals: A review. *Earth-Science Reviews*. 53. 35-93. doi: 10.1016/S0012-8252(00)00035-0.
- Edzwald, J. K. 2019. Aluminum in Drinking Water: Occurrence, Effects, and Control. *Environmental Engineering Science*, 36(4), 341–353. doi: 10.1089/ees.2018.0363
- Eggleton, R.A., Foudoulis, C., & Varkevisser, D. 1987. Weathering of basalt: Changes in rock chemistry and mineralogy. *Clays and Clay Minerals*, 35(3), 161–169.
- Erkahveci, A., & Karaali, A. 1996. Fourier Transform Infrared (FT-IR) Spektroskopisinin gıda analizlerine uygulanması. *GIDA*, 21(5), 337–345.
- Everitt, B. S., Landau, S., Leese, M., & Stahl, D. 2011. *Cluster analysis* (5th ed.). Wiley.
- Exley, C. 2017. Aluminum should now be considered a primary etiological factor in Alzheimer’s disease. *Journal of Alzheimer's Disease Reports*, 1(1), 23–25. doi: 10.3233/ADR-170010
- Faccinnetto-Beltrán, P., Reza-Zaldivar, E. E., Curiel-Pedraza, D. A., Canales-Aguirre, A. A., & Jacobo-Velázquez, D. A. 2021. Docosahexaenoic acid (DHA), vitamin D3,

- and probiotics supplementation improve memory, glial reactivity, and oxidative stress biomarkers in an aluminum-induced cognitive impairment rat model. *Frontiers in Nutrition*, 8, 707711. doi: 10.3389/fnut.2021.707711
- Fang, H., Li, J., Zhang, L., Li, B., Song, J., Lu, X., Niu, Q., & Wang, L. 2022. LncRNA 51A: A promising diagnostic biomarker for assessing cognitive decline in occupationally exposed aluminum workers. *Environmental Research*, 213, 113574. doi: 10.1016/j.envres.2022.113574
- Farmer, V.C. 1974. *The Infrared Spectra of Minerals*. London: Mineralogical Society.
- Faure, G. and Mensing, T.M. 2005. *Isotope Principle and Applications*. 3rd Edition, John Wiley & Sons, Hoboken.
- Field, A. 2013. *Discovering statistics using IBM SPSS statistics* (4th ed.). SAGE Publications.
- Floyd, P.A., and Winchester, J.A., 1978. Identification and discrimination of altered and metamorphosed volcanic rocks using immobile elements. *Chemical Geology*, 21: 291–306.
- Frost, R.L. and Vassallo, A.M. 1996. The Dehydroxylation of the Kaolinite Clay Minerals using Infrared Emission Spectroscopy. *Clays and Clay Minerals*, 44, 635-651. doi: 10.1346/CCMN.1996.0440506
- García-Ávila, F., Encalada-Alvear, T., Alvarez-Altamirano, L. M., Avilés-Añazco, A., Valdiviezo-Gonzalez, L., & Alfaro-Paredes, E. 2023. Human health risk assessment of aluminium in water treated with aluminium-based coagulants in a rural area. *Science of the Total Environment*, 884, 163818. doi: 10.1016/j.scitotenv.2023.163818
- Georgitzikis K., Mancini L., d’Elia E., Vidal-Legaz B. 2021. Sustainability aspects of Bauxite and Aluminium, *Climate change, Environmental, Socio-Economic and Circular Economy considerations*.
- Gerardo, B., Nogueira, J., Pinto, M.C., Almeida, A., Simões, M.R., & Freitas, S. 2023. Trace Elements and Cognitive Function in Adults and Older Adults: A Comprehensive Systematic Review. *Nutrients*, 15(3), 567. doi: 10.3390/nu15030567
- Goldstein, J. I., Newbury, D. E., Joy, D. C., Lyman, C. E., Echlin, P., Lifshin, E., & Michael, J. R. 2003. *Scanning Electron Microscopy and X-ray Microanalysis*. Springer.
- Göncüoğlu, M. C., Turhan, N., Şentürk, K., Özcan, A., Uysal, Ş., & Yalınız, M. K. 2000. A geotraverse across northwestern Turkey: tectonic units and their relation to the Alpine orogen. *Geological Journal*, 35(1), 17–38. doi: 10.1144/GSL.SP.2000.173.01.06
- Griffiths, P. R., & de Haseth, J. A. 2007. *Fourier Transform Infrared Spectrometry*. 2nd ed. John Wiley & Sons.
- Gu, J., Huang, Z., Fan, H., Jin, Z., Yan, Z., Zhang, J. 2013. Mineralogy, geochemistry, and genesis of lateritic bauxite deposits in the Wuchuan-Zheng’an-Daozhen area, Northern Guizhou Province, China. *J. Geochem. Explor.* 130: 44–59.

- Gürbüz, A., Kazancı, N., Hakyemez, H. Y., Leroy, S. A., Roberts, N., Saraç, G., Yücel, T. O. 2021. Geological evolution of a tectonic and climatic transition zone: the Beyşehir-Suğla basin, lake district of Turkey. *International Journal of Earth Sciences*, 110, 1077-1107.
- Gündüz, S. 2023. Machine Learning and Artificial Intelligence in Composite Materials: A Comprehensive Review. *Journal of Materials Science and Engineering*.
- Gündoğan, İ. 2022. Meta-bauxite deposit in the Tavşanlı Zone, NW Turkey: A new locality for gem-quality diaspore formation. *Journal of Asian Earth Sciences*: X, 8, 100114 doi: 10.1016/j.jaesx.2022.100114.
- Hallberg, J. A. 1984. A geochemical aid to igneous rock type identification in deeply weathered terrain. *Journal of Geochemical Exploration*, 20(1), 1–8. doi: 10.1016/0375-6742(84)90085-2
- Hanilçi, N. 2019. Bauxite deposits of Turkey. In *Mineral resources of turkey* (pp. 681-730). Cham: Springer International Publishing. doi: 10.1007/978-3-030-02950-0_15
- Haude, H. 1972. Stratigraphie und tektonik des südliche Sultan Dağ (SW Anatolien). *Zeit. Deutsch. Geol. Ges.*, V. 123, 411-421, Hannover.
- Henderson, P. 1984. *Rare Earth Element Geochemistry*. Elsevier.
- HGM, 2023. Türkiye Mülki İdare Sınırları, <https://www.harita.gov.tr/urun/turkiye-mulki-idare-sinirlari/232> [Son Erişim Tarihi: 23.04.2023].
- Işık, A. 1997. Maşatdağı (Alanya) yöresinin jeolojisi, petrografisi ve yöre boksitlerinin jeokimyası. Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Jeoloji Mühendisliği Anabilim Dalı
- İlhan, S. 2006. Küçükçoraş (Ayrancı-Karaman) Boksit Yataklarının Jeolojisi ve Jeokimyası, Niğde Üniversitesi, Fenbilimleri Ens., Yüksek Lisans Tezi, 96s
- İlhan, S. ve Yalçın M.G. 2007. Küçükçoraş (Ayrancı-Karaman) Boksit Yataklarının Oluşumu, JMO 60. *Türkiye Jeoloji Kurultayı*, Ankara, Turkey, pp.200-203, 2007
- İMİB, 2018. İstanbul Maden İhracatçıları Birliği. *Boksit*.
- İnce, Z., Özer Atakoğlu, Ö., & Yalçın, M. G. 2021. Multivariate and Spatial Statistical Analysis of Geochemical Data of Dolomite: The Case of Industrial Raw Materials' Differentiation. *Montes Taurus Journal of Pure and Applied Mathematics*, vol.3, no.2, 8-28.
- Jenkins, R., & Snyder, R. L. 1996. *Introduction to X-Ray Powder Diffractometry*. Wiley-Interscience. doi: 10.1002/9781118520994
- Jorgenson, M., Sandlos, J. 2020. Dust versus Dust: Aluminum Therapy and Silicosis in the Canadian and Global Mining Industries. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(14), 5138. doi: 10.3390/ijerph17145138
- Kadıoğlu, Y. K., Demirbaş, A., & Karakaya, M. (2005). Geochemistry of karst bauxites from SW Anatolia: Implications for weathering processes. *Journal of Asian Earth Sciences*, 24(4), 545–556.

- Kalaycı, Ş. 2010. SPSS uygulamalı çok değişkenli istatistik teknikleri. Asil Yayın Dağıtım.
- Kansun, G., Yalcin, M. G., & Copuroglu, I. 2010. Bolcardagi bauxite deposits at Ayranci, Karaman, central Turkey. Part 2. Mineralogical and petrographical studies. XIX Congress of the Carpathian-Balkan *Geological Association Thessaloniki*, Greece, 23-26 September, 39(1-2), 177.
- Kara, H. 2023. Mineral Signatures and Trace and Rare Earth Elements Constraints on the Sources of the Doğanşehir Bauxite Deposit (Malatya-Turkey). *Geochemistry International*, 61(13), 1394-1412, doi: 10.1134/S0016702923110058.
- Karadağ, M. M., Arık, F., Öztürk, A., 2006. Çatmakaya (Seydişehir – Türkiye) boksit yatağının kökenine jeostatistiksel ve jeokimyasal bir yaklaşım. *Yerbilimleri*, 27 (2), 63-85.
- Karadağ, M. M., Küpeli, Ş., Arık, F., Ayhan, A., Zedef, V., & Döyen, A. 2009. Rare earth element (REE) geochemistry and genetic implications of the Mortaş bauxite deposit (Seydişehir/Konya–Southern Turkey). *Geochemistry*, 69(2), 143-159. doi: 10.1016/j.chemer.2008.04.005.
- Karadağ, M. M., Temur S., Arık, F. ve Öztürk, A. 2003. Maşatdağı (Alanya-Antalya) diasporitik boksitlerinin dört anabileşen jeokimyası. *Geosound* (42), 35-51.
- Kaufman, L., & Rousseeuw, P. J. 2009. Finding groups in data: An introduction to cluster analysis. Wiley. doi: 10.2307/2532178.
- Khan, H., Javaid, S., Ashraf, W., Siddique, F., Bibi, M., Ahmad, T., Gill, M. S. A., Abrar, A., Alqahtani, F., & Imran, I. 2023. Erqember Mitigates Neurotoxic Effects of Aluminum Chloride in Mice: Phytochemical Insights With Neurobehavioral and In Silico Approaches. *Frontiers in Pharmacology*, 14, 1156743. doi: 10.3389/fphar.2023.1156743
- Kırat, G. 2022. Nadir Toprak Elementleri ve Yatak Türleri, *Euroasia Journal of Mathematics, Engineering, Natural & Medical Sciences International Indexed and Refereed* ISSN 2667-6702, doi: 10.5281/zenodo.7130650.
- Killin, L.O.J., Starr, J.M., Shiue, I.J., & Russ, T.C. (2023). Environmental risk factors for dementia: a systematic review. *Alzheimer's & Dementia*, 19(5), 1234-1254. doi: 10.1002/alz.13032
- Kilicoglu, O., More, C. V., Kara, U., & Davraz, M. 2023. Investigation of the effect of cement type on nuclear shield performance of heavy concrete. *Radiation Physics and Chemistry*, 209, 110954.
- Kinaci, E.H., Ozturk A. 2023. Gemological features of diaspore in Sodra-Milas (Mugla) region. *Front. Earth Sci.* 11:1145674. doi: 10.3389/feart.2023.1145674
- Klein, C. and Dutrow, B. 2007. *The Manual of Mineral Science* (23rd ed.). John Wiley & Sons.
- Klotz, K., Weistenhöfer, W., Neff, F., Hartwig, A., van Thriel, C., & Drexler, H. 2017. The Health Effects of Aluminum Exposure. *International Archives of Occupational and Environmental Health*, 90(8), 625–637. doi: 10.1007/s00420-017-1236-5

- Koçyiğit, A. 1989. Suşehri basin: an active fault wedge basin on the North Anatolian Fault Zone, Turkey. *Tectonophysics*. 167, 13-29.
- KTÜ Merkezi Laboratuvarı X-Işını Kırınım (XRD) Laboratuvarı Bilgileri <https://www.ktu.edu.tr/merlab/x-isini-kirininim-xrd-laboratuvari> [Son erişim tarihi: 25.03.2025].
- Kumar, H., Sarkar, A., Singh, U., Singh, N., Jain, S., & Dutta, A. 2024. Water chemistry and estimation of local geochemical background values of elements in headwater streams of Ken–Betwa catchment of Yamuna River, India. *Environmental Geochemistry and Health*.
- Kurşun, B. 2022. Alanya (Antalya) Baritlerinin Jeolojik Jeokimyasal Ve Kökensele İncelemesi, Akdeniz Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Jeoloji Mühendisliği Anabilim Dalı Doktora Tezi
- Kursun, G. B., Yalcin, M. G. 2020. Origin of barite deposits in dolomite-limestone units Gazipasa Eastern of Antalya. geology, eochemistry, statistics, sulfur isotope composition. *Mining of Mineral Deposits*, 14(1), 62-71. doi:10.33271/mining14.01.062
- Kurtman, F. 1963. Tecer Dağlarının Jeolojisi ve Alacalı Seri Hakkında Müşahadeler, *TJK Bült.*, Ankara, 8 (1-2), 19-26.
- Lewis S. and Rosales J. 2020. Restoration of Forested Lands under Bauxite Mining with Emphasis on Guyana during the First Two Decades of the XXI Century: A Review, University of Guyana, Faculty of Agriculture and Forestry, Georgetown, Guyana. doi: 10.4236/gep.2020.811003
- Lichte, F. E., Meier, A. L., & Crock, J. G. 1987. Determination of the rare-earth elements in geological materials by inductively coupled plasma mass spectrometry. *Analytical Chemistry*, 59(8), 1150–1157.
- Liu, B., Song, L., Zhang, L., Wu, M., Wang, L., Cao, Z., Zhang, B., Xu, S., & Wang, Y. 2020. Prenatal aluminum exposure is associated with increased newborn mitochondrial DNA copy number. *Environment International*, 136, 105446. doi: 10.1016/j.envint.2019.105446
- Mameli, P., Mongelli, G., Oggiano, G., & Dinelli, E. (2007). Geological, geochemical and mineralogical features of some bauxite deposits from Nurra (Western Sardinia, Italy): insights on conditions of formation and parental affinity. *International Journal of Earth Sciences*, 96, 887-902.
- Mazurek, A., Włodarczyk-Stasiak, M. 2024. The Effect of the Addition of Selected Juices on the Content of Aluminum in Tea Infusions and Health Risk Assessment in the Polish Population.
- McGill, R., Tukey, J. W., & Larsen, W. A. (1978). Variations of box plots. *The American Statistician*, 32(1), 12–16. doi: 10.1080/00031305.1978.10479236
- McLenan, S.M., 1989. Rare earth elements in sedimentary rocks: influence of provenance and processes. In: Lipin, B.R., Macky, G.A. (Eds.), *Geochemistry and Mineralogy of Rare Earth Elements*. Mineralogical Society of America, Reviews in Mineralogy, vol. 21, pp. 169–196.
- Mechati B., Bachir L., Lakhdar B., Nathalie F. 2021. Mineralogical and geochemical

- characterization of Three Kaolinitic Clays (Ne Algeria): Comparative Study. *Applied Clay Science*, 206, 106098. doi: 10.21203/rs.3.rs-198012/v1
- Mohammad, F. S., Al Zubaidy, E. A. H., Yacoub, G. F., & Bassioni, G. 2011. Aluminum corrosion in vegetable solutions – A contribution to dietary intake. *Science of the Total Environment*, 409(4), 739–743. doi: 10.1016/j.scitotenv.2010.11.004
- MTA, 2018. Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü. Dünyada ve Türkiye’de Nikel.
- MTA, 2022. Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü Laboratuvar Hizmetleri Kataloğu. Ankara: MTA Yayınları.
- MTA, 2024. Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, Afyon L25, L26 1/100.000 ve Afyon L25-b2, L26-a1 1/25.000 genel jeoloji haritası
- Mutakyahwa, M.K.D & Ikingura, Justinian & Mruma, A.H. 2003. Geology and geochemistry of bauxite deposits in Lushoto District, Usambara Mountains, Tanzania. *Journal of African Earth Sciences*. 36. 357-369. doi: 10.1016/S0899-5362(03)00042-3.
- MYBD, 2019. Jeometalurji, Maden Planlama, Cevher Hazırlama, Madencilik ve Yer Bilimleri Dergisi. <https://www.mtmagaza.com/wp-content/uploads/2019> [Son erişim tarihi: 18.03.2025].
- Nahon, D. 1991. Introduction to the petrology of soils and chemical weathering. *A Wiley Interscience Publication*, 313 p.
- Nesbitt, H.W., Young, G.M. 1982. Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutite. *Nature* 299, 715–717.
- Nieto, J. & Puga, E. & Diaz de F., Antonio & Rodríguez, D. & Gebauer, E. & Jagoutz, E. & Monié, P. 1997. Petrological, geochemical and geochronological constraints on the geodynamic evolution from the Hercynian to Alpine orogeny in the Mulhacén Complex (Betic Cordilleras, Spain). *Cuad. Geodin. Alpina Quat.* 4. 85-86.
- Nyamsari, D. G. Yalcin, M. G. 2017. Statistical analysis and source rock of the Minim-Martap plateau bauxite, *Cameroon. Arabian Journal of Geosciences*, 10, 1-16.
- Nyamsari, D.G. Yalcin, M.G. Wolfson, I. 2020. Alteration, chemical processes, and parent rocks of Haléo-Danielle Plateau bauxite, Adamawa-Cameroon. *Lithology and Mineral Resources*, 231- 243. doi: 10.1134/S0024490220030049
- OECD, 2019. Measuring distortions in international markets: The aluminium value chain, *OECD Trade Policy Papers*, No. 218, OECD Publishing, Paris, doi: 10.1787/c82911ab-en.
- Okay, A. I. 1989. Tectonic units and sutures in the Pontides, northern Turkey. *Geological Society, London, Special Publications*, 45(1), 333–347.
- Okay, A. I., & Tüysüz, O. 1999. Tethyan sutures of northern Turkey. *Geological Society of America Bulletin*, 111(3), 404-417. doi:10.1144/GSL.SP.1999.156.01.22
- Öncel, M. S. 1995. Şarkikaraağaç–Yalvaç (Isparta) Arasının Jeolojisi ve Boksit Zuhurlarının Mineralojik, Petrografik, Jeokimyasal İncelemesi. Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi.

- Öncel, M.S. ve Söğüt, A.R. 2008. Kaletepe Lateritik Boksit Zuhurunun Mineralojik ve Jeokimyasal İncelemesi. *S.Ü. Müh.-Mim. Fak. Dergisi*, c.23, s.4, 2008
- Özdamar, K. 2013. Paket programlar ile istatistiksel veri analizi (9. baskı). Nisan Kitabevi.
- Özer Atakoglu, Ö., Yalcin, M. G., & Ozmen, S. F. 2021. Determination of radiological hazard parameters and radioactivity concentrations in bauxite samples: the case of the Sutlegen Mine Region (Antalya, Turkey). *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 329(2), 701-715.
- Özer Atakoglu, Ö., Yalcin, M. G. 2021. Explanation of the Sutlegen Bauxites to Some REE Contents by Statistical Approach and Inequality Expressions. *Gazi University Journal of Science Part A: Engineering and Innovation*, 8(4), 391-401. doi: 10.54287/gujsa.987102
- Özer, Ö. 2020. Sütleg n Bölgesi (Ka , Antalya) Boksit Yataklarının Jenezi ve Ekonomik  zellikleri, Akdeniz Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Jeoloji M hendisli i Anabilim Dalı Yüksek Lisans Tezi
-  zer,  ., Yalçın, M. G. (2020, November). Correlation of chemical contents of Sutlegen (Antalya) bauxites and regression analysis. In *AIP Conference Proceedings* (Vol. 2293, No. 1). AIP Publishing.
-  zer,  ., Yalçın, F., Nyamsari, D. G., & Yalçın, M. G., 2019. Appraisal of Metal Accumulation in Beach Sand Using Contamination Indices and Multivariate Statistical Analysis. *The 2nd Mediterranean International Conference of PureApplied Mathematics and Related Areas* (pp.1-5). Paris, France
-  zg l, N. 1997. Stratigraphy and tectonic evolution of the Central Taurides. *MTA Bulletin*, 119, 1–15.
-  zl , N. 1979. Akseki - Seydi ehir Boksitlerinin Kökeni Hakkında Yeni Bulgular. *Türkiye Jeoloji Kurumu Bülteni*, 22, 215–226.
-  zl , N. 1983. Trace element contents of karst bauxites and their parent rocks in the Mediterranean belt. *Mineralium Deposita*, 469-476.
-  zt rk, E.M. Dalkılı , H., Ergin, A., Af ar,  .P. 1987. Sultanda ı g neydo usu ile Anamas Da ı dolayının jeolojisi. *Maden Tetkik ve Arama Genel M d rl   Rapor No: 8191* (yayımlanmamış), Ankara
- Öztürk, E.M. Öztürk, Z., Acar,  . ve Ayaro lu, A. 1981.  arkikaraa a  (Isparta) ve dolayının jeolojisi. *Maden Tetkik ve Arama Enstitüsü Rapor No. 7045* (yayımlanmamış), Ankara
- Öztürk, E.M. ve  zt rk, Z. 1989. Bal khisar – Karadilli (Afyon)-Dereköy (Isparta) dolayının jeolojisi. *Maden Tetkik Arama Genel M d rl   Rapor No: 8191* (yayımlanmamış).
- Öztürk, E.M. ve  zt rk, Z. 1989. Bal khisar-Karaadilli (Afyon)-Dereköy (Isparta) dolayının jeolojisi. *Maden Tetkik ve Arama Genel M d rl   Rapor No: 8946* (yayımlanmamış), Ankara
- Öztürk, H., Hein, J.R., & Hanilçi, N. 2002. Genesis of the Do ankuzu and Morta  Bauxite deposits, Taurides, Turkey: separation of Al, Fe, and Mn and implications for

- passive margin metallogeny. *Economic Geology*, 97(5), 1063-1074.
- Öztürk, H., Hanilçi, N., Altuncu, S., Kasapçı, C. 2019. Rare earth element (REE) resources of Turkey: An overview of their characteristics and origin. *Bulletin of the Mineral Research and Exploration*, 159(159), 129-143. doi: 10.19111/bulletinofmre.471205
- Öztürk, H.; Hanilçi, N.; Cansu, Z.; Kasapçı, C. 2021 "Kıta kenarı karbonatlarındaki alkali bazalttan Ti açısından zengin boksit oluşumu, Payas bölgesi, SE Türkiye: Üst Kretase'de deniz seviyesindeki değişime ilişkin çıkarımlar," *Türkiye Yer Bilimleri Dergisi* : Cilt 30: Sayı 1, Makale 7. doi: 10.3906/yer-2006-6
- Panahi, A., Young, G. M., & Rainbird, R. H. 2000. Behavior of trace elements during weathering of granitic rocks. *Chemical Geology*, 170(3–4), 449–470. doi: 10.1016/S0016-7037(99)00420-2
- Parajes, E. 1942. Sandıklı-Dinar-Burdur ve Eğirdir bölgesinde yapılan löveler hakkında rapor. Maden Tetkik ve Arama Enstitüsü Rapor No: 1390, 20s., (yayımlanmamış), Ankara
- Patel, N. 2021. A Decision Tree-Based Approach for Classifying and Characterizing the Failure Type of White Goods. In N. Chaubey, S. Parikh, & K. Amin (Eds.), *Computing Science, Communication and Security: Second International Conference, COMS2 2021, Gujarat, India, February 6–7, 2021, Revised Selected Papers* (pp. 3–14). Springer. doi: 10.1007/978-3-030-76776-1_1
- Patel, V. & Trivedi, R. & Adil, S.H. & Golekar, R. 2013. Geochemical and mineralogical study of bauxite deposit of Mainpat Plateau, Surguja District, Central India. *Arabian Journal of Geosciences*. 7. doi: 10.1007/s12517-013-0999-x.
- Pavia, D. L., Lampman, G. M., Kriz, G. S., & Vyvyan, J. R. 2013. *Introduction to Spectroscopy*. 5th ed. Cengage Learning.
- Pflug, H.D. 1961. Vergleichende Untersuchungen an Bauxiten und Verwandten Lateriten. *Geologische Rundschau*, 50(1), 29–64.
- Pohl, W. L. 2011. *Economic Geology: Principles and Practice: Metals, Minerals, Coal and Hydrocarbons – Introduction to Formation and Sustainable Exploitation of Mineral Deposits*. Wiley-Blackwell.
- Poisson, A. 1977. *Recherches géologiques dans les Taurides occidentales (Turquie)*. Ph.D. Tezi, Université Paris-Sud Orsay.
- Potts, P. J., and West, M. 2008. Portable X-ray fluorescence spectrometry: capabilities for in situ analysis. *Royal Society of Chemistry*. doi: 10.1039/9781847558640
- Pradhan, G. & Tripathy, B. & Ram, D. & Digal, A. & Das, A. 2023. Bauxite Mining Waste Pollution and Its Sustainable Management through Bioremediation. *Geomicrobiology*. 41. 1=10. doi: 10.1080/01490451.2023.2235353.
- Putzolu, F. & Papa, A. & Mondillo, N. & Boni, M. & Balassone, G. & Mormone, A. 2018. Geochemical Characterization of Bauxite Deposits from the Abruzzi Mining District (Italy). *Minerals*. 8. doi: 10.3390/min8070298.
- Rai, R., Jat, D., Mishra, S. K. 2021. Naringenin mitigates aluminum toxicity-induced learning memory impairments and neurodegeneration through amelioration of

- oxidative stress. *Journal of Food Biochemistry*, 45(4), e13691. doi: 10.1111/jfbc.13691
- Ramachandran, V. S. & Beaudoin, J. J. 2001. *Handbook of Analytical Techniques in Concrete Science and Technology*. William Andrew Publishing.
- Rao, N. T., & Dey, J. G. 2014. Geochemical compatibility of the genesis of certain in situ bauxites from East and West Coast India. *Journal of the Geological Society of India*, 84(3), 345–356.
- Redgrove, J., Rodriguez, I., Mahadevan-Bava, S., Exley, C. 2023. Prescription Infant Formulas Are Contaminated with Aluminium. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 20(3), 2275. doi: 10.3390/ijerph20032275
- Reed, S. J. B. 2005. *Electron Microprobe Analysis and Scanning Electron Microscopy in Geology*. Cambridge University Press.
- Retallack, G. 2010. Lateritization and Bauxitization Events. *Economic Geology*. 105. 655-667. doi: 10.2113/gsecongeo.105.3.655.
- Rigaku 2020. NEX CG Energy Dispersive X-ray Fluorescence Spectrometer – User Manual. Rigaku Corporation, Austin, TX, USA.
- Robertson, A. H. F. 2000. Mesozoic–Tertiary tectonic evolution of southwest Turkey. *International Journal of Earth Sciences*, 89(4), 605–631. doi: 10.1144/GSL.SP.2000.173.01.05
- Robertson, A. H. F. and Dixon, J. E. 1984. Aspects of the geological evolution of the eastern Mediterranean. *Geological Society*, London, Special Publications, 17(1), 1–74. doi: 10.1144/GSL.SP.1984.017.01.02
- Robertson AHF, Ustaömer T. 2009. Upper Palaeozoic subduction/accretion processes in the closure of Palaeotethys: evidence from the Chios Melange (E Greece), the Karaburun Melange (W Turkey) and the Teke Dere Unit (Sw Turkey). *Sediment Geol* 201:29–59
- Rollinson, H. R. 1993. Using geochemical data: Evaluation, presentation, interpretation <https://www.sbgeo.org.br/books/Rollinson%201993.pdf> [Son erişim tarihi: 18.03.2025].
- Röntgen, W. C. 1895. On a new kind of rays. *Sitzungsberichte der Würzburger Physik-Medizinischen Gesellschaft*, 137-147.
- Sanajou, S., Yirün, A., Demirel, G., Erkekoğlu, P., Şahin, G., & Baydar, T. 2023. The ameliorative potential of metformin against aluminum-induced neurotoxicity: Insights from in vitro studies. *Environmental Toxicology and Pharmacology*, 101, 104926. doi: 10.1016/j.etap.2023.104926
- Schellman, W. 1986. A new definition of laterite. In: Banerji, P.K. (Ed.), *Lateritisation Processes. Geological Survey of India Memoir*, vol. 120, pp. 11–17
- Schroll, E., & Sauer, D. 1968. Beitrag zur Geochemie von Titan, Chrom, Nickel, Cobalt, Vanadium und Molybdän in bauxitischen Gesteinen und das Problem der stofflichen Herkunft des Aluminiums. *Travaux du ICSOBA*, 83-96.
- Shangguan et al. 2021. Geochemical Characteristics of Early Permian Pyroclastic Rocks

- in the Jimunai Basin, West Junggar, Xinjiang (NW China): Implications for Provenance and Tectonic Setting. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 95(3): 794–809. doi: 10.1111/1755-6724.14412
- Sharma, S. 1996. *Applied Multivariate Techniques*. John Wiley and Sons Inc., New York, 512 p.
- Sidibe, M. 2018. Kindia (Gine, Batı Afrika) Bölgesindeki Boksit Yataklarının Jeolojisi, Jeokimyası ve Kökeni, Akdeniz Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Jeoloji Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans Tezi.
- Sidibe, M., Yalçın, M. G. 2019. Petrography, Mineralogy, Geochemistry and Genesis of the Balaya Bauxite Deposits in Kindia Region, Maritime Guinea, West Africa. *Journal of African Earth Sciences*, 149, 348–366.
- Skoog, D. A., Holler, F. J., & Crouch, S. R. 1998. *Principles of Instrumental Analysis* (5th ed.). Brooks/Cole.
- Smith, B. C. 2018. *Infrared Spectral Interpretation: A Systematic Approach*. CRC Press. Boca Raton, doi: 10.1201/9780203750841
- Smith, L. F. 1994. Public Health Role, Aluminium and Alzheimer's Disease. In: *Proceedings of the Workshop on the Health Effects of Aluminium*, Royal Society of Canada.
- Smith, L. F., Nieboer, E., Gibson, B. L. 1995. Critical assessment of the epidemiologic evidence. In: *Proceedings of the Workshop on the Health Effects of Aluminum*. Royal Society of Canada, Discussion Section.
- Stahl, T., Falk, S., Rohrbeck, A., Georgii, S., Herzog, C., Wiegand, A., Hotz, S., Boschek, B., Zorn, H., & Brunn, H. 2024. Migration of aluminum from food contact materials to food—a health risk for consumers? Part I of III: exposure to aluminum, release of aluminum, tolerable weekly intake (TWI), toxicological effects of aluminum, study design, and methods. *Food and Chemical Toxicology*, 171, 113510.
- Sun, L. & Zhang, S. & Zhang, S. & Liu, J. & Xiao, K. 2019. Geologic characteristics and potential of bauxite in China. *Ore Geology Reviews*. 120. 103278. doi: 10.1016/j.oregeorev.2019.103278.
- Sun, S.S., McDonough, W.F., 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes, vol. 42. *Geological Society*, London, pp. 313–345 Special Publications.
- Soukhaklari, R., Pirsalami, F., Moezi, L., & Moosavi, M. 2025. Curcumin ameliorates aluminum oxide nanoparticle-induced memory deficit by regulating the hippocampal p38 signaling pathway in mice.
- Solak, C., Taslı, K., Özer, S., & Koç, H. 2019. The Madenli (Central Taurides) Upper Cretaceous platform carbonate succession: Benthic foraminiferal biostratigraphy and platform evolution. *Geobios*, 52, 67-83.
- Sverdrup, H. & Ragnarsdottir, K. & Koca, D. 2015. Aluminium for the future: Modelling the global production, market supply, demand, price and long term development of the global reserves. *Resources, Conservation and Recycling*. 103. 139-154. doi: 10.1016/j.resconrec.2015.06.008.

- Şencan, H. 2005. Sosyal ve davranışsal ölçümlerde güvenilirlik ve geçerlilik. Seçkin Yayıncılık.
- Şenel, M. 1997. 1/100000 ölçekli Türkiye Jeoloji Haritaları, J11 - Isparta Paftası. *Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü*, Yayın No: 4.
- Şengör, A.M.C. and Yılmaz, Y. 1981. Tethyan evolution of Turkey: A plate tectonic approach. *Tectonophysics*, 75(3-4), 181–241.
- Tardy, Y. 1997. Petrology of Laterites and Tropical Soils. Balkema.
- Tardy, Y., Roquin, C., & Paquet, H. 1989. Geochemistry of Lateritic Weathering.
- Taylor, S.R., McLennan, S.M. 1981. The composition and evolution of the continental crust: rare earth element evidence from sedimentary rocks. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, 301(1461), 381-399.
- Taylor, S.R., McLennan, S.M. 1985. The Continental Crust: Its Composition and Evolution. Blackwell Scientific Publications.
- Tomperi, J., Juuso, E., Eteläniemi, M., Leiviskä, K. 2022. Drinking water quality monitoring using trend analysis. *Environmental Monitoring and Assessment*, 194(3), 204. doi: 10.1007/s10661-022-09941-3
- Tutmez, B. 2018 Bauxite quality classification by shrinkage methods, *J. Geochem. Explor.* 191, 22–27, 2018.
- Umut, M., 2009. Maden Tetkik Arama Genel Müdürlüğü, 1/100000 ölçekli Türkiye Jeoloji Haritaları, Afyon-L26 Paftası, No:119, Ankara.
- USGS, 2021. Bauxite and Alumina Statistics and Information. United States Geological Survey. Available at: <https://pubs.usgs.gov> [Son erişim tarihi: 01.02.2025].
- USGS, 2023. Mineral Commodity Summaries: Bauxite and Alumina. U.S. Geological Survey.
- Willhite, C. C., Karyakina, N. A., Nordheim, E., Arnold, I., Armstrong, V., Momoli, F., Shilnikova, N. S., Yenugadhati, N., & Krewski, D. 2014. The REACH registration process: A case study of metallic aluminium, aluminium oxide and aluminium hydroxide. *Regulatory Toxicology and Pharmacology*, 70(3), 629–640. doi: 10.1016/j.yrtph.2014.09.005
- Willhite, C.C., Karyakina, N.A., Yokel, R.A., Yenugadhati, N., Wisniewski, T.M., Arnold, I.M.F., Momoli, F., Krewski, D. 2023. Systematic review of potential health risks posed by pharmaceutical, occupational and consumer exposures to metallic and nanoscale aluminum, aluminum oxides, aluminum hydroxide and its soluble salts. *Environmental Health Perspectives*.
- Valeton, I. 1972. Bauxites. Elsevier
- Valeton, I., Beissner, H., & Carvalho, A. 1991. The Tertiary Bauxite Belt on Tectonic Uplift Areas in the Serra da Mantiqueira, South-East Brazil. *Schweizerbart*.
- Valeton, I., & Wilke, F. 1993. Tertiary Bauxites in Subsidence Areas and Associated Laterite Derived Sediments in Northwestern India. Stuttgart: E. Schweizerbart.
- Van Dyke, N., Yenugadhati, N., Birkett, N. J., Lindsay, J., Turner, M. C., Willhite, C. C.,

- & Krewski, D. 2013. Association between aluminum in drinking water and incident Alzheimer's disease in the Canadian Study of Health and Aging cohort. *NeuroToxicology*, 37, 163–170. doi: 10.1016/j.neuro.2013.04.004
- Vasconcelos, P. & Conroy, M. 2003. Geochronology of weathering and landscape evolution, Dugald River valley, NW Queensland, Australia. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 67. 2913-2930. doi: 10.1016/S0016-7037(02)01372-8.
- Yağmurlu, F. 1991. Yalvaç-Yarıkkaya Neojen havzasının stratigrafisi ve depolanma ortamları. *Türkiye Jeoloji Bülteni*, 34, 9-19.
- Yalçın, C., Uras, Y., & İlbeyli, N. 2020. Hayriye (Felahiye-Kayseri) Floritlerinin Nadir Toprak Element (Nte) Jeokimyası. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 9(1), 461-471. doi: /10.28948/ngumuh.604350
- Yalçın, F., Ünal, S., Yalçın, M. G., Aktürk, O., Ocak, S. B., & Ozmen, S. F. 2020. Investigation of the Effect of Hydrothermal Waters on Radionuclide Activity Concentrations in Natural Marble with Multivariate Statistical Analysis. *Symmetry*, 12(8), 1219. doi:10.3390/sym12081219
- Yalcin, F. 2022. Investigation of bauxite module classification using regression analysis and inequality expressions involving them. *Montes Taurus Journal of Pure and Applied Mathematics*, 4(1), 142-148.
- Yalçın, H., Bozkaya, Ö., & Yılmaz, C. 2015. Tekirova (Antalya) Ofiyolit Napı Kayaçlarının Alterasyon Mineralojisi ve Jeokimyası. *Türkiye Jeoloji Bülteni*, 58(1), 63–80.
- Yalçın, H., ve Gültekin, A. H. 2001. Seydişehir (Konya) boksitlerinin mineralojik ve jeokimyasal özellikleri. *Türkiye Jeoloji Bülteni*, 44(1), 1–16.
- Yalçın, M. G. 2005. Türkiye Boksit Yataklarına Yeni Bir Bakış. *40. Yıl Jeoloji Sempozyumu*, Trabzon, Türkiye, 27–30 Eylül 2005, ss. 119–122.
- Yalçın, M.G., Çopuroğlu İ. 2023. Türkiye Toros Dağı Ayrancı'daki Bolkardağı Boksit Yataklarının Jeolojik Özellikleri. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 11(2), 776-793. doi: 10.21923/jesd.1233223
- Yalçın M.G., Çopuroğlu İ., Temur S., Shiderin B. 2025. Geochemical and mineralogical properties of karst types bauxite, Catkoy, Taurus Mountains, Turkey, *Carbonates and Evaporites*, (2025) 40-72 doi: /10.1007/s13146-025-01103-2
- Yalçın, M.G., İlhan, S. 2013. Major and Trace Element Geochemistry of Bauxites of Ayrancı, Karaman, Central Bolkardag, Turkey. *Asian Journal of Chemistry*, 25(5), 120-128.
- Yalcin, M. G., Nyamsari, D. G., Paksu, E., & Yalcin, F. 2016. Statistical assessment of rare earth elements of bauxite deposits of Minim-Martap Plateau, Cameroon. *International Multidisciplinary Scientific GeoConference: Surveying Geology Mining Ecology Management*, 2, 819-825.
- Yünsel, T. Y., Ersoy, A., & Ehsani, A. 2019. X-Işını Difraksiyonu Yöntemi ile Kantitatif Mineral İçeriği Tayini ve Çalışma Şartlarının Etkisi. *Artıbilim: Adana Alparslan Türkeş Bilim ve Teknoloji Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 2(2), 16–28.
- Wipperm, J. 1962 Die Bauxite Des Taurus Und Ihre Tektonische Stellung, Mineral

Research and Exploration Institute of Turkey, Manuscript received February 8.

Zhang, Y. 2014. Mineralogical and geochemical characteristics of the Guigang Salento-type bauxite deposits, western Guangxi, China. *Acta Geodynamica et Geomaterialia*. 1-7. doi: 10.13168/AGG.2014.0014.



ÖZGEÇMİŞ

Sinan Emre ÇAKIR

ÖĞRENİM BİLGİLERİ

Doktora	Akdeniz Üniversitesi
2020-2025	Fen Bilimleri Enstitüsü, Jeoloji Mühendisliği Anabilim Dalı, Antalya
Yüksek Lisans	Akdeniz Üniversitesi
2017-2020	Fen Bilimleri Enstitüsü, Jeoloji Mühendisliği Anabilim Dalı, Antalya
Lisans	Akdeniz Üniversitesi
2009-2014	Mühendislik Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü

MESLEKİ VE İDARİ GÖREVLER

Jeoloji Mühendisi	SEÇ MÜHENDİSLİK - DANIŞMANLIK
2021-Devam Ediyor	Zemin Etüdü ve Geoteknik Etüt, Antalya
Jeoloji Mühendisi	JEORYAPI MÜH. MİM. LTD. ŞTİ.
2017-2018	Zemin Etüdü ve Geoteknik Etüt, Antalya

ESERLER

Uluslararası hakemli dergilerde yayımlanan makaleler

1- Çakır, S. E., & Yalcın, M. G. (2022). Flood Control of Ulupinar Stream (Kemer/Antalya) and Evaluation of Geological Data. Gazi University Journal of Science Part A: Engineering and Innovation, 9(4), 537-544. doi: 10.54287/gujsa.1204005