



Yerbilimleri, 2020, 41 (1), 1-29, DOI:10.17824/yerbilimleri.684511
Hacettepe Üniversitesi Yerbilimleri Uygulama ve Araştırma Merkezi Bülteni
Bulletin of the Earth Sciences Application and Research Centre of Hacettepe University

Geochemical differences between bed and terrace sediments of the Harşit Stream (NE Turkey): Implications for mixed source rocks, weathering and mass transfer

Harşit Çayına ait yatak ve taraça sedimentleri arasındaki kimyasal farklılıklar (KD Türkiye): Karışık kaynak kayalık, ayrışma ve kütle transferi

ÇİĞDEM SAYDAM EKER¹

¹Department of Geology, Engineering and Natural Sciences Fac., Gümüşhane University, 29000 Gümüşhane, Turkey

Geliş (received) : 4 Şubat (February) 2020
Kabul (accepted) : 17 Nisan (April) 2020

ABSTRACT

There are minor geochemical differences between Harşit Stream bed and terrace sediments, and these can be owing to the impacts of climatic differences and chemical weathering rather than source rock composition. The bed sediments have lower average SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, K₂O, TiO₂ and MnO concentrations than terrace sediments, but higher concentrations of MgO, CaO and Na₂O. The rare earth element (REE) distributions, Eu/Eu*, (Gd/Yb)_N, La/Th and (La/Yb)_N ratios of the bed and terrace sediments indicate that they derived from a mixture of 3% granodiorite + 50% gabbro + 47% felsic tuff and 5 % granodiorite + 37% gabbro + 58% felsic tuff, respectively. The CIA, PIA, WIP values and ICV, Rb/Sr ratios indicate that the bed sediments are lowly weathered and terrace sediments are lowly to moderately weathered. The distribution of C-values and Sr/Cu ratios indicate an arid to semiarid climatic conditions for the bed sediments and an arid to semi-moist climatic conditions for terrace sediments. During weathering of the mixed source rocks, Na indicates the greatest loss for the bed and the terrace sediments, and P shows the lowest loss for both of sediments. The average of Si, Al, Na, K and Mn exhibits more loss in bed sediments than terrace sediments, the Fe, Mg, Ca and P exhibits less loss in bed sediments than terrace sediments.

Keywords: NE-Turkey, stream sediment, mixed source, weathering, paleoclimate, mass transfer.

<https://doi.org/10.17824/yerbilimleri.684511>

✉ Çiğdem SAYDAM EKER csaydam@gumushane.edu.tr

¹ Gümüşhane Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fak., Jeoloji Müh. Böl., 29000 Gümüşhane, Türkiye, ORCID 0 532 5863555

ÖZ

Harşit Çayı kanal ve taraça sedimentleri arasında küçük jeokimyasal farklılıklar vardır. Bu farklılıklar kaynak kaya bileşiminden ziyade kimyasal ayrışma ve iklimsel farklılıklardan dolayı meydana gelmiş olabilir. Kanal sedimentleri, taraçaya göre daha düşük SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, K₂O, TiO₂ ve MnO, fakat daha yüksek MgO, CaO ve Na₂O ortalama konsantrasyonuna sahiptir. Kanal ve taraça sedimentlerinin nadir toprak element dağılımları (NTE), Eu/Eu, (Gd/Yb)_N, La/Th ve (La/Yb)_N oranları, bu sedimentlerin sırasıyla %3 granodiyorit + %50 gabro + %47 felsik tuf ve %5 granodiyorit + %37 gabro + %58 felsik tüften türediğini göstermektedir. CIA, PIA, WIP değerleri ve ICV, Rb/Sr oranları kanal sedimentlerinin düşük seviyede, taraça sedimentlerinin ise düşük – orta seviyede kimyasal ayrışmaya uğradığını göstermektedir. C-değerleri ve Sr/Cu oranlarının dağılımı, kanal sedimentleri için kurak – yarı kurak, taraça sedimentleri için kurak – yarı nemli iklim şartlarının hâkim olduğunu göstermektedir. Karışık kaynak kayaların ayrışması sırasında, kanal ve taraça sedimentlerinde en çok kayba uğrayan elementin Na, en az kayba uğrayan elementin ise P olduğu tespit edilmiştir. Kanal sedimentlerinin ortalama Si, Al, Na, K ve Mn elementleri taraçaya göre daha fazla, Fe, Mg, Ca ve P elementleri ise daha az kayba uğramıştır.*

Anahtar kelimeler: KE-Türkiye, dere sedimanı, karışık kaynak, ayrışma, paleoiklim, kütle transferi.

INTRODUCTION

The siliciclastic sedimentary rocks and detrital sediments preserve detailed evidence of the Paleozoic, Mesozoic and Cenozoic tectonic and climatic history of the Gümüşhane and related region. Chemical composition of siliciclastic sedimentary rocks and detritic sediments is controlled by several factors from source rocks composition, erosion, chemical and physical weathering, transport, deposition and diagenesis (Johnsson, 1993; Jian et al., 2013). Because, weathering by chemical and physical alteration of available rocks and minerals forms detrital sediments. Former studies have indicated that the major elements of sediments can be used as determiners of source rock property, tectonic setting, provenance of the sediments changes in the supply of material from different sources (Bhatia, 1983; Taylor and McLennan, 1985; Rosher and Korsch, 1986; 1987; Wronkiewicz and Condie, 1987; McLennan, 1989; McLennan and Taylor, 1991; McLennan, et al., 1993; Roddaz et al., 2011; Armstrong-Altrin, et al., 2017; 2018). Nevertheless, major elements abundances are altered by chemical weathering in the source area (Nesbitt, 1979; McLennan, 1989), and also their compositional variations that

happen during chemical weathering can be performed to evaluate the weathering history of sediments and paleoclimatic conditions (Nesbitt et al., 1980; Nesbitt and Young, 1982; McLennan, et al., 1993; Fedo et al., 1996; 1997; Young, 1999; Jian et al., 2013). The proportion of mafic and felsic contributions to sediments can be differentiated using provenance sensible indicators, like ratios of immobile elements (La, Sc, Co, Th) and Rare Earth Elements (REEs) (Zhou et al., 2017).

Rivers are the main sources of detrital particles delivered to various basins and enforce a major control on the formation of sedimentary rocks. The proficiency of rivers to transport sediment is directed by their flow, gradient, volume and the sediment load itself. Characteristics of a river basin like geology, geomorphology, climate and vegetation are significant factors controlling the composition and amounts of materials carried by rivers (Milliman and Meade, 1983; Kaotekwar et al., 2019). Mineralogical and chemical compositions of river deposits are highly useful in understanding the geochemical cycling of elements and erosional properties of river basins (Martin and Meybeck, 1979; Milliman and Meade, 1983; Kaotekwar et al., 2019). Lithology, diagenesis, weathering and sedimentary sorting of catchment areas control major, trace and rare earth element (REE) compositions of river sediments and so can be used to identify provenance of sediments (Piper, 1974; Alexander and Gibbson, 1977; Condie, 1991; Sensarma et al., 2008; Kessarkar et al., 2010). Terrace sediments overlain on the base of a sequences boundary are widespread in fluvial sediments of a river or stream valley. Nevertheless, terrace sediments are usually ignored because their volume is small to negligible compared with other formations. However, terrace sediments often contain important geological information. Terrace sediments reveal differences of climatic conditions, chemical weathering and source rocks between present day and a few hundreds years ago. The purpose of this study is to compare mixed of source rock compositions, weathering intensity and quantifications of mass transfer values of the Harşit Stream (Gümüşhane, NE Turkey) bed and terrace sediments. The thickness of the terrace sediments ranges from 2 to 6 meters and it has a well-developed terrace system (Saydam Eker, 2017)

GEOLOGICAL SETTING AND CLIMATE

The studied sediments are located in the region Gümüşhane, in the Eastern Pontides, NE Turkey. The Eastern Pontides orogenic belt is commonly subdivided into southern and northern parts that change in terms of rock groups. The southern part is a multi-phase tectonic unit, containing plutonic, volcanic, metamorphic and sedimentary rocks, and the northern part is dominated by Carboniferous to Eocene granitoids and volcanic rocks (Eyuboğlu, 2015). The basement of the north-eastern Pontides contains Lower Carboniferous metamorphic rocks (Topuz et al., 2004) and granitoids of Upper Carboniferous age (Çoğulu, 1975; Topuz et al., 2010; Dokuz, 2011; Kaygusuz et al., 2012;

Kaygusuz et al., 2016). The Early and Middle Jurassic volcanoclastic, sedimentary and volcanic rocks (conglomerates, sandstones, carbonates, gabbros, granites, basalts and rhyolites) lie unconformably on this basement. The Jurassic rocks are conformably overlain by neritic and pelagic carbonates of Upper Jurassic to Middle Cretaceous units. Late Cretaceous rocks are represented by turbidites in the south-eastern Pontides (Saydam Eker and Korkmaz, 2011). Paleocene and Eocene rocks in the Gümüşhane region comprise granite and volcanic (Kaygusuz et al., 2011; Aslan et al., 2014), volcano-sedimentary and sedimentary rocks. This unit is wide in the region and discordantly overlies the elder rocks (Fig. 1).

The basement rocks of the stream basin are composed of Carboniferous plutons. Lower – Middle Jurassic volcanites and volcanoclastic, clastic deposits lie unconformably on the Carboniferous plutons. This unit is overlain by platform carbonates of the Early Jurassic–Lower Cretaceous age. The Upper Cretaceous sedimentary rocks lie conformably on the platform carbonates. Eocene rocks in this basin are composed of andesites and dacites and lie unconformably on the Upper Cretaceous unit (Fig. 2A).

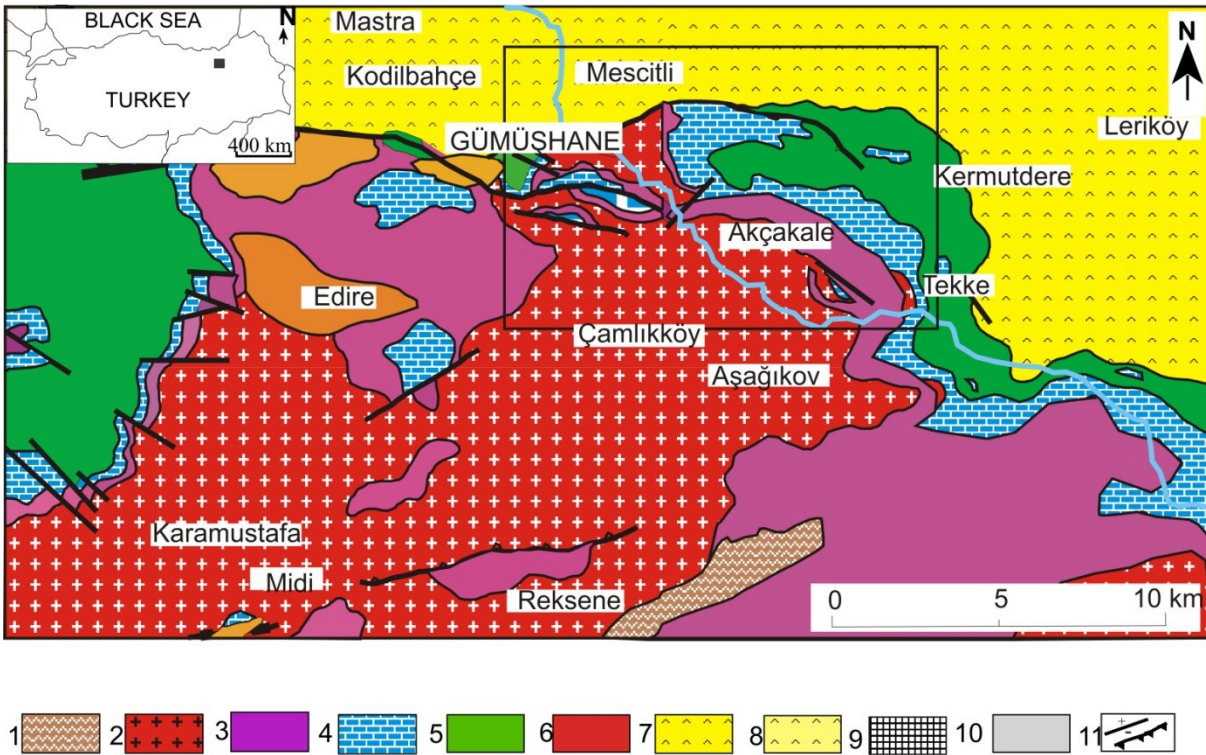


Figure 1. Geological map of Gümüşhane and its vicinity (modified from Güven et al., 1993) and location map of the study area. 1- Paleozoic metamorphic rocks, 2- Paleozoic granitoid, 3- Jurassic volcanic, volcanoclastic and sedimentary rocks, 4- Lower Cretaceous platform carbonates, 5- Upper Cretaceous volcanic and sedimentary rocks, 6- Paleocene granites, 7- Eocene andesites, 8- Eocene dacites, 9- Travertines, 10. Alluviums, 11- Thrust fault and fault.

Şekil 1. A. Gümüşhane ve çevresinin jeolojik haritası (Güven vd., 1993'den değiştirilerek) ve çalışma alanının lokasyon haritası. 1- Paleozoyik metamorfik kayalar, 2- Paleozoyik granitoidi, 3- Jura volkanik, volkanoklastik ve sedimanter kayalar, 4- Alt Kretase platform karbonatları, 5- Üst Kretase volkanik ve sedimanter kayalar, 6- Paleosen granitleri, 7- Eosen andezitleri, 8- Eosen dasitleri, 9- Travertenler, 10- Alüvyonlar, 11- Bindirme fayı ve fay.

Climate at the studied area is essentially moderate. The summer months (June to August) are dominated by the heat (The average temperature is approximately 30°C). Rainy season is seen between March and June, and between September and November. The average annual rainfall in the studied location covers approximately 400 mm. The humidity rises up to 70-88% during rainy season. The average temperature is approximately -1°C in winter months (December to February) (Climate-Data-Org., 2020).

MATERIAL AND METHODS

Sampling and preparation

A total of 49 samples were collected throughout the Harşit Stream (between the Mescitli and Tekke areas), 35 samples for bed sediments and 14 samples for terrace sediments. The sampling locations of collected bed and terrace sediments are displayed in Fig. 2B. The sediment samples were collected in September as representatives of low-flow conditions. The samples of the bed sediments were achieved from the stream bed. The vertical face of the terrace was trenched inward by approximately 45 cm to 50 cm and the 14 samples were obtained from there. The samples were air dried in the laboratory prior to analytical analysis and then homogenized split into sub-samples and crushed to roughly 0.075 mm (200 meshes) size using an agate mill (Saydam Eker, 2017).

Analytical techniques

Major, trace, and REE elements were determined at ACME Analytical Laboratories Ltd., Vancouver, Canada. Major and trace element compositions were measured by inductively coupled plasma (ICP)-emission spectrometry and ICP-mass spectrometry (MS) using 0.2 g of rock powder fused with 1.5 g of LiBO₂ dissolved in 100 ml of 5% HNO₃. Ignition loss was determined on dried samples heated to a temperature of 1000 °C for 15 min. REE analysis was conducted by ICP-MS at ACME. The detection limits are in the range of 0.001 to 0.1 wt. % for major element oxides, 0.1 to 10 ppm for trace elements, and 0.01 to 0.5 ppm for REE. Calibration and verification standards together with reagent blanks were added to sample sequences. STD SO 18 was certified in-house against 38 certified reference materials including CANMET SY-4 and USGS AGV-1, G-2, GSP-2 and W-2 as external standards. The analytical accuracy is better than 4%.

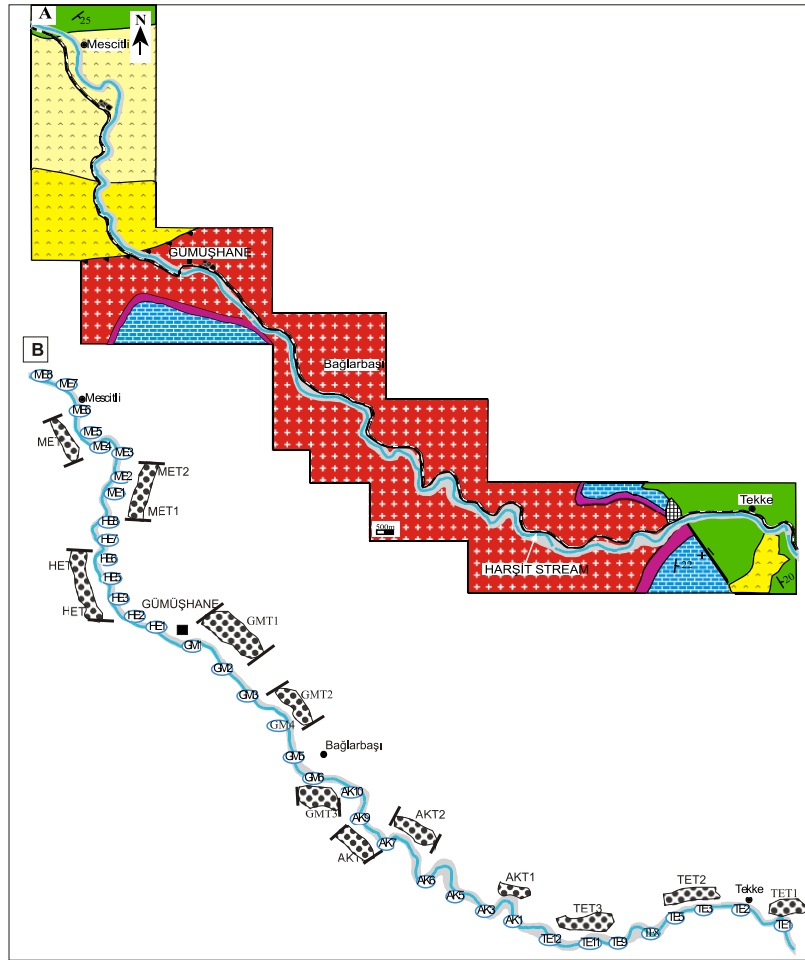


Figure 2. A) Geological map of the study area (Saydam Eker, 2017), B) Sampling sites of stream bed and terrace sediments.

Şekil 2. A) Çalışma alanının jeolojik haritası (Saydam Eker, 2017), B) Kanal ve taraça sedimanları örnekleme yerleri.

In this study, whole rock major element, trace element, and rare earth element (REE) analyses were done on 35 bed sediment samples and 14 terrace sediment samples (Saydam Eker, 2017).

Statistical methods

Distribution of the data is non-normal, so Spearman's correlation coefficient analysis was performed with statistical software SPSS 22.0 for Windows. Data preparation was calculated through Microsoft Office Excel 2013 and a two-tail test ($p < 0.05$ and 0.01) was performed to analyze the variance.

Mixed source composition model

The objective of the modeling is to reach a mass balance among the REEs and Th/Sc ratio, because, REEs and Th/Sc ratio are sensitive to bulk source composition (Taylor and McLennan, 1985; McLennan and Taylor, 1991; Fedo et al., 1997; Schoenborn and Fedo, 2011; Jian et al., 2013). Major, selected trace and rare earth element data of variety

potential sources were gathered and used to model the relative proportions of end members that subscribed sediment to the Harşit Stream in the Gümüşhane region. End-members used in the mixing computation were selected from the distinctive igneous and volcanic rocks in the Gümüşhane area. The end member is a 320 Ma granodiorite exposed in the Gümüşhane region (Topuz et al., 2010), the second end member is a 177 Ma gabbro (Karslı et al., 2017) and the third end-member is a 84 Ma felsic tuffs (Eyuboğlu, 2015).

RESULTS

Geochemical characteristics

The major, selected trace and rare earth element composition of the Harşit bed and terrace sediments are listed in Table 1. The bed sediment samples have lower average SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , K_2O , TiO_2 and MnO concentrations than samples from terrace sediment, but higher concentrations of MgO , CaO and Na_2O (Table 1). When the major, trace and rare earth element components of the bed and terrace sediments are compared upper continental crust (Taylor and McLennan, 1985), the bed sediments are generally enriched in Fe_2O_3 , MgO , CaO , Cu , Sc , V , Gd , Tb , Ho , Yb and Lu , and depleted in Na_2O , K_2O , MnO , Rb , Ba , Th , Zr , Hf , Y , Nb , La , Ce , Pr , Nd , Sm , Eu , Dy , Er and Tm , and almost similar in SiO_2 , Al_2O_3 , TiO_2 , P_2O_5 , Sr , U , Co . The terrace sediments are usually enriched in Fe_2O_3 , MgO , TiO_2 , Cu , Sc , V , Yb and Lu , and depleted in Na_2O , K_2O , P_2O_5 , MnO , Rb , Ba , Th , Zr , Hf , Nb , Ni , La , Ce , Pr , Nd , Sm , Dy , Er and Tm , and nearly similar in SiO_2 , Al_2O_3 , CaO , U , Y , Co , Eu , Gd and Tb (Saydam Eker, 2017).

For the Harşit bed sediments, MgO is positively correlated with CaO , P_2O_5 and TOT/C , but negatively correlated to SiO_2 , Na_2O and K_2O , suggesting the occurrence of Mg in carbonate and apatite. Likewise, CaO is positively correlated to TOT/C and P_2O_5 , but negatively correlated to SiO_2 , Na_2O and K_2O . Fe_2O_3 exhibits a positive correlation with TiO_2 , MnO and Al_2O_3 , but negatively correlated to TOT/C , indicating a primary contribution of mafic minerals. Na_2O and K_2O are positively correlated to SiO_2 , but negatively correlated to TOT/C and P_2O_5 , suggesting the occurrences of Na and K in silicates. In addition to, CIA and PIA demonstrate a positive correlation with SiO_2 , Al_2O_3 , Na_2O and K_2O , but a negative correlation with MgO , CaO and TOT/C . For the terrace sediments, MgO exhibits a positive correlation with CaO , but a negative correlation with SiO_2 and K_2O , suggesting the occurrence of Mg in carbonate. CaO is positively correlated to TOT/C and P_2O_5 , negatively correlated to SiO_2 . Fe_2O_3 is positively correlated to TiO_2 , MnO and Al_2O_3 but negatively correlated to K_2O , indicating a primary contribution of mafic minerals. Na_2O exhibits a positive correlation with SiO_2 and TiO_2 , but a negative correlation with K_2O and TOT/C , suggesting the occurrences of Na in silicates and mafic minerals. K_2O exhibits a negative correlation with Fe_2O_3 , MgO , Na_2O , TiO_2 , P_2O_5 and MnO , but there are no correlation with SiO_2 , Al_2O_3 and TOT/C suggesting the occurrence of K -feldspar. CIA and PIA are positively correlated to K_2O , but negatively correlated to MgO , CaO and TiO_2 (Table 2).

Table 1 Chemical composition (major, some trace and REE from Saydam Eker, 2017) of analyzed samples. *Çizelge 1. Analiz edilen örneklerin kimyasal bileşenleri (ana, bazı iz ve NTE, Saydam Eker, 2017).*

Sample	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	Na ₂ O %	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	MnO	Cr ₂ O ₃	TOT/C
TE1 Bed	59.23	15.45	7.42	3.27	9.12	2.33	2.07	0.79	0.19	0.12	0.004	1.81
TE3	61.85	15.37	6.67	2.89	7.48	2.49	2.29	0.71	0.14	0.11	0.004	1.29
TE4	58.68	15.6	6.95	3.47	9.75	2.56	1.97	0.73	0.16	0.12	0.005	1.68
TE8	59.7	16.88	6.98	3.1	8.06	2.43	1.91	0.69	0.14	0.11	0.004	1.24
TE9	62.94	15.52	6.12	2.6	6.85	2.69	2.4	0.64	0.13	0.11	0.003	1.15
TE11	58.95	16.27	7.12	3.36	9.13	2.33	1.83	0.75	0.16	0.11	0.005	1.58
TE12	60.95	14.92	7.47	2.92	7.98	2.42	2.28	0.79	0.14	0.12	0.005	1.39
AK1	62	14.74	6.16	2.69	8.58	2.48	2.48	0.63	0.13	0.1	0.006	1.88
AK3	60.74	14.32	5.67	3.35	10.4	2.24	2.41	0.62	0.12	0.1	0.007	2.23
AK5	64.55	14.53	6.86	2.33	5.7	2.73	2.41	0.67	0.12	0.11	0.005	0.89
AK6	64.42	14.66	5.09	2.54	7.51	2.65	2.4	0.51	0.12	0.09	0.004	1.32
AK7	58.43	15.27	6.63	3.31	11.3	2.19	1.94	0.7	0.15	0.11	0.006	2.18
AK9	62.89	14.59	6.16	2.74	7.87	2.58	2.28	0.64	0.12	0.11	0.004	1.40
AK10	60.1	14.87	5.98	3	10.8	2.26	2.08	0.61	0.13	0.1	0.005	2.03
GM6	63.63	15.38	5.8	2.57	6.52	2.68	2.62	0.59	0.12	0.1	0.005	1.51
GM5	63.86	15.88	6.39	1.97	4.81	3.07	3.16	0.64	0.12	0.1	0.004	1.16
GM4	66.25	14.35	6.41	1.99	4.64	2.83	2.7	0.62	0.11	0.11	0.005	0.69
GM3	58.17	16.09	6.43	3.46	10.1	2.18	2.53	0.72	0.16	0.13	0.007	2.91
GM2	60.18	15.51	6.14	3.37	9.04	2.34	2.49	0.67	0.15	0.1	0.007	1.96
GM1	61.67	15.11	6.19	3.02	8.03	2.33	2.75	0.65	0.13	0.11	0.007	2.08
HE1	58.29	15.23	5.94	3.4	11.5	2.27	2.47	0.65	0.17	0.11	0.007	2.63
HE2	59.9	15.01	5.83	3.28	10.3	2.32	2.47	0.63	0.16	0.1	0.007	2.31
HE3	63.61	14.5	5.87	2.73	7.34	2.5	2.6	0.6	0.13	0.1	0.005	1.69
HE5	64.89	14.75	5.81	2.55	6.06	2.7	2.44	0.6	0.12	0.1	0.004	1.00
HE6	64.37	15.41	5.66	2.49	6.06	2.62	2.6	0.57	0.12	0.1	0.005	1.05
HE7	56.27	15.45	6.26	3.77	12.8	2.1	2.36	0.69	0.19	0.1	0.007	2.96
HE8	58.48	15.83	6.3	3.43	10.4	2.26	2.34	0.67	0.19	0.11	0.006	2.32
ME1	63.76	15.34	6.63	2.4	5.65	2.65	2.67	0.65	0.13	0.1	0.004	1.02
ME2	65.64	15.26	5.3	2.22	5.29	2.75	2.82	0.51	0.11	0.09	0.003	0.87
ME3	64.84	15.09	5.9	2.33	5.55	2.77	2.76	0.58	0.11	0.09	0.004	0.91
ME4	62.87	14.83	5.77	2.47	7.94	2.66	2.68	0.57	0.12	0.1	0.006	1.52
ME5	61.92	14.62	7.42	2.87	7.35	2.49	2.36	0.73	0.13	0.11	0.006	1.31
ME6	65.37	13.39	7.6	2.35	5.32	2.62	2.4	0.72	0.11	0.11	0.006	0.92
ME7	51.28	11.87	4.9	3.48	23.9	1.9	2.02	0.48	0.11	0.09	0.004	4.73
ME8	58.82	15.61	6.28	3.31	10.5	2.27	2.28	0.67	0.18	0.1	0.007	2.34
Average	54.67	13.42	5.62	2.74	8.32	2.21	2.14	0.58	0.12	0.09	0.005	1.91
Mixed source	61.60	15.35	4.81	3.50	5.71	3.59	1.33	0.42	0.05	0.09		
AKT1 Terrace	65.31	15.32	8.04	1.93	3.51	2.39	2.42	0.8	0.12	0.15	0.006	0.32
AKT2	64.43	18.39	7	1.82	2.49	1.86	3.17	0.58	0.11	0.15	0.006	0.29
AKT3	64.62	16.94	6.67	2.27	3.07	2.27	3.33	0.6	0.11	0.12	0.006	0.54
TET4	67.76	15.2	6.05	1.9	3.03	2.73	2.49	0.63	0.13	0.07	0.004	0.08
TET5	62.75	15.47	6.66	2.13	6.43	2.04	3.48	0.62	0.28	0.13	0.012	4.36
TET6	64.95	14.93	5.99	3.02	5.45	1.68	3.06	0.65	0.12	0.13	0.008	1.44
GMT3	65.97	16.68	6.22	2	2.83	2.77	2.66	0.64	0.12	0.12	0.004	0.04
GMT1	65.11	15.72	6.56	2.64	3.85	2.29	2.96	0.64	0.11	0.13	0.005	0.85
GMT2	64.98	15.05	6.51	2.67	4.56	2.56	2.8	0.64	0.12	0.11	0.004	0.82
HET1	63.58	16.36	7.43	2.36	4.34	2.43	2.48	0.73	0.13	0.15	0.004	0.42
HET2	64.71	15.57	7.19	2.08	4.71	2.31	2.5	0.74	0.11	0.09	0.005	0.81
MET3	56.63	16.91	8.27	3.16	9.91	2.11	1.92	0.72	0.19	0.18	0.003	1.54
MET4	61.92	17.22	7.86	2.66	4.25	2.51	2.33	0.73	0.13	0.37	0.013	0.45
MET5	57.85	17	10.2	3.21	5.67	2.89	1.91	0.93	0.14	0.15	0.002	0.13
Average	58.85	14.98	6.65	2.23	4.21	2.17	2.47	0.64	0.12	0.13	0.006	0.86
Mixed source	63.99	14.59	4.10	2.90	4.70	3.77	1.55	0.38	0.05	0.08		

Table 1 (Continued).
Çizelge 1 (Devam ediyor).

Sample	Sr	Ba	Co	Ni	Cu	V	CIA	PIA	WIP	ICV	C-value	Sr/Cu
TE1	320.7	545	14.1	12.6	36.1	181	47.79	47.43	57.02	2.19	0.24	8.9
TE3	336.7	604	11.8	9.3	36.1	171	48.86	48.65	58.62	1.99	0.21	9.3
TE4	352	493	14.5	11.5	34.3	167	45.28	44.62	60.82	2.30	0.23	10.3
TE8	363.7	500	16.2	11.4	41.7	159	50.30	50.34	55.96	1.91	0.22	8.7
TE9	334.6	631	11.1	9.2	32.3	149	49.51	49.42	59.82	1.86	0.18	10.4
TE11	355.1	482	16.4	11.7	37	169	48.32	48.09	56.04	2.11	0.24	9.6
TE12	320.1	620	11.4	9.3	34.2	194	47.33	46.83	58.61	2.14	0.23	9.4
AK1	270	544	11.2	12.6	25.7	133	46.78	46.12	59.05	2.09	0.20	10.5
AK3	267.6	487	11.4	17	25	116	43.40	42.15	60.11	2.42	0.19	10.7
AK5	270.6	641	11.7	10.4	26.7	174	49.95	49.94	58.66	1.86	0.22	10.1
AK6	278.7	509	10.2	11.3	24	109	46.91	46.29	60.15	1.96	0.17	11.6
AK7	315.7	473	13.6	15.1	33	150	43.83	42.98	57.52	2.41	0.23	9.6
AK9	276.2	515	11.9	12.6	26.8	146	46.51	45.86	59.51	2.09	0.22	10.3
AK10	300.3	461	13.3	13.6	28.3	127	43.13	42.10	58.59	2.35	0.20	10.6
GM6	264.3	540	11.1	12.3	26	122	51.35	51.67	59.10	1.77	0.18	10.2
GM5	233.4	742	10.4	9.5	19.8	140	53.80	54.95	63.25	1.57	0.17	11.8
GM4	251.7	606	10.4	10.1	23.9	158	51.16	51.46	59.66	1.72	0.21	10.5
GM3	264.6	537	12.8	18.9	37.3	121	50.12	50.15	56.05	2.08	0.19	7.1
GM2	264.3	554	12.2	16.1	29	125	47.67	47.21	59.54	2.14	0.19	8.9
GM1	255.2	728	11.3	15.9	42.1	127	49.77	49.72	58.31	2.00	0.16	6.1
HE1	292.3	527	12.2	17.3	35.4	114	44.16	43.09	60.68	2.40	0.18	8.3
HE2	282.2	521	11.7	15.5	32.7	119	45.12	44.19	60.24	2.29	0.18	8.6
HE3	255.2	583	10.3	12	27.5	126	48.79	48.51	58.83	1.98	0.18	9.3
HE5	275.3	574	10.4	9.4	32.4	134	49.75	49.69	59.16	1.85	0.18	8.5
HE6	271.5	586	10.4	10.8	31.4	121	50.98	51.21	59.23	1.75	0.17	8.6
HE7	299.1	494	13	18.3	41.2	120	43.32	42.20	59.98	2.56	0.19	7.3
HE8	330.9	527	13.2	16.5	44.7	129	47.01	46.48	58.23	2.23	0.19	7.4
ME1	289.5	645	12.5	10.6	37.4	153	51.88	52.34	59.21	1.75	0.19	7.7
ME2	281.4	603	10.6	9.6	31.1	112	51.42	51.79	60.92	1.66	0.15	9.0
ME3	279.1	620	10.9	10	32.4	134	50.60	50.74	61.24	1.75	0.18	8.6
ME4	267	596	10.7	10.8	33.5	124	46.35	45.54	62.35	2.01	0.17	8.0
ME5	277.7	737	12.7	11.5	41.3	175	47.82	47.38	59.07	2.10	0.20	6.7
ME6	259	812	11.4	9	35.7	202	49.45	49.31	57.00	1.99	0.21	7.3
ME7	251.9	415	9.7	11.8	24.3	97	25.55	23.01	69.09	4.89	0.18	10.4
ME8	319.9	523	13.6	15.2	37.4	130	46.46	45.85	58.12	2.24	0.19	8.6
Avr.	289.4	571	12.0	12.5	32.51	140.8	47.44	59.42	47.07	1.95	0.20	9.1
Mixed source							36.38	34.88	87.36	1.85		
AKT1	279.9	697	11.2	10.7	32.7	138	57.25	59.01	51.57	1.54	0.17	8.6
AKT2	203.3	606	12.1	38	95.5	102	65.64	70.70	49.45	1.11	0.19	2.1
AKT3	213.8	573	12.9	23.9	25.7	117	60.78	64.55	56.06	1.34	0.20	8.3
TET4	276.5	539	15.7	15.2	43.5	231	56.38	57.97	55.61	1.46	0.32	6.4
TET5	210	968	12.2	20.9	34.4	139	74.55	88.51	44.09	1.25	0.15	6.1
TET6	179.3	650	11.9	23.2	30.6	117	56.33	58.44	52.08	1.72	0.19	5.9
GMT3	312	781	13.7	11.3	31.1	139	58.59	60.77	56.77	1.36	0.15	10
GMT1	244	107	12.7	17.2	33.5	145	58.41	61.04	55.01	1.53	0.15	7.3
GMT2	241.4	724	11.3	11.8	25.1	151	54.06	55.19	58.45	1.72	0.18	9.6
HET1	374.7	610	14.7	12.8	62.6	192	56.17	57.56	54.56	1.57	0.23	6.0
HET2	383.9	663	11.8	10.6	47.3	182	55.69	57.06	52.17	1.58	0.20	8.1
MET3	375.5	501	16.6	9.5	143.4	215	47.80	47.51	56.12	2.12	0.28	2.6
MET4	384.9	726	16.3	13.5	82.6	204	57.97	59.59	54.21	1.54	0.22	4.7
MET5	478.6	559	20.3	10.8	70.8	296	51.52	51.74	60.76	1.96	0.32	6.8
Avr.	297.0	690	13.8	16.4	54.20	169.1	57.94	54.07	60.69	1.46	0.21	6.6
Mixed source							38.25	36.62	83.18	1.72		

Table 1 (Continued).
Çizelge 1 (Devam ediyor).

Sample	Th	Sc	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
TE1	4.8	16	19	33	3.6	14	2.8	0.8	2.7	0.4	2.6	0.5	1.6	0.3	1.8	0.3
TE3	4.9	16	18	32	3.4	14	2.5	0.7	2.6	0.4	2.5	0.5	1.4	0.3	1.6	0.3
TE4	4.3	16	18	33	3.7	15	3.1	0.8	2.9	0.5	2.9	0.6	1.8	0.3	1.8	0.3
TE5	1.5	8	11	14	1.8	7.5	1.4	0.4	1.5	0.2	1.5	0.3	0.9	0.1	0.9	0.1
TE8	4.7	17	18	34	3.8	15	3	0.8	3	0.5	2.6	0.6	1.7	0.3	1.8	0.3
TE9	4.8	14	18	33	3.6	15	3	0.8	2.8	0.4	2.6	0.6	1.7	0.3	1.7	0.3
TE11	4.5	17	19	36	3.9	15	3.1	0.8	3	0.5	3	0.6	1.7	0.3	1.8	0.3
TE12	5.1	15	19	35	3.8	15	3.1	0.7	2.7	0.4	2.7	0.5	1.7	0.3	1.7	0.3
AK1	5.8	13	21	40	4.4	17	3.2	0.8	3.2	0.5	3.0	0.7	2.0	0.3	2.0	0.3
AK3	6.1	13	20	38	4.1	16	3.2	0.7	3.1	0.5	3.3	0.7	2	0.3	2.0	0.3
AK5	5.6	14	19	34	3.9	15	3.0	0.7	2.9	0.5	2.9	0.6	1.8	0.3	1.8	0.3
AK6	5.1	12	18	36	3.9	15	3	0.7	2.9	0.5	2.9	0.6	1.8	0.3	1.8	0.3
AK7	4.8	15	19	34	3.9	15	3.2	0.8	3.1	0.5	2.8	0.6	1.9	0.3	1.7	0.2
AK9	5.0	14	18	35	3.8	15	3.2	0.8	3.2	0.6	3.1	0.7	2.0	0.3	2	0.3
AK10	5.2	14	18	36	3.8	14	2.9	0.7	3.0	0.5	2.8	0.5	1.7	0.3	1.8	0.3
GM6	5.9	13	20	37	4.1	16	3	0.7	3.1	0.5	3	0.7	1.9	0.3	2	0.3
GM5	11	13	31	58	6.1	23	4.5	0.9	4.2	0.7	3.9	0.8	2.6	0.4	2.7	0.4
GM4	5.4	13	20	35	3.9	15	2.9	0.7	2.9	0.5	2.9	0.6	1.8	0.2	1.8	0.2
GM3	7.8	15	25	48	5.1	20	4	0.9	3.8	0.7	3.9	0.8	2.5	0.4	2.4	0.4
GM2	7.6	15	24	45	4.9	19	3.8	0.8	3.7	0.7	3.7	0.8	2.3	0.4	2.5	0.4
GM1	7.5	13	24	46	4.9	19	3.8	0.8	3.6	0.6	3.5	0.7	2.3	0.3	2.3	0.3
HE1	7.1	14	21	41	4.5	17	3.5	0.8	3.4	0.6	3.5	0.7	2.2	0.3	2.2	0.4
HE2	7.2	14	23	41	4.3	16	3.1	0.7	3.4	0.6	3.3	0.8	2.3	0.3	2.4	0.4
HE3	7.2	13	20	39	4.1	16	3.1	0.7	3.2	0.5	3.2	0.8	1.9	0.3	2.1	0.3
HE5	5.7	14	18	35	3.8	15	2.9	0.8	3.0	0.5	3.2	0.7	1.9	0.3	1.9	0.3
HE6	7.4	14	21	39	4.2	16	3.2	0.7	3.3	0.5	3.1	0.7	2	0.3	2.1	0.3
HE7	7.1	15	22	43	4.6	18	3.4	0.8	3.5	0.6	3.3	0.7	2.1	0.3	2.2	0.4
HE8	7.2	15	21	39	4.3	16	3.2	0.8	3.4	0.5	3.3	0.7	2.1	0.3	2.2	0.3
ME1	7.0	14	21	41	4.4	16	3.2	0.8	3.3	0.5	3.2	0.7	2.1	0.3	2.2	0.4
ME2	6.5	12	20	36	3.9	15	3	0.7	2.9	0.5	2.9	0.6	1.8	0.3	1.9	0.3
ME3	6.7	13	21	38	4.1	15	3.0	0.7	3.1	0.5	2.9	0.7	1.9	0.3	2	0.3
ME4	7.5	13	23	38	4.2	16	3.1	0.7	3.2	0.5	3.1	0.7	1.8	0.3	2.0	0.3
ME5	7.7	16	25	45	4.9	18	3.6	0.9	3.6	0.6	3.5	0.8	2.3	0.4	2.4	0.4
ME6	6.7	13	23	40	4.3	16	3.2	0.8	3.2	0.5	3.1	0.7	1.9	0.3	2.1	0.3
ME7	4.9	9	15	27	3.0	12	2.2	0.5	2.4	0.4	2.2	0.5	1.3	0.2	1.3	0.2
ME8	6.9	14	23	42	4.5	16	3.6	0.8	3.5	0.6	3.5	0.7	2.2	0.3	2.2	0.4
TET4	5.5	14	21	39	4.0	15	3.2	0.8	3	0.5	3.2	0.7	1.9	0.3	2.0	0.3
TET5	10.4	12	24	42	4.9	19	3.8	0.9	3.9	0.6	3.8	0.8	2.4	0.4	2.2	0.4
TET6	8.1	14	39	68	7.2	27	4.7	0.9	4.7	0.8	4.4	1	3	0.5	3.1	0.5
AKT1	5.8	15	20	38	4.2	16	3.3	0.8	3.3	0.5	3.2	0.7	2.1	0.3	2.0	0.3
AKT2	7.7	17	31	57	6.1	23	4.3	0.8	4.3	0.7	4	0.8	2.5	0.8	2.4	0.4
AKT3	15.4	15	26	53	5.7	21	4.4	0.8	4.3	0.7	4.2	0.9	2.4	0.4	2.4	0.4
GMT3	6.3	15	22	40	4.4	17	3.5	0.8	3.4	0.5	3.3	0.7	2.1	0.3	2.2	0.3
GMT1	7.9	13	2	44	4.2	16	3.2	0.7	3.1	0.5	3.2	0.6	1.9	0.3	2.0	0.3
GMT2	8.3	13	22	43	4.5	17	3.3	0.8	3.2	0.5	3.2	0.7	1.9	0.3	1.9	0.3
HET1	8.2	17	24	45	4.8	18	3.8	0.9	3.6	0.6	3.5	0.8	2.3	0.4	2.3	0.4
HET2	6.6	16	19	38	3.9	15	3.2	0.8	3.2	0.5	3.1	0.7	2.0	0.3	2.1	0.3
MET3	4.8	17	18	34	3.7	14	2.8	0.9	2.9	0.5	2.7	0.5	1.7	0.3	1.7	0.3
MET4	7.0	19	21	42	4.1	16	3.1	0.9	3.1	0.5	3.1	0.7	2	0.3	2	0.3
MET5	5.4	21	17	33	3.7	15	3.1	0.9	3.4	0.5	3.3	0.7	1.9	0.3	2.2	0.3

Table 2. Correlation coefficients (r) from the correlation matrix obtained using geochemical data from the analyzed samples (n=35 for bed, n=14 for terrace sediments).

Çizelge 2. Analiz edilen örneklerin kimyasal verilerinin kullanılarak elde edilen korelasyon katsayıları (r) (yatak için 35, taraça için 14 örnek).

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	F ₂ O ₃	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	MnO	TOC	CIA	PIA
SiO ₂	1.000												
Al ₂ O ₃	.296	1.000											
Fe ₂ O ₃	.200	.364 ^(*)	1.000										
MgO	-.923 ^(**)	-.234	-.105	1.000									
CaO	-.949 ^(**)	-.477 ^(**)	-.328	.876 ^(**)	1.000								
Na ₂ O	.941 ^(**)	.456 ^(**)	.283	-.879 ^(**)	-.932 ^(**)	1.000							
K ₂ O	.797 ^(**)	.267	-.056	-.792 ^(**)	-.814 ^(**)	.751 ^(**)	1.000						
Ti ₂ O	-.051	.310	.926 ^(**)	.172	-.088	.034	-.227	1.000					
P ₂ O ₅	-.593 ^(**)	.194	.290	.646 ^(**)	.487 ^(**)	-.496 ^(**)	-.448 ^(**)	.521 ^(**)	1.000				
MnO	-.186	.184	.735 ^(**)	.299	.068	-.106	-.306	.799 ^(**)	.502 ^(**)	1.000			
TOC	-.926 ^(**)	-.493 ^(**)	-.407 ^(*)	.828 ^(**)	.920 ^(**)	-.931 ^(**)	-.616 ^(**)	-.169	.462 ^(**)	-.004	1.000		
CIA	.838 ^(**)	.649 ^(**)	.360 ^(*)	-.764 ^(**)	-.949 ^(**)	.832 ^(**)	.759 ^(**)	.159	-.358 ^(*)	.002	-.854 ^(**)	1.000	
PIA	.838 ^(**)	.654 ^(**)	.375 ^(*)	-.770 ^(**)	-.949 ^(**)	.837 ^(**)	.743 ^(**)	.169	-.352 ^(*)	.012	-.862 ^(**)	.998 ^(**)	1.000

* Correlation is significant at the 0.05 level ** Correlation is significant at the 0.01 level

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	F ₂ O ₃	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	MnO	TOC	CIA	PIA
SiO ₂	1.000												
Al ₂ O ₃	-.055	1.000											
Fe ₂ O ₃	-.279	.495	1.000										
MgO	-.470	.015	.276	1.000									
CaO	-.727 ^(**)	-.468	.134	.616 ^(*)	1.000								
Na ₂ O	.407	.327	.288	.143	-.156	1.000							
K ₂ O	.213	-.260	-.748 ^(**)	-.427	-.354	-.504	1.000						
Ti ₂ O	-.024	.241	.761 ^(**)	.356	.210	.626 ^(*)	-.899 ^(**)	1.000					
P ₂ O ₅	-.537 ^(*)	-.054	.149	.274	.614 ^(*)	.221	-.460	.253	1.000				
MnO	-.577 ^(*)	.487	.644 ^(*)	.337	.152	-.145	-.484	.355	.294	1.000			
TOC	-.530	-.662 ^(**)	-.235	.338	.662 ^(**)	-.666 ^(**)	.224	-.381	.115	.027	1.000		
CIA	.235	.196	-.354	-.753 ^(**)	-.653 ^(*)	-.270	.660 ^(*)	-.591 ^(*)	-.348	-.101	-.165	1.000	
PIA	.213	.138	-.380	-.744 ^(**)	-.600 ^(*)	-.266	.664 ^(**)	-.595 ^(*)	-.296	-.125	-.121	.996 ^(**)	1.000

DISCUSSIONS

Mixed source composition

Previous research (Cullers, 1994, 1995; Jian et al., 2013) have exhibited that fine-grained sediments are more likely to have mineralogical and chemical composition similar to their source rocks compositions and so they may be better indicators of provenance. Major, trace and rare earth elements data of different potential sources are collected and used to model the notional proportions of end members for Harşit bed and terrace sediments. The first end-member is Carboniferous granodiorite (Gümüşhane pluton, Topuz et al., 2010), the second end-member is Lower Jurassic gabbro (Gökcedere pluton, Karslı et al., 2017), and the third end-member is Upper Cretaceous felsic tuffs (Eyuboğlu, 2015). These three end-members can provide a wide range of composition for identifying likely source end-member proportions (Table 3, Fig. 3A, B).

Using the granodiorite, gabbro and felsic tuffs as the potential source contributors, it is possible to quantitatively model their proportions. A mixture of 3% granodiorite (Gd) + 50% gabbro (Gb) + 47% felsic tuff (TF) is suggested as the ideal modeling source composition for Harşit bed sediments, and 5 % granodiorite + 37% gabbro + 58% felsic tuff for terrace sediments, because they are almost similar chondrite-normalized REE pattern (Fig. 4A, B). In addition, the average Eu/Eu^* , $(Gd/Yb)_N$, La/Th and $(La/Yb)_N$ ratios (0.79, 1.15, 3.40 and 6.20, respectively) of the first mixture model of 3% Gd + 50% Gb + 47% TF are nearly similar to those of bed sediments (0.74, 1.29, 3.47 and 7.02, respectively). Eu/Eu^* , $(Gd/Yb)_N$, La/Th and $(La/Yb)_N$ ratios (0.74, 1.16, 3.06 and 7.10, respectively) of the second mixture model of 5% Gd + 37% Gb + 58% TF are nearly similar to those of terrace sediments (0.74, 1.30, 3.20, 7.10 respectively) (Table 3). The average Co/Th and Th/Sc ratios of the first and second mixed models (14.16, 10.54 and 1.80, 2.22, respectively) are higher than those of the bed and terrace sediments (2.11, 2.00 and 0.40, 0.50, respectively) (Table 3). The average Eu/Eu^* , $(Gd/Yb)_N$, La/Th and $(La/Yb)_N$ ratios of the studied sediments coincide with the 1:1 line, whereas, the average Co/Th and Th/Sc ratios of both sediments are somewhat far from the 1:1 line (Fig. 4C, D), and this case can be described by the enrichment of mafic fragments and decreased of quartz during sedimentary processes. Additionally, the bed sediments have lower average SiO_2 , Al_2O_3 , MgO and Na_2O concentrations than that of the suggested modeled mixed

source rocks, but higher concentrations of Fe₂O₃, CaO, K₂O, TiO₂ and P₂O₅ (Fig. 5A). The terrace sediments have lower average have SiO₂, MgO, CaO, Na₂O and MnO concentration than that of the suggested mixed source rocks, but higher concentrations of Al₂O₃, Fe₂O₃, K₂O, TiO₂ and P₂O₅ (Table 3, Fig. 5B).

Table 3. Major, trace and rare earth elements of source end members, mixing source and average of the studied sediments.

Çizelge 3. İncelenen örneklerin, karışık kaynak ve kaynak üyelerinin ana, iz ve nadir toprak element ortalamaları.

Element	End Members Granodiorite Gabbro Felsic tuff			Mixed source model for bed sediments	Mixed source model for terrace sediments	Studied sediments	
	Gd.	Gb.	FT	3% Gd+50%Gb+4 7%FT	5% Gd+37%Gb+58%F T	Bed sediments	Terrace sediment s
SiO ₂	64.77	52.11	71.50	61.6	63.99	54.67	58.85
Al ₂ O ₃	15.26	18.46	12.06	15.35	14.59	13.42	14.98
Fe ₂ O ₃	5.10	7.70	1.71	4.81	4.1	5.62	6.65
MgO	2.76	5.86	1.03	3.5	2.9	2.74	2.23
CaO	3.55	9.70	1.60	5.71	4.7	8.32	4.21
Na ₂ O	2.99	2.83	4.44	3.59	3.77	2.21	2.17
K ₂ O	3.11	0.57	2.03	1.33	1.55	2.14	2.47
TiO ₂	0.48	0.58	0.25	0.42	0.38	0.58	0.64
P ₂ O ₅	0.10	0.05	0.05	0.05	0.05	0.12	0.12
MnO	0.08	0.14	0.03	0.09	0.08	0.09	0.13
Th	13.4	1.24	16.53	8.79	11.28	6.1	7.7
Sc	14.2	33.79	5.15	19.74	15.05	13.9	15.6
Co	13.7	23.34	2.34	13.18	9.68	11.9	13.8
La	22.10	4.65	34.59	19.25	24.19	20.36	23.25
Ce	41.70	10.33	61.55	35.35	43.79	37.66	43.87
Pr	4.80	1.37	6.38	3.83	4.65	4.10	4.66
Nd	17.70	6.65	21.70	14.05	16.51	15.74	17.84
Sm	3.50	2.00	3.95	2.96	3.28	3.14	3.55
Eu	0.80	0.66	0.71	0.69	0.69	0.75	0.84
Gd	3.40	2.77	3.53	3.15	3.27	3.11	3.52
Tb	0.60	0.47	0.60	0.54	0.56	0.51	0.57
Dy	3.30	3.28	3.48	3.38	3.41	3.05	3.43
Ho	0.70	0.71	0.76	0.73	0.74	0.65	0.74
Er	2.10	2.08	2.34	2.20	2.25	1.92	2.15
Tm	0.30	0.31	0.37	0.34	0.35	0.29	0.33
Yb	2.10	2.04	2.45	2.24	2.31	1.97	2.19
Lu	0.30	0.32	0.39	0.35	0.36	0.31	0.35
Th/Sc	0.95	0.04	0.58	1.80	2.22	0.40	0.50
La/Th	1.66	4.7	9.98	3.40	3.06	3.47	3.20
Co/Th	1.06	28.12	1.18	14.16	10.54	2.11	2.00
Eu/Eu*	0.71	0.99	3.72	0.79	0.74	0.74	0.74
La _N /Yb _N	6.98	2.59	2.13	6.20	7.10	7.02	7.10
Gd _N /Yb _N	1.28	1.11	0.14	1.15	1.16	1.29	1.30

In substance, REEs distributions, Eu/Eu^* , $(\text{Gd}/\text{Yb})_N$, La/Th and $(\text{La}/\text{Yb})_N$ ratios of the bed and terrace sediments show that they were derived from mixed sources (A mixture of 3% granodiorite + 50% gabbro + 47% felsic tuff and a mixture of 5% granodiorite + 37% gabbro + 58% felsic tuff, respectively).

Weathering intensity

Major element chemistry is best practicable for defining the weathering degree of source sediment to interpret the weathering intensity. Different indices such as the Chemical Index of Alteration (CIA, Nesbitt and Young, 1982), the Plagioclase Index of Alteration (PIA, Fedo et al., 1995), the Weathering Index (WIP, Parker, 1970) and the Index of Composition Variability (ICV, Cullers and Podkovyrov, 2002), were improved to determine the level of weathering. The CIA is a chemical representative to evaluate the degree of switch of minerals to clay minerals. The CIA values in unaltered rocks are between 45 and 55 for granite, granodiorite and rhyolite, and between 30 and 45 for fresh gabbro and basalt. The CIA values are ~10 for unweathered clinopyroxene, ~30 for unweathered hornblende, and ~50 for unweathered feldspars (Nesbitt and Young, 1982; Zhou et al., 2017). The value is higher for sediment and sedimentary rocks, which are formed of complex mineralogical mixtures (carbonates, phyllosilicates and phosphates). In aluminum-rich phyllosilicates the CIA values range from 75 to 100 (100 for chlorite and kaolinite, ~80 for illite and smectite, and 75 for muscovite) (Nesbitt and Young, 1982). Sediments with high WIP and ICV values may have been derived from immature sediments and characterize first-cycle deposits; sediments with low WIP and ICV values may have been derived from mature sediments (Kamp and Leake, 1985; Wang et al., 2014; Saydam Eker and Demirkol Kiliç, 2018).

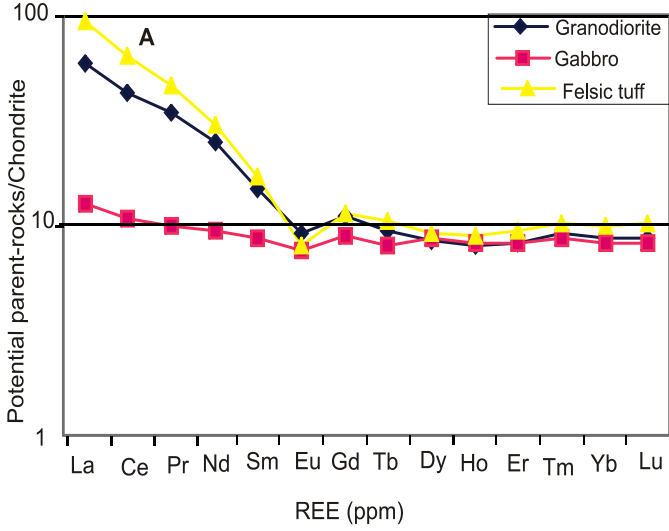
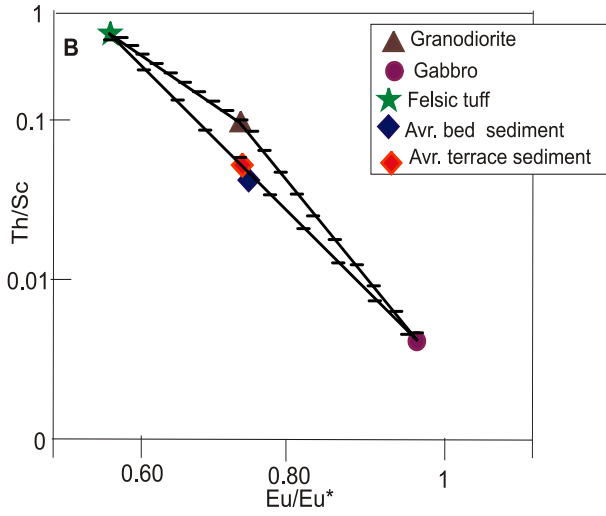


Figure 3. A. Chondrite-normalized REE patterns of Potential parent-rock end members for the bed and terrace sediments, B. Plot of Th/Sc versus Eu/Eu* for the sediments. Mixing curves are divided into 10% increments, with a mixture of 3% granodiorite, % 50 gabbro, 47% felsic tuff for bed sediments and 5% granodiorite, % 37 gabbro, 58% felsic tuff for terrace sediments.



Şekil 3. A. Kanal ve taraça sedimentleri için potansiyel kaynak kayaların kondritle normalize edilmiş REE diyagramı, B. Sedimentler için Th/Sc ve Eu/Eu* diyagramı. Karışım eğrisi %10 aralıklarla bölünmüştür. Kanal sediment için %3 granodiyorit, %50 gabbro, %47 felsik tuf ve taraça sedimenti için %5 granodiyorit, %37 gabbro, %58 felsik tuf karışımı alınmıştır.

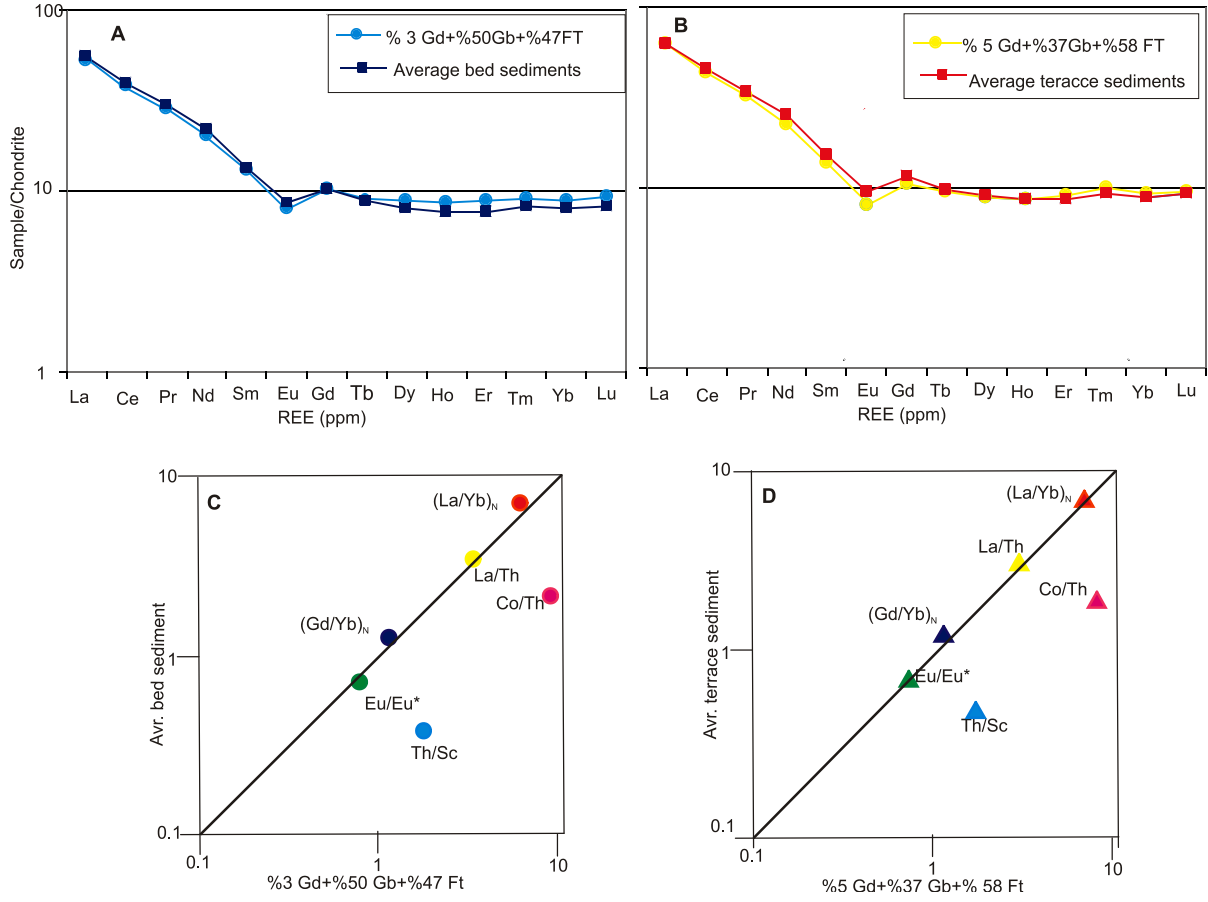


Figure 4. Comparison between the modeled mixed source and the average studied sediments composition. Chondrite-normalized REE patterns for studied sediments (A, B) and trace elemental ratios (C, D).

Şekil 4. Modellenmiş karışık kaynak ve çalışılan sediment bileşenlerinin karşılaştırılması. Çalışılan sedimentler için kondritle normalize edilmiş NTE (A, B) ve iz element oranları (C, D).

The Chemical Index of Alteration (CIA), described as $[CIA = 100 \times Al_2O_3 / (Al_2O_3 + CaO^* + Na_2O + K_2O)]$ (Nesbitt and Young, 1982), the Plagioclase Index of Alteration $[PIA = (Al_2O_3 - K_2O) / (Al_2O_3 - K_2O) + (CaO^* + Na_2O) \times 100]$, Fedo et al., 1995], the Weathering Index $[WIP = 100 \times (CaO^* / 0.7 + 2 Na_2O / 0.35 + 2 K_2O / 0.25 + MgO / 0.9)]$, Parker, 1970] and the Index of Compositional Variability $[ICV = Fe_2O_3 + K_2O + Na_2O + CaO^* + MgO + TiO_2 / Al_2O_3]$, Cullers and Podkovyrov, 2002] (in molecular proportion) is used to appraise the weathering intensity of rocks. CaO^* represents the amount of CaO added in the silicate fraction of the rock by expecting Ca incorporated in apatite and carbonate (Zhou et al., 2017).

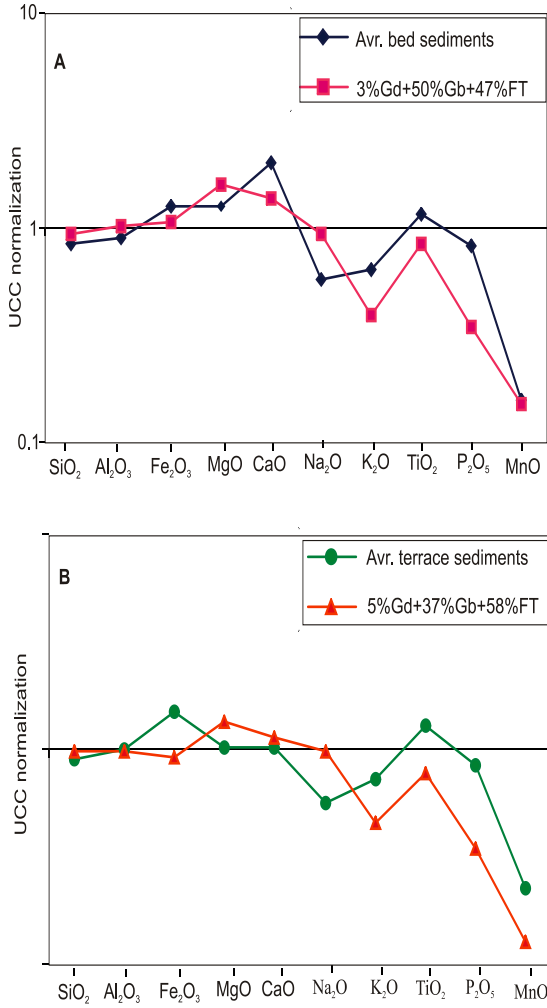


Figure 5. UCC-normalized (Taylor and McLennan, 1985) major elements of the modeled mixed sources and the average of the studied sediments composition. A: bed sediments, B: terrace sediments.

Şekil 5. İncelenen sediment ve karışık kaynak kayaların ortalama ana elementlerinin ÜKK ile normalize edilmiş örümcek diyagramı (Taylor ve McLennan, 1985). A: Kanal sedimentleri, B: Taraça sedimentleri.

The possible source rocks of the Harşit sediments are the Upper Cretaceous felsic tuffs, the Early Jurassic gabbro and the Carboniferous granodiorite. The gabbro is unweathered as shown by its very low CIA, PIA values (29, 28, respectively) and high WIP, ICV values (98, 2.4, respectively). The felsic tuff and granodiorite are lowly weathered as shown by their low CIA, PIA values (44, 40 and 42, 38, respectively) and medium - high WIP, ICV values (70, 82 and 1.4, 1.7, respectively). The mixed source rocks for Harşit bed and terrace sediments have low CIA and PIA values (36, 38 and 35, 37, respectively), and high WIP and ICV values (84, 82 and 1.9, 1.8) (Table 1). The CIA and PIA values of terrace sediments are higher than those of bed sediments. The CIA values calculated accordingly vary from 26 to 54 for the bed sediments and 48 to 75 for the terrace sediments, showing a mild weathering history for bed sediments and a mild to moderate weathering history for terrace sediments. The CIA value is used to reflect the progressive alteration of potassium feldspar and plagioclase to clay minerals during the weathering of rocks (Nesbitt and Young, 1982;

Zhou et al., 2017). The PIA index is used to evaluate the degree of weathering of plagioclase in rocks. The PIA values of the bed sediments are between 23 and 55 and terrace sediments are between 47 and 89, indicating the bed sediments contain better preserved plagioclase than the terrace sediments. The high positive correlation of PIA and CIA values for the bed sediments ($r= 0.998$), and the terrace sediments ($r= 0.996$) are required to show the minimal weathering in the sediments. At the same time, PIA values are higher than CIA values in both sediments, because differential rates of K-feldspar and plagioclase weathering are mostly observed in bed rocks and its sediments (Goldich, 1938; White et al., 2001); Zhou et al., 2017). At the beginning of magma cooling, plagioclase crystallizes and forms chains of physically linked phenocrysts in crystalline rocks (Bryon et al., 1995). Conversely, the latter nucleation and growth of K-feldspar are limited to interstices of this crystalline framework and are more physically divided (Zhou, et al., 2017). In addition, experimental dissolution of plagioclase indicates that Na-rich plagioclase is more slowly dissolved than Ca-rich plagioclase (Blum and Stillings, 1995). The WIP and ICV values of the terrace sediments are lower than those of the bed sediments (average of 54, 1.46 and 59, 1.95, respectively).

The weathering intensity of the source of various sediments has been evaluated using the A-CN-K ternary diagram (Fig. 6). The diagram indicates kinetically and empirically presumable weathering vectors for different rock types and minerals, and strengthening for graphical interpretation of proportional chemical changes (Nesbitt and Young, 1984; Nesbitt and Wilson, 1992; Zhou et al., 2017). The general weathering vector for feldspar decomposition in different parent rocks is need to be parallel to the A-CN axis, but the certain vector direction is a function of the relative proportion of K-feldspar and plagioclase, their incongruent or congruent resolution, and the rate of preservation of aluminous weathering products (Babechuk et al., 2015). On the A-CN-K ternary diagram, the granodiorite, the gabbro, the felsic tuffs, the mixed source rocks for bed and terrace sediments and the analyzed samples exhibit a linear array along weathering trend, falling on the A-CN axis (Fig. 6). The Harşit bed sediments are ranged between 40 and 50 values (except two samples), indicating that the samples are lowly weathered. The terrace sediments are ranged between 50 and 65 values along weathering line (Fig. 6), indicating that the samples are lowly to moderately weathered (Taylor and McLennan, 1985). In addition, intensive chemical weathering may direct to increase the Rb/Sr ratio, therefore ratios

>1 are indicators of intense weathering (Armstrong-Altrin et al., 2019; McLennan et al., 1993). The bed and terrace sediments have low Rb/Sr ratios, the average Rb/Sr ratio was calculated as 0.23 for the bed sediments, and as 0.31 for the terrace sediments (Saydam Eker, 2017). This result supports the low chemical weathering for bed sediments and low to moderate chemical weathering for terrace sediments.

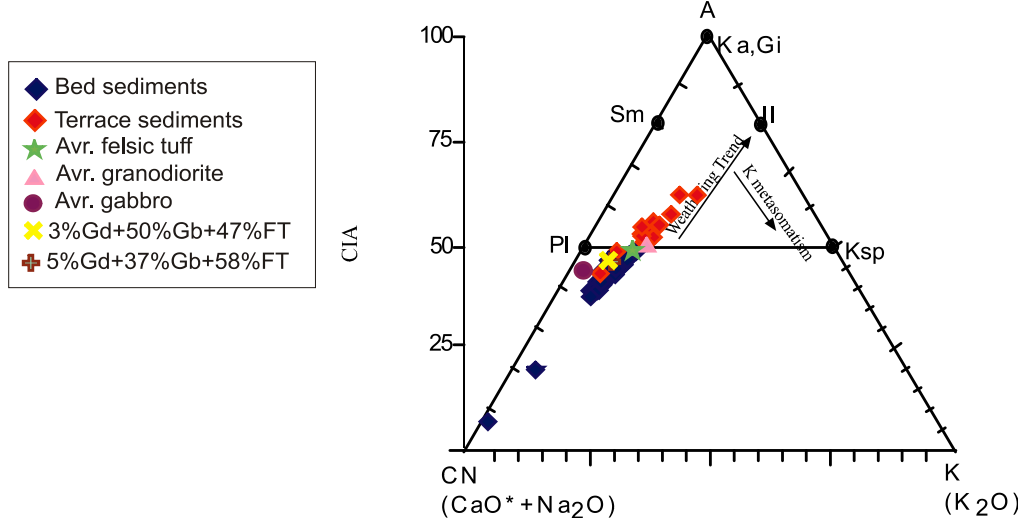


Figure 6. A-CN-K ternary diagram of the studied sediments, potential parent-rock end members (granodiorite, gabbro, felsic tuff) and modeled mixed source. A=Al₂O₃; CN=(CaO* + Na₂O); K= K₂O (in molar proportions). CIA= Chemical Index of Alteration. Mineral composition: PI= Plagioclase; Ksp=K-feldspar; Ka= Kaolinite; Gi= Gibbsite; Sm= Smectite; II= Illite (Nesbitt and Young, 1984).

Şekil 6. İncelenen sedimentlerin, potansiyel kaynak kayaların (Granodiyorit, gabro, felsik tüf) ve modellenmiş karışık kaynak kayaların A-CN-K üçgen diyagramı. A=Al₂O₃; CN=(CaO* + Na₂O); K= K₂O (molar oranlar). CIA= Kimyasal alterasyon indeksi. Mineral bileşen: PI= plajyoklaz; Ksp= K-feldispat; Ka= Kaolinit; Gi= Jipsit; Sm= Smektit, II= İllit (Nesbitt ve Young, 1984).

Paleoclimate conditions

Time differences in climate can be a significant factor for the weathering of source area for the bed and terrace sediments. Since the weathering index values of the terrace sediments are higher, the climate was likely more humid in the study area a few hundred years ago. In addition, the composition and distribution of some trace and major elements in sedimentary rocks may disclose the paleoclimatic variations (Hu et al., 2017; Vd'ačný' et al., 2019). Cao et al. (2012) suggested that Mn, Fe, Cr, Co, Ni and V are relatively enriched under humid conditions. Contrarily, Ca, Mg, K, Na, Sr and Ba are relatively enriched under arid conditions. Some research successfully performed the C-value as a proxy for climate changes (Zhao et al., 2007; Fu et al., 2016; Wang et al., 2017; Vd'ačný et al., 2019).

The C-value is calculated by the following formula:

$$C\text{-value} = \frac{\Sigma(\text{Fe}+\text{Mn}+\text{Cr}+\text{Ni}+\text{V}+\text{Co})}{\Sigma(\text{Ca}+\text{Mg}+\text{Na}+\text{K}+\text{Sr}+\text{Ba})} \quad (1)$$

The C-values for the bed sediments range from 0.15 to 0.24 (on average 0.20), for the terrace sediments, from 0.15 to 0.32 (on average 0.21) (Table 1). This reflects a generally arid to semiarid climate during the depositional period of bed and terrace sediments, but the climate conditions in a few hundreds years ago (depositional period of terrace sediments) is relatively more humid than present.

In addition, the Sr/Cu ratio index has been used for paleoclimatic studies (Meng et al., 2012; Jia et al., 2013; Hu et al., 2017). In general, low Sr/Cu ratios show a warm humid climate, whereas high Sr/Cu ratios indicate a hot climate (Jia et al., 2013). Lerman (1978) suggested that Sr/Cu ratios between 1.3 and 5.0 are determinative of a warm humid climate, while Sr/Cu ratio >5.0 exhibits a hot arid climate. The Sr/Cu ratios of the bed sediments range from 6.1 to 11.6 (on average 9.1), terrace sediments range from 2.1 to 10.6 (on average 6.6) (Table 1). This distribution of Sr/Cu ratios indicate that an arid to semiarid climate conditions dominated during the depositional period of bed sediments and an arid to semi-moist climate conditions dominated during the depositional period of terrace sediments.

Quantification of mass transfer

To quantify mass transfer during weathering of the probable source rocks (granodiorite, gabbro and felsic tuffs), the tau (τ) mass-transport model (Brimhall and Dietrich, 1987; Anderson et al., 2002; Zhou et al., 2017) was performed to mass balance calculations. Titanium is regarded as the immobile index element for τ calculation. In this model, the concentrations (C) of elements (j) in the source rocks (p), relative to that of an immobile index element (i), are used as a normalization to determine the mass changes in the progressively altered rocks using the formula (Zhou et al., 2017).

$$W: \tau_{(i,j)} = \frac{[(C_{j,w})/(C_{j,p})]}{[(C_{i,w})/(C_{i,p})]} - 1 \quad (2)$$

When $T_j = 0$, element is immobile during weathering with respect to the source rocks, indicating no gain and loss of mass. When $T_j = -1$, the element is completely removed during weathering. The results calculated for selected elements are listed in Table 4. During weathering of the mixed source rocks, Na exhibits the greatest loss (T_{Na} from -0.86 to -0.92) for the bed sediments, followed by Si (T_{Si} from -0.80 to -0.88), K (T_K from -0.75 to -0.88), Al, Mg ($T_{Al, Mg}$ from -0.77 to -0.86), Mn (T_{Mn} from -0.67 to -0.73), Fe (T_{Fe} from -0.63 to -0.68), Ca (T_{Ca} from -0.47 to -0.79, except two samples) and P (T_P from -0.39 to -0.67). Two samples exhibits unusual high positive values of $T_{Ca} = 0.44 - 2.88$ (Table 4, Fig. 7A), which may include the occasional autogenic deposition. More rapidly dissolution of Ca-rich plagioclase than Na-rich plagioclase supports autogenic mineral deposition. The Na, Si, K, Mg and Al are highly depleted, Mn and Fe are moderately depleted, P and Ca are moderately – slightly depleted, but Ca is sometimes enriched in the bed sediment samples (Fig. 7A). For the terrace sediments, Na exhibits the greatest loss (T_{Na} from -0.86 to -0.90), followed by Si (T_{Si} from -0.80 to -0.89), Mg (T_{Mg} from -0.79 to -0.89), K (T_K from -0.65 to -0.89), Al (T_{Al} from -0.74 to -0.85), Ca (T_{Ca} from -0.60 to -0.87), Fe (T_{Fe} from -0.62 to -0.71), Mn (T_{Mn} from -0.47 to -0.81) and P (T_P from -0.48 to -0.69) (Table 4). Na, Si, Mg and Al are highly depleted, K, Ca and Fe are highly – moderately depleted, Mn is slightly – highly depleted and P is slightly – moderately depleted in the terrace sediment samples (Fig. 7B). The average of Si, Al, Na, K and Mn shows more loss in bed sediments than terrace sediments, the average of Fe, Mg, Ca and P shows less loss in bed sediments than terrace sediments (Table 4, Fig. 7C). The T_{Si} values were lost in both sediments during weathering of silicates, only in part kept in the secondary clay minerals. The important depletion of Na in the bed and terrace sediments likely reflects that weathering occurred in humid climatic conditions. The rate of K-feldspar weathering is very restricted, because it has a lower resolution than plagioclase (Holland and Turekian, 2010). Therefore, K-feldspars were with lower loss than plagioclase in the studied sediments.

Although the PIA and CIA values of terrace sediments are higher than those of bed sediments, quantification of mass transfer of the elements is generally higher in the bed sediments. It may be because river water causes silicate hydrolysis and transports soluble weathering products away from reaction sites.

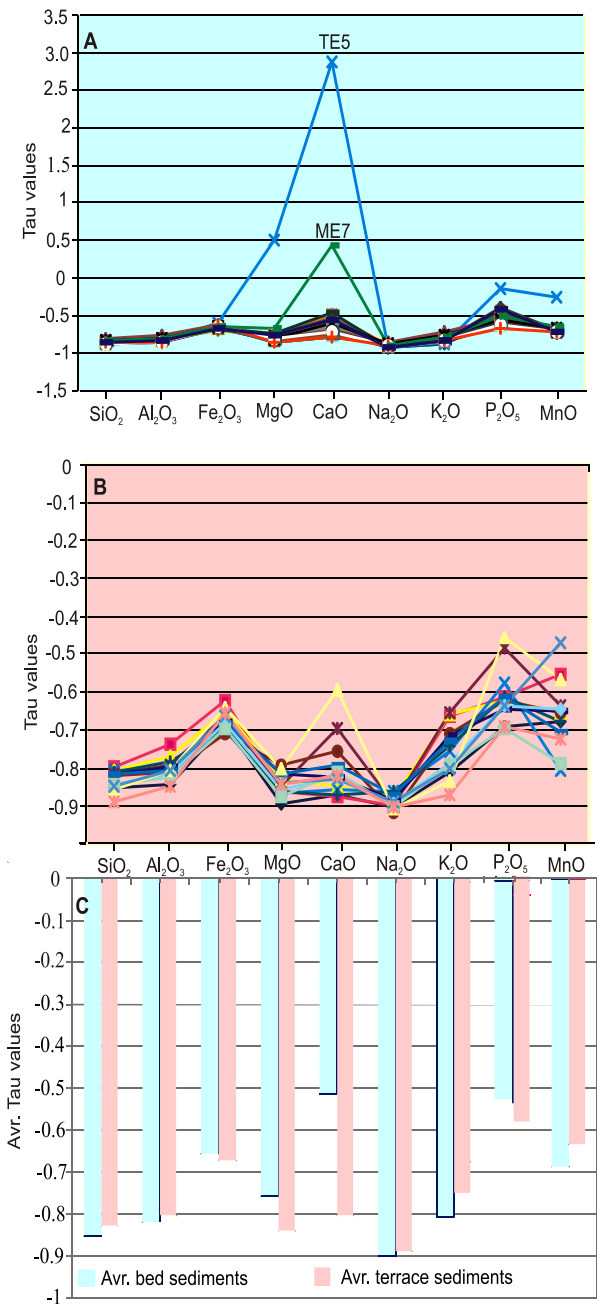


Figure 7. Distributions of τ values for major elements of the studied samples. A: bed sediments, B: terrace sediments, C: average of bed and terrace sediments.

Şekil 7. İncelenen örneklerin major element değerlerinin dağılımı. A: Kanal sediment, B: Taraça sediment, C: Kanal ve taraça sediment ortalaması.

CONCLUSIONS

1. The Harşit bed sediment samples have higher average of MgO, CaO and Na₂O concentrations than samples from terrace sediments, but lower concentrations of SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, K₂O, TiO₂ and MnO.

2. The Eu/Eu*, La/Th, (Gd/Yb)_N, (La/Yb) ratios of the average bed and terrace sediments are closely reproduced by mixing source rocks showed in the bed sediments in following properties: 3% granodiorite + 50% gabbro + 47% felsic tuff and in the terrace sediments in following properties: 5% granodiorite + 37% gabbro + 58% felsic tuff.

3. The CIA and PIA values of bed sediments are lower than those of terrace sediments. The CIA values calculated accordingly vary from 26 to 54 for bed sediments, and 48 to 75 for terrace sediments, indicating a low weathering history for bed sediments and a low to moderate weathering history for terrace sediments.

4. The distribution of C-values and Sr/Cu ratios reflect a generally arid to semiarid climate conditions during the depositional period of bed sediments and an arid to semi-moist climate conditions during the depositional period of terrace sediments.

5- During weathering of the mixed source rocks, Na exhibits the greatest loss for bed and terrace sediments, P exhibits the lowest loss. The average of Si, Al, Na, K and Mn shows more loss in bed sediments than terrace sediments, the average of Fe, Mg, Ca and P shows less loss in bed sediments than terrace sediments.

Finally, the PIA and CIA values of terrace sediments are higher than those of bed sediments, whereas quantification of mass transfer of the elements is generally higher in the bed sediments. It may be because river water causes silicate hydrolysis and transports soluble weathering products away from reaction sites.

ACKNOWLEDGEMENTS

The author gratefully acknowledges M. Tekin Yürür and Gülbanu Tekbulut, from the Hacettepe University, Yerbilimleri Uygulama ve Araştırma Merkezi, for editorial handling. I would like to thank two anonymous reviewers for their contributions to the manuscript.

REFERENCES

- Alexander, P.O. and Gibbson, I.L., 1977. Rare earth abundances in Deccan trap basalts. *Lithos*, 10, 143–147.
- Anderson, S.P., Dietrich, W.E. and Brimhall, G.H., 2002. Weathering profiles, mass-balance analysis, and rates of solute loss: linkages between weathering and erosion in a small, steep catchment. *Geological Society of America Bulletin*, 14, 1143–1158.
- Armstrong-Altrin, J.S., Lee, Y.I., Kasper-Zubillaga, J.J. and Trejo-Ramírez, E., 2017. Mineralogy and geochemistry of sands along the Manzanillo and El Carrizal beach areas, southern Mexico: implications for palaeoweathering, provenance, and tectonic setting. *Geological Journal*, 52, 559-582.
- Armstrong-Altrin, J.S., Botello, A.V., Villanueva, S.F. and Soto, L.A., 2019. Geochemistry of surface sediments from the north western Gulf of Mexico: implications for provenance and heavy metal contamination. *Geological Quarterly*, 63, 522–538.
- Armstrong-Altrin, J.S., Ramos-Vázquez, M.A., Zavala-León, A.C. and Montiel-García, P.C., 2018. Provenance discrimination between Atasta and Alvarado beach sands, western Gulf of Mexico, Mexico: Constraints from detrital zircon chemistry and U-Pb geochronology. *Geological Journal*, 53, 2824-2848.
- Aslan, Z., Arslan, M., Temizel, İ. and Kaygusuz, A., 2014. K–Ar dating, whole-rock and Sr–Nd isotope geochemistry of calc-alkaline volcanic rocks around the Gümüşhane area: implications for post-collisional volcanism in the Eastern Pontides, Northeast Turkey. *Mineralogy and Petrology*, 108, 245–267.
- Babechuk, M.G., Widdowson, M., Murphy, M. and Kamber, B.S., 2015. A combined Y/Ho, high field strength element (HFSE) and Nd isotope perspective on basalt weathering, Deccan traps, India. *Chemical Geology*, 396, 25–41.
- Bhatia M.R., 1983. Plate tectonics and geochemical composition of sandstones. *Journal of Geology*, 91, 611–627.
- Blum, A.E. and Stillings, L.L., 1995. Chemical weathering of feldspars. *Chemical Weathering Rates of Silicate Minerals*. *Min. Soc. Am. Rev. Min.*, 31, 291–351.
- Brimhall, G.H. and 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, 567–587.
- Bryon, D.N., Atherton, M.P. and Hunter, R.H., 1995. The interpretation of granitic textures from serial thin sectioning, image analysis and three-dimensional reconstruction. *Mineralogical Magazine*, 59, 203–211.

- Cao, J., Wu, M., Chen, Y., Hu, K., Bian, L., Wang, L. and Zhang, Y., 2012. Trace and rare earth element geochemistry of Jurassic mudstones in the northern Qaidam Basin, northwest China. *Chemie der Erde*, 72, 245–252.
- Climate-Data-Org., 2020. Annual climate in Gümüşhane, Turkey. <https://tr.climate-data.org/asya/tuerkiye/guemueshane-665/>, accessed on 15 April 2020.
- Condie, K.C., 1991. Another look at the rare earth elements in shales. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 35, 2527–2531.
- Cullers, R. L., 1994. The controls on the major and trace element variation of shales, siltstones of Pennsylvanian-Permian age from uplifted continental blocks in Colorado to platform sediment in Kansas, USA. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 5, 4955-4972.
- Cullers, R. L., 1995. The controls on the major and trace element evolution of shales, siltstones and sandstones of Ordovician to Tertiary age in the wet Mountains region, Colorado, USA. *Chemical Geology*, 123, 107-131.
- Cullers, R.L. and Podkovyrov, N., 2002. The source and origin of terrigenous sedimentary rocks in the Mesoproterozoic Ui group, southeastern Russia. *Precambrian Research*, 117, 157–183.
- Çoğulu, E., 1975. Gümüşhane ve Rize Granitik Plutonlarının Mukayeseli Petrojeolojik ve Jeokronolojik Etüdü. PhD, İstanbul Technical University, İstanbul, Turkey (Unpublished).
- Dokuz, A., 2011. A slab detachment and delamination model for the generation of Carboniferous high-potassium I-type magmatism in the Eastern Pontides, NE Turkey: The Köse composite pluton. *Gondwana Research*, 19, 926-944.
- Eyuboglu, Y., 2015. Petrogenesis and U-Pb zircon chronology of felsic tuffs interbedded with turbidites (Eastern Pontides Orogenic Belt, NE Turkey): Implications for Mesozoic geodynamic evolution of the eastern Mediterranean region and accumulation rates of turbidite sequences. *Gondwana Research*, 212-215, 74-92.
- Fedo, C.M., Nesbitt, H.W. and Young, G.M., 1995. Unraveling the effects of potassium metasomatism in sedimentary rock sand paleosols, with implications for paleoweathering conditions and provenance. *Geology*, 23, 921-924.
- Fedo, C.M., Eriksson, K.A. and Krogstad, E.J., 1996. Geochemistry of shales from the Archean (~3.0 Ga) Buhwa Greenstone Belt, Zimbabwe: implications for provenance and source-area weathering. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 60, 1751–1764.

- Fedo, C.M., Young, G.M. and Nesbitt, H.W., 1997. Paleoclimatic control on the composition of the Paleoproterozoic Serpent Formation, Huronian Supergroup, Canada: a greenhouse to icehouse transition. *Precambrian Research*, 86, 201–223.
- Fu X, Wang J, Chen W, Feng X, Wang D, Song C, Zeng S (2016) Elemental geochemistry of the early Jurassic black shales in the Qiangtang Basin, eastern Tethys: constraints for palaeoenvironment conditions. *Geological Journal* 51: 443–454
- Goldich, S.S., 1938. A study in rock-weathering. *Journal of Geology*, 46, 17–58.
- Güven, I.H., 1993. 1/100.000 scaled geological map series of Turkey. 57-60, MTA Publication, Ankara.
- Holland, H.D. and Turekian, K.K., 2010. Geochemistry of Earth Surface Systems. A Derivative of the Treatise on Geochemistry, In: Holland HD, Turekian KK (eds), Academic Press, pp. 227-230.
- Hu, J., Li, Q., Song, C., Wang, S. and Shen, B., 2017. Geochemical characteristics of the Permian sedimentary rocks from Qiangtang Basin: constraints for paleoenvironment and paleoclimate. *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences*, 28, 271–282.
- Jia, J., Liu, Z., Bechtel, A., Strobl, S.A.I. and Sun, P. 2013. Tectonic and climate control of oil shale deposition in the Upper Cretaceous Qingshankou Formation (Songliao Basin, NE China). *International Journal of Earth Sciences*, 102, 1717–1734.
- Jian, X., Guan, P., Zhang, W. and Feng, F., 2013. Geochemistry of Mesozoic and Cenozoic Sediments in the Northern Qaidam Basin, Northeastern Tibetan Plateau: Implications for Provenance and Weathering. *Chemical Geology*, 360-361, 74-88.
- Johnsson, M.J., 1993. The system controlling the composition of clastic sediments. Processes controlling the composition of clastic sediments, In: Johnsson M.J., Basu A. (eds), Geological Society of America Special Paper, 284, 1–19.
- Kamp, P.C. and Leake, B.E., 1985. Petrography and geochemistry of feldspathic and mafic sediments of the northeastern Pacific margin. *Transaction of the Royal Society of Edinburgh. Earth Sciences*, 76, 411-449.
- Kaotekwar, A.B., Ahmad, S.M., Satyanarayanan, M. and Krishana, A.K., 2019. Geochemical investigations in bulk and clay size fractions from lower Krishna river sediments, southern India: implications of elemental fractionation during weathering, transportation and deposition. *Geosciences Journal*, 23, 951-960.
- Karsli, O., Dokuz, A. and Kandemir, R., 2017. Zircon Lu-Hf isotope systematics and U–Pb geochronology, whole-rock Sr-Nd isotopes and geochemistry of the early Jurassic Gokcedere pluton, Sakarya Zone-NE Turkey: a magmatic response to roll-back of the

- Paleo-Tethyan oceanic lithosphere. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 172, 31.
- Kaygusuz, A., Arslan, M., Siebel, W. and Şen, C., 2011. Geochemical and Sr–Nd isotopic characteristics of post-collisional calc-alkaline volcanics in the eastern Pontides (NE Turkey). *Turkish Journal of Earth Sciences*, 20, 137–159.
- Kaygusuz, A., Arslan, M., Siebel, W., Sipahi, F. and İlbeyli, N., 2012. Geochronological evidence and tectonic significance of Carboniferous magmatism in the southwest Trabzon area, eastern Pontides, Turkey. *International Geology Review*, 1776–1800.
- Kaygusuz, A., Arslan, M., Sipahi, F. and Temizel, İ., 2016. U-Pb zircon chronology and petrogenesis of Carboniferous plutons in the northern part of the Eastern Pontides, NE Turkey: Constraints for Paleozoic magmatism and geodynamic evolution. *Gondwana Research*, 39, 327–346.
- Kessarkar, P.M., Rao, V.P. and Shynu, R., 2010. The nature and distribution of particulate matter in the Mandovi estuary, central West coast of India. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 3, 30–44.
- Lerman, A., 1978. *Lakes: Chemistry, Geology, Physics*. Springer-Verlag, New York.
- Martin, J.M. and Meybeck, M., 1979. Elemental mass-balance of material carried by major world rivers. *Marine Chemistry*, 7, 173–206.
- McLennan, S.M., 1989. Rare earth elements in sedimentary rocks; influence of provenance and sedimentary processes. *Reviews in Mineralogy Geochemistry*, 21, 169-200.
- McLennan, S.M. and Taylor, S.R., 1991. Sedimentary rocks and crustal evolution: tectonic setting and secular trends. *Journal of Geology*, 99, 1–21.
- McLennan, S.M., Hemming, S., McDaniel, D.K. and Hanson, G.N., 1993. Geochemical approaches to sedimentation, provenance, and tectonics. *Processes Controlling the Composition of Clastic Sediments*, In: Johnsson, M.J. and Basu, A. (eds), *Geol. Soc. Am. Spec. Pub.*, 284, pp. 21-40.
- Meng, Q., Liu, Z., Bruch, A.A., Liu, R. and Hu, F., 2012. Palaeoclimatic evolution during Eocene and its influence on oil shale mineralisation, Fushun basin, China. *Journal of Asian Earth Science*, 45, 95–105.
- Milliman, J.D. and Meade, R.H., 1983. World-wide delivery of river sediment to the oceans. *Journal of Geology*, 91, 1–21.
- Nesbitt, H.W., 1979. Mobility and fractionation of REE during weathering of granodiorite. *Nature*, 279, 206–210.

- Nesbitt, H.W., Markovics, G. and Price, R.C., 1980. Chemical processes affecting alkalis and alkaline earths during continental weathering. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 44, 1659–1666.
- Nesbitt, H.W. and Wilson, R.E., 1992. Recent chemical weathering of basalts. *American Journal of Science*, 292, 740–777.
- Nesbitt, H.W. and Young, G. M., 1982. Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites. *Nature*, 299, 715-717.
- Nesbitt, H.W. and Young, G.M., 1984. Predictions of some weathering trends of plutonic and volcanic rocks based on thermodynamic and kinetic considerations. *Geochim. Cosmo. Acta*, 48, 1523-1534.
- Parker, A., 1970. An index of weathering for silicate rocks. *Geological Magazine*, 107, 501-504.
- Piper, D.Z., 1974. Rare earth elements in the sedimentary cycle: a summary. *Chemical Geology*, 14, 285–304.
- Roddaz, M., Said, A., Guillot, S., Antoine, P.O., Montel, J-M., Martin, F. and Darrozes, J., 2011. Provenance of Cenozoic sedimentary rocks from the Sulaiman Fold and Thrust Belt, Pakistan: Implications for the Palaeogeography of the Indus Drainage System. *Journal of Geology Society*, 168, 499–516.
- Roser, B.P. and Korsch, R.J., 1986. Determination of tectonic setting of sandstone–mudstone suites using SiO₂ content and K₂O/Na₂O ratio. *J. Geol.*, 94, 635–650.
- Saydam, Eker, C. and Korkmaz, S., 2011. Mineralogy and whole rock geochemistry of late Cretaceous sandstones from the eastern Pontides (NE Turkey). *Neues Jahrbuch Für Mineralogy-Abhandlungen*, 188 (3), 235-256.
- Saydam, Eker, Ç., 2017. Geochemical and isotopic characteristics of stream and terrace sediments of the Harsit Stream, NE Turkey. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*, 17 (4), 279-296.
- Saydam, Eker, Ç. and Demirkol, Kiliç, E., 2018. Geochemistry of Çoruh River bed sediments in NE Turkey: Implications in weathering-sedimentary cycle, provenance, and metal pollution. *Geochemistry International*, 56 (6), 579-600.
- Schoenborn, W.A. and Fedo, C.M., 2011. Provenance and paleoweathering reconstruction of the Neoproterozoic Johnnie Formation, southeastern California. *Chemical Geology*, 285, 231–255.
- Sensarma, S., Rajamani, V. and Tripathi, J.K., 2008. Petrography and geochemical characteristics of the sediments of the small River Hemavati, southern India: implications for provenance and weathering processes. *Sedimentary Geology*, 205, 111–125.

- Taylor, S.R. and McLennan, S.M., 1985. *The Continental Crust: Its Composition and Evolution*. Oxford, Blackwell Scientific Publishing.
- Topuz, G., Altherr, R., Kalt, A., Satır, M., Werner, O. and Schwarz, W., 2004. Aluminous granulites from the Pulur complex, NE Turkey: a case of partial melting, efficient melt extraction and crystallization. *Lithos*, 72, 183–207.
- Topuz, G., Altherr, R., Siebel, W., Schwarz, W., Zack, T., Hasözbeğ, A., Barth, M., Satır, M. and Şen, C., 2010. Carboniferous High-potassium I-type Granitoid Magmatism in the Eastern Pontides: The Gümüşhane Pluton (NE Turkey). *Lithos*, 116, 92-110.
- Vd'ačný, M., Madzin, J. and Plašienka, D., 2019. Geochemical characteristics of the Upper Cretaceous to Lower Eocene sedimentary rocks from the Pieniny Klippen Belt (Western Carpathians, Slovakia): implications for tectonic setting, paleoenvironment and paleoclimate. *Geosciences Journal*, 23 (5), 731–745.
- Wang, Y., Long, X., Wilde, A.A., Xu, H., Sun, M. and Xiao, W., 2014. Provenance of Early Paleozoic metasediments in the central Chinese Altai: Implication for tectonic affinity of the Altai-Mongolia terrane in the Central Asian Orogenic Belt. *Lithos*, 210-211, 57-68.
- Wang, Z., Fu, X., Feng, X., Song, C., Wang, D., Chen, W., and Zeng, S., 2017. Geochemical features of the black shales from the Wuyu Basin, southern Tibet: implications for palaeoenvironment and palaeoclimate. *Geological Journal*, 52, 282–297.
- White, A.F., Bullen, T.D., Schulz, M.S., Blum, A.E., Huntington, T.G. and Peters, N.E., 2001. Differential rates of feldspar weathering in granitic regoliths. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 65, 847–869.
- Wronkiewicz, D.J. and Condie, K.C., 1987. Geochemistry of Archean shales from the Witwatersrand Supergroup, South Africa: source-area weathering and provenance. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 53, 1537-1549.
- Young, G.M., 1999. Some aspects of the geochemistry, provenance and palaeoclimatology of the Torridonian of NW Scotland. *J. Geol. Soc. Lond.*, 156, 1097–1111.
- Zhao, Z., Zhao, J., Wang, H., Liao, J., Liu, C., 2007. Distribution characteristics and applications of trace elements in Junggar Basin (in Chinese with English abstract). *Natural Gas Exploration and Development*, 30, 30–33.
- Zhou, L., Friis, H., Yang, T. and Nielsen, A.N. 2017. Geochemical interpretation of the Precambrian basement and overlying Cambrian sandstone on Bornholm, Denmark: Implications for the weathering history. *Lithos*, 286-287, 369-387.



Yerbilimleri, 2020, 41 (1), 30-55, DOI:10.17824/yerbilimleri.617852
Hacettepe Üniversitesi Yerbilimleri Uygulama ve Araştırma Merkezi Bülteni
Bulletin of the Earth Sciences Application and Research Centre of Hacettepe University

Deprem Kaynak Mekanizması Parametreleriyle Sayısal Tsunami Simülasyonları: 08 Eylül 2017 Chiapas-Meksika Depremi (M_w 8.2) ve Tsunamisi

*Numerical Tsunami Simulations based on Earthquake Source Mechanism Parameters:
A case study of the September 08, 2017 Chiapas-Mexico (M_w 8.2) Earthquake and
Associated Tsunami*

HAKAN TARIK MERİÇ¹, SEDA YOLSAL-ÇEVİKBİLEN *¹, TUNCAY TAYMAZ¹

¹ İstanbul Teknik Üniversitesi, Maden Fakültesi, Jeofizik Müh. Böl., Ayazağa Kampüsü, TR-34469, Maslak, Sarıyer, İstanbul, Türkiye

Geliş (received): 11 Eylül (September) 2019
Kabul (accepted) : 18 Nisan (April) 2020

ÖZ

Sismolojik gözlem ve verilerin ters çözüm işlemleri ile modellenmeleri, bir depremin kaynak mekanizması çözümünün ve kinematik ve dinamik kaynak parametrelerinin (fay düzlemine ait doğrultu, eğim, kayma açısı, deprem odak derinliği, sismik moment, fay uzunluğu, fay genişliği, maksimum ve ortalama yerdeğiştirme miktarı, gerilme düşümü, kırılma süresi vb) belirlenmesine olanak tanımaktadır. Bu parametreler, daha sonra yapılacak olan diğer çalışmalarda (örn., tsunami simülasyonları vb) giriş parametreleri olarak kullanılmaktadır. Bu çalışmada, 08 Eylül 2017 tarihinde Chiapas (Meksika) bölgesinde meydana gelen M_w 8.2 büyüklüğündeki yıkıcı depremin kaynak mekanizması çözümü ve fay düzlemi üzerinde gerçekleşen kayma/yırtılma dağılımı, telesismik uzaklıklarda kaydedilen uzun periyotlu P- ve SH- ve geniş-bantlı P- dalga şekillerinin modellenmesi sonucunda belirlenmiştir. Sonuçlar, 08 Eylül 2017 Chiapas (Meksika) depreminin çok küçük doğrultu atım bileşenine sahip normal faylanma mekanizmasıyla ve basit yapı bir kırılmayla 54 km odak derinliğinde meydana geldiğini göstermektedir. Ayrıca, KB-GD uzanımlı fay düzlemi üzerinde gerçekleşen kırılmanın yaklaşık 125 km fay uzunluğuna ve 55 km fay genişliğine sahip bir alanda meydana geldiği, maksimum yerdeğiştirme miktarının ise yaklaşık olarak

<https://doi.org/10.17824/yerbilimleri.617852>



Seda YOLSAL-ÇEVİKBİLEN yolsalse@itu.edu.tr

¹İstanbul Teknik Üniv., Maden Fak., Jeofizik Müh. Böl., Ayazağa Kampüsü, TR-34469, Maslak, Sarıyer, İstanbul, Türkiye, ORCID 0000-0001-9866-7847

¹İstanbul Teknik Üniv., Maden Fak., Jeofizik Müh. Böl., Ayazağa Kampüsü, TR-34469, Maslak, Sarıyer, İstanbul, Türkiye, ORCID 0000-0002-7250-4617

¹İstanbul Teknik Üniv., Maden Fak., Jeofizik Müh. Böl., Ayazağa Kampüsü, TR-34469, Maslak, Sarıyer, İstanbul, Türkiye, ORCID 0000-0001-6807-9622

22.10 m olduğu saptanmıştır. Tekdüze (homojen) kayma dağılımı modeline ve 30 yay-sın çözünürlüklü GEBCO-BODC batimetri verisine dayalı olarak gerçekleştirilen sayısal tsunami simülasyonu ile deprem nedeniyle oluşan tsunami dalgalarının Pasifik okyanusu içerisinde ilerleyişi modellenerek çeşitli kıyılar için yapay tsunami dalgaları hesaplanmıştır. Hesaplanan tsunami dalgaları Derin Deniz Tsunami Belirleme ve Raporlama Şamandıraları (DART) ve gel-git ölçerler tarafından kaydedilen gerçek-zamanlı tsunami verileri ile karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak, yapay tsunami dalgalarının gerçek-zamanlı kayıtlar ile nispeten uyumlu olduğu gözlenmiştir. Ancak, bu uyum özellikle okyanus/deniz içi şamandıra kayıtlarında daha fazla, kıyılardaki gel-git ölçer kayıtları için ise göreceli olarak daha azdır. Kıyılarda gözlenen tsunami dalgalarının daha iyi modellenebilmesinin, sayısal tsunami simülasyonlarında yüksek çözünürlüklü batimetri verisinin ve depreme ait sonlu-fay kayma dağılımı modelinin kullanılması ile mümkün olabileceği önerilmektedir.

Anahtar Kelimeler: Deprem, Kaynak mekanizması parametreleri, Kayma/Yırtılma Dağılımı, Orta Amerika Hendeği, Meksika, Sayısal Tsunami Simülasyonu.

ABSTRACT

Modeling of seismological data by inversion processes provides earthquake source mechanism solutions (e.g, strike, dip and rake angles of the fault plane, earthquake focal depth and seismic moment etc.) and kinematic and dynamic source parameters (e.g, fault length, fault width, maximum and average displacement amount, stress drop, rupture duration etc.). These parameters are used as input constraints for further analysis, particularly for tsunami modeling. In this study, we provide an example of teleseismic waveform inversion and numerical tsunami simulation studies in order to demonstrate the importance and necessity of seismological data in tsunami studies. We obtained source mechanism solution and finite-fault slip distribution model of the destructive 08 September 2017 (M_w 8.2) earthquake occurred in Chiapas (Mexico) region by inverting long period P- and SH- and broad-band P-waveforms recorded at teleseismic stations. Overall results show that this earthquake occurred with a normal faulting mechanism and a very small strike-slip component at a focal depth of 54 km, and a very simple rupture. In addition, slip distribution model of this event showed that the rupture occurred on the NW-SE trending fault plane has an area with a fault length of about 125 km and fault width of 55 km with a maximum displacement amount of 22.10 m. Then, numerical tsunami simulations were performed based on a uniform slip model and GEBCO-BODC bathymetry data with 30 arc-sec resolution, and propagation of tsunami waves triggered by this earthquake in the Pacific Ocean have been modeled. Synthetic tsunami waves were calculated for various

coasts and they were further compared with the real-time tsunami data recorded by Deep Ocean Assessment and Reporting of Tsunami (DART) and tide gauges. As a result, it is observed that synthetic tsunami waves are relatively compatible with real-time recordings. However, this consistency is particularly high for DART buoy records in open ocean and relatively less for tide gauge records on shorelines. Hence, we suggest that better modeling of tsunami waves recorded at tide gauges on the coasts might be achieved by using a high-resolution bathymetry data and a detailed finite-fault slip distribution model of earthquakes in numerical simulations.

Key words: *Earthquake, Middle America Trench, Mexico, Numerical tsunami simulations, Source mechanism parameters, Slip/Rupture distribution.*

GİRİŞ

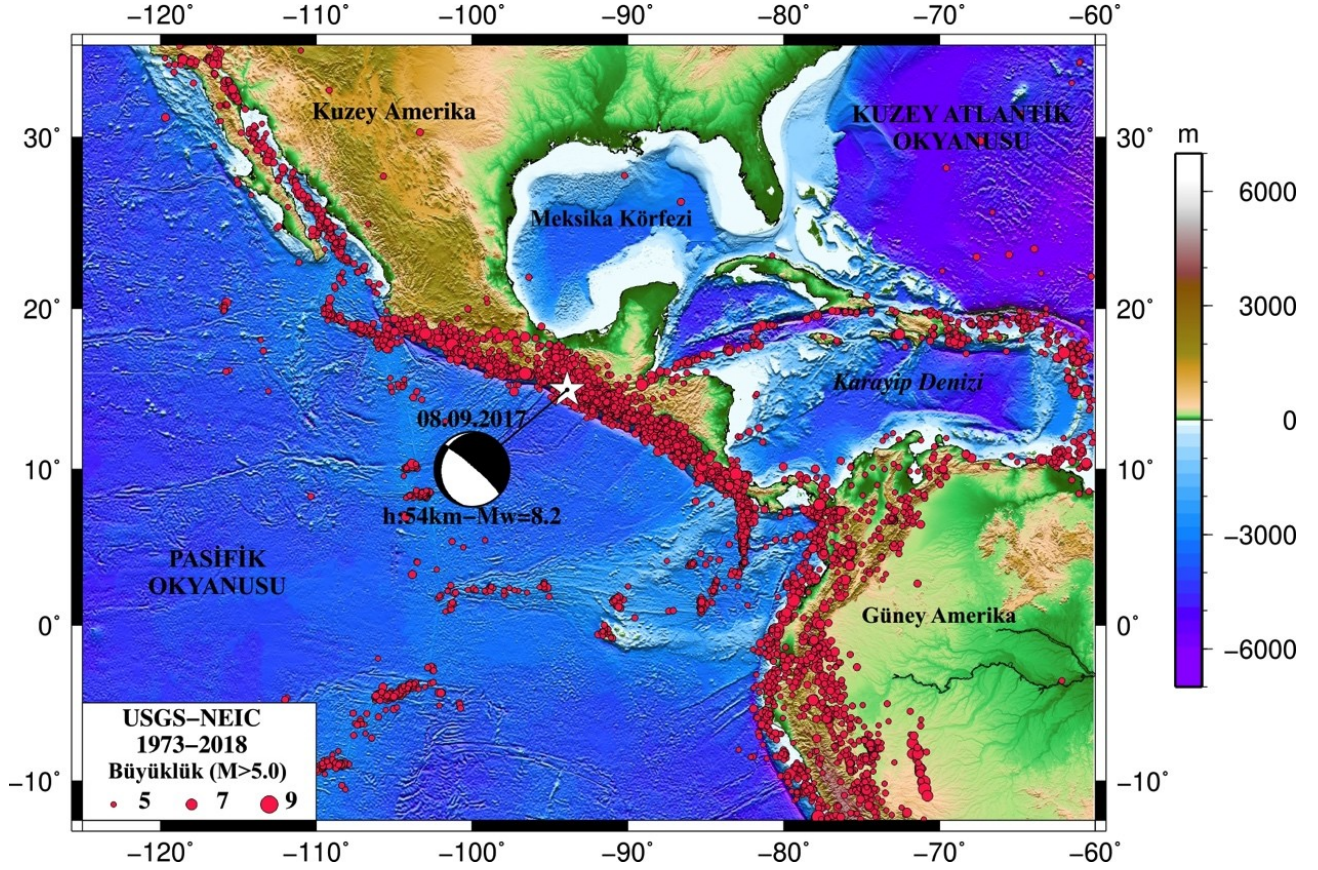
Dünya üzerinde yıkıcı ve büyük depremler ($M > 7.5$) en yoğun olarak levha sınırları boyunca oluşmaktadır. Özellikle iki litosferik levhanın birbirine yaklaşıp çarpıştığı ve bu levhalardan bir tanesinin diğerinin altına dalıp batarak yok olduğu dalma batma zonları olası tsunami bölgeleridirler (örn., Güney Amerika, Sumatra-Endonezya, Japonya, Alaska, Kamçatka yarımadası, Kuril, Aleutan dalma batma zonları vb). Sismolojik çalışmalar, bu zonlar boyunca meydana gelen depremlerin farklı derinliklerde farklı odak mekanizması çözümleri gösterdiklerini ortaya koymaktadır (Taymaz vd., 1990, 1991; Bohnoff vd., 2005; Shaw ve Jackson, 2010; Ruiz-Constán vd., 2011; Yolsal-Çevikbilen ve Taymaz, 2012; Howell vd., 2017). Bu depremlerin büyük çoğunluğu yaklaşma ve çarpışma hareketini yansıtacak şekilde ters faylanma mekanizması ile meydana gelmektedir. Örneğin, 26 Aralık 2004 Kuzey Sumatra (M_w 9.3) depremi, Hint-Avustralya levhası ile Avrasya levhaları arasındaki çarpışma zonu boyunca, ters faylanma mekanizması ile 37 km odak derinliğinde kırılğan üst kabuk içerisinde oluşmuş ve çeşitli kıyılarda yaklaşık 10 m yüksekliğe kadar ulaşan tsunami dalgaları meydana getirmiştir. Tsunami dalgaları, deprem kaynağından başlayarak yayılma doğrultusu boyunca oldukça uzaklara ilerleyebilmiş ve pek çok ülkede (örn., Endonezya, Sri Lanka, Tayland, Malezya, Hindistan vb.) önemli boyutlarda can ve mal kaybına neden olmuştur (Lay vd., 2005; Sibuet vd., 2007; Franke vd., 2008). Benzer şekilde, 11 Mart 2011 tarihinde Japonya'da meydana gelen Tohoku-Oki mega-bindirme depremi (M_w 9.0) ve tsunamisi de Japonya'da büyük ölçüde yıkıma neden olmuş, nükleer santrallerde ciddi boyutta hasara yol açmıştır (Ammon vd., 2011). Tarihsel dönem içerisinde Türkiye'de özellikle GB Anadolu kıyıları buldukları konum itibarı ile yıkıcı tsunami dalgalarına maruz kalmıştır. Tarihsel kayıtlar ve kataloglar, bu tsunamilerin çoğunlukla deprem kaynaklı olduklarını ve bu depremlerin de sismik açıdan dünyanın en

aktif bölgelerinden birisi olan Doğu Akdeniz Bölgesi'nde yer alan Hellenik dalma batma zonu boyunca meydana geldiklerini rapor etmektedirler (örn., Ambraseys, 1962; Antonopoulos, 1980; Guidoboni ve Comastri, 2005a,b; Papadopoulos vd., 2007; Yolsal vd., 2007). Depremlere ait kaynak mekanizması parametrelerinin tsunami dalga modelleme çalışmalarında başlangıç ve sınır koşullarının tanımlanmasında kullanılması, sismolojik gözlem ve analizlerin önemini ortaya koymaktadır (örn., Okal, 1988; Geist, 1999; Yolsal-Çevikbilen ve Taymaz, 2012; Ulutaş, 2013; Heidarzadeh vd., 2018; Yolsal-Çevikbilen vd., 2019). Okyanus veya deniz içerisinde meydana gelen, okyanus tabanında düşey yönde harekete neden olan eğim atımlı faylanma mekanizması (normal veya ters faylanma) ile sığ odak derinliğinde oluşan büyük ve yıkıcı depremlerin ($M_w \geq 7.5$) tsunami dalgalarına neden oldukları bilinmektedir. Ancak yine de bazı depremlerin doğrultu atımlı faylanma mekanizması ile oluşmalarına rağmen tsunami dalgalarına neden oldukları gözlenmektedir. Örneğin, 28 Eylül 2018 Palu-Sulawesi (Endonezya) depremi ($M_w 7.5$) baskın olarak doğrultu atımlı faylanma mekanizması ile meydana gelmesine rağmen, Palu körfezinde oldukça etkili tsunami dalgaları gözlenmiştir (örn., Jamelot vd., 2019; Pakoksung vd., 2019; Ulrich vd., 2019; Yolsal-Çevikbilen ve Taymaz, 2019). Son yıllarda yapılan sayısal tsunami simülasyonlarında yüksek çözünürlüklü batimetri verilerinin kullanılması ve uygun matematiksel modellerin geliştirilmesi ile tsunami dalgalarının okyanus/deniz içerisindeki yayılımları ve ulaştıkları kıyılardaki karakteristik özellikleri doğru bir şekilde belirlenebilmektedir. Matematiksel modellemelerde tanımlanan başlangıç ve sınır koşulları, sismolojik ve sismotektonik gözlemlerden elde edilen dinamik ve kinematik kaynak parametreleriyle tanımlanmaktadır (bkz. Heidarzadeh vd., 2018; Yolsal-Çevikbilen vd., 2019). Bir deprem olduğu andan itibaren çeşitli ulusal ve uluslararası merkezler (örn., Harvard-CMT, USGS, ISC vb.) otomatik ve hızlı analizler yaparak depreme ait kaynak mekanizması parametrelerini rapor etmektedir. Ancak, bu analizlerde farklı frekans içeriğine sahip sismik dalgaların modellenmesi nedeniyle moment tensör ters çözümlerinde farklılıklar meydana gelmektedir (Tan ve Taymaz, 2006; Taymaz vd., 2007; Yolsal, 2008). Özellikle, odak derinliğinin birçok deprem katalogunda ters çözüm ile hesaplanmadığı ve bölgenin genel yapısı göz önünde bulundurularak sabit bir değer olarak alındığı görülmektedir. Örneğin, moment tensör kataloglarında belirtilen odak derinlikleri incelendiği zaman depremlerin büyük çoğunlukla 5, 12, 15, 33 km odak derinliğinde meydana geldikleri görülmektedir (bkz. Harvard-CMT, USGS moment tensor katalogları). Yine de gözlenen bu farklılıklara rağmen, mevcut ilksel çözümler depremlerin telesismik P- ve SH- cisim dalgası modelleme teknikleri ile daha detaylı olarak incelenmeleri aşamasında çok değerli ve vazgeçilemez ön bilgiler sağladıkları için önemlidirler.

Bu çalışma, ters çözüm teknikleri ile sismolojik verilerden elde edilen deprem kaynak mekanizması parametrelerinin sayısal tsunami simülasyonlarında kullanılmasının gerekliliğinin ve öneminin örnek bir deprem ile gösterilmesini amaçlamaktadır. Bu kapsamda incelenen 08 Eylül 2017 Chiapas-Meksika (M_w 8.2) depremi, Orta Amerika Hendeği boyunca normal faylanma mekanizması ile oluşarak yıkıcı tsunami dalgalarına neden olan ve çok sayıda can ve mal kaybının gözlemlendiği bir depremdir. Depreme ait odak mekanizması çözümü ve fay düzlemi üzerinde gerçekleşen sonlu-fay kayma dağılımı modeli, telesismik istasyonlarda kaydedilen uzun periyotlu P- ve SH-, ve geniş-bantlı P-dalga şekillerinin ters çözüm işlemleri ile modellenmesi sonucunda belirlenmiştir. Deprem kaynak mekanizması parametreleri daha sonraki aşamada gerçekleştirilen sayısal tsunami simülasyonunda giriş parametreleri olarak kullanılmış ve tsunami dalgalarının okyanus içerisinde ilerleyişi modellenerek çeşitli kıyıları için yapay tsunami dalgaları hesaplanmıştır. Tsunami simülasyon sonuçları gerçek-zamanlı tsunami kayıtları ile karşılaştırılarak, elde edilen tüm sonuçlar tartışılmıştır.

08 Eylül 2017 Chiapas-Meksika Depremi (M_w 8.2) ve Tsunamisi

08 Eylül 2017 Chiapas-Meksika depremi (M_w 8.2) Cocos, Kuzey Amerika ve Karayip levhalarının birbirlerine göreceli olarak hareket ettikleri ve üçlü-kesişim noktası ile buluştukları Panama kırığının batısında Orta Amerika dalma-batma zonu boyunca meydana gelmiştir (USGS Enlem: 15.022° ve Boylam: -93.899° ; Şekil 1). Bu bölgede Cocos levhası, Kuzey Amerika ve Karayip levhalarının altına 6.4 cm/yıl hız ile dalıp batarak yitmektedir (Singh vd., 2000). Deprem, meydana geldiği bölgede oldukça etkili olarak can ve mal kaybına yol açmıştır. Ramírez-Herrera vd. (2018) deprem nedeniyle 100'den fazla kişinin hayatını kaybettiğini, 1.5 milyondan fazla kişinin depremden etkilendiğini ve yaklaşık olarak 41.000 binanın yıkıldığını rapor etmişlerdir. 08 Eylül 2017 Chiapas depremi (M_w 8.2), 1932 Jalisco ve 1985 Mexico City depremlerinden sonra (Mendoza, 1993) Meksika bölgesinde meydana gelen en büyük depremdir (Ramírez-Herrera vd., 2018). Son 100 yıl içerisinde, bölgedeki levhaların yaklaşma hareketini yansıtacak şekilde ters faylanma mekanizması ile oluşan büyük bir deprem ($M_w \geq 7.0$) gözlenmediği için, 2017 Chiapas depreminin meydana geldiği bölge *Theuantepec Sismik Boşluğu* olarak adlandırılmaktadır (Kelleher vd., 1973; Kelleher ve McCann, 1976; McNally ve Minster, 1981; Singh vd., 1981; Nishenko, 1991; Franco vd., 2005). Singh vd. (1981) *Theuantepec Sismik Boşluğu*'nun ya asismik bir zon olduğunu ya da bölgede büyük ve yıkıcı bir deprem oluşma periyodunun oldukça yüksek olduğunu önermiştir. Cocos ve Kuzey Amerika levhalarının arasında yer alan dalma batma zonu, Meksika bölgesinde düşük eğim açılı olup, Orta Amerika kısmında daha dik açığa sahiptir (Ponce vd., 1992).



Şekil 1. Cocos, Kuzey Amerika and Karayipler levhaları arasında yer alan Orta Amerika dalma batma zonu boyunca meydana gelen deprem aktivitesi. Deprem bilgileri USGS NEIC (1973 - 2018) deprem kataloğundan alınmıştır. Batimetri ve topografya verileri ise sırasıyla GEBCO-BODC ve ETOPO1'dan alınmıştır. Beyaz yıldız 08 Eylül 2017 Chiapas-Meksika depreminin (M_w 8.2) lokasyonunu, odak küresi ise depremin odak mekanizması çözümünü göstermektedir.

Figure 1. Seismicity map of the region between the Cocos, North America and Caribbean plates. Epicentres are taken from USGS NEIC (1973 - 2018) earthquake catalogue. Bathymetry and topography data are taken from GEBCO-BODC and ETOPO1, respectively. The location (white star) and source mechanism solution of the September 08, 2017 Chiapas-Mexico earthquake are also given.

2017 Chiapas depreminin lokasyonu, Cocos levhası'nın Kuzey Amerika levhası altına dalıp batarak yittiği Meksika dalma batma zonuna yakın olsa da, deprem levha arası bir deprem olmayıp, dalan okyanusal levhanın üzerindeki normal faylanma ile ilişkili olarak meydana gelmiş levha içi bir deprem olarak tanımlanmaktadır. Deprem ve depremle ilişkili gelişen tsunaminin genel karakteristik özellikleri son dönemde bir çok araştırmacı tarafından çalışılmıştır (örn., Okuwaki ve Yagi, 2017; Ye vd., 2017; Adriano vd., 2018; Gusman vd., 2018; Chacón-Barrantes, 2018; Heidarzadeh vd., 2018; Jiménez, 2018; Ramírez-Herrera vd., 2018; Spagnotto vd., 2018; Guo vd., 2019; Song ve Ge, 2019). Ramírez-Herrera vd. (2018) yaptıkları tsunami sonrası arazi çalışmasında, Chiapas kıyılarında 41 km boyunca tsunami gözlemleri elde etmişlerdir. Huatulco gel-git ölçer istasyonunda depremden 12 dk sonra tsunami dalgalarının kaydedildiğini, maksimum

tırmanma yüksekliğinin Boca del Cielo kıyılarında yaklaşık 3 m olduğunu ve maksimum su basma uzaklığının ise Puerto Arista'da 190 m olduğunu belirlemişlerdir. Heidarzadeh vd. (2018) telesismik deprem verilerini ve tsunami kayıtlarını analizleyerek depreme ait sonlu-fay kayma dağılımı modelini belirlemiştir. Elde ettikleri modele göre 130 km x 80 km boyutlarındaki fay düzlemi üzerinde meydana gelen maksimum ve ortalama yerdeğiştirme miktarı sırasıyla 13.1 m ve 3.7 m'dir. Yapılan Coulomb statik gerilme analizleri, 2017 Chiapas depreminin Tehuantepec (Meksika) bölgesinin sığ kesimlerinde gerilme artışına neden olduğunu ve yakın gelecekte bu bölgede bindirme mekanizmasına sahip, olası büyük bir levha arası depremin ($M_w > 7.9$) meydana gelebileceğini göstermektedir (Heidarzadeh vd., 2018; Spagnotto vd., 2018). Jiménez (2018) ise normal faylanma mekanizması (doğrultu, eğim ve kayma açısı: 316° , 80° , -91°) ile oluşan bu depremin basit bir kırılmayla 59 km odak derinliğinde meydana geldiğini, kırığın tek yönlü olarak KB'ya doğru ilerlediğini belirlemiştir. Sismik moment değerinin (M_0) 2.55×10^{21} Nm olduğunu, enerjinin büyük oranda ilk 60 sn içerisinde boşaldığını ve kırılma süresinin yaklaşık 75 sn olduğunu rapor etmiştir. Ayrıca, depremin episantr noktasının KB'sında 75 km uzunluklu yüksek kayma bölgesinin oluştuğunu ve 180 km x 96 km boyutlarındaki fay düzlemi üzerinde meydana gelen maksimum yerdeğiştirme miktarının 14.5 m olduğunu da saptamıştır.

VERİ VE YÖNTEMLER

Telesismik P- ve SH- dalga şekli Modelleme

Bu çalışmada gerçekleştirilen ters çözüm işlemlerinde telesismik uzaklıklardaki (30° - 90°) sismik istasyonlarda kaydedilen cisim dalgaları (P- ve SH-) ile yapay olarak üretilen dalga şekilleri ve genlikleri karşılaştırılmıştır. Belirlenen kaynak mekanizması parametreleri, fayın doğrultu, eğim ve kayma açıları, deprem odak derinliği ve sismik momenti (M_0) ve kırılmanın zaman içindeki davranışını gösteren kaynak zaman fonksiyonudur. Telesismik dalga şekli modelleme ters çözüm yönteminde, ikili kuvvet çifti (double-couple) yaklaşımı kullanılmakta ve ortamın nokta kaynak, doğrusal, homojen, elastik ve izotrop olduğu varsayılmaktadır. Telesismik deprem verileri, IRIS (*Incorporated Research Institutions for Seismology*) Uluslararası Sismoloji Veri Merkezi'nden alınarak analizlenmiştir. Depremlerin kaynak mekanizması çözümleri Zwick vd. (1994)'in geliştirdiği MT5 ters çözüm algoritması ile belirlenmiştir. Bu algoritma, telesismik uzun periyotlu (*Long-Period*) ve geniş-bantlı (*Broad-Band*) P- ve SH- dalga şekillerinin ters çözümüne dayalı olarak, depremin ikili kuvvet çifti kaynak mekanizması ve moment tensör çözümlerinin belirlenmesini sağlayan bir ters çözüm programıdır (McCaffrey vd., 1991). Doğrudan gelen P- ve SH- dalga

şekilleri ve yüzeyden yansıyan pP, pS ve sS yansıma fazlarını içeren dalga şekilleri öncelikle hız kaydından yerdeğiştirme kaydına dönüştürülmüştür. Dalga genlikleri, geometrik yayılma ve elastik olmayan atenüasyon faktörlerine göre düzeltilmektedir. Atenüasyon için Futterman Q operatörü t^* , P- ve SH- dalgaları için sırasıyla 1 sn ve 4 sn olarak alınmış ve telesismik uzaklıklardaki kayıtlar için sabit olarak kabul edilmiştir (Futterman, 1962). Ters çözüme giren telesismik istasyonların ağırlıklandırılması ise dalgaların ortalama göreceli genlikleri, dalga tipi ve odak küresi üzerindeki dağılımları dikkate alınarak yapılmıştır. Ters çözüm ile belirlenen kaynak parametrelerine ait hata miktarları Molnar ve Lyon-Caen (1989) ve Taymaz vd. (1990) tarafından önerilen klasik yöntemler ile belirlenmiştir. Telesismik dalga şekli modelleme ile ilgili daha detaylı bilgiye Taymaz vd. (1990, 1991), Tan ve Taymaz (2006), Yolsal-Çevikbilen ve Taymaz (2012, 2019) ve Fielding vd. (2013)' den ulaşılabilir.

Sonlu-Fay Kayma/Yırtılma Dağılımının Modellenmesi

Büyük depremlerin fay düzlemi boyunca gerçekleşen kayma/yırtılma dağılımları genelde karmaşık ve heterojen yapıdadırlar ve depremin ikincil etkileri üzerinde önem taşımaktadır (Yagi vd., 2012; Basili vd., 2013; Lay vd., 2013; Saltogianni vd., 2015; Yolsal-Çevikbilen vd., 2019). Bu çalışmada 2017 Chiapas – Meksika (M_w 8.2) depremine ait sonlu-fay kayma dağılımı modeli, ilk olarak Yagi ve Kikuchi (2000) tarafından geliştirilen ve daha sonra Yagi vd. (2012) tarafından çeşitli düzenlemelerle yenilenen ve birçok büyük depremin ($M_w > 7.0$) modellenmesinde kullanılan ters çözüm algoritması ile telesismik geniş bantlı P- dalga şekillerinin modellenmesi sonucunda saptanmıştır. Ters çözümde öncelikle fay düzlemi olarak seçilen düzlem $M \times N$ sayıda xx uzunluğu ve yy genişliğinde alt-düzleme bölünmüş ve her bir parça için τ yükselme zamanına sahip L sayıda üçgenden oluşan kaynak zaman fonksiyonu tanımlanmıştır. Başlangıç modeli olarak, ilk aşamada belirlenen kaynak mekanizması parametreleri (doğrultu, eğim, kayma açıları ve deprem odak derinliği) kullanılmıştır. Kayma vektörü, ters çözüm işlemi sırasında tüm parçalar için sabit olarak alınabileceği gibi serbest bırakılarak birbirlerinden bağımsız olarak ta alınabilmektedir. Bu çalışmada kayma açısı serbest bırakılarak, ters çözüm ile yeniden belirlenmiştir. Ayrıca, kırılma hızının (V_r) 3.2 km/sn olduğu kabul edilmiştir. Teorik olarak Green fonksiyonları, Kikuchi ve Kanamori (1991) yöntemine göre 0.1 sn örnekleme aralığı ile hesaplanmıştır. Hesaplamalarda hız modeli olarak PREM (Preliminary Reference Earth Model; Dziewonski ve Anderson, 1981) yer modeli kullanılmıştır. Kırılma işlemini daha ayrıntılı belirleyebilmek için fay düzlemi çok sayıda alt-düzleme ve kaynak zaman fonksiyonunu ise çok sayıda üçgen fonksiyona bölünebilir. Ancak model parametrelerinde artış, çözümde duraysızlığa neden olmakta ve böylece verideki çok küçük bir değişim çözümde büyük değişime yol

açabilmektedir. Daha duraylı çözümler elde edebilmek için, minimum Akaike Bayesian kriterleri (*ABIC*) kullanılmış, kaymanın zaman ve uzaydaki dağılımına göre yumuşatma işlemi (smoothing) uygulanmıştır. Ters çözüm işlemleri sonucunda, 2017 Chiapas (Meksika) depreminin fay düzlemi üzerindeki kayma dağılımı, kırılmanın zaman içerisindeki davranışı, kırılan alanın boyutları (fay uzunluğu ve genişliği), moment oran fonksiyonu, maksimum ve ortalama yerdeğiştirme miktarları ve gerilme düşümü gibi dinamik deprem parametreleri belirlenmiştir (Çizelge 1).

Sayısal Tsunami Simülasyonları

Bu çalışmada Liu vd. (1998) ve Wang (2009) tarafından geliştirilen COMCOT (*Cornell Multi-grid Coupled Tsunami Model*) algoritması kullanılarak bu deprem için sayısal tsunami simülasyonu gerçekleştirilmiştir. Simülasyonda 30 yay-sn çözünürlüklü GEBCO-BODC (<https://www.gebco.net>) batimetri verisi kullanılmıştır. Algoritma, küresel koordinatlarda sığ su denklemlerini hesaplayabilmek için kademeli “leap-frog” (sıçrayan kurbağa) sonlu fark şemasını kullanmaktadır. Yöntem, başlangıçtaki dalga yüksekliğinin modellenmesini, tsunami dalga yayılımının ve çeşitli kıyı bölgelerinde maksimum dalga yüksekliklerinin hesaplanmasını kapsamaktadır. Genel olarak, sayısal tsunami simülasyonlarında başlangıç dalga yüksekliğinin, deprem nedeniyle deniz tabanında oluşan deformasyon ile aynı olduğu varsayılmaktadır (Gica vd., 2007; Titov vd., 2005; Okal vd., 2009; Yolsal-Çevikbilen ve Taymaz, 2012; Ulutaş, 2013; Yolsal-Çevikbilen vd., 2017, 2019). Bu makalede, 08 Eylül 2017 Chiapas-Meksika (M_w 8.2) depreminin deniz tabanında meydana getirdiği çökme ve yükselme miktarları, depremin tekdüze kayma modeli ile oluşturduğu varsayılarak, Okada (1985) elastik dislokasyon yaklaşımı ile hesaplanmıştır (Wang, 2009). Deprem dış merkezi, deprem büyüklüğü, fay düzleminin doğrultusu, eğimi ve kayma açısı ve faylanan alanın boyutları ve fay düzlemi üzerinde meydana gelen ortalama yerdeğiştirme miktarı (Çizelge 1) kullanılarak deniz tabanında deprem nedeniyle oluşan düşey yükselme ve çökme miktarları hesaplanmıştır. Bu yaklaşıma göre, belli bir derinlikte bulunan dikdörtgen şekilli fay düzleminde oluşan kayma/kırılma, yarı sonsuz elastik ortamda bir gerilme alanı oluşturarak deprem esnasında deniz tabanında deformasyona neden olur (Mansinha ve Smylie, 1971; Okada, 1985). Kaynak parametrelerinin başlangıç tsunami dalgasına ve tsunami simülasyon sonuçlarına etkileri/katkıları farklıdır ve bu etkiler birçok makalede detaylı olarak tartışılmıştır (Geist, 1999; Yolsal ve Taymaz, 2010). Örneğin, Yolsal ve Taymaz (2010) kırılma olduğu anda meydana gelen başlangıç tsunami dalgası yüksekliğine ve kıyılarda hesaplanan dalga genliklerine en fazla etki eden deprem kaynak parametresinin kaynaktan boşalan enerjinin miktarı olan sismik moment (M_0) ve dolayısıyla depremin büyüklüğü (M_w) olduğunu önermektedir. Tsunami simülasyon sonuçlarını etkileyen bir diğer önemli parametrenin deprem lokasyonu olduğunu, deprem

konumuna bağlı olarak, episantr ve çeşitli kıyılar arasındaki uzaklıklar değişeceği için tsunami dalgalarının kıyılara ulaşma süreleri ve genliklerinin de değişim göstereceğini rapor etmişlerdir. Odak mekanizması çözümünün değişmesi durumunda ise tsunami dalgalarının yayılma doğrultuları değişmekte ve dolayısıyla dalgaların kıyılara ulaşma süreleri değişerek farklı mekanizmalar için farklı şekil ve genliklerde yapay tsunami dalgaları elde edilmektedir.

Tsunami simülasyonunda 2 yay-dk ve 0.5 yay-dk hesaplama çözünürlüğüne sahip iki ayrı bölge tanımlanmıştır. Biri diğerini içine alan ve farklı hesaplama çözünürlüklü bu iki bölge için yapılan sayısal simülasyonlarda geçerli olan koordinat sistemi küresel koordinat sistemidir. Okyanus tabanının sürtünme kuvveti simülasyonda hesaba katılmış ve hesaplamalarda Manning katsayısı 0.025 olarak alınmıştır. Her iki bölge için dalga yüksekliği ve kuzey-güney ve doğu-batı yönlü dalga hızı hesaplanmıştır. Tsunami dalga yüksekliği hesaplanırken, 2 yay-dk hesaplama çözünürlüğüne sahip olan bölgede doğrusal sığ su denklemleri, diğer bölgede ise doğrusal olmayan sığ su denklemleri kullanılmıştır. Tsunami dalgalarının okyanus içerisinde 4 saat'lik süre içinde yayılımı belirlenmiş ve simülasyondaki hesaplama zaman aralığı (Δt) Courant-Friedrichs-Lewy (CFL) kriterini sağlayacak şekilde 1 sn olarak alınmıştır. İki bölge arasındaki sınır koşulu olarak ise açık (etkisiz) sınır koşulu seçilmiştir. Tsunami dalgalarının okyanus içerisinde yayılımları ve çeşitli kıyılarda hesaplanan yapay tsunami dalgalarının karakteristik özellikleri, kıyı ve açık denizlerde ölçülen ve Gerçek-Zamanlı Derin Deniz Tsunami Belirleme ve Raporlama Şamandıraları (DART) ve kıyılardaki gelgit ölçerler (tide-gauge) tarafından kaydedilen gözlemsel tsunami dalgalarıyla karşılaştırılmıştır (NDBC, 2017; IOC, 2017). Gözlemsel DART kayıtlarında deniz seviyesi değişimi ve zaman bilgileri tespit edildikten sonra, depremin oluş zamanından DART verisindeki değişimin gözlemlendiği zaman çıkartılmış ve saat formatına dönüştürülmüştür. Bu işlemde sonra üst üste birden fazla kaydedilmiş veriler silinmiştir. Gel-git ölçer verilerinde ise depremin oluş zamanına göre verinin başladığı zaman belirlenmiştir. Daha sonra, tsunami kayıtları örnekleme aralığı 15 sn olacak şekilde tekrar örneklenmiştir. Ayrıca, gel-git etkilerini ve yüksek frekanslı deniz seviyesi değişimlerini gözlemsel tsunami verilerinden atmak için alçak geçişli ve yüksek geçişli Butterworth filtreleme işlemleri uygulanmıştır.

SONUÇLAR

08 Eylül 2017 Chiapas - Meksika (M_w 8.2) depremine ait kaynak mekanizması çözümü telesismik uzun periyotlu 25 P- ve 6 SH- dalga şeklinin kullanıldığı ters çözüm işlemi ile belirlenmiştir (Çizelge 1 ve Şekil 2). 2017 Chiapas depreminin küçük miktarda doğrultu

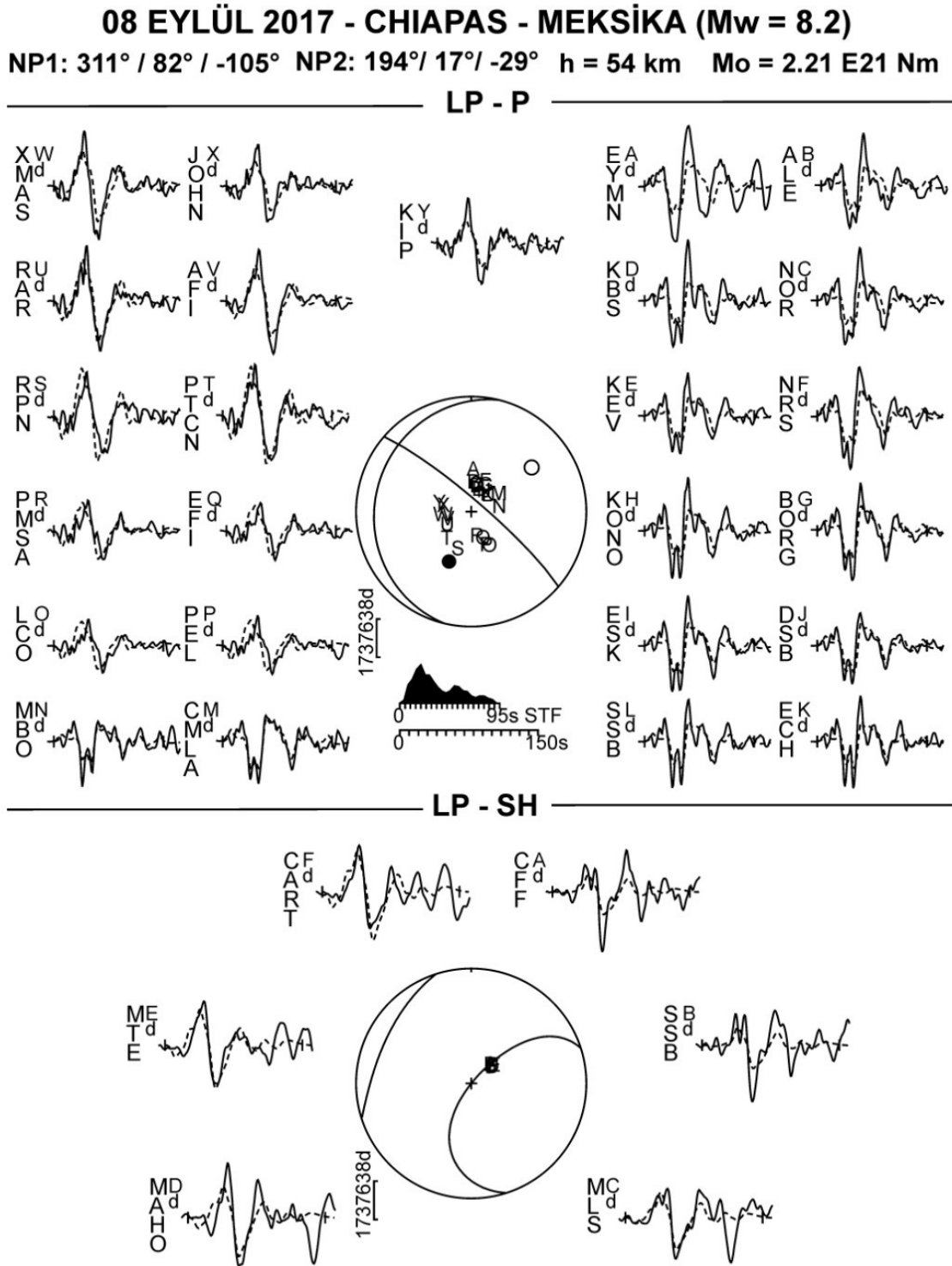
atım bileşenine sahip baskın normal faylanma mekanizması ile meydana geldiği belirlenmiştir. Fay düzleminin doğrultu, eğim ve kayma açıları sırasıyla, 311°, 82° ve -105° olarak belirlenmiştir (Çizelge 1).

Çizelge 1. Ters çözüm işlemleri sonucunda 08 Eylül 2017 Chiapas-Meksika (M_w 8.2) depremine ait olarak belirlenen kaynak mekanizması parametreleri. * ile işaretlenen parametreler USGS-NEIC deprem kataloğundan alınmıştır.

Table 1. Source mechanism parameters of the September 08, 2017 Chiapas-Mexico (M_w 8.2) earthquake obtained by this study. * denotes the parameters taken from USGS-NEIC earthquake catalogue.

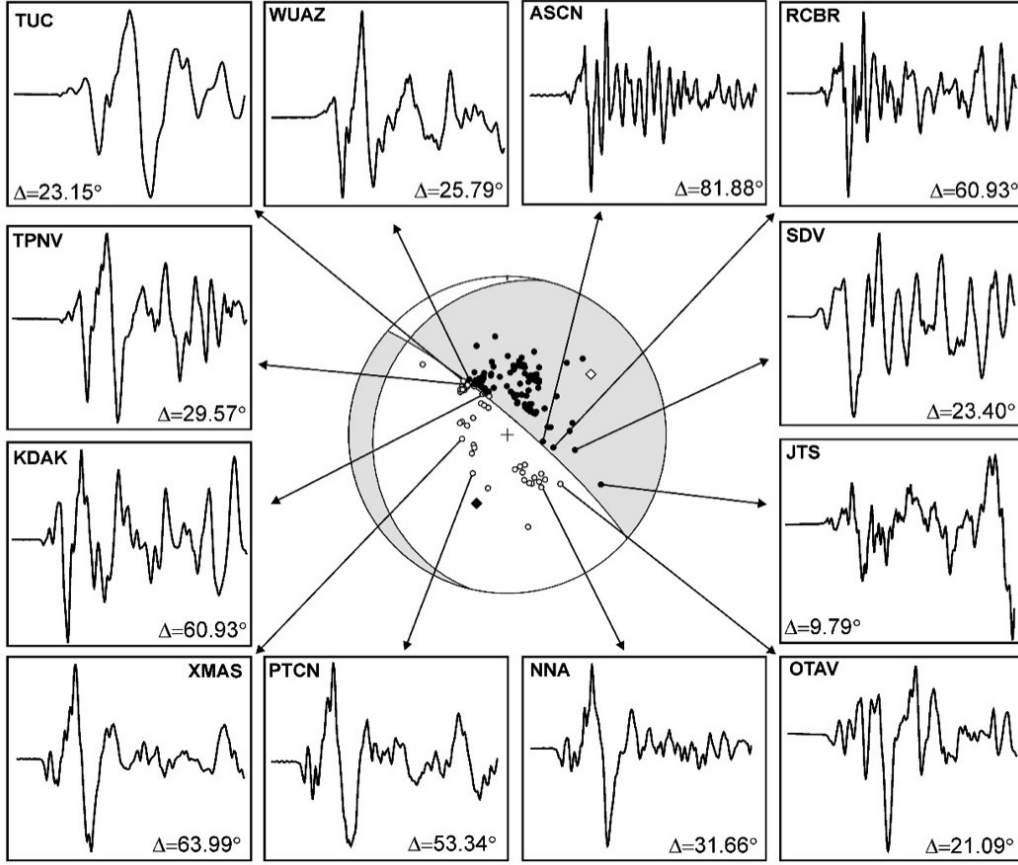
	08 Eylül 2017	
	Chiapas (Meksika) depremi	
	Nokta-Kaynak İkili-kuvvet çifti	Sonlu-fay Kayma modeli
Enlem (K°)	15.022*	15.022*
Boylam (B°)	93.899*	93.899*
Oluş Zamanı (h:m:s)	04:49:19*	04:49:19*
Odak Derinliği (km)	54	54
Doğrultu (ϕ , °)	311	311
Eğim (δ , °)	82	82
Kayma açısı (λ , °)	-105	-85.9
Fay uzunluğu (L, km)	-	125
Fay genişliği (W, km)	-	55
Ortalama yerdeğiştirme (m)	-	5.2
Maksimum yerdeğiştirme (m)	-	22.8
$M_o \times 10^{21}$ (Nm)	2.21	2.295
M_w	8.2	8.2

Deprem odak derinliği sığ olup, 54 km olarak saptanmıştır. Kaynak zaman fonksiyonu, odakta başlayan basit yapıllı bir kırılmanın meydana geldiğini, enerji boşalımının büyük ölçüde ilk 60-70 sn içerisinde gerçekleştiğini ve sismik moment değerinin (M_o) 2.21×10^{21} Nm olduğunu göstermektedir (Şekil 2). Yakın alan ve telesismik uzaklıklarda yer alan istasyonlarda kaydedilen P- dalgası ilk hareket yönlerinin odak küresi üzerindeki azimutal dağılımları ters çözüm sonucu ile oldukça uyumludur. Örneğin, KB-GD uzanımlı fay düzlemine çok yakın yerde bulunan ve yukarı doğru P- dalgası ilk hareket yönünü gösteren deprem kaydına sahip WUAZ ($\Delta=25.79^\circ$) istasyonu odak mekanizması çözümü ile uyumlu olarak sıkışma bölgesinde, aşağı doğru P- dalgası ilk hareket yönünü gösteren KDAK ($\Delta=60.93^\circ$) istasyonu ise genişleme bölgesinde yer almaktadır (Şekil 3). Kaynak mekanizması parametrelerinin belirlenmesi esnasında yapılan hata miktarlarının ise yaklaşık olarak $\pm 5-10^\circ$ olduğu saptanmıştır.



Şekil 2. 08 Eylül 2017 Chiapas-Meksika ($M_w 8.2$) depremine ait olarak telesismik uzun periyotlu 25 P- ve 6 SH- dalga şeklinin modellenmesiyle belirlenen odak mekanizması çözümü. Her iki düğüm düzlemi için saptanan doğrultu, eğim ve kayma açıları, deprem odak derinliği, sismik moment değeri şeklin üzerinde özetlenmiştir. Kaynak zaman fonksiyonu (STF) şeklin ortasında P- odak küresinin altında gösterilmiştir. P- ve SH- odak küreleri, alt yarımküre projeksiyon açılı ile çizilmiştir. P- ve T- eksenleri sırasıyla dolu ve boş daireler ile gösterilmiştir (detaylar için bkz. Meriç, 2019).

Figure 2. Minimum misfit solution of the September 08, 2017 Chiapas-Mexico earthquake ($M_w 8.2$) obtained by using teleseismic long period 25 P- and 6 SH- waveforms. Strike, dip and rake angles of nodal planes, focal depth and seismic moment of this earthquake is given on header. The source time function (STF) is also given in the middle of figure, and beneath it is shown the time scale used for the waveforms. Focal spheres are shown with P (top) and SH (bottom) nodal planes in lower hemisphere projections. P- and T- axes are marked by solid and open circles, respectively (see for details Meriç, 2019).



Şekil 3. 08 Eylül 2017 Chiapas-Meksika (M_w 8.2) depremine ait olarak, yakın ve uzak alanda yer alan deprem kayıt istasyonları tarafından kaydedilen P- dalgası ilk hareket yönlerinin azimut açısına bağlı olarak dağılımı. Yukarı ve aşağı yönlü P- dalgası ilk hareket yönleri, sırasıyla siyah ve beyaz daireler ile gösterilmiştir (detaylar için bkz. Meriç, 2019).

Figure 3. Azimuthal distributions of P- wave first motion polarities of 08 September 2017 Chiapas-Mexico earthquake recorded at near-field and teleseismic seismic stations. Up and down polarities are shown with black and open circles, respectively (see for details Meriç, 2019).

Fay düzlemi üzerinde gerçekleşen kayma/yırtılma dağılımını belirleyebilmek için yapılan ters çözüm işleminde ise 39 adet telesismik genişbantlı P- dalga şekli kullanılmıştır (Şekil 4 ve 5). Deprem meydana geldiği bölgenin genel tektonik yapısı gözönünde bulundurularak, 82° eğim açısına sahip KB-GD uzanımlı düzlemin fay düzlemi olduğu kabul edilmiştir. Fay düzlemi 5 km x 5 km grid boyutunda 24 x 10 adet alt-faya bölünmüştür. Kaynak zaman fonksiyonu 2 sn yükselme zamanına sahip 15 adet üçgen fonksiyondan oluşmaktadır.

Kayma dağılımı modelinin belirlenmesi için, farklı boyutlarda ve sayılarda alt-faya bölünmüş fay düzlemi ile 14 adet ters çözüm yapılmıştır, bunlardan en küçük varyans değerine sahip, gözlemsel ve sentetik dalga şekilleri arasında en iyi uyumu veren model, sonuç modeli olarak seçilmiştir. Kayma modeli, fay düzlemi üzerinde gerçekleşen kırılmanın yaklaşık 60 sn sürdüğünü ve telesismik P- ve SH- dalga şekli modelleme sonucu ile uyumlu olarak basit yapıldığını göstermektedir (Şekil 2 ve 4). 125 km fay

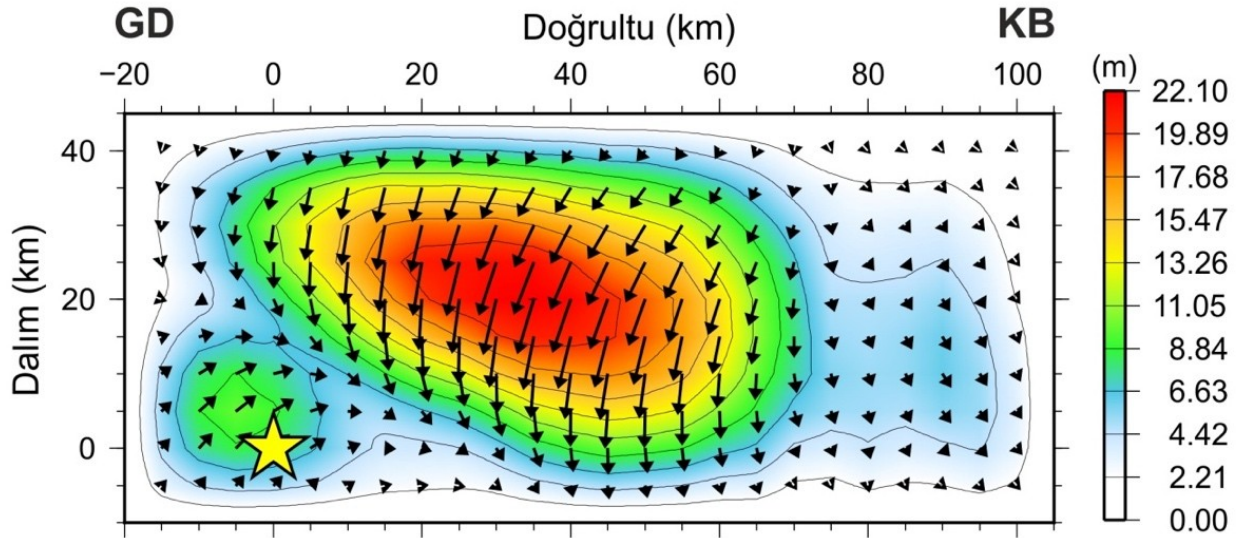
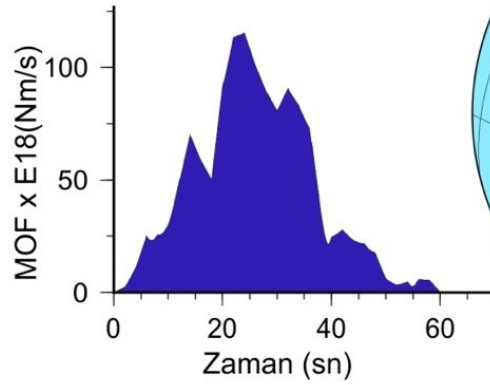
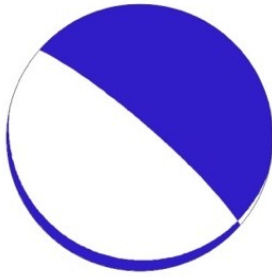
uzunluğuna ve 55 km fay genişliğine sahip olarak belirlenen KB-GD uzanımlı fay düzlemi üzerinde meydana gelen maksimum yerdeğiştirme miktarının (D_{maks}) ise 22.10 m olduğu saptanmıştır. Belirlenen fay boyutları, Wells ve Coppersmith (1994) ampirik bağıntıları ve depremin sismik momenti (M_0) 2.295×10^{21} Nm kullanılarak bulunan değerler (fay uzunluğu: 123 km; fay genişliği: 53 km, D_{maks} : 25 m) ile uyumludur (Çizelge 1 ve Şekil 4).

08 Eylül 2017 Chiapas — Meksika (M_w 8.2)

NP1: $311^\circ/82^\circ/-86^\circ$ NP2: $104^\circ/9^\circ/-116^\circ$

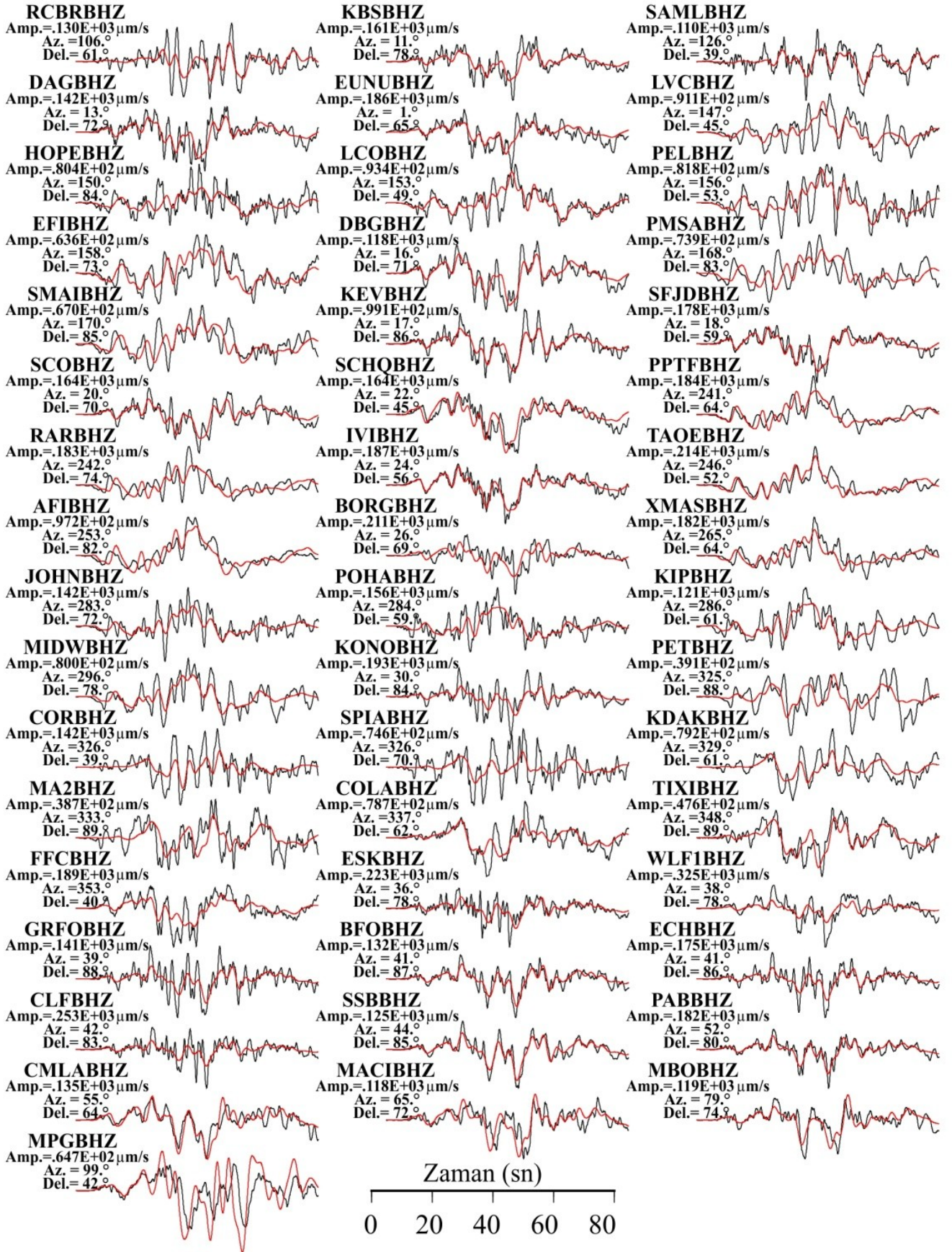
Sismik Moment (M_0) = 2.295×10^{21} Nm

Odak Derinliği = 54 km $V_{r_{max}} = 3.2$ (km/sec)



Şekil 4. 08 Eylül 2017 Chiapas-Meksika depremine (M_w 8.2) ait olarak belirlenen fay düzlemi üzerindeki sonlu-fay kayma dağılımı modeli. Odak mekanizması, kaynak zaman fonksiyonu ve ters çözümde kullanılan telesismik istasyonların dağılımları gösterilmiştir (detaylar için bkz. Meriç, 2019).

Figure 4. Finite-fault slip distribution model of the September 08, 2017 Chiapas-Mexico (M_w 8.2) earthquake determined by slip inversion. Focal mechanism, source time function and teleseismic station distribution used in inversion are also provided (see for details Meriç, 2019).



Şekil 5. 08 Eylül 2017 Chiapas - Meksika depremine (M_w 8.2) ait sonlu-fay kayma dağılımı ters çözüm işleminde kullanılan 39 adet telesismik geniş-bantlı gözlemsel (siyah) P- dalga şeklinin sentetik (kırmızı) dalga şekilleri ile karşılaştırılması (detaylar için bkz. Meriç, 2019).

Figure 5. Comparison of teleseismic 39 observed broad-band (BB) P-waveforms (black) and synthetic waveforms (red) of the September 08, 2017 Chiapas-Mexico earthquake (M_w 8.2) (see for details Meriç, 2019).

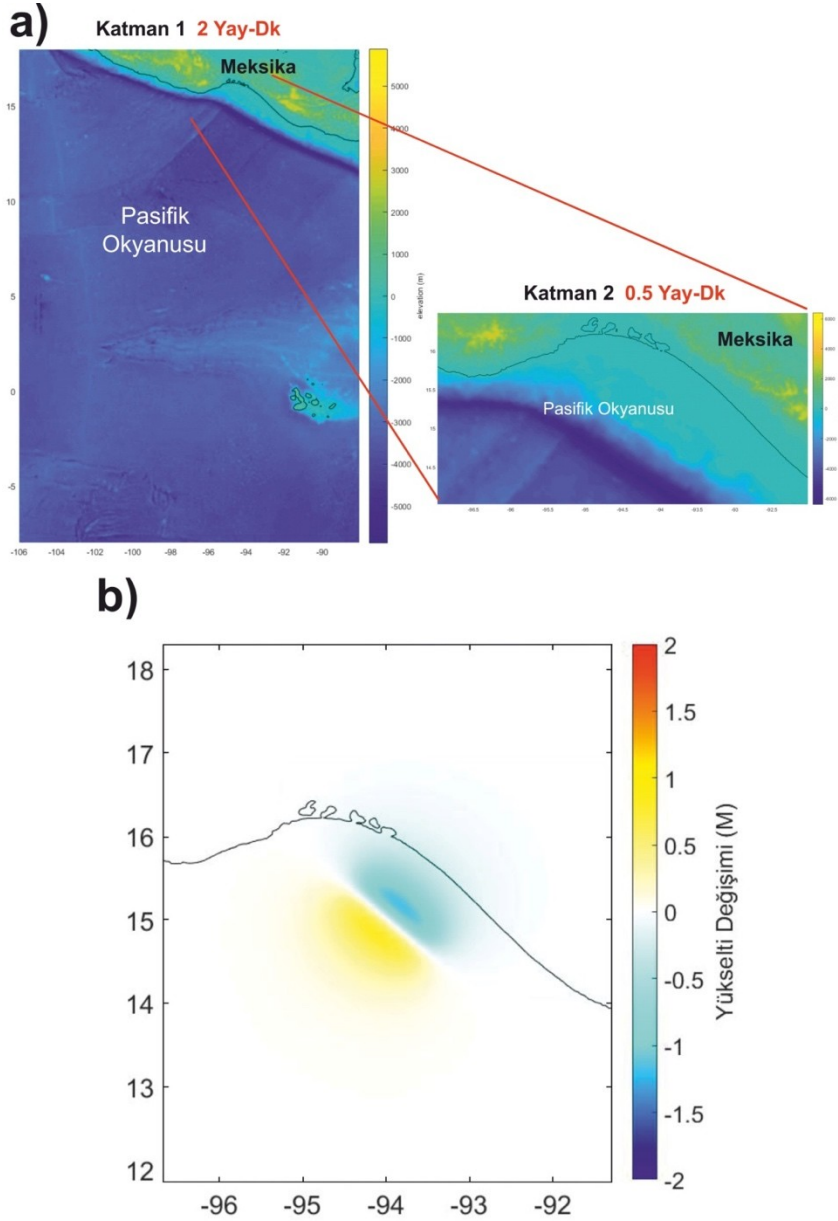
Son aşamada, 2017 Chiapas depremi (M_w 8.2) ve tsunamisine ait matematiksel tsunami simülasyonu gerçekleştirilmiştir. Yapılan sayısal simülasyonda, KB-DG uzanımlı fay düzlemi (doğrultu: 311° , eğim: 82° , kayma: -105°) üzerinde tekdüze kayma dağılımı (fay uzunluğu: 125 km, fay genişliği: 55 km) olduğu varsayılmıştır. Aki ve Richards (1980) bağıntısı ($M_o = \mu A D_{ort}$) ile fay düzlemi üzerinde meydana gelen ortalama kayma miktarı ($D_{ort} = 5.2$ m) simülasyonda kullanılan bir diğer giriş parametresidir. Bu deprem için Adriano vd. (2018) tarafından önerildiği şekilde katılık (rijidite) değeri (μ), 7×10^{11} dyn/cm² olarak alınmıştır. Deprem olduğu anda meydana gelen başlangıç tsunami dalgasının çökme bölgesi yüksekliği -1.172 m, tepe bölgesi yüksekliği ise 0.791 m olarak hesaplanmıştır. Hesaplanan çökme miktarı yükselme miktarından daha fazladır; bu da depremin kaynak mekanizması çözümü (örn., normal faylanma) ile uyumludur. Oluşan tsunami dalgalarının 4 saatlik süre boyunca okyanus içerisinde ilerleyişi modellenmiş ve dalgaların çeşitli kıyılara varış zamanları, dalga şekilleri ve genlikleri belirlenmiştir (Şekil 6 ve 7).

Çeşitli kıyılar için hesaplanan tsunami dalgalarının genlik, şekil ve zaman özellikleri, 3 adet okyanus içi DART şamandıraları (örn., DART-32411, DART-32413 and DART-43413) ve 1 adet gel-git ölçer (örn., Huatulco) tarafından kaydedilen gerçek-zamanlı tsunami kayıtları ile karşılaştırılmıştır (Çizelge 2). Genel olarak bakıldığında, kayıtlara ulaşan ilk tsunami dalgasının varış zamanının ve dalga şekillerinin özellikle okyanus içi DART kayıtları ile uyumlu olduğu görülmektedir. Ancak Huatulco gel-git ölçer istasyonu tarafından kaydedilen tsunami dalgası ile hesaplanan dalga arasında belirgin bir varış zamanı farkı gözlenmektedir (Şekil 7).

Çizelge 2. Gerçek-zamanlı tsunami verilerinin kaydedildiği DART şamandıraları ve gelgit ölçer istasyonlarının koordinatları (bkz. NDBC, 2017; IOC, 2017).

Table 2. Coordinates of DART buoys and tide-gauge stations where real-time tsunami data are recorded (see NDBC, 2017; IOC, 2017).

İstasyon adı	Enlem (°K)	Boylam (°D)
DART 32411	4.953	-90.880
DART 32413	-7.406	-93.517
DART 43413	11.012	-100.083
Huatulco	15.7500	-96.1168



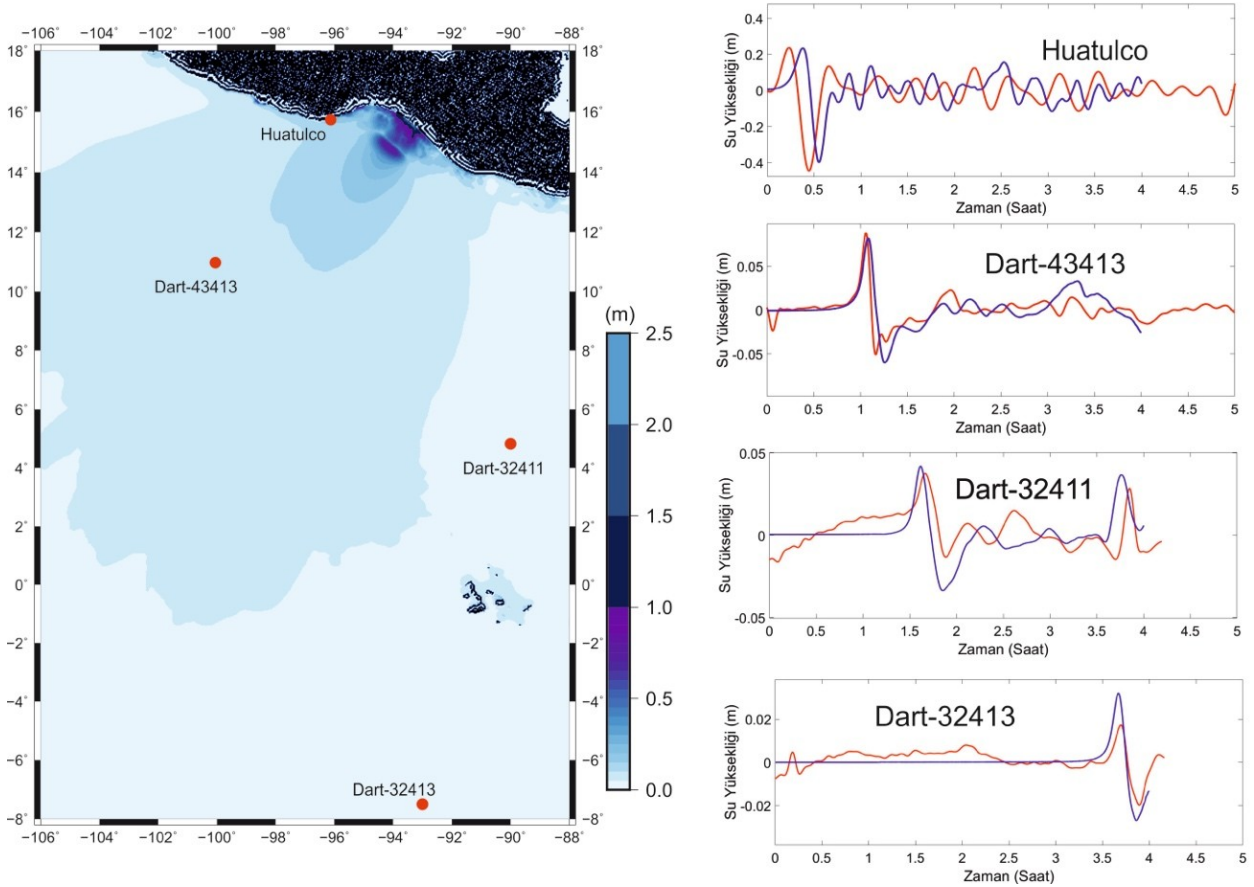
Şekil 6. (a) Sayısal tsunami simülasyonunda tanımlanan 2 yay-dk ve 0.5 yay-dk hesaplama çözünürlüğüne sahip katmanlar, **(b)** Tekdüze kayma modeline dayalı olarak gerçekleştirilen simülasyonda hesaplanan başlangıç tsunami dalga yüksekliği. Başlangıç dalgası tepe noktası yüksekliği 0.791 m, çökme noktası yüksekliği ise -1.172 m olarak hesaplanmıştır.

Figure 6. (a) Computational layers with 2 arc-min and 0.5 arc-min used for numerical tsunami simulations, **(b)** Initial tsunami wave calculated using the uniform slip model of the 2017 Chiapas (Mexico) earthquake in tsunami simulation. The crest and trough of the initial wave is found as 0.791 m, and -1.172m, respectively.

TARTIŞMA

Deprem verilerinin ters çözüm işlemleri ile modellenmeleri sonucunda elde edilen deprem kaynak mekanizması parametrelerinin sayısal tsunami simülasyonlarda giriş parametresi olarak kullanılmasının gerekliliği bilinmektedir. Bu çalışmada yapılan ters çözüm işlemleri sonucunda, 08 Eylül 2017 Chiapas-Meksika (M_w 8.2) depreminin normal faylanma mekanizması ile 54 km odak derinliğinde meydana geldiği belirlenmiştir (Şekil 2). Yıkıcı olan bu deprem Orta Amerika Hendeği boyunca olan dalma batma zonunda sismik boşluk

olarak nitelendirilen bir bölgede meydana gelmiştir, ancak bindirme mekanizması ile oluşmadığı için bu depremin bölgedeki mevcut gerilmeyi boşaltmadığı çeşitli Coulomb gerilme analizleriyle saptanmıştır (örn., Heidarzadeh vd., 2018; Spagnotto vd., 2018). Bu çalışmada telesismik P- dalga şekillerinin ters çözümü ile elde edilen sonlu-fay kayma dağılımı modeli, fay düzlemi üzerinde gerçekleşen kırılmanın odakta başladığını, eğim doğrultusu boyunca deniz tabanına yakın bir derinliğe kadar ilerlediğini, basit yapıldığını ve maksimum yerdeğiştirmenin (D_{maks} : 22.10 m) deprem episantır noktasının KB'sında yaklaşık 25 km derinlikte meydana geldiğini göstermektedir. Kırılma süresi ise 60-70 sn olarak belirlenmiştir (Şekil 2 ve 4). Benzer şekilde, Heidarzadeh vd. (2018) kırılma süresini 59.5 sn, Jiménez (2018) ise 75 sn olarak rapor etmiştir. İleride yapılacak çalışmalar ile 2017 Chiapas (Meksika) depreminin fay düzlemi üzerinde meydana gelen kayma/yırtılma dağılımının, farklı veri setlerinin (örn., yakın alan ivme kayıtları, tsunami ve GPS verileri vb) ters çözüm işlemlerine eklenmesiyle daha detaylı olarak belirlenebilmesi mümkündür.



Şekil 7. 08 Eylül 2017 Chiapas-Meksika depremi tsunamisi simülasyonunda 2 yay-dk hesaplama çözünürlüğü ile hesaplanan maksimum tsunami dalga yüksekliklerinin dağılımı ve hesaplanan (mavi) ve gözlemsel (kırmızı) tsunami dalgalarının karşılaştırılması. Kırmızı daireler DART şamandıraları ve gelgit ölçerin konumunu göstermektedir.

Figure 7. Computed maximum tsunami wave heights for the September 08, 2017 Chiapas-Mexico earthquake with a computational grid of 2 arcmin, and comparison of the real-time tsunami data (red) recorded by DART buoys and tide gauges with the calculated waveforms (blue). Red dots indicate the locations of the DART buoys and tide gauge station.

Son aşamada ise, fay düzlemi boyunca kayma dağılımının tekdüze (homojen) olduğu varsayımına dayalı olarak gerçekleştirilen sayısal tsunami simülasyonunda 2017 Chiapas (Meksika) depremine ait kaynak mekanizması parametreleri (Çizelge 1) giriş parametresi olarak kullanılmış ve Okada (1985) elastik dislokasyon yaklaşımına göre başlangıç tsunami dalgası hesaplanmıştır (Şekil 6b). Odak derinliğinde başlayıp yüzeye ulaşmayan kaymaların elastik dislokasyon yaklaşımına göre okyanus tabanında oluşturduğu düşey yönlü çökme ve yükselme miktarları hesaplanabilir. Ayrıca, farklı dislokasyon modellerine dayalı olarak da tsunami oluşumu ve tsunami dalga ilerleyişi modellenenmektedir. Örneğin, doğrultu atımlı faylanmalarda fay düzlemi boyunca yatay yerdeğiştirmeler meydana gelmesine rağmen deniz tabanında düşey yerdeğiştirmelerin oluşabileceği ve bunun da tsunami oluşumuna neden olabileceğini gösteren çeşitli çalışmalar bulunmaktadır (örn., Geist ve Dmowska, 1999; Geist ve Oglesby, 2014; Yolsal-Çevikbilen vd., 2017). Deprem nedeniyle oluşan tsunami dalgalarının kaynaktan başlayarak 4 saatlik süre boyunca Pasifik Okyanusu'nda ilerleyişi modellenmiştir. Gerçek zamanlı tsunami kayıtları ile yapılan karşılaştırmalar sonucunda, okyanus içerisinde yer alan DART şamandıralarının kaydettiği tsunami dalgalarının yeterli düzeyde modellenemediği, ancak yapay ve gözlemsel tsunami dalgalarında genlik ve zaman bakımından en belirgin uyumsuzluğun yakın alanda yer alan gel-git ölçer kaydında (bkz. Huatulca gel-git ölçer kaydı; Şekil 7) gözlemlendiği saptanmıştır. Bu uyumsuzluğun, sayısal simülasyonda kullanılan 30 yay-sın çözünürlüklü GEBCO-BODC batimetri verisinin nispeten düşük çözünürlüklü olması ve özellikle yakın kıyı detaylarını tam olarak gösterememesinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Özellikle kıyılarda bulunan gel-git ölçer kayıtlarının deniz içi ve kıyı batimetri yapısından oldukça fazla etkilendiği ve bu nedenle yakın alanda yer alan bölgeler için yapılan hesaplamalarda daha yüksek çözünürlüklü batimetri verisinin kullanılmasının daha iyi sonuçlar verdiği birçok çalışmada örnekler ile gösterilerek vurgulanmaktadır (örn., Satake, 1988; Mofjeld vd., 2001; Yolsal vd., 2007; Tang vd., 2008; Gusman vd., 2014; Adriano vd., 2018; Chacón-Barrantes, 2018). Ayrıca, güncel çalışmalar sayısal tsunami simülasyonlarında sonlu-fay kayma/yırtılma dağılımının kullanılmasının gözlemsel ve hesaplanan tsunami dalgaları arasındaki uyumun artmasında etkili olabileceğini göstermektedir (Ulutaş, 2013; Yolsal-Çevikbilen vd., 2019). Örneğin, Yolsal-Çevikbilen vd. (2019), 28 Ekim 2012 Haida Gwaii - Kanada (M_w 7.7) ve 16 Eylül 2015 Illapel - Şili (M_w 8.3) depremlerine ait homojen ve homojen olmayan kayma dağılımı modellerini kullanarak Pasifik Okyanusu içinde ve çeşitli kıyılarda tsunami dalga yüksekliklerini hesaplamış, fay düzlemi üzerinde meydana gelen heterojen kayma dağılımına dayalı olarak yapılan simülasyon sonuçlarının tsunami dalga özelliklerinin daha iyi belirlenmesinde etkili olduğunu rapor etmişlerdir. Bu nedenle özellikle kıyılarda gel-git ölçerler tarafından kaydedilen tsunami dalgalarının modellenebilmesi için yapılacak olan ileriki simülasyon

çalışmalarında yüksek çözünürlüklü batimetri verisinin ve tekdüze olmayan sonlu-fay kayma dağılımı modelinin kullanılmasının gerekliliği bu çalışma ile de gösterilmiştir.

KATKI BELİRTME

Bu çalışma H.T. Meriç'in yüksek lisans tez çalışmasının (Meriç, 2019) bir bölümünü içermektedir. Çalışmanın yapılmasındaki desteklerinden dolayı Türkiye Bilimler Akademisi – Üstün Başarılı Genç Bilim İnsanı Ödülleri Programı'na (TÜBA-GEBİP), İstanbul Teknik Üniversitesi – Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi'ne (İTÜ-BAP) ve Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu'na (TÜBİTAK) teşekkür ederiz. Çalışmada, Uluslararası Sayısal Sismograf Ağı (FDSN) ve Küresel Sayısal Sismograf Ağı (GDSN) istasyonları tarafından kaydedilen telesismik deprem kayıtları, IRIS-DMC web sayfasından (<http://ds.iris.edu/wilber3>) alınmıştır. Deprem verilerinin ters çözüme hazırlanması işlemleri SAC2000 program paketi (Goldstein vd., 2003; Goldstein ve Snoke, 2005) ile, haritaların hazırlanması ise haritalama programı GMT (The Generic Mapping Tools; Wessel ve Smith, 1998) ile yapılmıştır. Tsunami kayıtları "www.ioc-sealevelmonitoring.org" ve "www.ndbc.noaa.gov/dart.shtml" kaynaklarından alınmıştır. Ayrıca, sonlu-fay kayma dağılımı modelinin belirlenmesinde kullanılan ters çözüm programı için Yuji Yagi'ye (Tsukuba Üniversitesi, Japonya), sayısal tsunami simülasyonunda kullanılan COMCOT (*Cornell Multi-grid Coupled Tsunami Model*) algoritması için ise P.L.-F. Liu (Cornell Üniversitesi, ABD) ve Xiaoming Wang'a (Jeoloji ve Nükleer Bilim Enstitüsü, Yeni Zelanda) teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR

- Adriano, B., Fujii, Y., Koshimura, S., Mas, E., Ruiz-Angulo, A. and Estrada, M., 2018. Tsunami source inversion using tide gauge and DART tsunami waveforms of the 2017 M_w 8.2 Mexico earthquake. *Pure and Applied Geophysics*, 175 (1), 35-48.
- Aki, K. and Richards, P., 1980. *Quantitative seismology: theory and methods*. W.H. Freeman and Co., New York.
- Ambraseys, N.N. 1962. Data for the investigation of the seismic sea waves in the Eastern Mediterranean. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 52, 895–913.
- Ammon, C.J., Lay, T., Kanamori, H. and Cleveland, M., 2011. A rupture model of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake. *Earth, Planets and Space*, 63, 693-696.
- Antonopoulos, J. 1980. Data from investigation on seismic sea-waves events in the Eastern Mediterranean from the birth of Christ to 1980 AD (6 parts). *Annali di Geofisica*, 33, 141–248.

- Basili, R., Tiberti, M. M., Kastelic, V., Romano, F., Piatanesi, A., Selva, J. and Lorito, S., 2013. Integrating geologic fault data into tsunami hazard studies. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 13, 1025–1050.
- Bohnoff, M., Hajes, H.-P. and Meier, T., 2005. Deformation and stress regimes in the Hellenic subduction zone from focal Mechanisms. *Journal of Seismology*, 9, 341–366.
- Chacón-Barrantes, S., 2018. The 2017 México tsunami record, numerical modeling and threat assessment in Costa Rica. *Pure and Applied Geophysics*, 175, 1939-2950.
- Dziewonski, A.M., and Anderson, D.L., 1981. Preliminary Reference Earth Model (PREM). *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 25, 297-356.
- Fielding, E.J., Lundgren, P.R., Taymaz, T., Yolsal-Çevikbilen, S. and Owen, S.E., 2013. Fault-Slip source models for the 2011 M7.1 Van earthquake in Turkey from SAR interferometry, pixel offset tracking, GPS and seismic waveform analysis. *Seismological Research Letters*, 84 (4), 579-593.
- Franco, S.I., Kostoglodov, V., Larson, K.M., Manea, V.C., Manea, M. and Santiago, J.A., 2005. Propagation of the 2001 – 2002 silent earthquake and interplate coupling in the Oaxaca subduction zone, Mexico. *Earth Planets Space*, 57, 973 – 985.
- Franke, D., Schnabel, M., Ladage, S., Tappin, D.R., Neben, S., Djajadihardja, Y. S., Müller, C., Kopp, H. and Gaedicke, C., 2008. The great Sumatra–Andaman earthquakes - Imaging the boundary between the ruptures of the great 2004 and 2005 earthquakes. *Earth and Planetary Science Letters*, 269 (1–2), 118–130.
- Futterman, W., 1962. Dispersive body waves. *Journal of Geophysical Research*, 67, 5279 – 5291.
- GEBCO-BODC, “General Bathymetric Chart of the Oceans–British Oceanographic Data Centre”. <https://www.gebco.net>”, Son erişim tarihi: Ekim 2018.
- Geist, E.L., 1999. Local tsunamis and earthquake source parameters. *Adv. Geophys.*, 39, 117– 209.
- Geist, E.L. and Dmowska, R., 1999. Local tsunamis and distributed slip at the source. *Pure and Applied Geophysics*, 154, 485–512.
- Geist, E.L. and Oglesby, D.D., 2014. Earthquake Mechanism and Seafloor Deformation for Tsunami Generation. *Encyclopedia of Earthquake Engineering*, doi: 10.1007/978-3-642-36197-5_296-1.
- Gica, E., Teng, M., Liu, P.L. -F, Titov, V.V. and Zhou, H., 2007. Sensitivity analysis of source parameters for earthquake generated distant tsunamis. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, 133 (6), 429–441.
- Goldstein, P., Dodge, D., Firpo, M. and Minner, L., 2003. SAC2000: Signal processing and analysis tools for seismologists and engineers. In Lee W.H.K., Kanamori H., Jennings P.C. and Kisslinger C., Eds. Contribution to “The IASPEI International Handbook of Earthquake and Engineering Seismology”, Academic Press, London.

- Goldstein, P. and Snoke, A., 2005. SAC availability for the IRIS community: Incorporated Research Institutions for Seismology Newsletter, v. 7, no. 1.
- Guidoboni, E. and Comastri, A. 2005a. Catalogue of Earthquakes and Tsunamis in the Mediterranean area From the 11th to the 15th Century. INGV-SGA, Bologna.
- Guidoboni, E. and Comastri, A. 2005b. Two thousand years of earthquakes and tsunamis in the Aegean are (from 5th BC to 15th century). International Symposium on the Geodynamics of Eastern Mediterranean: Active Tectonics of the Aegean Region. Abstract Book: Kadir Has University, 15–18 June, 2005, İstanbul, Turkey, p. 242.
- Guo, R., Zheng, Y., Xu, J., Zhongshan, J., 2019. Seismic and aseismic fault slip associated with the 2017 M_w 8.2 Chiapas, Mexico earthquake sequence. Seismological Research Letters, 90 (3), 1111-1120.
- Gusman, A.R., Tanioka, Y., MacInnes, B.T. and Tsushima, H., 2014. A methodology for near-field tsunami inundation forecasting: Application to the 2011 Tohoku tsunami. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 119, 8186–8206, doi:10.1002/2014JB010958.
- Gusman, A.R., Mulia, I.E. and Satake, K., 2018. Optimum sea surface displacement and fault slip distribution of the 2017 Tehuantepec earthquake (M_w 8.2) in Mexico estimated from tsunami waveforms. Geophysical Research Letters, 45, 646-653.
- Heidarzadeh, M., Ishibe, T. and Harada, T., 2018. Constraining the source of the M_w 8.1 Chiapas, Mexico earthquake of 8 September 2017 using teleseismic and tsunami observations. Pure and Applied Geophysics, 175, doi:10.1007/s00024-018-1837-6.
- Howell, A., Jackson, J., Copley, A., McKenzie, D. and Nissen, E., 2017. Subduction and vertical coastal motions in the eastern Mediterranean. Geophysical Journal International, 211, 593-620.
- IOC, 2017. Intergovernmental Oceanographic Commission, <http://www.ioc-sealevelmonitoring.org>, Son Erişim Tarihi: Ekim 2017.
- Jamelot, A., Gailler, A., Heinrich, Ph., Vallage, A., Champenois, J., 2019. Tsunami Simulations of the Sulawesi M_w 7.5 Event: Comparison of Seismic Sources Issued from a Tsunami Warning Context Versus Post-Event Finite Source. Pure and Applied Geophysics, 176, 3351-3376.
- Jiménez, C., 2018. Seismic source characteristics of the intraslab 2017 Chiapas-Mexico earthquake (M_w 8.2). Physics of the Earth and Planetary Interiors, 280, 69-75.
- Kelleher, J., Sykes L. and Oliver J., 1973. Possible criteria for predicting earthquake locations and their application to major plate boundaries of the Pacific and the Caribbean. Journal of Geophysical Research, 78 (14), 2547–2585.
- Kelleher, J. and McCann., W., 1976. Buoyant zones, great earthquakes, and unstable boundaries of subduction. Journal of Geophysical Research, 81, 4885-4896.
- Kikuchi, M. and Kanamori, H., 1991. Inversion of complex body waves—III. Bulletin of the Seismological Society of America, 81 (6), 2335–2350.

- Lay, T., Kanamori, H., Ammon, C.J., Nettles, M., Ward, S. N., Aster, R.C., Beck, S.L., Bilek, S.L., Brudzinski, M.R., Butler, R., De Shon, H.R., Ekstrom, G., Satake, K. and Sipkin, S., 2005. The great Sumatra– Andaman earthquake of 26 December 2004. *Science*, 308, 1127–1133.
- Lay, T., Ye, L., Kanamori, H., Yamazaki, Y., Cheung, K.F., Kwong, K. and Koper, K.D., 2013. The October 28, 2012 M_w 7.8 Haida Gwaii underthrusting earthquake and tsunami: slip partitioning along the Queen Charlotte Fault transpressional plate boundary. *Earth and Planetary Science Letters*, 375, 57-70.
- Liu, P.L.F., Woo, S.B. and Cho, Y.S., 1998. Computer programs for tsunami propagation and inundation. Cornell University, Ithaca.
- Mansinha, L. and Smylie, D.E., 1971. The displacement fields of inclined faults. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 61, 1433–1440.
- McCaffrey, R., Zwick, P. and Abers, G., 1991. SYN4 Program. IASPEI Software Library, 3, 81-166.
- McNally, K.C. and Minster, J.B., 1981. Nonuniform seismic slip rates along the Middle America Trench. *Journal of Geophysical Research*, 86 (B6) , 4949–4959.
- Mendoza, C., 1993. Coseismic slip of two large Mexican earthquakes from teleseismic body waveforms: Implications for asperity interaction in the Mihoacan plate boundary segment. *Journal of Geophysical Research*, 98, 8197-8210
- Meriç, H.T., 2019. Source models of September 25, 2013 Acari-Peru (M_w 7.1) and September 08, 2017 Chiapas-Mexico (M_w 8.2) earthquakes and Tsunami Simulations. Istanbul Technical University, Graduate School of Science and Engineering and Technology, MSc. Thesis, 82 sayfa, İstanbul, Turkey.
- Mofjeld, H. O., Titov, V. V., González, F. I. and Newman, J. C., 2001. Tsunami scattering provinces in the Pacific Ocean. *Geophysical Research Letters*, 28 (2), 335–337.
- Molnar, P. and Lyon-Caen, H., 1989. Fault plane solutions of earthquakes and active tectonics of the Tibetan Plateau and its margins. *Geophysical Journal International*, 99, 123–154.
- Nishenko, S.P., 1991. Circum-Pacific seismic potential: 1989–1999. *Pure and Applied Geophysics*, 135 (2), 169–259.
- NDBC, 2017. National Data Buoy Center. <https://www.ndbc.noaa.gov>, Son Erişim Tarihi: Ekim 2017.
- Okada, Y., 1985. Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 75, 1135-1154.
- Okal, E.A. 1988. Seismic parameters controlling far-field tsunami amplitudes: A review. *Natural Hazards*, 1, 67–96.
- Okal, E.A., Fritz, H. M. and Sladen, A., 2009. 2004 Sumatra- Andaman tsunami surveys in the Comoro Islands and Tanzania and regional tsunami hazard from future Sumatra events. *South African Journal of Geology*, 112, 343-358.

- Okuwaki, R. and Yagi, Y., 2017. Rupture Process during the M_w 8.1 2017 Chiapas Mexico Earthquake: Shallow Intraplate Normal Faulting by Slab Bending. *Geophysical Research Letters*, 44, 11816-11823.
- Pakoksung, K., Suppasri, A., Imamura, F., Athanasius, C., Omang, A. and Muhari, A., 2019. Simulation of the Submarine Landslide Tsunami on 28 September 2018 in Palu Bay, Sulawesi Island, Indonesia, Using a Two-Layer Model. *Pure and Applied Geophysics*, 176, 3323-3350.
- Papadopoulos, G.A., Daskalaki, E., Fokaefs, A. and Giraleas, N. 2007. Tsunami hazard in the Eastern Mediterranean: strong earthquakes and tsunamis in the east Hellenic Arc and Trench system. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 7, 57–64.
- Ponce, L., Suarez, G. and Lomas, E., 1992. Geometry and state of stress of the downgoing Cocos plate in the Isthmus of Tehuantepec, Mexico. *Geophysical Research Letters*, 19, 773-776.
- Ramírez-Herrera, M.T., Néstor C., Ruiz-Angulo, A., Melgar, D. and Zavala-Hidalgo, J., 2018. The 8 September 2017 Tsunami triggered by the M_w 8.2 Intraplate Earthquake, Chiapas, Mexico. *Pure and Applied Geophysics*, 175 (1), 25-34.
- Ruiz-Constán, A., Galindo-Zaldivar, J., Pedrera, A., Célérier, B., Marín-Lechado, C., 2011. Stress distribution at the transition from subduction to continental collision (northwestern and central Betic Cordillera). *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 12 (12), Q12002, doi:10.1029/2011GC003824.
- Saltogianni, V., Gianniou, M., Taymaz, T., Yolsal-Çevikbilen, S. and Stiros, S., 2015. Fault-Slip Source Models for the 2014 M_w 6.9 Samothraki-Gökçeada Earthquake (North Aegean Trough): combining geodetic and seismological observations. *Journal of Geophysical Research – Solid Earth*, 120, doi:10.1002/2015JB012052.
- Satake, K., 1988. Effects of bathymetry on tsunami propagation: application of ray tracing to tsunamis. *Pure and Applied Geophysics*, 126, 27-36.
- Shaw, B. and Jackson, J., 2010. Earthquake mechanisms and active tectonics of the Hellenic subduction zone. *Geophysical Journal International*, 181 (2), 966-984.
- Sibuet, J.C., Rangin, C., LePichon, X., Singh, S., Cattaneo, A., Graindorge, D., Klingelhoefer, F., Lin, J.Y., Malod, J., Maury, T., Schneider, J. L., Sultan, N., Umler, M. and Yamaguchi, H., 2007. The “Sumatra aftershocks” team, 26th December 2004 great Sumatra–Andaman earthquake: Co-seismic and post-seismic motions in northern Sumatra. *Earth and Planetary Science Letters*, 263 (1-2), 88-103.
- Singh, S. K., Astiz, L. and Havskov, J., 1981. Seismic gaps and recurrence periods of large earthquakes along the Mexican Subduction Zone: A Re-examination. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 71 (3), 827-843.
- Singh, S. K., Shapiro M.N., Iglesias-Mendoza A., Cruz-Atienza V. and Pacheco J., 2000. Popocatepetl, an active volcano, reduce seismic hazard to Mexico City. *Geophysical Research Letters*, 27, 2753–2756.

- Song, C. and Ge, Z., 2019. 3D model backprojection of the 2017 Mw 8.2 Chiapas earthquake: a two-stage rupture with a barrier-induced velocity increase. *Seismological Research Letters*, 90 (3), 1121-1130.
- Spagnotto, S., Alvarez, O. and Folguera, A., 2018. Static stress increase in the outer forearc produced by M_w 8.2 September 8, 2017 Mexico earthquake and its relation to the gravity signal. *Pure and Applied Geophysics*, 175, 2575-2593.
- Tan, O. and Taymaz, T., 2006. Active tectonics of the Caucasus: Earthquake source mechanisms and rupture histories obtained from inversion of teleseismic body waveforms. In: *Post-collisional Tectonics and Magmatism in the Mediterranean Region and Asia*, Geological Society of America, Special Paper, 409, 531-578.
- Tang, L., Titov, V. V., Wei, Y., Mofjeld, H.O., Spillane, M., Arcas, D., Bernard, E. N., Chamberlin, C., Gica, E. and Newman, J., 2008. Tsunami forecast analysis for the May 2006 Tonga tsunami. *Journal of Geophysical Research*, 113, C12015, doi:10.1029/2008JC004922.
- Taymaz, T., Jackson, J. and Westaway, R., 1990. Earthquake mechanisms in the Hellenic Trench near Crete. *Geophysical Journal International*, 102, 695-731.
- Taymaz, T., Jackson, J. and McKenzie, D., 1991. Active tectonics of the north and central Aegean Sea. *Geophysical Journal International*, 106, 433-490.
- Taymaz, T., Wright, T.J., Yolsal, S., Tan, O., Fielding, E. and Seyitoğlu, G., 2007. Source characteristics of the 6 June 2000 Orta – Çankırı (central Turkey) earthquake: a synthesis of seismological, geological and geodetic (InSAR) observations and internal deformation of the Anatolian plate. in: *The Geodynamics of the Aegean and Anatolia*, Geological Society, London, Special Publication, 291, 259-290.
- Titov, V. V., Rabinovich, A. B., Mofjeld, H. O., Thomson, R. E., González, F. I., 2005. The global reach of the 26 December 2004 Sumatra Tsunami. *Science*, doi: 10.1126/science.1114576.
- Ulrich, T., Vater, S., Madden, E.H., Behrens, J., van Dinther, Y., van Zelst, I., Fielding, E. J., Liang, C. and Gabriel, A.-A., 2019. Coupled, Physics-Based modeling reveals earthquake displacements are critical to the 2018 Palu, Sulawesi Tsunami. *Pure and Applied Geophysics*, 176, 4069-4109.
- Ulutaş, E., 2013. Comparison of the seafloor displacement from uniform and non-uniform slip models on tsunami simulation of the 2011 Tohoku-Oki earthquake. *Journal of Asian Earth Sciences*, 62, 568-585.
- Wang, X., 2009. User Manual for COMCOT version 1.7 (first draft), Cornell University.
- Wells, D.L. and Coppersmith, K.J., 1994. New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 84, 974-1002.
- Wessel, P. and Smith, W.H.F., 1998. New, improved version of generic mapping tools released. *Eos Trans. AGU*, 79 (47), 579.

- Yagi, Y. and Kikuchi, M., 2000. Source rupture process of the Kocaeli, Turkey, earthquake of August 17, 1999, obtained by joint inversion of near-field data and teleseismic data. *Geophysical Research Letters*, 27, 1969-1972.
- Yagi, Y., Nishimura, N. and Kasahara, A., 2012. Source process of the 12 May 2008 Wenchuan, China, earthquake determined by waveform inversion of teleseismic body waves with a data covariance matrix. *Earth Planets Space*, 64, E13–E16.
- Ye, L., Lay, T., Bai, Y., Cheung, K.F., Kanamori, H., 2017. The 2017 M_w 8.2 Chiapas, Mexico Earthquake: Energetic Slab Detachment. *Geophysical Research Letters*, 44, 11824–11832.
- Yolsal, S., 2008. Girit-Kıbrıs Yayları ve Ölü Deniz Fay Zonu Çevresinde Oluşan Depremlerin Kaynak Mekanizması Parametreleri, Kayma dağılımları ve Tarihsel Tsunami simülasyonları. Doktora Tezi, 523 sayfa, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Yolsal, S. and Taymaz, T. 2010. Sensitivity analysis on relations between earthquake rupture parameters and far-field tsunami waves: Case studies in the Eastern Mediterranean region. *Turkish Journal of Earth Sciences*, 19, 313–349.
- Yolsal-Çevikbilen, S. and Taymaz, T., 2012. Earthquake source parameters along the Hellenic subduction zone and numerical simulations of historical tsunamis in the Eastern Mediterranean. *Tectonophysics*, 536–537, 61-100.
- Yolsal-Çevikbilen, S. and Taymaz, T., 2019. Source characteristics of the 28 September 2018 M_w 7.5 Palu-Sulawesi, Indonesia (SE Asia) earthquake based on inversion of teleseismic bodywaves. *Pure and Applied Geophysics*, 176, 4111–4126.
- Yolsal, S., Taymaz, T. and Yalçiner, A.C., 2007. Understanding tsunamis, potential source regions and tsunami prone mechanisms in the Eastern Mediterranean. in *The Geodynamics of the Aegean and Anatolia*, Eds. Taymaz, T., Yılmaz, Y. and Dilek, Y., Special Publication, Geological Society, London, Special Publications, 291, 201-230.
- Yolsal-Çevikbilen, S., Taymaz, T., Ulutaş, E., 2017. Aktif dalma batma zonlarında meydana gelen depremlerin kaynak mekanizması parametreleri, kayma/yırtılma dağılımları ve matematiksel tsunami simülasyonları. TÜBİTAK-ÇAYDAG 1001 Araştırma Projesi, Proje No: 114Y066, Final Proje Raporu, 354 sayfa.
- Yolsal-Çevikbilen, S., Ulutaş, E. and Taymaz, T., 2019. Source models of the 2012 Haida Gwaii (Canada) and 2015 Illapel (Chile) earthquakes and numerical simulations of related tsunamis. *Pure and Applied Geophysics*, 176 (7), 2995-3033.
- Zwick, P., McCaffrey, R. and Abers, G., 1994. MT5 Program. IASPEI Software Library, 4.



Yerbilimleri, 2020, 41 (1), 56-85, DOI:10.17824/yerbilimleri.693508

Hacettepe Üniversitesi Yerbilimleri Uygulama ve Araştırma Merkezi Bülteni

Bulletin of the Earth Sciences Application and Research Centre of Hacettepe University

Flotasyon Tesis Atıklarının Asit Üretme Potansiyeli ve Kirliliğin Önlenmesi, Gümüşhane, KD Türkiye

Acid Production Potential of Flotation Plant Tailings and Pollution Prevention, Gumushane, Turkey NE

SELÇUK ALEMDAĞ *¹, ENVER AKARYALI ¹, MEHMET ALİ GÜCER ¹

¹Gümüşhane Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, 29100, Gümüşhane, Türkiye

Geliş (received): 24 Şubat (February) 2020

Kabul (accepted) : 25 Nisan (April) 2020

ÖZ

Madencilik faaliyetlerindeki çevre kirliliğinin birincil kaynağını, çoğunlukla metalik, kömür ve asfaltit madenlerinde meydana gelen asit drenajı oluşturmaktadır. Bu çalışmada, Pb-Zn cevherleşmesinin flotasyon tesisi atıklarının asit üretme potansiyelleri jeokimyasal analizler, kısa-dönem temas sızıntı testleri ve Asit-Baz Muhasebesi (ABM) işlemlerini kapsayan statik testlerle incelenmiştir. İşlenen cevherin mineral parajenezini başlıca pirit, kalkopirit, sfalerit ve galen mineralleri oluşturmaktadır. Cevherli atık örneklerinin iz element konsantrasyonlarında, özellikle S, Zn, Cu, As, Sb, Cd, Hg, Ag ve Bi gibi potansiyel toksik metallerdeki yüksek zenginleşme cevherin türü ile doğrudan ilişkili olup, yeraltı suyunu kirlenme potansiyeline sahiptir. Kısa-dönem temas sızıntı testlerine göre, örneklerin pH değerleri (9.55-10.60, n= 10), kıta içi su kaynaklarının kalite sınıflandırmasına göre, dördüncü-sınıf (IV) kalite sularını işaret etmektedir. Bununla birlikte, sülfür-sülfür (%S⁻²: 2.92-3.98, n= 10), Net Nötralizasyon Potansiyeli (NNP; -32 kg CaCO₃/t -149 kg CaCO₃/t, n= 10) ve Nötralizasyon Potansiyel Oranı (NPO; 0.20-0.80, n= 10) değerleri cevherli atık malzemenin potansiyel asit üreticisi olduğunu göstermektedir. Baraj eksen yeri ve rezervuar alanında açılan sondaj kuyularında kaya kütle geçirimsizliğini değerlendirmek için lugeon deneyleri yapılmış ve geçirgen özellikte ($K= 2 \times 10^{-6}$ m/s) olduğu belirlenmiştir.



*Selçuk ALEMDAĞ selcukalemdag@gmail.com

¹Gümüşhane Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, 29100, Gümüşhane, Türkiye, ORCID 0000-0003-2893-3681

¹Gümüşhane Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, 29100, Gümüşhane, Türkiye, ORCID 0000-0003-1495-9186

¹Gümüşhane Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, 29100, Gümüşhane, Türkiye, ORCID 0000-0002-9075-3350

Rezervuar alanını geçirimsiz hale getirmek için 40-50 cm kalınlığında kil serilerek sıkıştırılmış, oluşan kesit sonlu elemanlar yöntemi ile modellenerek geçirimsizlik ve atıksu deşarjları belirlenmiştir. Sonlu elemanlar sızma analizi ile yapılan modellemede, temel kaya üzerinde 5m derinlikte elde edilen deşarj değeri 5.63×10^{-8} m³/s ve temel kaya kütlelerinin geçirimsizlik değeri ise 9.79×10^{-10} m/s olarak belirlenmiştir. Buna ilaveten atık baraj alanı, jeosentetik kil membran, jeomembran ve drenaj jeokompozit gibi jeotekstiller kullanılarak tamamen geçirimsiz hale getirilmiştir. Bu uygulamalar sayesinde, flatasyon tesisi atıklarının olası asit üretme potansiyellerinden kaynaklanacak yüzey ve yeraltı suyu kirliliği önlenmiş olacaktır.

Anahtar Kelimeler: Asit Üretme Potansiyeli, Asit-Baz Muhasebesi, Çevresel Değerlendirme, Jeokimya, Sızma Analizi, Sonlu Elemanlar Yöntemi.

ABSTRACT

The primary source of environmental pollution in mining activity is acid drainage, which mostly occurring metallic, coal, and asphaltite mines. In this study, the acid producing potential of Pb-Zn mineralization from flotation plant tailings was investigated by geochemical analysis and static tests including short-term contact leakage tests and Acid-Base Accounting (ABM) processes. The mineral assemblage of the processed ore mainly consists of pyrite, chalcopyrite, sphalerite, and galena minerals. The high enrichment in trace element concentrations of ore-bearing tailings samples, especially in potentially toxic metals such as S, Zn, Cu, As, Sb, Cd, Hg, Ag, and Bi is directly related to the type of mineralizations, and they have the potential to contaminate groundwater. According to short-term contact leaching tests, the pH (9.55-10.60, n= 10) values of samples indicated that they are four-class (IV) quality by classification of the intra-continental water resources. Besides, sulphide-sulfur (%S⁻²: 2.92-3.98, n= 10), Net Neutralization Potential (NNP; -32 kg CaCO₃/t -149 kg CaCO₃/t, n= 10), and Neutralization Potential Ratio (NPR; 0.20-0.80, n= 10) values show that the ore-bearing tailings material has an acid production potential. Lugeon tests were carried out to evaluate rock mass permeability in drilling wells drilled in the dam axis location and reservoir area and it was determined to be permeable (K= 2×10^{-6} m/s). In order to make the reservoir impermeable, 40-50 cm thick clay was laid and compacted, and the formed section was modeled by finite elements method, and permeability and wastewater discharges were determined. In the modeling with finite element seepage analysis, the wastewater discharge value obtained at a depth of 5m from

the foundation excavation was determined as $5.63 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{s}$. Also, the permeability value for the reservoir area was determined as $9.79 \times 10^{-10} \text{ m/s}$ after the applied clay compaction process. In addition, the environment will be completely impermeable as a result of laying geotextiles such as geosynthetic clay membrane, geomembrane and drainage geocomposite on the bottom of the reservoir area to prevent a possible chemical leakage. Thanks to these applications, surface and groundwater pollution will be prevented due to the potential of acid production of flotation plant tailings.

Keywords: *Acid Producing Potential, Acid-Base Accounting, Environmental Assessment, Geochemistry, Seepage Analysis, Finite Elements Method.*

GİRİŞ

Toplumların gelişmesinde geçmişten günümüze anahtar bir parametre olan madencilik faaliyetlerinin gelecekte de devam edeceği bir gerçektir. Bununla birlikte, metalik maden üretimi, su ve toprak gibi diğer hayati kaynaklar üzerinde, özellikle de asit maden drenajı (AMD) olarak bilinen, sülfür ve kömür madenciliğinden kaynaklanan metal yüklü asit çözeltilerinin oluşumu önemli çevresel etkilere sahiptir. AMD genel olarak pirit, kalkopirit, galen, sfalerit ve pirotin gibi sülfürlü minerallerin atmosferik koşullar altında, bazen de *Acidophilic bacterium* ve *Acidithiobacillus ferrooxidans* mikrobiyolojik organizmaların katkısıyla, hava (oksijen) ve su ile reaksiyona girerek kimyasal oksitlenmenin gerçekleşmesi ve bunların neticesinde drenaj sularının asidik karakter kazanması olayı olarak tanımlanmaktadır (Singer ve Stumm, 1970; Sobek vd., 1978; EPA, 1994b; Skousen vd., 2000; Price, 2003; Lottermoser, 2010; Dold, 2014, 2017; Akaryalı vd., 2018). Sülfür içeren mineraller, madencilik faaliyetleri sırasında veya sonrasında, oksijen ve suyla reaksiyona girdiğinde bazı potansiyel toksik metaller (Fe, Pb, Cu, Zn vb.) çözünerek drenaj suyuna asidik karakter verir ve AMD oluşumu gerçekleşir (Morin ve Hutt, 2001; Dold vd., 2009).

AMD, herhangi bir insan etkisi olmadan doğal olarak ortaya çıkabileceği gibi, madencilik faaliyetleri, karayolu inşaatı ve/veya şev çalışmalarını gibi antropojenik faaliyetlerden de kaynaklanabilmektedir. Volkanojenik masif sülfür, yüksek sülfürlü epitermal, porfir bakır ve skarn cevherleşmeleri AMD oluşumu ile ilişkili en yaygın maden yataklarını oluşturmaktadır. Son yıllarda hem abiyotik hem de biyotik sistemlerde pirit oksidasyon kinetiği üzerinde de bir dizi çalışma gerçekleştirilmiştir (örneğin, Boon ve Heijnen, 1998;

Holmes ve Crundwell, 2000; Descostes vd., 2004; Gleisner vd., 2006; Brunner vd., 2008; Ma ve Lin, 2013; Jia vd., 2018).

Önceki çalışmalarda, araştırmacıların genellikle AMD oluşumu ve potansiyel çevresel sonuçlarının anlaşılmasına odaklanmış oldukları gözlenmektedir (örneğin, Lawrence vd., 1989; Blowes ve Jambor, 1990; Gray, 1997; Price, 2003; Cidu ve Frau, 2009). Bu çalışmada ise Gümüşhane'de faaliyet gösteren Gümüştaş Madencilik çinko-kurşun-bakır cevherleşmesinin zenginleştirme işlemi sonucu oluşan ve pirit içeren atıkların kısa süreli asit üretme potansiyeli ve çevresel etkisi incelenmiş, sonlu elemanlar yöntemi ile sızma analizi yapılarak baraj eksen yeri ve rezervuar alanı temel kayasının geçirimsizlik sınırlarının derinlikle değişimi belirlenmiştir. Ayrıca, rezervuar alanı geçirimsizliği için doğal kil serip sıkıştırma ve jeosentetiklerin kullanımı da değerlendirilmiştir.

ÇALIŞMA ALANININ KONUMU VE JEOLJİSİ

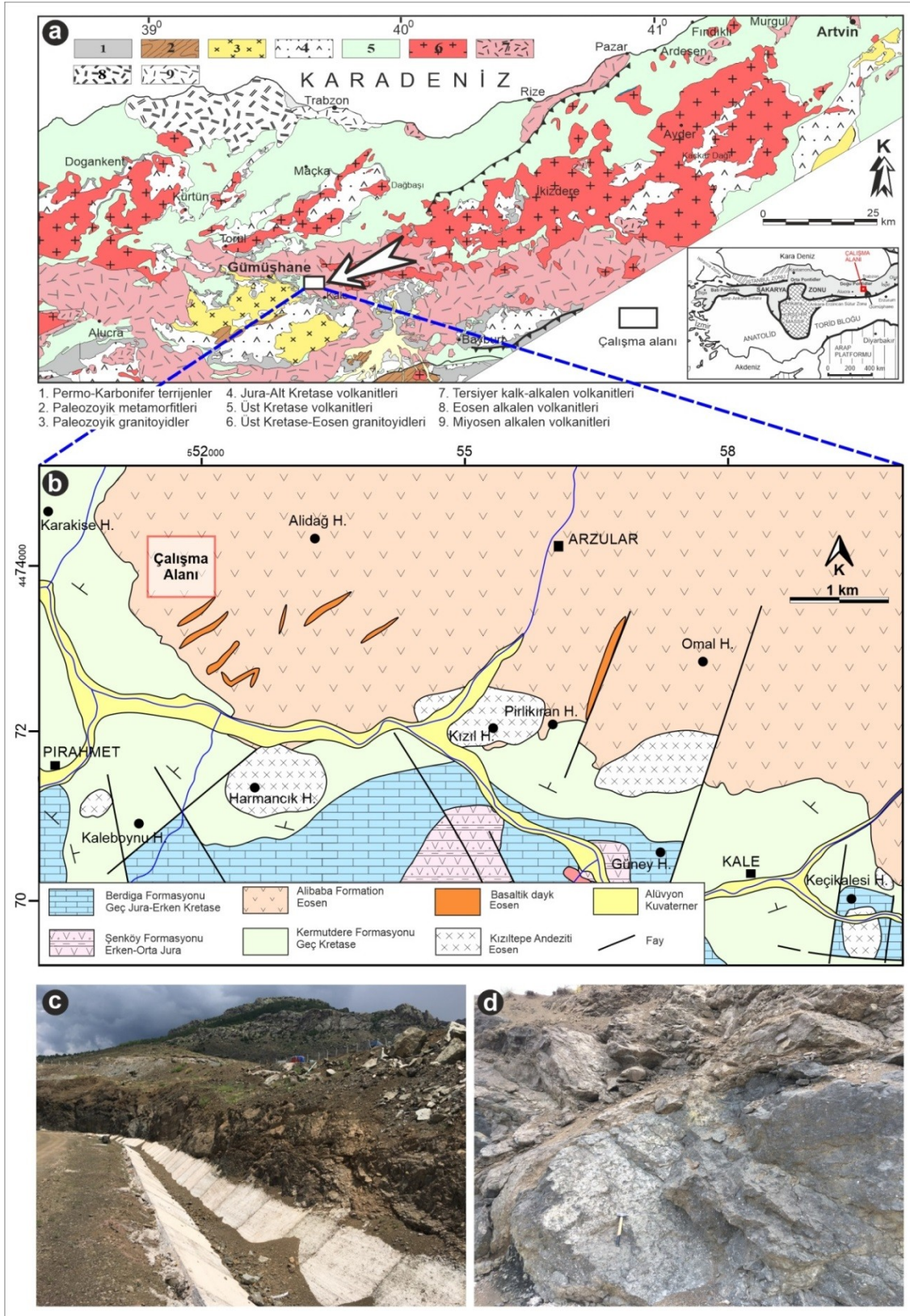
Çalışma alanı, Gümüşhane il merkezinin yaklaşık 10 km doğusunda, Yeniyol-Arzular mevkiinde yer almaktadır (Şekil 1). Çalışma alanının içerisinde yer aldığı, Türkiye'nin önemli bir bölümünü oluşturan ve Karadeniz'in güneydoğu kesimi boyunca uzanan Doğu Pontid orojenik kuşağı, tektonik olarak Sakarya Zonu'nun doğu kesimini teşkil etmektedir (Okay ve Tüysüz, 1999; Şekil 2a).

Alp-Himalaya metalojenik kuşağın önemli bir parçası olan Doğu Karadeniz bölgesinde, volkanizma ile ilişkili masif sülfid yatakları, porfiri Cu, Au, Mo yatakları, skarn ve epitermal damar tip Cu, Pb, Zn, Au ve Ag yatakları başta olmak üzere çok sayıda ve farklı tiplerde maden yatakları gözlenmektedir (Güven, 1993; Tüysüz, 2000; Lermi, 2003; Demir vd., 2008, 2013; Sipahi, 2011; Akaryalı ve Tüysüz, 2013; Akaryalı ve Akbulut, 2016; Akaryalı, 2016; Sipahi vd., 2020; Demir ve Dişli, 2020).



Şekil 1. Çalışma alanının konumu ve atık barajının genel görünümü.

Figure 1. The location of the study area and a general view of the waste dam.



Şekil 2. a) Doğu Pontidler'in basitleştirilmiş jeoloji haritası (Güven, 1993; Aydınçakır, 2012 ve Yücel vd., 2017'den değiştirilerek). **b)** Çalışma alanı ve yakın çevresinin jeoloji haritası (Eyüboğlu vd., 2013'den değiştirilerek). **c** ve **d)** Çalışma alanında Alibaba Formasyonu'na ait andezitler.

Figure 2. a) Simplified geological map of the Eastern Pontides (modified after Güven, 1993; Aydınçakır, 2012 and Yücel et al., 2017). **b)** Geological map of the study area (modified after Eyüboğlu et al., 2013). **c** and **d)** Andesites from the Alibaba Formation in the study area.

Bununla birlikte, cevherleşmenin çoğunlukla gözleendiği Tersiyer volkanitleri Gümüşhane yöresinde yaygın olarak yüzeylenmektedir (Arslan vd., 1997; Aslan, 2010; Alemdağ, 2015; Şahin ve Kaygusuz, 2016; Gücer vd., 2017; Sipahi vd., 2019).

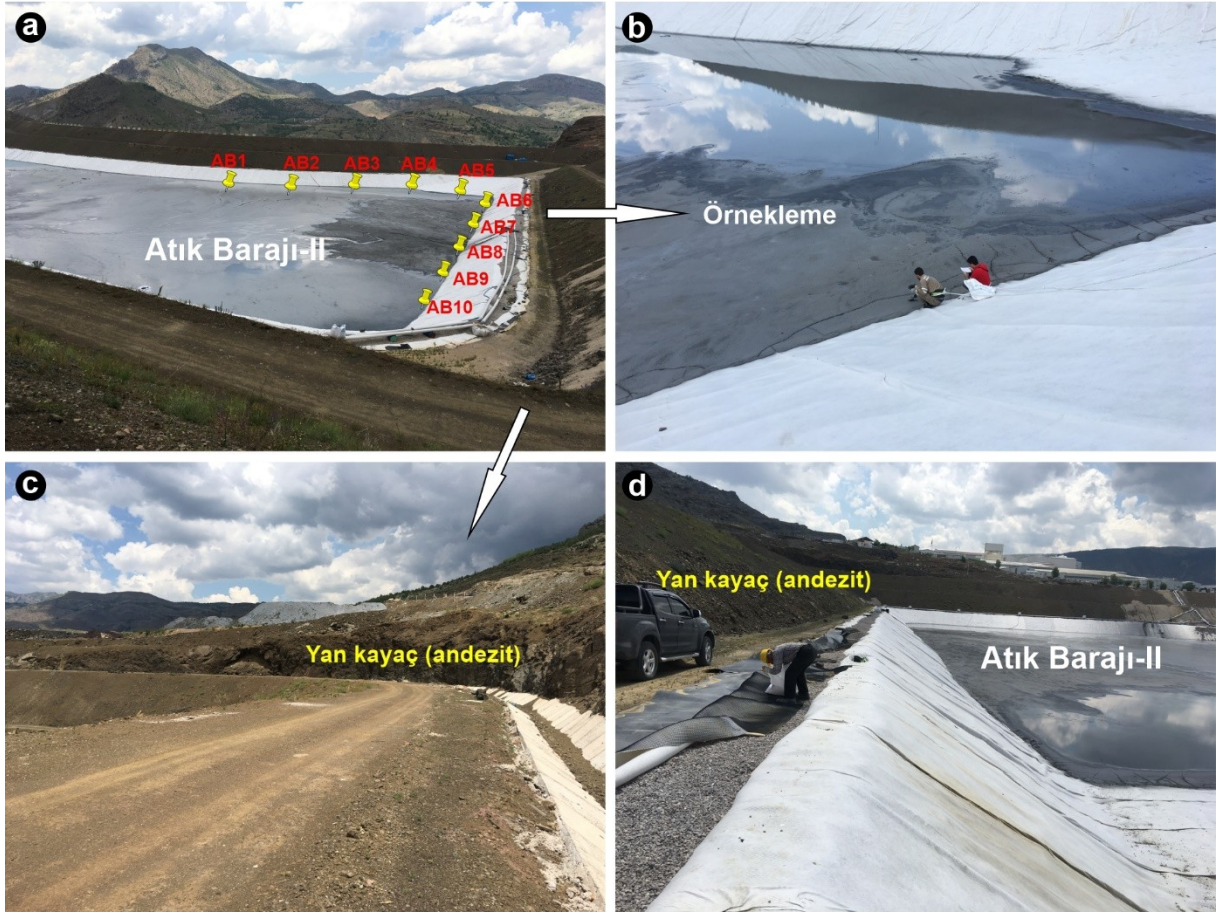
Çalışma konusunu oluşturan atık depolama tesisi Eosen yaşlı andezit ve bazalt ile bu kayaların piroklastitlerinden oluşan Alibaba Formasyonu (Tokel, 1972) üzerinde yer almaktadır (Şekil 2b). Tüm bu birimler Eosen yaşlı Kızıltepe Andeziti ile bazik dayklar tarafından kesilmiştir. Alibaba Formasyonu, genel olarak tabanda kumtaşı ve tüfit ara katkılı nummulitli kireçtaşları ile başlayarak, üst seviyelere doğru andezit, bazalt ve ilişkili piroklastikleri, bazaltik-andezitik aglomera, lapilli tuf ve tuf ardışımı ile devam etmektedir. Birim, yer yer aşınmış olarak bulunan kireçtaşı, kumtaşı, marn tuf aralanması ile son bulmaktadır. Çalışma alanı ve yakın çevresinde çoğunlukla gri, siyahımsı-gri renklere gözlenen andezit ve bazalt türü volkanik kayalar en yaygın litolojiyi oluşturmaktadır (Şekil 2c ve 2d). Bol çatlaklı ve çoğunlukla ayrılmış olan bu volkanitlerde, silikleşme, koyu yeşil rengin hâkim olduğu kloritleşme ve ayrıca çatlaklar boyunca yerleşen kalsit damarları sıkça gözlenmektedir. Andezitler başlıca plajiyoklas, hornblend (amfibol) ve opak mineralleri içermektedir.

ÖRNEKLEME VE ANALİTİK YÖNTEM

AMD oluşumunu belirleyebilmek amacıyla flotasyon tesisi cevherli atıklarının yer aldığı atık barajından 10 adet (AB1-AB10) örnek alımı gerçekleştirilmiştir (Şekil 3). Alınan örnekler üzerinde tüm kayacın jeokimyası analizleri, temas sızıntı suyu ve Asit-Baz Muhasebesi (ABM) testleri gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, tesis alanında yapılan iyileştirme çalışmaları sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak yapılan sızıntı analizleri ile modellenmiştir.

Örneklerin kimyasal bileşimlerini ortaya koymak amacıyla tüm kayacın kimyası analizleri SGS Laboratuvarında (Ankara) gerçekleştirilmiştir. Analizlerde, ana oksitler İndüktif Eşleşmiş Plazma Atomik Emisyon Spektrometresi (ICP-AES), iz elementlerden As, B, Cd, Cr, Cu, Hg, Mo, Sb, Th ve W İndüktif Eşleşmiş Plazma Optik Emisyon Spektrometresi (ICP-OES) ve Ag ile Zn ise Atomik Absorbsiyon Spektrometresi (AAS) ile analiz edilmiştir. Örnekler halkalı öğütücü yardımı ile toz haline getirilmiş, 0.2 gr alınarak 1.5 gr LiBO₂ ile karıştırılmış ve % 5 HNO₃ içeren bir sıvı içinde çözündürülmüştür. Ana elementler %

ağırlık, iz elementler ise ppm mertebesinde ölçülmüştür. Ateşte kayıp miktarını belirlemek için örnekler 105°C'de 24 saat süreyle fırında kurutulmuş ve nemi uzaklaştırılmıştır.



Şekil 3. a ve b) Atık barajında gerçekleştirilen örnekleme işlemi. **c) ve d)** Yan kayaçların (Alibaba Formasyonu) genel görünümü.

Figure 3. a and b) Sampling from the waste dam. **c and d)** General view of the host rocks (Alibaba Formation).

Karbondiyoksit ve sülfür gazı ölçümleri için %2'lik C ve %1'lik S standartları kullanılmıştır. Sonrasında ise yaklaşık 1 saat süreyle 1000°C'lik sıcaklığa maruz bırakılmıştır. Isıtmadan önce ve sonraki ağırlıklar kontrol edilerek su, karbondiyoksit ve sülfür kayıpları belirlenmiş ve iki tartı arasındaki farkın yüzdesi alınarak örneklerin ateşte kayıp miktarları tespit edilmiştir.

Kısa süreli sızıntı oluşturma davranışlarını belirleyebilmek amacıyla temas sızıntı (contact leachate) testleri, Gümüşhane Üniversitesi, Merkezi Araştırma Laboratuvarı, Uygulama ve Araştırma Merkezinde gerçekleştirilmiştir. Cevherli atıktan alınan örnekler "modifiye US EPA (United States Environmental Protection Agency) 1312" standardına göre 24 saat süreyle 3:1 sıvı/katı oranlı saf su (deiyonize) temas sızıntı testine tabi tutulmuştur. Ölçüm sırasında çökelmeyi önlemek amacıyla %65'lik suprapur nitrik asit (HNO₃)'den, %2'lik

HNO₃ çözelti hazırlanıp su numunelerine ilave edilmiştir. Hazırlanan çözeltilerden itibaren iz element derişimlerinin belirlenmesinde Agilent 7700 marka ICP-MS (Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometer) cihazı kullanılmıştır.

ABA testleri SGS Dilovası Çevre Laboratuvarı (Kocaeli)'nda yaptırılmış olup, analizlerde, karbon (toplam) ve karbonat ölçümlerinde TS 12089 EN 13137; sülfür (toplam) ölçümlerinde ISO 15178, Fizz testinde SOBEK ve diğer parametrelerde ise TS EN 15875 analiz/ölçüm metodu kullanılmıştır. C-S analizleri için; öncelikle kurutulup, öğütülmüş ve elenmiş numunenin C ve S miktarları yüksek sıcaklıkta cihazda yakılarak sonuçları % olarak alınmıştır. Bu sonuçlar toplam karbon ve toplam sülfür miktarlarını vermekte olup, elde edilen sülfür miktarından, "% sülfid sülfür x 31.25" formülü kullanılarak, Asit Üretme Potansiyeli (AP) hesaplanmıştır. Örnekler üzerine asit ilave edilip, dinlendirildikten sonra yüksek sıcaklıkta cihazda yakılarak sonuçları % olarak alınmış ve bu sonuçlardan SO₄-S ve CO₃ miktarları belirlenmiştir. Nötralizasyon Potansiyeli (NP) analizleri için; öncelikle kurutulup, öğütülmüş ve elenmiş numuneden 2 g alınıp, üzerine 90 mL su ilave edilmiş ve 15 dakika karıştırılmıştır. 15 dk sonra pH ölçümü yapılmış ve pH değeri ve zamanı kaydedilmiştir. 1 N HCl ile pH 2-2.5 aralığına indirilmiştir. İlave edilen HCl miktarı kaydedilip 22 saat bekletilmiş ve 22 saat sonunda pH tekrar ölçülmüştür. pH değeri 2.5'in üzerinde olması durumunda tekrar 1 N HCl ilave edilerek, ilave edilen HCl miktarı kaydedilmiştir. 2 saat daha bekletilen numunenin toplam 24 saat sonunda pH'ı tekrar ölçülmüştür. Aynı işlemler tekrar edilerek son (final) pH kaydedilmiştir. 24 saat sonunda 0.1 N NaOH ile pH 8.33 olana dek titre edilmiş ve NaOH sarfiyatı kaydedilmiştir. Harcanan HCl ve NaOH miktarlarından NP hesaplanmıştır. Hesaplamalarda "NP = 50 x (1 N HCl x eklenen toplam HCl-0.1 N NaOH x eklenen NaOH)" formülü kullanılmıştır. Bu metod ile örneklerin macun pH, sülfid (S²⁻), AP, NP, NNP (NP-AP) ve NPO (NP/AP) parametreleri elde edilmiştir.

Baraj eksen yerindeki kaya kütlelerinin geçirimsizlik özellikleri hem yerinde deneyler, hem de sonlu elemanlar tabanlı sızma analizi ile Phase² 8.0 bilgisayar programı kullanılarak belirlenmiştir. Geçirimsizliğin belirlenmesinde; açılmış olan araştırma sondajlarında basınçlı su testleri (BST) yapılmış ve kaya kütlelerinin Lugeon (Lugeon, 1933) değerleri belirlenmiştir. Deney esnasında 10 atm basınca çıkılamadığı seviyelerdeki geçirimsizliği hesaplamak için Nonveiller (1989) tarafından önerilen eşitlik (1) kullanılmıştır.

$$LU = \frac{Q * 10}{P * L} \quad (1)$$

Burada; LU: Lugeon değerini (l/dak/m), Q: Kuyuya verilen su miktarını (l/dak), L: Kademe boyu (m) ve P: Uygulanan gerçek basınç (kg/cm²) değerlerini göstermektedir.

BULGULAR VE TARTIŞMA

Cevherli Atık Örneklerinin Jeokimyası

Atık barajından alınan cevherli atık örneklerinin kimyasal bileşimlerini ortaya koymak ve metal salınımlarını belirleyebilmek amacıyla yapılan tüm kayaç kimyası analizlerine ait sonuçları ve ölçüm sınırları Çizelge 1 ve Çizelge 2’de sunulmuştur. Bununla birlikte, örneklerdeki zenginleşme/tüketilme miktarını görebilmek amacıyla Ortalama Yer Kabuğu Oranları (OYKO; Yaroshevsky, 2006) ile de karşılaştırılmıştır.

Örneklerin ana oksit bileşimlerinin OYKO değerlerine kıyasla; SiO₂, Al₂O₃, Na₂O, K₂O, TiO₂ ve P₂O₅ konsantrasyonlarında 3 ila 20 kata kadar azalmaların olduğu, buna karşın, CaO, Fe₂O₃, MgO ve MnO değerlerinin ise zenginleştiği belirlenmiştir (Çizelge 1, Şekil 4a). Bu durum, cevherli malzemelerin işleme süreci ve zenginleştirme işlemleri ile bağlantılı olarak bünyesinde bulunan Si, Al, Na, K, Ti, P gibi elementlerin uçucularla birlikte kayaçlardan uzaklaştığını ve Ca, Fe, Mg ve Mn gibi elementler bakımından ise zenginleştiğini göstermektedir. Bununla birlikte, cevherleşmeden kaynaklı alterasyonlara bağlı olarak ateşte kayıp (AK) değerlerinin de oldukça yüksek (%27.18 - %31.37, n= 10) çıktığı görülmüştür.

Çizelge 1. Cevherli atık örneklerinin ana oksit (% ağırlık) analiz sonuçları.

Table 1. Results of major oxide (wt %) analysis of ore-bearing tailings samples.

Ana Oksitler	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃ ^T	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	MnO	P ₂ O ₅	Cr ₂ O ₃	A.K.	Toplam
DL*	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01		
OYKO**	53.54	15.87	9.41	8.71	5.44	2.66	1.09	0.97	0.164	0.189	0.03		
Örnek No	Atık barajı örnekleri (cevherli atıklar)												
AB1-T	10.21	2.96	27.15	9.53	16.56	0.15	0.33	0.15	2.08	0.06	DLA	30.09	99.28
AB2-T	10.56	3.50	26.25	9.43	16.57	0.13	0.38	0.16	2.04	0.07	DLA	29.94	99.04
AB3-T	11.37	3.95	25.85	8.66	15.89	0.12	0.50	0.16	2.10	0.08	DLA	29.86	98.56
AB4-T	10.63	3.20	26.42	9.36	16.08	0.12	0.41	0.15	2.14	0.07	DLA	29.26	97.85
AB5-T	10.43	3.36	25.37	8.70	15.21	0.16	0.44	0.14	1.90	0.07	DLA	29.93	95.72
AB6-T	10.16	2.96	26.58	7.75	15.11	0.14	0.40	0.13	1.83	0.07	DLA	30.54	95.67
AB7-T	10.36	2.88	25.86	8.05	15.43	0.11	0.37	0.14	1.86	0.06	DLA	30.55	95.67
AB8-T	10.28	2.05	25.23	9.02	15.64	0.11	0.28	0.11	1.91	0.05	DLA	30.62	95.29
AB9-T	10.75	3.20	25.90	7.43	15.98	0.10	0.43	0.14	1.96	0.07	DLA	31.37	97.32
AB10-T	10.41	3.66	24.16	7.06	14.13	0.12	0.49	0.15	1.91	0.07	DLA	27.18	89.35

*DL: Dedeksiyon Limiti, **OYKO: Ortalama Yer Kabuğu Oranı (Yaroshevsky, 2006), A.K.: Ateşte Kayıp, DLA: Dedeksiyon Limiti Altında, OYKO konsantrasyonlarının üzerinde çıkan değerler koyu renkte gösterilmiştir.

Çizelge 2. Cevherli atık örneklerinin iz element (ppm) analiz sonuçları.**Table 2.** Results of trace element (ppm) analysis of ore-bearing tailings samples.

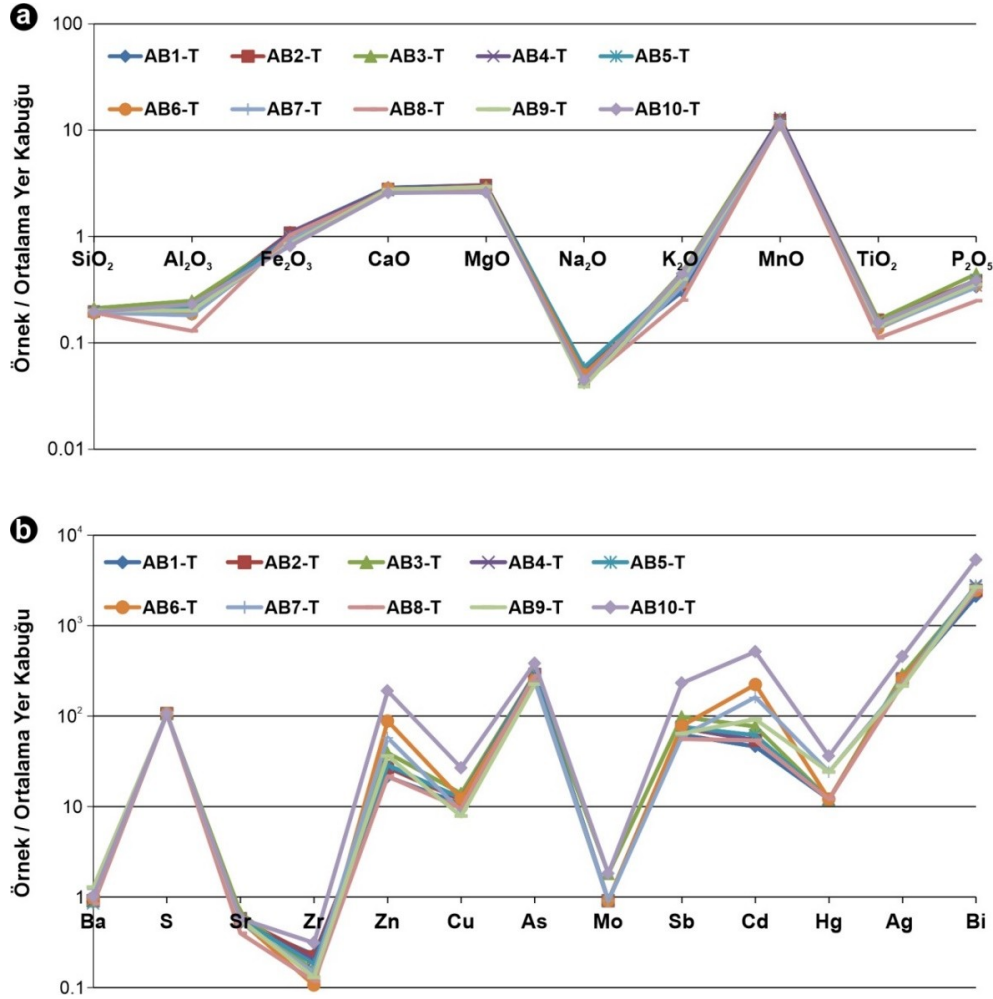
İz Elementler	Ba	S	Sr	Zr	Zn	Cu	Y	Th	As	W	Mo	Sb	Cd	Hg	Ag	Bi
DL*	10	1	10	10	10	0.5	10	20	3	10	1	5	1	1	2	5
OYKO**	650	470	340	170	83	47	29	13	1.7	1.3	1.1	0.5	0.13	0.083	0.07	0.009
OYKOx3***	1950	1410	1020	510	249	141	87	39	5.1	3.9	3.3	1.5	0.39	0.249	0.21	0.027
Örnek No	Atık barajı örnekleri (cevherli atıklar)															
AB1-T	581	>50000	176	39	1771	497	DLA	DLA	469	DLA	1	31	6	1	17	19
AB2-T	590	>50000	195	37	2242	558	DLA	DLA	489	DLA	1	37	7	DLA	18	22
AB3-T	595	>50000	227	26	3262	656	DLA	DLA	496	DLA	2	49	10	1	20	24
AB4-T	584	>50000	185	34	2325	586	DLA	DLA	491	DLA	1	38	7	1	17	25
AB5-T	552	>50000	191	31	2396	580	DLA	DLA	475	DLA	1	38	8	1	18	24
AB6-T	633	>50000	186	18	7317	576	DLA	DLA	420	DLA	1	39	29	1	18	22
AB7-T	785	>50000	180	25	4779	420	DLA	DLA	421	DLA	1	30	21	2	16	25
AB8-T	544	>50000	135	20	1788	451	DLA	DLA	473	DLA	DLA	28	7	1	16	22
AB9-T	833	>50000	191	22	3008	368	DLA	DLA	383	DLA	DLA	32	12	2	15	24
AB10-T	657	>50000	196	53	15742	1258	DLA	DLA	653	DLA	2	116	67	3	32	48

*DL: Dedeksiyon Limiti, **OYKO: Ortalama Yer Kabuğu Oranı (Yaroshevsky, 2006), A.K.: Ateşte Kayıp, DLA: Dedeksiyon Limiti Altında, OYKO konsantrasyonlarının üzerinde çıkan değerler koyu renkte gösterilmiştir.

İz elementlerde OYKO değerlerinin 3 katına kadar zenginleşme kabul edilebilir sınırlar dâhilinde değerlendirilmekte olup, özellikle potansiyel toksik metallerin OYKOx3 değeri üzerine çıkması çevresel açıdan ciddi riskler doğurabilmektedir. Bu nedenle örneklerin hem OYKO, hem de OYKOx3 değerleri ile karşılaştırılmıştır (Çizelge 2). Buna göre; cevherli atık örneklerine ait iz elementlerden Ba, Sr, Zr ve Mo konsantrasyonlarının OYKO değerlerine yakın ve bazı örneklerde de altında çıktığı (Şekil 4b); Y, Th ve W değerlerinin ise ölçülemeyecek kadar düşük olduğu tespit edilmiştir. Ancak, S, Zn, Cu, As, Sb, Cd, Hg, Ag ve Bi elementlerinin oldukça yüksek oranda zenginleştiği belirlenmiştir (Şekil 4b).

Kükürt (S) elementinde OYKO değeri 470 ppm ve OYKOx3 değeri 1410 ppm iken, atık örneklerinde bu değer %5'in üzerinde (>50000 ppm olarak) ölçülmüştür. Benzer şekilde, Zn elementi için sırasıyla OYKO ve OYKOx3 değerine göre en fazla 83 ppm ve 249 ppm seviyelerinde olması gerekirken, örneklerdeki konsantrasyonu 1771-15742 ppm arasında (n= 10) değişmektedir. Bir diğer potansiyel toksik metal olan Cu elementi, örneklerde 47 ppm ile 141 ppm aralığında dağılım sergilemektedir. Zenginleşmenin en yüksek gözlemlendiği diğer elementlerden As ve Bi sırasıyla 383-653 ppm (OYKO: 1.7 ppm; OYKOx3: 5.1 ppm) ve 19-48 ppm (OYKO: 0.009 ppm; OYKOx3: 0.027 ppm) arasında değişmektedir. Sb elementinin OYKO ve OYKOx3 değeri sırasıyla 0.5 ppm ve 1.5 pmm iken, atık

örneklerinde bu değerler 28-116 ppm aralığındadır. Benzer zenginleşmeler Cd (6-67 ppm), Hg (1-3 ppm) ve Ag (15-32 ppm) elementlerinde de gözlenmektedir (Çizelge 2, Şekil 4b). Sözkonusu tesiste çinko-kurşun-bakır zenginleştirmesi yapılmakta olup, işlenen cevherin mineral parajenezi başlıca pirit (FeS_2), kalkopirit (CuFeS_2), sfalerit (ZnS) ve galen (PbS) minerallerinden oluşmaktadır. Dolayısıyla cevherli atık örneklerindeki S, Zn, Cu, As, Sb, Cd, Hg, Ag ve Bi elementlerin konsantrasyonlarındaki OYKOx3' göre artışlar, su kirliliği oluşturma potansiyeline sahip olduğu ortaya konmuştur (Çizelge 2).



Şekil 4. Cevherli atık örneklerinin **a)** ana (%ağ.) ve **b)** iz (ppm) elementlerinin zenginleşme oranları (ortalama yer kabuğu bileşenleri Yaroshevsky, 2006'dan alınmıştır).

Figure 4. Enrichments of the **a)** major (wt %) and **b)** trace (ppm) elements of the ore tailings samples (average Earth's crust compositions from Yaroshevsky, 2006).

Cevherli Atık Örneklerinin Su Kalitesi Standartları ve Maden Drenaj Suları ile Karşılaştırılması

Atık barajında olası sızıntılar ile ilgili değerlendirmeler yapmak amacıyla kısa-dönem temas sızıntı testleri gerçekleştirilmiş ve sonuçlar Çizelge 3'de verilmiştir. Elde edilen sonuçlar aynı zamanda kıta içi su kalite standartları (RG28483, 2012) ve maden drenaj

suları (Ficklin vd., 1992; Plumlee vd., 1992, 1999) ile karşılaştırılmıştır. Kısa-dönem temas sızıntı testleri, su kirliliği oluşturma potansiyeline sahip elementler olarak belirlenen metallerin çözünerek su ile sızıntıya geçme durumlarının değerlendirilmesine olanak tanımaktadır.

Çizelge 3. Cevherli atık örneklerinin kısa-dönem temas sızıntı testi (mg/l) sonuçları.

Table 3. Results of short-term contact leach tests (mg/l) of the ore-bearing tailings samples.

	pH	Na	Al	Cd	Co	Cr	Cu	Fe	Mn	Ni	Pb	Zn	Ba
Kıta içi Yerüstü Su Kaynaklarının Sınıflarına Göre Kalite Kriterleri*													
I	6.5-8.5	125	≤0.3	≤0.002	≤0.01	≤0.02	≤0.02	≤0.3	≤0.1	≤0.02	≤0.01	≤0.2	≤1
II	6.5-8.5	125	≤0.3	0.005	0.02	0.05	0.05	1	0.5	0.05	0.02	0.5	2
III	6.0-9.0	250	1	0.007	0.2	0.2	0.2	5	3	0.2	0.05	2	2
IV	<6.0 veya >9.0	>250	>1	>0.007	>0.2	>0.2	>0.2	>5	>3	>0.2	>0.05	>2	>2
Örnek	Atık barajından alınan cevherli atık örnekleri												
AB1	10.40	2.36	0.015	<0.002	<0.001	<0.002	0.015	<0.001	0.002	0.001	0.0061	5.405	0.001
AB2	10.10	5.49	0.005	<0.002	<0.001	<0.002	0.016	<0.001	0.003	0.002	<0.001	0.482	0.001
AB3	10.15	5.00	0.034	<0.002	<0.001	<0.002	0.029	<0.001	0.002	0.002	<0.001	0.116	0.001
AB4	10.25	3.34	0.013	<0.002	<0.001	<0.002	0.011	<0.001	0.002	0.001	<0.001	0.166	0.001
AB5	10.25	6.44	0.005	<0.002	<0.001	<0.002	0.013	<0.001	0.003	0.001	<0.001	0.254	0.001
AB6	10.12	8.21	0.017	<0.002	<0.001	<0.002	0.014	<0.001	0.005	0.001	<0.001	0.250	0.001
AB7	9.55	4.29	0.045	<0.002	<0.001	<0.002	0.009	<0.001	0.006	0.001	0.0039	7.205	0.001
AB8	10.43	1.86	0.022	<0.002	<0.001	<0.002	0.010	<0.001	0.002	0.001	0.0012	0.207	0.001
AB9	10.10	1.82	0.000	<0.002	<0.001	<0.002	0.010	<0.001	0.003	0.001	0.0011	0.219	0.001
AB10	10.60	3.44	0.006	<0.002	<0.001	<0.002	0.008	<0.001	0.002	0.002	<0.001	0.045	0.001

*Su sınıfları 30.11.2012 tarih ve 28483 (değişik ibare: RG-15/4/2015-29327) sayılı 'Yerüstü Su Kalitesi Yönetimi Yönetmeliği'ne göre. Ortalamanın üzerindeki değerler koyu renkte gösterilmiştir.

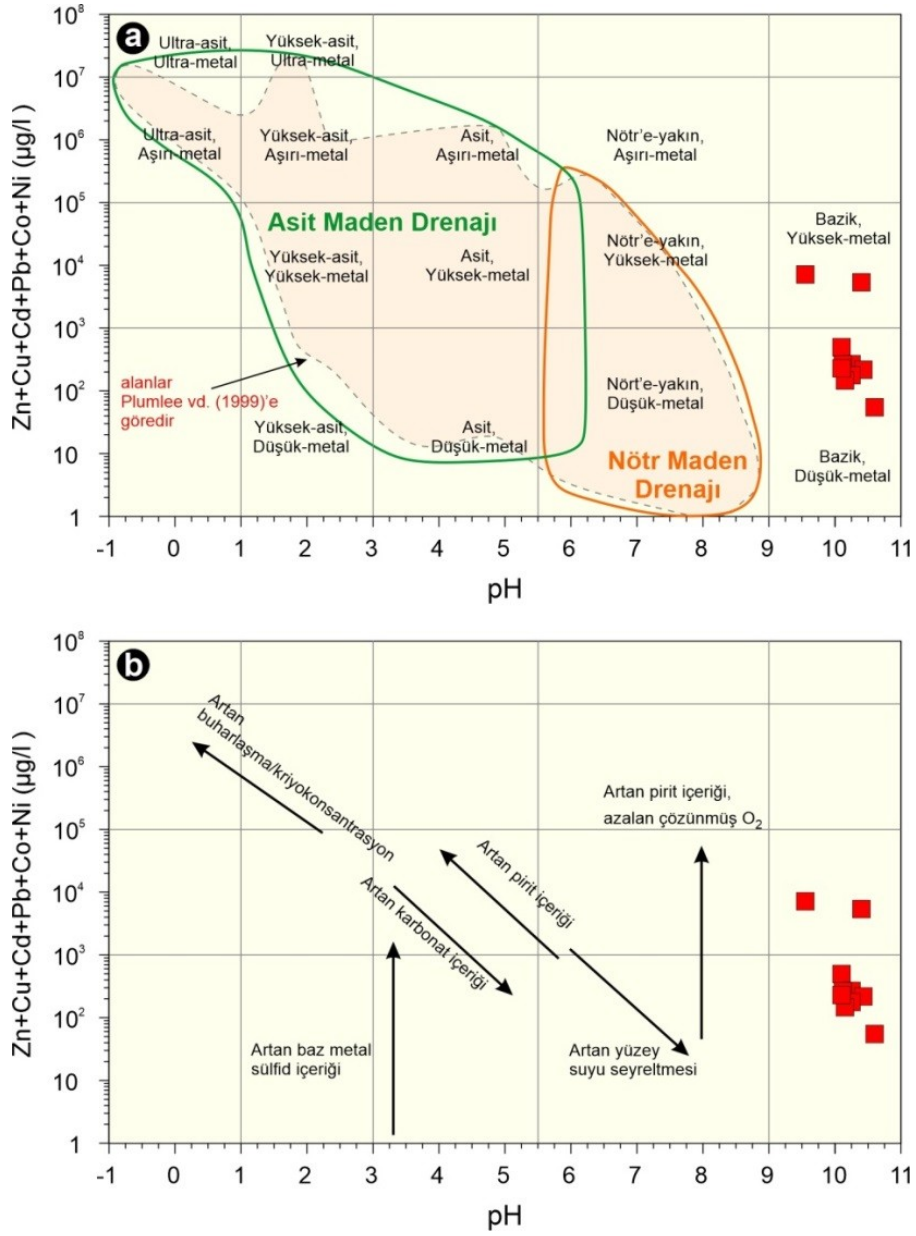
Cevherli atık örneklerinin pH değerleri 9.55-10.60 (n= 10) arasında değişmekte olup, bu değerler asidik ortamdan ziyade bazik ortama işaret etmektedir. Elde edilen değerler kıta içi su kaynaklarının kalite sınıflandırmasıyla karşılaştırıldığında, pH parametresi cinsinden dördüncü sınıf (IV) kalite sularını temsil etmektedir (Çizelge 3). Diğer elementler (Na, Al, Mn, Ba) ve potansiyel toksik metal (Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Ni, Pb, Zn) içerikleri bakımından ise birinci sınıf (I) kalite sularına karşılık gelmektedir. Tesiste Zn-Pb flatasyon işleminin yapıldığı dikkate alındığında, AB1 ve AB7 nolu örneklerde Zn konsantrasyonlarının kabul edilebilir sınır değeri üzerinde (sırasıyla 5.4 mg/l ve 7.2 mg/l) olması, flatasyona giren cevherli örneklerdeki sfalerit (ZnS) minerali ile ilişkilidir.

Atıklarda meydana çıkan ürünün, klimatolojik koşulların, maden veya proses tesisinin ve/veya maden fazının asit maden drenajının doğası üzerindeki etkisi Ficklin diyagramları kullanılarak gösterilebilmektedir (Plumlee vd., 1999). Zn, Cu, Cd, Pb, Co, Ni gibi bazı metallerin toplamının pH'a karşı çizildiği bu grafikler maden drenaj suyu kimyasındaki farklı tortu tipleri arasındaki varyasyonları yorumlamak için kullanılabilir (örneğin, Ficklin

vd., 1992; Plumlee vd., 1992, 1999). Yukarıda bahsedilen baz metallerin, Fe, Al ve Mn gibi daha yaygın metallere göre, farklı jeolojik kontroller arasında ayırım yaparken en tanısıl elementler oldukları bilinmektedir. Örneklere ait su analiz değerleri Ficklin diyagramına aktarıldığında, cevherli atık örneklerinin (AB1 ve AB7 hariç) “bazik/düşük metal” alanında yer aldığı görülmüştür (Şekil 5a).

AB1 ve AB7 nolu atık örnekleri ise, diğer örneklerle kıyasla, nispeten yüksek Zn içeriğinden dolayı “bazik/yüksek metal” alanında yer almıştır. Tüm değerler “asit maden drenajı” ve “nötr maden drenajı” alanları dışında yer almakta olup, kısa-dönem temas sızıntı testlerine göre herhangi bir asit üretme potansiyellerinin olmayacağını işaret etmektedir. Sular tarafından drene edilen maden yataklarının pirit, baz-metal sülfid ve karbonat içeriğine göre maden ve doğal drenaj grupları sınıflamasında ise örneklerin, yukarı yönde pozitif bir dağılım sergilediği gözlemlenmiştir (Şekil 5b). Bu durum örneklerde artan pirit ve azalan çözünmüş O_2 içeriğini yansıtmaktadır. Cevherli atık örneklerindeki pirit (FeS_2) ve kalkopirit ($CuFeS_2$) minerallerinin varlığı bu durumu desteklemektedir.

Cevherli atık örneklerin kısa dönem temas sızıntı pH değerleri (9.55-10.60, n= 10) bazik ortamı ve IV. sınıf kalite sularını işaret etmesine rağmen, çözünmüş potansiyel toksik metal (Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Ni, Pb, Zn) içeriklerinin düşük olması I. sınıf kalite su özelliğini yansıtmaktadır. Bu durum, atık depolama tesisinde kısa dönemde asit üretme potansiyelinin drenajı oluşma potansiyelinin olmayacağına veya çok düşük olacağına işaret etmektedir. Bu özellik, Ficklin diyagramlarında örneklerin Asit Maden Drenajı alanının dışında yoğunlaşması ile de desteklenmektedir.



Şekil 5. İncelenen örneklerde; **a)** Ficklin jeokimyasal sınıflama diyagramı ve **b)** sular tarafından drene edilen maden yataklarının pirit, baz-metal sülfid ve karbonat içeriğine göre maden ve doğal drenaj gruplarını gösteren sınıflama diyagramı. Alan sınırları, isimleri ve farklı drenaj bileşimlerinin sınıflandırılması Plumlee vd. (1999)'e göredir.

Figure 5. In the studied samples; **a)** Ficklin geochemical classification diagram, and **b)** classification diagram showing groupings of mine- and natural-drainage according to pyrite, base-metal sulfide and carbonate content of the mineral deposits drained by the waters. The boundaries, names of metal bins and classify different drainage compositions were originally proposed by Plumlee et al. (1999).

Asit-Baz Muhasebesi (ABM)

Metalik madenler başta olmak üzere, maden atıklarının, türüne ve boyutuna bağlı olmaksızın, asit drenajı oluşturma olasılığı her zaman bulunmaktadır. Asit drenajı

oluşturacak minerallerin aşınma potansiyellerini belirleyebilmek amacıyla, kompozisyonel analizlerden ve hesaplamalardan oluşan ABM testlerinden yararlanılmaktadır. İlk kez Smith vd. (1974) tarafından geliştirilen ve sonrasında Sobek vd. (1978) tarafından kömür madeni atıklarının asit üretme kapasitesini değerlendirmek üzere modifiye edilen ABM testleri, en genel ifade ile demir sülfür oksidasyonu tarafından asit üretim oranı ve yan kayaç mineral çözülmesi tarafından asit tüketim oranı arasındaki denge olarak tanımlanmaktadır (Smith vd., 1974, 1976; Skousen vd., 1987; Lapakko, 1992; Hossner ve Brandt, 1997; Siddharth vd., 2002). Asit üretme potansiyelini tahmin etmek için toplam sülfür (% S) veya sülfat sülfür (S^{-2}) ölçümleri kullanılmaktadır.

Çalışma alanında, cevherli atık örneklerin ABM ölçüm sonuçları Çizelge 4’de verilmiş olup, macun pH değerleri 10.00-11.04 (n = 10) arasında değişmektedir. Statik test değerlendirme parametreleri dikkate alındığında (Çizelge 5), gerek temas sızıntı testleri pH sonuçlarının 5.5’in üzerinde olması (9.55-10.60, n= 10; Şekil 5a), gerekse macun pH değerlerinin >7 (Price vd., 1997; Çizelge 5) çıkması, örneklerin yeterli nötrleştirme kapasitesine sahip olduğunu ve asit üretme potansiyelinin bulunmadığını ortaya koymaktadır.

Çizelge 4. Cevherli atık örneklerinin ABM test sonuçları.

Table 4. Results of ABA tests of the ore-bearing tailings samples.

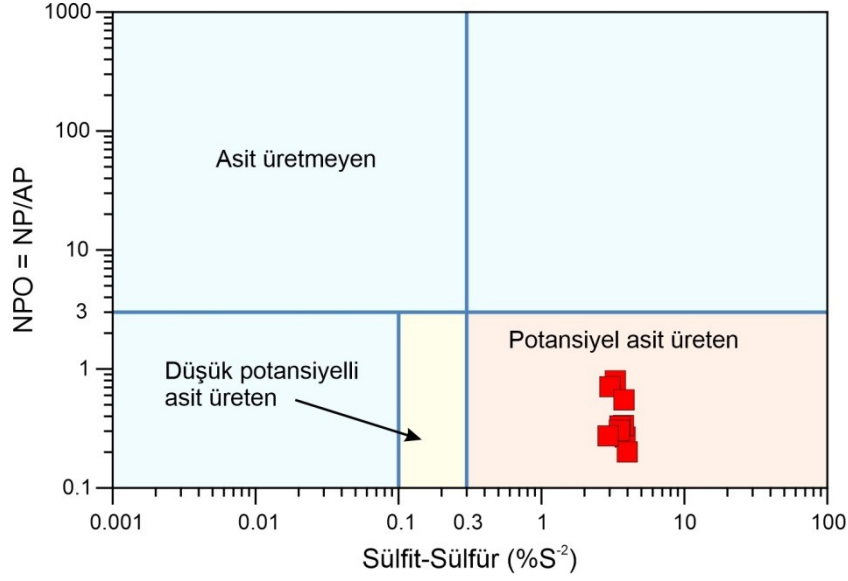
	Macun pH	Karbon (C) (toplam)	Karbonat (CaCO ₃)	Sülfür (Toplam S)	Sülfat Sülfür (S ⁻²)	Sülfat (SO ₄ ⁻²)	¹ NP	² AP	³ Net NP	⁴ NPO
Birimi	-	%	%	%	%	%	kgCaCO ₃ /t	kgCaCO ₃ /t	kgCaCO ₃ /t	-
AB1	10.09	14.46	72.30	5.77	3.85	1.92	48.25	180.31	-132.06	0.27
AB2	10.42	14.07	70.34	4.93	3.29	1.64	122.50	154.06	-31.56	0.80
AB3	11.04	13.72	68.58	4.51	3.01	1.50	100.00	140.94	-40.94	0.71
AB4	10.94	14.10	70.49	5.31	3.54	1.77	55.00	165.94	-110.94	0.33
AB5	10.66	13.98	69.92	5.62	3.75	1.87	58.75	175.63	-116.88	0.33
AB6	10.43	14.16	70.82	5.31	3.54	1.77	55.00	165.94	-110.94	0.33
AB7	10.14	14.68	73.41	5.25	3.50	1.75	50.00	164.06	-114.06	0.30
AB8	10.36	14.46	72.29	5.97	3.98	1.99	37.50	186.56	-149.06	0.20
AB9	10.00	14.33	71.67	4.38	2.92	1.46	37.50	136.88	-99.38	0.27
AB10	10.08	13.31	66.56	5.67	3.78	1.89	97.50	177.19	-79.69	0.55

¹NP (Nötralizasyon Potansiyeli) = $50 \times (1 \text{ N HCl} \times \text{eklenen toplam HCl} - 0.1 \text{ N NaOH} \times \text{eklenen NaOH})$ (Sobek vd., 1978’e göre); ²AP (Asit Üretim Potansiyeli) = % Sülfat sülfür $\times 31.25$ (Sobek vd., 1978’e göre); ³NNP (Net Nötralizasyon Potansiyeli) = NP-AP; ⁴NPO (Nötralizasyon Potansiyel Oranı) = NP/AP; ölçü birimi ton başına kg CaCO₃ cinsinden olup, açığa çıkacağı öngörülen asidin nötrleştirilebilmesi için gerekli olan kalsit (CaCO₃) miktarı olarak ifade edilmektedir.

Çizelge 5. Statik test değerlendirme parametreleri.**Table 5.** *Static test interpretation parameters.*

Referans	Ayrım kriteri		
	NPO	NNP	Macun pH
Price vd. (1997)	<1, asit üretir (yeterli nötrleştirme kapasitesine sahip olmayan)		pH<4, Acid
	1-2, potansiyel asit üreticisi		pH>7, Neutral
Soregaroli ve Lawrence (1998)	2-4, düşük potansiyel asit üreticisi		
	>4, asit üretmez (yeterli nötrleştirme kapasitesine sahip)		
Brodie vd. (1991)	<1, potansiyel asit üreticisi		
	1-3, belirsiz bölge (asit üretme potansiyeli zayıf)		
Ferguson ve Morin (1991)	>4, asit üretmez		
	<1, asit üretir		
Sobek vd. (1978)	1-3 (1<NP/AP<3), belirsiz bölge		
	>3, asit üretmez		
Day (1989)		<-20, potansiyel asit üreticisi	
		-20<NNP<20, belirsiz bölge	
Ferguson ve Morin (1991)		>20, asit üretmez	
		<-5, asit üretir	
Sobek vd. (1978)		<10, asit üretir	
		>10, asit üretmez	

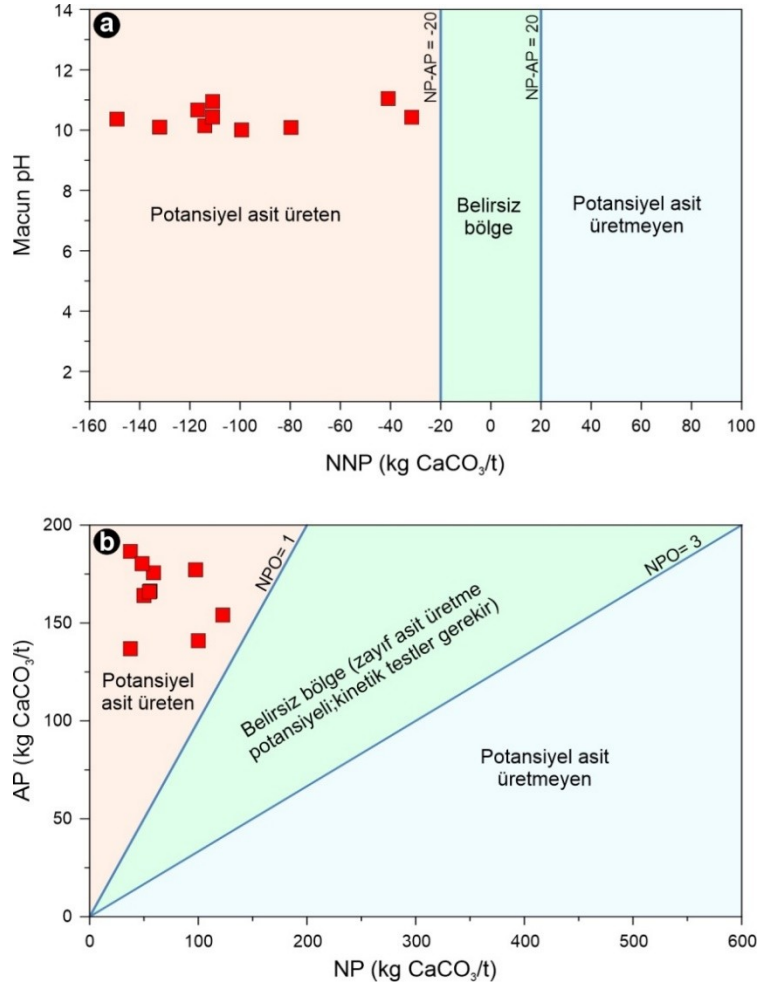
Ancak, cevherli maden atıklarının karakterizasyonunda en önemli parametrelerden biri olan sülfür (%S⁻²) miktarının ve buna bağlı olarak asit üretme potansiyelinin belirlenmesi gerekmektedir. Örneklerin S⁻² miktarının %0.1'in üzerinde olması, atık malzemenin 'potansiyel asit üreticisi' olduğunu ve statik, gerekiyorsa kinetik testlerin yapılması gerektiğini göstermektedir. Ancak tersi durum, yani S⁻²<%0.1 olması durumunda potansiyel asit üreticisi olmadığını ve asit drenajı yönünden herhangi bir problem teşkil etmeyeceğini işaret etmektedir (Sobek vd., 1978; Brodie vd., 1991; Price vd., 1997). Çalışma alanı örneklerinin S⁻² değerlerinin %2.92 - %3.98 (n = 10) arasında değiştiği belirlenmiş olup, tüm değerlerin %0.3'ün üzerinde olması, pH sonuçlarının aksine, cevherli maden atıklarının 'potansiyel asit üreten' karakterde olduğunu yansıtmaktadır (Şekil 6).



Şekil 6. İncelenen örneklerin dağılımını gösteren NPO'ya karşı Sülfür-Sülfür (%S²) diyagramı (sonuçları yorumlamak için kullanılan kriterler Sobek vd., 1978; Brodie vd., 1991; Price vd., 1997'ye göredir).

Figure 6. NPR vs Sulphide-Sulphur (%) diagram of studied samples (criteria used to interpret the results are according to Sobek et al., 1978; Brodie et al., 1991; Price et al., 1997).

Asit drenajı oluşumu tahmininde kullanılan diğer bir yöntem ise NNP parametresi olup, bir kayacın nötürleştirme (nötralizasyon) özelliği ile asit üretme potansiyeli arasındaki farkı ifade etmektedir. Birimi kgCaCO₃/t olan NNP için asit drenajı oluşturma potansiyeli açısından farklı araştırmacılar tarafından farklı oranlar önerilmiştir (Çizelge 5). Ferguson ve Morin (1991) tarafından önerilen ve büyük ölçüde kabul gören görüşe göre NNP değerinin <-20 olması, kayacın potansiyel asit üreticisi karakterini yansıtmaktadır. Cevherli atık örneklerinin ise NNP değerlerinin -32 kgCaCO₃/t ile -149 kgCaCO₃/t (n = 10) arasında değiştiği ve tamamının asit üretme potansiyeline sahip olduğu ortaya konmuştur (Şekil 7a).



Şekil 7. İncelenen örneklerin ABM diyagramları. **a)** NNP'ye karşı macun pH sınıflama diyagramı (ayırım kriterleri Ferguson ve Morin, 1991'e göredir). **b)** AP-NP sınıflama diyagramı (Sobek vd., 1978; Brodie vd., 1991; Lapakko, 2002).

Figure 7. The ABA diagrams of studied samples. **a)** Classification diagram of the samples according to Paste pH versus NNP (criteria used to interpret the results of ABA are according to Ferguson and Morin, 1991). **b)** AP vs NP classification diagram (Sobek et al., 1978; Brodie et al., 1991; Lapakko, 2002).

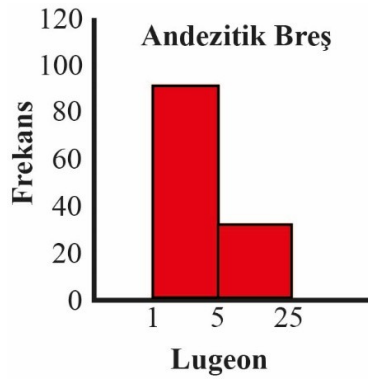
Maden atıklarının karakterizasyonunu belirlemede kullanılan en önemli parametrelerden biri de NPO değeri olup, NP/AP oranı ile elde edilmektedir. Potansiyel asit üretmeyen bir maden atığında NP değerlerinin AP değerlerinden yüksek çıkması beklenmekle birlikte, NPO değerlendirmesinde birçok araştırmacı tarafından farklı sınır değerleri önerilmektedir (örneğin, Brodie vd., 1991; Price vd., 1997; Soregaroli ve Lawrence, 1998). Ancak günümüzde yaygın olarak kullanılan ve ülkemizde maden atık yönetmeliğinde de yer alan sınır değerleri Brodie vd. (1991) tarafından önerilen değerler olup; $NPO < 1$ olması durumunda 'asit üreten', $NPO > 3$ durumunda 'asit üretmeyen' ve $1 < NPO < 3$ durumunda ise

kinetik testler gerektiren 'belirsiz bölge' olarak kabul edilmektedir. Çalışılan örneklerde NPO değerleri 0.20-0.80 (n = 10) arasından değişmekte olup, potansiyel asit üretici karakteri yansıttıkları belirlenmiştir (Şekil 7b).

Yapılan statik test sonuçları, cevherli atık örneklerinin asit üretme potansiyeline sahip olduğunu işaret etmesinden dolayı, meydana gelebilecek olası sızıntılara önlem olarak, atık depolama tesisi temel kayasının geçirimsiz hale getirilmesi için, yapılan çalışmalar aşağıda verilmiştir.

Atık Barajı Temel Kaya Kütlelerinin Geçirimsizlik Değerlendirmesi

Atık barajı temel alanının bulunduğu kaya kütleleri Alibaba Formasyonu'na ait andezitik breşlerden oluşmakta olup, akifer özelliği göstermemektedir (Alemdag, 2015). Çalışma alanında hesaplanan Lugeon değerlerinin dağılımına (Şekil 8) göre, temel kayayı oluşturan andezitik breşlerin az geçirimli-geçirimsiz özellikte olduğu belirlenmiş olup, birime ait geçirimsizlik verileri Çizelge 6'da verilmiştir.



Şekil 8. Çalışma alanındaki andezitik breşlerin Lugeon (Lugeon, 1933) değerlerinin frekans dağılım histogramı.

Figure 8. Frequency distribution histogram of Lugeon (Lugeon, 1933) values of the andesitic breccias in the study area.

Sonlu elemanlar yöntemi ile sızma (seepage) analizi

Sonlu elemanlar yöntemi mühendislik yapılarının tasarımı ve temel kaya kütle özelliklerinin değerlendirilmesinde (geçirimsizlik, duraylılık, dayanım, deformasyon, yer değiştirme, enjeksiyon derinlikleri gibi) kullanılan en geçerli uygulamalardan biri olup, günümüzde pek çok araştırmacı tarafından kullanılmaktadır (Alemdag vd. 2008; Gurocak vd. 2008; Gurocak ve Alemdag, 2012; Alemdag vd., 2019).

Çizelge 6. Lugeon (1933)'un geçirimsizlik sınıflamasına göre çalışma alanındaki andezitik breşlerin % dağılımı ve sınıflandırılması.

Table 6. The distribution (%) and classification of andesitic breccias in the study area according to the permeability classification of Lugeon (1933).

Lugeon sınır değerleri (1/m/dak)	Kaya Sınıfı	Andezitik Breş
< 1	Geçirimsiz	0
1 - 5	Az Geçirimli	75
5 - 25	Geçirimli	25
> 25	Çok Geçirimli	0

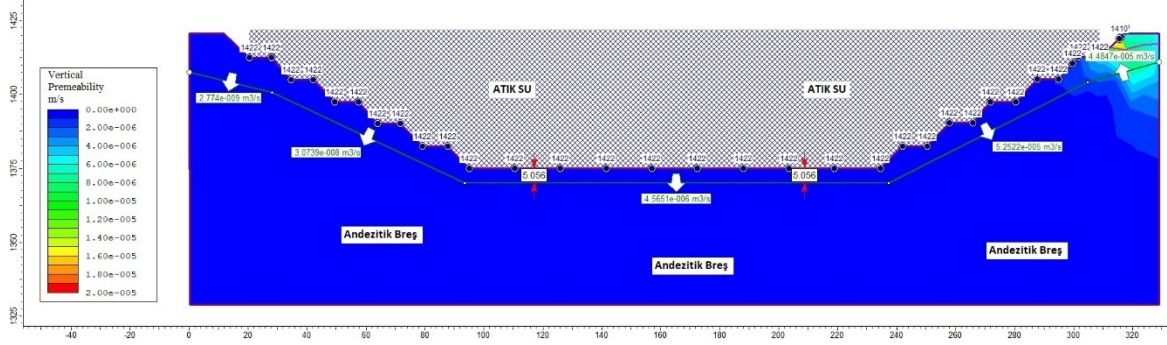
Atık barajı eksen yerinde açılmış olan SK1, SK2 ve SK3 nolu sondaj kuyularında yapılan basınçlı su deneyi ve sondaj kuyularından alınan örneklerde yapılan jeoteknik deneyler ile kaya kütle ve rezervuar alanına serilecek kil malzemenin özellikleri belirlenmiştir (Çizelge 7). İnceleme alanında baraj eksenine paralel alınan enine kesitte (Şekil 9) sonlu elemanlar tabanlı ağ sistemi oluşturulmuş ve analizde Phase² bilgisayar programı kullanılmıştır (Rocscience, 2011). İlk analizde, baraj eksen yeri sıyırma kazısı yapıldıktan sonra baraj yerinin tamamen atıksu ile dolduğu durum dikkate alınmış ve baraj tabanından 5m, sağ-sol şevlerden ise yaklaşık 10m derinlikte meydana gelebilecek su deşarjları belirlenmiştir. Ayrıca, atık baraj yeri su ile dolu iken andezitik breşlerdeki düşey geçirimsizlik de tespit edilmiştir.

Çizelge 7. Sayısal analizde kullanılan parametreler.

Table 7. The parameters used in numerical analysis.

Temel Kaya Kütleleri		Rezervuar Alanına Serilen Kil	
Malzeme Özellikleri	Andezitik Breş	Malzeme Özellikleri	Sıkıştırılmış Kil
Birim Ağırlık (MN/m ³)	0.0273	Birim Ağırlık (MN/m ³)	0.016
Elastisite Modülü (MPa)	6302	Elastisite Modülü (MPa)	4.2
Poisson Oranı	0.32	Poisson Oranı	0.4
Yenilme Kriteri	Genelleştirilmiş Hoek-Brown	Yenilme Kriteri	Mohr-Coulomb
Malzeme Tipi	Plastik	Sürtünme açısı	15°
Tek Eksenli Sıkışma Dayanımı (MPa)	51.7	Kohezyon (MPa)	0.11
m_b	1.603	Hidrolik Parametreler	
s	0.0007	Hidrolik Model	Basit
a	0.506	K_s (m/s)	1.16×10^{-9}
Hidrolik Model	Basit	K_2/K_1	1
K_s (m/s)	2.99×10^{-5}		
K_2/K_1	1		

Yapılan sızma analizine göre (Şekil 9), atık depolama tesisi baraj eksen yerinin geçirimsizlik katsayısı $2 \times 10^{-6} \text{ m/s}$ olup, geçirimsiz özellikte olduğu belirlenmiştir (Şekil 9). Böylece, hem yerinde yapılan basınçlı su deneyleri, hem de sayısal analiz ile baraj eksen yerinde temel kayayı oluşturan andezitik breşlerin geçirimsiz özellikte olduğu ortaya konmuştur.



Şekil 9. Atık baraj yerinde sonlu elemanlar ağ modeli ve sızıntı analizi (Phase 8.0).

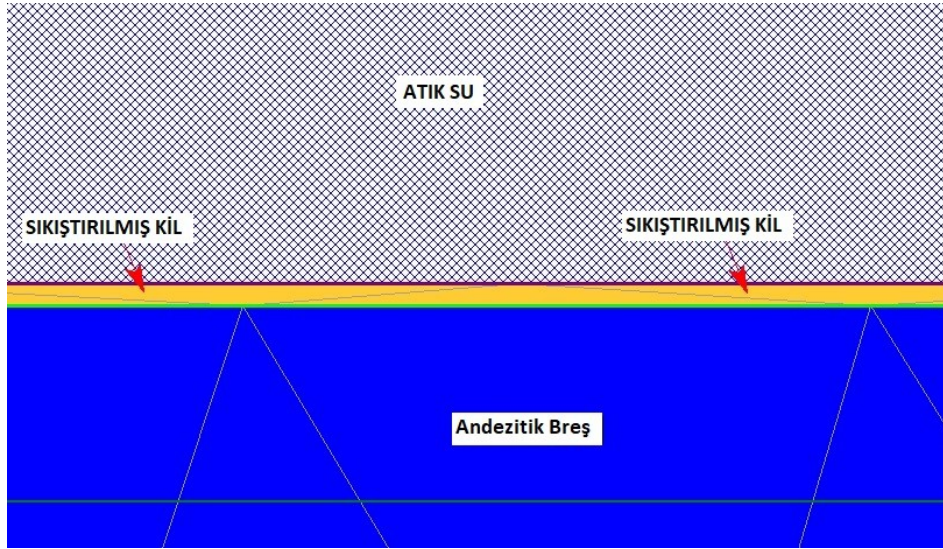
Figure 9. Finite element network model and seepage analysis in the waste dam site (Phase 8.0).

İnşa edilen atık barajının yüzey sularına etkisi olmayıp, temel kayanın geçirimsiz olması nedeni ile yeraltı sularına etkisi kaçınılmazdır. Bu durumu önlemek için baraj eksen yeri ve rezervuar alanında geçirimsizliği sağlamak amacıyla ince (40-50 cm) bir kil tabakası serilmiş olup, ek olarak kil üzerine jeosentetik kil membran, jeomembran ve drenaj jeokompozit serilmiştir.

Geçirimsizlik için yapılan çalışmalar

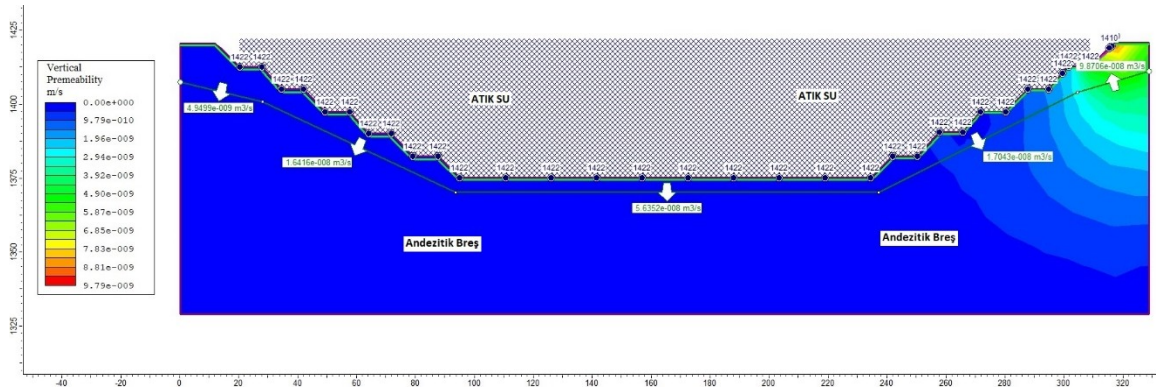
Basınçlı su testleri ve sayısal analizlerden elde edilen sonuçlar temel kayayı oluşturan andezitik breşlerde iyileştirmeler yapılması ve geçirimsiz hale getirilmesinin gerekli olduğunu ortaya koymaktadır. Çalışma alanına, bu konuda yapılan en yaygın uygulama tipi olan geçirimsiz alana kil serilmesi ve sıkıştırılması işlemi uygulanmıştır. Geçirimsiz özellikte kil serilerek iyileştirme yönteminin uygulanmasından sonra, geçirimsizlik problemlerinin ortadan kalkıp kalkmadığını kontrol etmek amacıyla sızma (Seepage) analizleri gerçekleştirilmiştir. Rezervuar alanı için oluşturulan sayısal analiz ağ modeli Şekil 10'da verilmiş olup, sayısal analiz için 50 cm kalınlığındaki geçirimsiz özellikteki kil ve tabandaki andezitik breşlerden oluşan kaya kütlesi dikkate alınmıştır. Yapılan sızma analizine göre (Şekil 11), gerçekleştirilen kil uygulamasından sonra permeabilite değeri $9.79 \times 10^{-10} \text{ m/s}$, deşarj değerleri ise tabanda 5m derinlikte $5.63 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{s}$, sol şevde $1.64 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{s}$, sağ şevde ise $1.70 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{s}$ (Şekil 11) olarak belirlenmiştir. Elde edilen permeabilite değeri ile tabanda ve yan şevlerde 5-10m derinlikteki deşarj değerleri

incelendiğinde, sifıra oldukça yakın oldukları ve yapılan iyileştirmelerin atık depolama tesisi tabanını geçirimsiz hale getirdiğini göstermektedir.



Şekil 10. Atık baraj alanında uygulanan iyileştirme (kil sıkıştırma) ve sonlu eleman ağı modeli.

Figure 10. The improvement (clay compression) and finite-element network model applied in the waste dam area.



Şekil 11. Atık baraj alanında iyileştirme sonrası uygulanan sonlu elemanlar sızma analizi.

Figure 11. The finite-element seepage analysis applied after improvement in the waste dam area.

SONUÇLAR

Gümüşhane’de yer alan Gümüştaş Madencilik çinko-kurşun-bakır flotasyon tesisinden çıkan atıklar için inşa edilmiş barajın, rezervuar alanında biriken atık malzemenin kısa süreli asit üretme potansiyelinin değerlendirilmesine yönelik yapılan statik testlerden elde edilen veriler değerlendirildiğinde;

- Eosen yaşlı Alibaba Formasyonu üzerine inşa edilen atık depolama tesisinde, cevherli atık örneklerindeki S, Zn, Cu, As, Sb, Cd, Hg, Ag ve Bi elementlerin konsantrasyonlarındaki artışın, flotasyonu yapılan cevherleşmenin mineral parajenezinde yer alan pirit, kalkopirit, sfalerit ve galen mineralleri ile ilişkili olduğu ve OYKOx3'den yüksek konsantrasyonlara sahip iz elementlerin su kirliliği oluşturma potansiyeli bulunduğu belirlenmiştir.
- Kısa-dönem temas sızıntı pH değerleri (9.55-10.60, n= 10) bazik ortamı ve IV. sınıf kalite suları işaret ederken, çözülmüş potansiyel toksik metal (Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Ni, Pb, Zn) içerikleri ve macun pH değerleri (10.00-11.04, n = 10) atık depolama tesisinde kısa dönemde asit üretme potansiyelinin bulunmadığını veya çok düşük olacağını göstermektedir.
- Cevherli atık örneklerinde yapılan ABM testine göre sülfid-sülfür (%S⁻²: 2.92-3.98, n = 10), NNP (-32 kg CaCO₃/t -149 kg CaCO₃/t, n= 10) ve NPO (0.20-0.80, n = 10) değerleri örneklerin 'potansiyel asit üreticisi' karakterinde olduğuna işaret etmektedir.
- Gerçekleştirilen sayısal analizlerden atık depolama tesisi baraj eksen yerinin geçirimsizlik katsayısının (K) 2×10^{-6} m/s olduğu ve temel kayanın geçirimli özellikte olduğu belirlenmiştir. Sayısal analizden elde edilen bu sonucu, baraj yerinde yapılmış olan Lugeon deneylerine ait sonuçlar da desteklemektedir. Asit üretme potansiyeli ve oluşabilecek sızıntılara önlem olarak önerilen, atık barajı eksen yeri ve rezervuar alanına 50cm kalınlığında geçirimsiz özellikte kil malzemesi serilerek sıkıştırılması işleminden sonra, uygulanan yöntemi kontrol etmek için sızma analizleri gerçekleştirilmiş ve atıksu deşarjları belirlenmiştir. Buna göre tabanda 5m derinlikte elde edilen deşarj değeri 5.63×10^{-8} m³/s, sol şevde 1.64×10^{-8} m³/s, sağ şevde 1.70×10^{-8} m³/s ve temel kaya kütlelerinin geçirimsizlik değeri ise 9.79×10^{-10} m/s olarak bulunmuştur. Bu değerler, alınan önlemin geçirimsizliği sağlamakta yeterli olduğunu göstermektedir.
- Kil sıkıştırma işleminin yanı sıra bir diğer önlem olarak atık depolama tesisi göl alanı ve baraj gövdesi memba şevinde jeosentetikler kullanılarak (jeosentetik kil membran, jeomembran ve drenaj jeokompozit) ortam tamamen geçirimsiz hale getirilmelidir. Uygulanan söz konusu önlemler ile birlikte oluşması muhtemel asit drenajından kaynaklanacak yeraltı suyu kirliliği de önlenmiş olacaktır.

KATKI BELİRTME

Bu çalışmaya maddi destek sağlayan, sahadan örneklerin alınmasına ve analiz edilmesine yardımcı olan Gümüştaş Madencilik Tic. A.Ş. (Gümüşhane)'ye, özellikle Erdal GÜLDOĞAN ve Uğur ÖLGEN'e katkılarından dolayı teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR

- Akaryalı, E. and Akbulut, K., 2016. Constraints of C-O-S isotope compositions and the origin of the Ünlüpinar volcanic-hosted epithermal Pb-Zn±Au deposit, Gümüşhane, NE Turkey. *Journal of Asian Earth Sciences*, 117, 119-134.
- Akaryalı, E., 2016. Geochemical, fluid inclusion and isotopic (O, H and S) constraints on the origin of Pb-Zn±Au vein-type mineralizations in the Eastern Pontides Orogenic Belt (NE Turkey). *Ore Geology Reviews*, 74, 1-14.
- Akaryalı, E. and Tüysüz, N., 2013. The genesis of the slab window-related Arzular lowsulfidation epithermal gold mineralization (Eastern Pontides, NE Turkey). *Geoscience Frontiers*, 4, 409-421.
- Akaryalı, E., Gücer, M.A., ve Alemdag, S., 2018. Atık Barajı Rezervuarı ve Cevher Stok Alanlarında Asit Maden Drenajı (AMD) Oluşumunun Değerlendirilmesi: Gümüşhane Örneği. *Doğal Afetler ve Çevre Dergisi*, 4 (2), 192-209.
- Alemdag, S., Gurocak, Z., Solanki, P., Zaman, M., 2008. Estimation of bearing capacity of basalts at Atasu dam site, Turkey. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 67, 1, 79-85.
- Alemdag, S., 2015. Assessment of bearing capacity and permeability of foundation rocks at the Gumustas waste dam site, (Turkey) using empirical and numerical analysis. *Arabian Journal of Geosciences*, 8, 1099-1110.
- Alemdag, S., Zeybek, H.I., Kulekci, G., 2019. Stability evaluation of the Gümüşhane-Akçakale cave by numerical analysis method. *Journal of Mountain Science*, 16(9), 2150-2158.
- Arslan, M., Tüysüz, N., Korkmaz, S. and Kurt, H., 1997. Geochemistry and Petrogenesis of the Eastern Pontide Volcanic Rocks, Northeast Turkey, *Chemie der Erde Geochemistry*, 57, 157-187.

- Aslan, Z., 2010. U–Pb zircon SHRIMP age, geochemical and petrographical characteristics of tuffs within calc-alkaline Eocene volcanics around Gümüşhane (NE Turkey). *Eastern Pontides, Neues Jahrbuch für Mineralogie – Abhandlungen*, 187 (3), 329–346.
- Aydınçakır, E., 2012. Borçka (Artvin, KD-Türkiye) yöresi Tersiyer volkanitlerinin petrografisi, jeokimyası ve petrojenezi. Doktora Tezi, KTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, Türkiye.
- Blowes, D.W. and Jambor, J.L., 1990. The pore-water geochemistry and the mineralogy of the vadose zone of sulfide tailings, Waite amulet, Quebec, Canada. *Applied Geochemistry* 5, 327-346.
- Boon, M. and Heijnen, J.J., 1998. Chemical oxidation kinetics of pyrite in bioleaching processes. *Hydrometallurgy*, 48, 27-41.
- Brodie, M.J., Broughton, L.M. and Robertson, A., 1991. A conceptual rock classification system for waste management and a laboratory method for ARD prediction from rock piles. *Proc 2nd ICARD* 3, 119-135.
- Brunner, B., Yu, J-Y., Mielke, R.E., MacAskill, J.A., Madzunkov, S., McGenity, T.J. and Coleman, M., 2008. Different isotope and chemical patterns of pyrite oxidation related to lag and exponential growth phases of *Acidithiobacillus ferrooxidans* reveal a microbial growth strategy. *Earth and Planetary Science Letters*, 270, 63-72.
- Cidu, R. and Frau, F., 2009. Abandoned and active mining sites: From contamination to remediation, IMWA Symposium Water in mining environments. *Journal of Geochemical Exploration*, 100 (2-3), doi: 10.1016/j.gexplo.2008.06.002.
- Day, S.J., 1989. Comments after presentation of: A practical approach to testing for acid mine drainage in the mine planning and approval process. At the Thirteenth Annual British Columbia Mine Reclamation Symposium. June 7-9, Vernon, British Columbia.
- Demir, Y. and Dişli, A., 2020. Fluid inclusion and stable isotope constraints (C, O, H) on the Dağbaşı Fe–Cu–Zn skarn mineralization (Trabzon, NE Turkey). *Ore Geology Reviews*, 116, 103235.
- Demir, Y., Uysal, İ. and Sadıklar, M.B., 2013. Mineral Chemical Investigation on Sulfide Mineralization of the İstala Deposit, Gümüşhane, NE-Turkey. *Ore Geology Reviews*, 53, 306-317.
- Demir, Y., Uysal, İ., Sadıklar, M.B. and Sipahi, F., 2008. Mineralogy, Mineral Chemistry, and Fluid Inclusion Investigation of Köstere Hydrothermal Vein-Type Deposit (Gümüşhane, NE-Turkey). *Neues Jahrbuch für Mineralogie - Abhandlungen*, 185 (2), 215-232.

- Descostes, M., Vitorge, P. and Beaucaire, C., 2004. Pyrite dissolution in acidic media. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 68, 4559-4569.
- Dold, B., 2014. Evolution of acid mine drainage formation in sulphidic mine tailings. *Minerals*, 4 (2), 621-641.
- Dold, B., 2017. Acid rock drainage prediction: A critical review. *Journal of Geochemical Exploration*, 172, 120-132.
- Dold, B., Wade, C. and Fontboté, L., 2009. Water management for acid mine drainage control at the polymetallic Zn–Pb–(Ag–Bi–Cu) deposit Cerro de Pasco, Peru. *Journal of Geochemical Exploration*, 100, 133-141.
- EPA (U.S. Environmental Protection Agency), 1994b. Acid Mine Drainage Prediction, USEPA, Office of Solid Waste, Special Wastes Branch (Washington DC), December, EPA 530-R-94-036.
- Eyüboğlu, Y., Santosh, M., Dudas, O.F., Akaryalı, E., Chung, S.L., Akdağ, K. and Bektaş, O., 2013. The nature of transition from adakitic to non-adakitic magmatism in a slab window setting: A synthesis from the Eastern Pontides, NE Turkey, *Geoscience Frontiers*, 4, 353-375.
- Ferguson, K.D. and Morin, K.A., 1991. The prediction of acid rock drainage-lessons from the database. In: *Proceedings of the 2nd ICARD*, vol 1-4. Montréal, QC, Canada, pp 83-106.
- Ficklin, W.H., Plumlee, G.S., Smith, K.S. and McHugh, J.B., 1992. Geochemical classification of mine drainages and natural drainages in mineralized areas. In: Kharaka, Y.K. and Maest, A.S. (eds). *Proceedings of water-rock interaction no 7*. Balkema, Rotterdam, pp 381-384.
- Gleisner, M., Herbert, R.B. and Kockum, P.C.F., 2006. Pyrite oxidation by *Acidithiobacillus ferrooxidans* at various concentrations of dissolved oxygen. *Chemical Geology*, 225,16-29.
- Gray, N., 1997. Environmental impact and remediation of acid mine drainage: a management problem. *Environmental Geology*, 30, 62-71.
- Gurocak, Z., Alemdag, S., Zaman, M., 2008. *Rock slope stability and excavatability assessment of rocks at the Kapikaya Dam site, Eastern Turkey*, *Engineering Geology*, 96(1-2), 17-27.
- Gurocak, Z., Alemdag, S., 2012. *Assessment of permeability and injection depth at the Atasu dam site (Turkey) based on experimental and numerical analyses*, *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 71, 221-229.

- Gücer, M.A., Aydınçakır, E., Yücel, C. Akaryalı, E., 2017. Tersiyer Yaşlı Altınpınar Hornblendli Andezitlerinin (Torul-Gümüşhane) Petrografisi, Mineral Kimyası ve P-T Kristalleşme Koşulları. Gümüşhane Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 7 (2), 236-267.
- Güven, İ.H., 1993. Doğu Karadeniz Bölgesi'nin 1/25.000 ölçekli jeolojisi ve komplikasyonu, MTA, Ankara.
- Holmes, P.R. and Crundwell, F.K., 2000. The kinetics of the oxidation of pyrite by ferric ions and dissolved oxygen: an electrochemical study. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 64, 263-274.
- Hossner, L.R. and Brandt, J.E., 1997. Acid/Base Account and Minesoils: A Review. Proceedings of 14th Annual Meeting of the ASSMR. America Society of Mining and Reclamation, pp 128-140.
- Jia, Y., Tan, Q., Sun, H., Zhang, Y., Gao, H. and Ruan, R., 2018. Sulfide mineral dissolution microbes: Community structure and function in industrial bioleaching heaps. *Green Energy and Environment*, 4 (1), 29-37.
- Lapakko, K., 1992. Characterization and Static Testing of Ten Gold Mine Tailings. Proceedings America Society of Mining and Reclamation, pp 370-384, doi: 10.21000/JASMR92010370.
- Lapakko, K.A., 2002. Metal mine rock and waste characterization tools: an overview, mining, minerals and sustainable development. Report 67, Acid Drainage Technology Initiative, <http://pubs.iied.org/pdfs/G00559.pdf>
- Lawrence, R.W., Poling, G.W., Ritcey, G.M. and Marchant, P.B., 1989. Assessment of predictive methods for the determination of AMD potential in mine tailings and waste rock, tailings and effluent management, New York: Pergamon Press, pp. 317-331.
- Lermi, A., 2003. Midi (Karamustafa/Gümüşhane, KD Türkiye) Zn-Pb Yatağının Jeolojik, Mineralojik, Jeokimyasal ve Kökensel İncelemesi, Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon.
- Lottermoser, B.G., 2010. Mine Wastes: Characterization, Treatment and Environmental Impacts, Third Edition. Springer, Berlin, Heidelberg, 400 p.
- Lugeon, M., 1933. Barrages et Geologie, vol. 1, Librairie de l'Université. F. Rouge & Cie, S.A., Lausanne, 138ss.
- Ma, Y. and Lin, C., 2013. Microbial oxidation of Fe and pyrite exposed to flux of micromolar H₂O₂ in acidic media. *Scientific Reports*, 3, 1350-1352.
- Morin, K.A. and Hutt, N.M., 2001. Environmental geochemistry of minesite drainage: practical theory and case studies. MDAG Publishing, Vancouver, 333 p.

- Nonveiller, E., 1989. Grouting, Theory and Practice, Elsevier, Amsterdam, 250ss.
- Okay, A.İ., Tüysüz, O., 1999. Tethyan Sutures of Northern Turkey. The Mediterranean Basin: Tertiary Extension within the Alpine Orogen. Geological Society, London, Special Publications, 156, 475-515.
- Plumlee, G.S., Smith K.S., Montour, M.R., Ficklin, W.H. and Mosier, E.L., 1999. Geologic controls on the composition of natural waters and mine waters draining diverse mineral-deposit types. In: Filipek, L.H., Plumlee, G.S. (eds). The environmental geochemistry of mineral deposits. Part B: case studies and research topics, vol 6B. Society of Economic Geologists, Littleton, pp 373-432.
- Plumlee, G.S., Smith, K.S., Ficklin, W.H. and Briggs, P.H., 1992. Geological and geochemical controls on the composition of mine drainages and natural drainages in mineralized areas: Proceedings, 7th International Water-Rock Interaction Conference, Park City, Utah, pp. 419-422.
- Price, W.A., 2003. Challenges posed by metal leaching and acid rock drainage and approaches used to address them. In: Jambor, J.L., Blowes, D.W., Ritchie, A.I.M. (eds.), Environmental aspects of mine wastes. Mineralogical Association of Canada, Short Course Series, 31, 15-30.
- Price, W.A., Errington, J. and Koyanagi, V., 1997. Guidelines for the prediction of acid rock drainage and metal leaching for mines in British Columbia: part I. General procedures and information requirements. In: Proc, 4th ICARD, Natural Resources Canada, Ottawa, 1, 1-14.
- RG (Resmi Gazete) 28483 (değişik ibare: RG-15/4/2015-29327), 2012. Yerüstü Su Kalitesi Yönetimi Yönetmeliği, Orman ve Su İşleri Bakanlığın, Ankara.
- Rocscience, 2011. Phase2 8.0 finite element groundwater seepage, Geomech Software and Res. Rocsci, Toronto.
- Siddharth, S., Jamal, A., Dhar, B.B. and Shukla, R., 2002. Acid-Base Accounting: A Geochemical Tool for Management of Acid Drainage in Coal Mines. Mine Water and the Environment, 21, 106-110.
- Singer, P.C. and Stumm, W., 1970. Acidic Mine Drainage: The rate-determining step. Science, 167, 1121-1123.
- Sipahi F., 2011. Formation of Skarns at Gümüşhane (Northeastern Turkey), Neues Jahrbuch für Mineralogie-Abhandlungen, 188 (2), 169-190.
- Sipahi, F., Gücer, M.A. and Sadıklar, M.B., 2019. Zigana Dağı (Gümüşhane, KD Türkiye) Dayklarının Jeokimyası ve Jeolojik Anlamı. Yerbilimleri, 40 (3), 293-325.

- Sipahi, F., Gücer, M.A. and Saydam Eker, Ç., 2020. Geochemical composition of magnetite from different iron skarn mineralizations in NE Turkey: implication for source of ore forming fluids. *Arabian Journal of Geosciences*, 13 (2), 70.
- Skousen, J.G., Sencindiver, J.C. and Smith, R.M., 1987. A Review of Procedures for Surface Mining and Reclamation in Areas with Acid-Producing Materials. EWRC 871, West Virginia University, Morgantown, WV, 40 pp.
- Skousen, J.G., Sexstone, A. and Ziemkiewicz, P.F., 2000. Acid mine drainage control and treatment. In: Hartfield, J.L., Volenec, J.G., Dick, W.A. (eds), Reclamation of drastically disturbed lands. American Society of Agronomy and American Society for Surface Mining and Reclamation. Agronomy No. 41pp 131-169.
- Smith, R.M., Grube, W.E.Jr., Arkele, T.Jr., Sobek, A.A., 1974. Mine spoil potentials for soil and water quality. West Virginia University. EPA-670/2-74-070, 303 p.
- Smith, R.M., Sobek, A.A., Arkle, T., Sencindiver, J.C. and Freeman, J.R., 1976. Extensive overburden potentials for soil and water quality. EPA-600/2-76-184. USEPA, Cincinnati, OH.
- Sobek, A.A., Schuller, W.A., Freeman, J.R. and Smith, R.M., 1978. Field and laboratory methods applicable to overburdens and minesoils. EPA-600/2-78-054. US Govt Printing Office, Washington, DC.
- Soregaroli, B.A. and Lawrence, R.W., 1998. Update on waste characterisation studies. In: Proc. mine design, operations and closure conference, Polson, MT, USA.
- Şahin, K. and Kaygusuz, A., 2016. Mescitli (Torul/Gümüşhane) ve Çevresindeki Eosen Yaşlı Volkanik Kayaçların Petrografik, Jeokimyasal ve Petrolojik Özellikleri. *Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 6 (2), 89-116.
- Tokel, S., 1972. Stratigraphical and volcanic history of the Gümüşhane region (Ne Turkey), PhD. Thesis, University College, London.
- Tüysüz, N., 2000. Geology, Lithochemistry and Genesis of the Murgul Massive Sulfide Deposit, NE Turkey. *Chemie der Erde - Geochemistry*, 60, 231-250.
- Yaroshevsky, A.A., 2006. Abundances of chemical elements in the Earth's crust. *Geochemistry International*, 44 (1), 54-62.
- Yücel, C., Arslan, M., Temizel, İ., Abdioğlu Yazar, E. and Ruffet, G., 2017. Evolution of K-rich magmas derived from a net veined lithospheric mantle in an ongoing extensional setting: Geochronology and geochemistry of Eocene and Miocene volcanic rocks from Eastern Pontides (Turkey). *Gondwana Research*, 45, 65-86.



Yerbilimleri, 2020, 41 (1), 86-99, DOI:10.17824/yerbilimleri.597652

Hacettepe Üniversitesi Yerbilimleri Uygulama ve Araştırma Merkezi Bülteni

Bulletin of the Earth Sciences Application and Research Centre of Hacettepe University

Kayaç Dayanımı Değerlerine Göre Kazı Yönteminin Belirlenmesi

Determination of Excavation Method According to Rock Strength Values

ABDURRAHMAN TOSUN ¹

¹ Dokuz Eylül Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Maden Mühendisliği Bölümü ve Bergama Meslek Yüksekokulu, Buca/Bergama/İzmir

Geliş (received): 28 Temmuz (July) 2019

Kabul (accepted) : 25 Nisan (April) 2020

ÖZ

Açık ocak madenciliğinde kazı işlemleri, genellikle direkt kazı ve gevşetme sonrası kazı olmak üzere iki şekilde yapılmaktadır. Kayaç dayanımı düşük olan sahalarda direkt olarak kazı yapılırken, tersi durumda ise delme-patlatma işlemiyle gevşetmeden sonra kazı operasyonları gerçekleştirilmektedir. Hangi kayaç dayanımı değerinden sonra gevşetme işleminin yapılması gerektiği üretimin ekonomik olarak yapılması açısından son derece önemlidir. Bu araştırmada açık işletme olarak çalışan bir kömür ocağında üç farklı kayaç dayanımı değerine sahip ve herhangi bir süreksizlik özelliği içermeyen bölgelerde çekme kepçeli yerkazar ile öncelikle direkt olarak kazı deneyleri yapılmıştır. Sonrasında ise aynı çalışma alanlarında delme-patlatma ile gevşetme yapıldıktan sonra yine aynı çekme kepçeli yerkazar ile kazı işlemi gerçekleştirilmiştir. Her iki durumda da birim kazı maliyetleri hesaplanarak karşılaştırma yapılmış ve tek eksenli basınç dayanımı 9,80 MPa ve daha yüksek olan sahalarda gevşetme işleminden sonra kazı yapılmasının daha ekonomik olduğu görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Çekme kepçeli yerkazar, kazı, kayaç dayanımı.

<https://doi.org/10.17824/yerbilimleri.597652>

✉ Abdurrahman TOSUN abdurrahman.tosun@deu.edu.tr

Dokuz Eylül Üniversitesi, Mühendislik Fak., Maden Mühendisliği Bölümü ve Bergama Meslek Yüksekokulu, Buca/Bergama/İzmir, ORCID 0000-0001-9866-7847

Abstract

In open pit mining, excavations are generally carried out in two ways: direct excavation and excavation after loosening. Direct excavation is performed in areas with low rock strength, and in the opposite case, excavation operations are carried out after loosening by drilling-blasting. Which rock strength value should be performed for the loosening process is extremely important in terms of economic production. In this research, firstly, direct excavation experiments were performed with a dragline in an open pit coal mine that has work areas that have materials with three different rock strength values and without any discontinuity characterized. Then, in the same work areas, after drilling-blasting and loosening, the same dragline was used in the excavation. In both cases, unit excavation costs were calculated and compared, and it was found to be more economical to excavate after loosening at sites with uniaxial compressive strength of 9.80 MPa and higher.

Key Words: Dragline, excavation, rock strength.

GİRİŞ

Açık ocak madenciliğinde üretim sırasında, cevhere ulaşmak için önce dekapaj, sonra da cevher kazısı yapılmaktadır. Kazı işlemleri genellikle direkt kazı ve gevşetme sonrası kazı olmak üzere iki şekilde yapılmaktadır. Mekanik özellikleri düşük ve yapısal özellikleri zayıf olan kayaç kazılarında direkt olarak kazı operasyonları yapılmaktadır. Gevşetme sonrası kazı ise direkt olarak kazılması mümkün olmayan sert kayaçlarda önce patlatma ile kayaç gevşetilmekte sonra da kazı yapılmaktadır. Kazılabilirliği etkileyen parametrelere göre kazı yöntemi seçimi çok sayıda araştırmacı tarafından incelenmiştir. Franklin vd. (1971) kayacın süreksizlik aralığı, nokta yük dayanımı ve tek eksenli basınç dayanımı değerlerini kullanarak bir grafik oluşturmuş ve grafiğe göre kayacın kazılabilirlik yöntemini belirlemeye çalışmıştır. Daha sonra Pettifer ve Fookes 1994'de Franklin'in belirlediği grafiği detaylandırarak güncellemiştir. Weaver (1975) sismik hız, kayacın tek eksenli basınç dayanımı, süreksizlik aralığı, süreksizlik devamlılığı, süreksizlik açıklığı ve doğrultu ve eğim yönelimi parametrelerinin her birine kendi arasında puanlar vererek kazı yöntemini tespit etmeye çalışmıştır. Kirsten (1982) kayacın tek eksenli basınç dayanımı, kaya kalite göstergesi (RQD), süreksizlik takımı sayısı, zemin yapısı, süreksizliklerin pürüzlülüğü ve süreksizliklerin alterasyonu parametrelerine göre sökücü dozer tiplerinin kullanılması gerektiğini

vurgulamıştır. Abdülatif ve Cruden (1983) yeraltı yapılarında tahkimat sistemlerinin boyutlandırmasında kullanılan RMR (Bieniawski, 1973) kaya kütle sınıflandırma sistemini kullanarak kayaçların kazılabilirlik yöntemlerini belirlemiştir. Yine konu ile ilgili olarak Müftüoğlu ve Scoble (1985) kayacın tek eksenli basınç dayanımı, nokta yük dayanımı, süreksizlik aralığı, katmanlaşma kalınlığı ve ayrışma derecesi parametreleriyle bir puanlama sistemi oluşturmuş ve puan durumuna göre kazı yöntemini tespit etmiştir. Singh vd. (1986) kayaç içindeki sismik hız, kayacın çekme dayanımı, süreksizlik aralığı, ayrışma derecesi ve kayacın aşındırıcılığı parametreleriyle kazılması istenen kayaç yapısına puanlar vermiş ve yine bu puanlara göre kazı yöntemi önermiştir. Karpuz (1990) kayacın tek eksenli basınç dayanımı, nokta yük dayanımı, süreksizlik aralığı, ayrışma derecesi ve kayaç içindeki sismik hız parametreleriyle bir puanlama sistemi oluşturmuş ve puan durumuna göre kazı yöntemi ve kazıcı tiplerini tespit etmiştir. Göktan ve Eskikaya (1991) süreksizlik tabakalanması, eklem takımları ve kayacın tek eksenli basınç dayanımı değerleriyle kaya kütle sökülebilirlik indeksi belirlemişler ve bu indekse göre de dozerin net kazı hızını tespit etmişlerdir. Kazısı yapılacak olan bölgenin kazılabilirlik yönteminin belirlenebilmesi için kayaç dayanımının önemli bir parametre olarak ortaya çıktığı yukarıdaki çalışmalardan anlaşılmaktadır. Bu kapsamda hangi kayaç dayanımı değerinden sonra delme-patlatma işleminin uygulanacağı önemlidir. Dolayısıyla kayaç dayanımı değerinin, kazı ve delme-patlatma maliyetlerine göre optimizasyonunun belirlenmesi gerekmektedir. Aksi takdirde üretim sırasında gereksiz maliyet artışları olacaktır.

Bu çalışmada açık işletme olarak çalışan bir kömür ocağında üç farklı kayaç dayanımı değerine sahip ve herhangi bir süreksizlik özelliği içermeyen bölgelerde çekme kepçeli yerkarar ile öncelikle direkt olarak kazı deneyleri yapılmıştır. Sonrasında ise aynı çalışma alanlarında delme-patlatma ile gevşetme yapıldıktan sonra yine aynı çekme kepçeli yerkarar ile kazı işlemi gerçekleştirilmiştir. Her iki durumda da kazı ve delme-patlatma maliyetleri hesaplanarak karşılaştırma yapılmıştır. Böylece hangi kayaç dayanımından sonra gevşetme-kazı operasyonunun ekonomik olduğu tespit edilmiştir. Aşağıda öncelikle çalışma sahası ve deneyler sırasında kullanılan çekme kepçeli yerkarar hakkında bilgiler verilmiş sonrasında ise laboratuvar ve arazi çalışmaları anlatılmıştır.

ÇALIŞMA SAHASI VE KULLANILAN ÇEKME KEPÇELİ YERKAZARIN ÖZELLİKLERİ

Araştırma, Muğla'nın Yatağan ilçesinde bulunan TKİ kömür işletmesine ait Eskihisar olarak adlandırılan kömür ocağında gerçekleştirilmiştir. Çalışma sahasına ait görünüm Şekil 1'de verilmektedir. Deneyler, söz konusu ocağın üç farklı bölgesinde gerçekleştirilmiştir.



Şekil 1. Çalışma sahasının görünümü.

Figure 1. View of the study site.

Bu ocakta kömür ve onun üstündeki dekapaj kazısı çekme kepçeli yerkazar ve ekskavatörler ile gerçekleştirilmektedir. Deneyler sırasında Marion 8050 tipi çekme kepçeli yerkazar kullanılmıştır. Söz konusu çekme kepçeli yerkazar 3500 ton ağırlığında olup 50 m³ kepçe kapasitesine sahiptir. Şekil 2'de çekme kepçeli yerkazarın görüntüsü ve Çizelge 1' de de çekme kepçeli yerkazara ait teknik veriler verilmiştir.

LABORATUVAR ÇALIŞMALARI

Her üç çalışma sahasından numuneler alınmış ve kaya mekaniği laboratuvarında numunelere ait birim hacim ağırlığı ve tek eksenli basınç değerleri belirlenmiştir. Sonuçlara ait değerler Çizelge 2’de sunulmuştur. Çizelge 2’de ayrıca yapılan deney sayıları da verilmiştir.

Çizelge 1. Çalışmada kullanılan çekme kepçeli yerkazarın teknik özellikleri.

Table 1. Technical characteristics of the dragline used in the study.

Marion 8050 Teknik Özellikleri				
Üst Gövde	Elektrik motorları			
Kepçe kapasitesi	50 m ³	DC motorlar	Adet x güç	Toplam güç
Elektrik sarfiyatı	1,3 kw/m ³		(HP)	(HP)
Toplam ağırlık (ton)	3500	Kaldırma	4x1045	4180
Bom ağırlığı (ton)	200	Çekme	4x1045	4180
Kepçe boş ağırlığı (ton)	35	Dönüş	4x640	2560
Maksimum yük (ton)	140	Yürüyüş	2x800	1600
Çalışma gerilimi volt)	6300			

ARAZİ ÇALIŞMALARI

Arazi çalışmaları kapsamında farklı kayaç dayanımına sahip üç farklı ve herhangi bir süreksizlik özelliği içermeyen bölgelerde öncelikle çekme kepçeli yerkazarın direkt olarak kazı yapılması sağlanmıştır. Kazı sırasında tükettiği enerji miktarları kaydedilerek birim kazı maliyetleri belirlenmiştir. Daha sonra yine her deney bölgesi için aynı patlatma verileri kullanılarak patlayıcı madde ve patlatma delik delme maliyetleri belirlenmiştir. En sonunda ise üç farklı çalışma alanında delme-patlatma işlemi uygulandıktan sonra çekme kepçeli yerkazarın o bölgelerde çalışması sağlanarak birim kazı maliyetleri hesaplanmıştır.



Şekil 2. Araştırmada kullanılan çekme kepçeli yerkazar görüntüsü.

Figure 2. The image of the dragline used in the research.

Çizelge 2. Çalışma bölgelerine ait laboratuvar deney sonuçları.

Table 2. Laboratory test results of studying areas.

Deney bölgesi	Ortalama birim hacim ağırlık (gr/cm ³)	Deney sayısı	Ortalama tek eksenli basınç dayanımı (MPa)	Deney sayısı
1. bölge	1,54±0,003	20	4,70±0,3	19
2. bölge	1,58±0,004	21	6,81±0,4	10
3. bölge	1,72±0,005	27	9,80±0,3	25

Çekme kepçeli yerkazarın direkt kazı işlemleri ve maliyetleri

Çekme kepçeli yerkazarların motorları elektrik tahrikli olduğundan dolayı bu kazıcıların ihtiyaç duyduğu elektrik enerjisi bir kesici yardımıyla trafodan alınmaktadır. Elektrik kesicisinin görevi, trafodan aldığı yüksek elektrik enerjisini düşürerek bir elektrik panosuna iletmektir (Şekil 3).



Şekil 3. Elektrik kesicisinin görünümü.

Figure 3. View of the electric breaker.

Çekme kepçeli yerkazarın kazı sırasında harcadığı amper değerleri, elektrik panosu üzerinde bulunan bir sayaçta anlık olarak görülebilmektedir (Şekil 4). Bu amper değerleri, çekme kepçeli yerkazarın kazı yaptığı bölgeler için kamera yardımıyla kayıt altına alınıp, daha sonra da bilgisayar ortamına aktarılarak ortalama olarak hesaplanmıştır. Sistemin volt değeri ise sürekli sabit olarak ortalama 6300 volt değerinde olmuştur.



Şekil 4. Elektrik panosu ve elektrik sayacı.

Figure 4. Electrical panel and electricity meter.

Çekme kepçeli yer kazarın kazı sırasında tükettiği amper değerleri, her bir deney bölgesi için ortalama olarak alınıp, aşağıda verilen bağıntı 1 yardımıyla çekme kepçeli yer kazarın kazı sırasında tükettiği ortalama güç değerleri hesaplanmıştır. Ayrıca çekme kepçeli yer kazarın kazı sıralarında ortalama çalışma saatleri ve toplam kazılan malzeme miktarları da deneyler yapılırken kaydedilmiştir. Çalışma saatleri gözlemlerle elde edilirken; ortalama toplam kazılan malzeme miktarları da çekme kepçeli yer kazarın kazı sırasında kullandığı kepçe sayısı ve kepçe hacmi değerleri kullanılarak kaydedilmiştir. Ortalama tüketilen güç değerleri ile çalışma saatleri çarpılmış ve elde edilen değerler, ortalama toplam kazılan malzeme miktarlarına bölünerek her bir deney bölgesi için birim kazı maliyetleri hesaplanmıştır. Birim maliyetlerin hesaplanmasında 1 kwh değeri 0,55 TL olarak alınmıştır (Çizelge 3).

$$P = (\sqrt{3}U I \cos\phi)/1000 \dots\dots\dots (1)$$

P= Kazı sırasında harcanan ortalama güç (kw)

U= Ortalama volt değeri (6300 V)

I= Ortalama amper değeri (A)

cosϕ= 0,8

Çizelge 3. Kazı sıralarında çekme kepçeli yer kazara ait ölçülen ve hesaplanan veriler

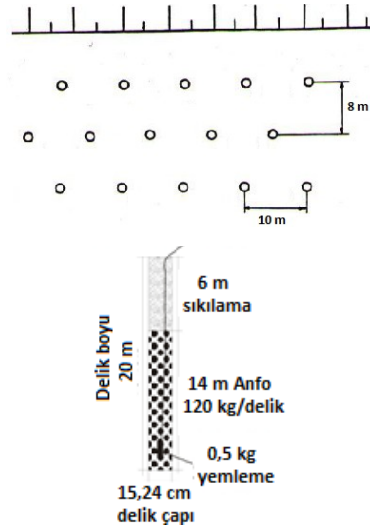
Table 3. Measured and calculated data of the dragline during excavation

Deney bölgesi	Ortalama volt (V)	Ortalama amper (A)	Ortalama tüketilen güç (kw)	Ortalama çalışma saati	Ortalama toplam kazılan malzeme (m ³)	Tüketilen birim enerji (kwh/m ³)	Birim kazı maliyeti (TL/m ³)
Birinci bölge	6300	153,2	1.337	24	24000	1,337	0,736
İkinci bölge	6300	181,5	1.584	25,8	24000	1,703	0,937
Üçüncü bölge	6300	285,7	2.494	28,5	24000	2,962	1,629

1 kwh 0,55 TL olarak alınmıştır.

Patlayıcı madde maliyetinin belirlenmesi

Her üç deney bölgesi için şeş-beş delik düzeni kullanılarak patlatma ile gevşetme işlemi yapılmıştır. Yine her üç deney bölgesinde üç sıralı ve her bir sırada beş patlatma deliği olmak üzere toplam 15 adet patlatma deliği delinmiştir. Delikler arası mesafe 10 m, dilim kalınlığı 8 m ve delik boyları da 20 m olarak oluşturulmuştur. Patlatma delik geometrileri, çekme kepçeli yerkararın direkt olarak kazısı sırasında kazdığı malzeme miktarı olan 24.000 m³ değerini verecek şekilde dizayn edilmiştir. Deneylerde kayacın parçalanmasında ANFO, yemleme olarak da dinamit tipi patlayıcı madde kullanılmıştır. Patlatma sonucu patlayan toplam malzeme miktarları her bir patlatma deneyi için patlatma delik geometrisi kullanılarak hesaplanmıştır. Bu verilerle, özgül şarj değerini ifade eden bir metre küp malzemenin patlaması için kullanılan toplam ANFO ve dinamit miktarları hesaplanmıştır. 1 kg. patlayıcı madde fiyatı olan 6 TL ile özgül şarj değeri çarpılarak her üç deney bölgesi için de aynı olan birim patlayıcı madde maliyeti hesaplanmıştır. Şekil 5’de her üç deney bölgesi için kullanılan patlatma delik geometrisi sunulurken; Çizelge 4’de de ölçülen ve hesaplanan değerler verilmiştir.



Şekil 5. Deney bölgelerinde kullanılan patlatma delik geometrisi.

Figure 5. Blast hole geometry used in test areas.

Çizelge 4. Deney bölgelerinde kullanılan patlatma verileri.*Table 4. Blasting data used in test sites.*

Delik Sayısı (adet)	15
Delik Çapı (cm)	15,24
Delik Boyu (m)	20
Delikler Arası Mesafe (m)	10
Dilim Kalınlığı (m)	8
Sıkılama Boyu (m)	6
Şarj Kolonu Yüksekliği (m)	14
Yemleme (kg/delik)	0.5
Patlayıcı Madde Miktarı (ANFO) (kg/delik)	120
Toplam Patlayıcı Madde Miktarı (kg)	1807,5
Patlayan Toplam Malzeme (m ³)	24.000
Özgül şarj (kg/m ³)	0,075
Birim Patlayıcı Madde Maliyeti (TL/ m ³)	0,45

1 kg. ANFO 6 TL. olarak alınmıştır.

Patlatma delik delme maliyetlerinin belirlenmesi

Patlatma deneylerinde öncelikle patlayan toplam malzeme miktarları değerlerinin, delici çalışma saatleri değerlerine bölünmesiyle delici makinanın birim saatteki çalışma kapasiteleri belirlenmiş daha sonra da delici makinanın bir saatteki yakıt tüketim değerlerinin çalışma kapasitesi değerlerine bölünmesiyle de her bir patlatma deneyine ait bir metre küpteki yakıt tüketim değerleri bulunmuştur. 1 litre motorin fiyatı 6 TL olarak alınmış ve her bir çalışma bölgesi için birim delik delme maliyetleri tespit edilmiştir (Çizelge 5). Patlayan toplam malzeme miktarları patlatma delik geometrisine göre hesaplanırken; delici çalışma saatleri de ölçüm ve gözlemlerle belirlenmiştir. Ayrıca delici makinanın bir saatte tükettiği yakıt miktarı değerleri ortalama olarak delici kabininde bulunan monitör bilgisayarından elde edilmiştir.

Çizelge 5. Delik delme maliyetleri.*Table 5. Drilling costs.*

Deney bölgesi	Delinen delik sayısı	Delinen toplam delik boyu (m)	Toplam patlayan malzeme miktarı (m ³)	Delici çalışma saati	Delici çalışma kapasitesi (m ³ /saat)	Delici yakıt tüketimi (lt./saat)	Delici birim yakıt tüketimi (lt./m ³)	Birim delik delme maliyeti (TL/m ³)
Birinci bölge	15	300	24000	21,5	1116,279	27,63	0,025	0,149
İkinci bölge	15	300	24000	24,8	967,742	30,21	0,031	0,187
Üçüncü bölge	15	300	24000	30,5	786,885	38,13	0,048	0,291

1 lt. motorin 6 TL olarak alınmıştır.

Gevşetme işlemi sonrası çekme kepçeli yerkazara ait kazı işlemleri ve maliyetleri

Aynı deney bölgelerinde delme-patlatma yöntemiyle gevşetme işlemi yapıldıktan sonra yine aynı çekme kepçeli yerkazara ile kazı operasyonları gerçekleştirilmiştir. Çekme kepçeli yerkazara'nın direkt kazı sırasında elde edilen maliyet yöntemi uygulanarak gevşetme işlemi sonrası çekme kepçeli yerkazara'nın kazı maliyetleri hesaplanmıştır (Çizelge 6).

Çizelge 6. Gevşetme işleminden sonra çekme kepçeli yerkazara ait ölçülen ve hesaplanan veriler.*Table 6. Measured and calculated data of the dragline after loosening operation.*

Deney bölgesi	Ortalama volt (V)	Ortalama amper (A)	Ortalama tüketilen güç (kw)	Ortalama çalışma saati	Ortalama toplam kazılan malzeme (m ³)	Tüketilen birim enerji (kwh/m ³)	Birim kazı maliyeti (TL/m ³)
Birinci bölge	6300	133,2	1162,740	19	24000	0,921	0,506
İkinci bölge	6300	141,5	1235,193	20,8	24000	1,071	0,589
Üçüncü bölge	6300	158,7	1385,337	20,3	24000	1,172	0,644

1 kwh 0,55 TL olarak alınmıştır.

TARTIŞMA

Çizelge 7’de çekme kepçeli yerkazara ait direkt birim kazı, birim patlayıcı madde, birim delik delme ve gevşetme işlemi sonrası çekme kepçeli yerkazara ait birim kazı maliyetleri görülmektedir. Çizelge 7’de ayrıca tüm deney bölgeleri için birim patlayıcı madde, birim delik delme ve gevşetme işlemi sonrası çekme kepçeli yerkazara ait birim kazı maliyetleri toplanarak delme-patlatmaya ilaveten birim kazı maliyetleri de hesaplanmıştır. Birinci ve ikinci deney bölgesinde çekme kepçeli yerkazara ile direkt kazı daha avantajlı olurken; üçüncü deney bölgesinde ise bu durum, delme-patlatmaya ilaveten birim kazıyı daha avantajlı kılmaktadır. Diğer bir deyişle tek eksenli basınç dayanımı 9,80 MPa ve daha yukarısına sahip olan sahalarda, delme-patlatma işleminden sonra kazı yapılması daha ekonomik olacaktır. İkinci deney bölgesinin sahip olduğu kayaç dayanımı olan 6,81 MPa ile üçüncü deney bölgesine ait 9,80 MPa kayaç dayanımı değerleri arasında kalan sahalarda, direkt kazının mı yoksa gevşetme sonrası kazının mı daha avantajlı olduğu belirli değildir. Bu durumun belirlenmesi için söz konusu kayaç dayanımı değerleri arasında kalan sahalarda deneylerin yapılması önemlidir. Deneyler herhangi bir süreksizlik özelliği içermeyen bölgelerde gerçekleştirilmiştir. Bu nedenle bu deneylerin süreksizlik özelliği içeren sahalarda da yapılması önemlidir.

Çizelge 7. Direkt kazı, delme-patlatma ve gevşetme sonrası birim kazı maliyetleri.

Table 7. Unit excavation costs of direct excavation, drilling and blasting and after loosening excavation.

Deney bölgesi	Çekme kepçeli yerkazara direkt birim kazı maliyeti (TL/ m ³)	Birim Patlayıcı Madde Maliyeti (TL/ m ³)	Birim delik delme maliyeti (TL/ m ³)	Gevşetme işlemi sonrası Çekme kepçeli yerkazara birim kazı maliyeti (TL/ m ³)	Delme-patlatmaya ilaveten birim kazı maliyeti (TL/ m ³)
Birinci bölge	0,736		0,149	0,506	1,105
İkinci bölge	0,937	0,45	0,187	0,589	1,226
Üçüncü bölge	1,629		0,291	0,644	1,385

SONUÇLAR

Tek eksenli basınç dayanımı 4,70, 6,81 ve 9,80 MPa olan birbirinden farklı kayaç dayanımına sahip ve herhangi bir süreksizlik özelliği içermeyen üç farklı sahada 50 m³ kepçe kapasitesine sahip çekme kepçeli yerkazara ile öncelikle direkt olarak kazı deneyleri yapılmış ve bu

deneylere ait birim kazı maliyetleri belirlenmiştir. Bu değerler, birinci sahada 0,736, ikinci sahada 0,937 ve üçüncü sahada da 1,629 TL/m³ olarak bulunmuştur. Daha sonra yine aynı sahalarda aynı delme-patlatma verileri kullanılarak delme-patlatma işlemi gerçekleştirilmiş ve bunlara ait birim patlayıcı madde ve birim delik delme maliyetleri tespit edilmiştir. Birim patlayıcı madde maliyeti her üç saha için de 0,45 TL/m³ olarak hesaplanırken; birim delik delme maliyetleri de sırasıyla 0,149, 0,187 ve 0,291 TL/m³ olarak ortaya çıkmıştır. Delme-patlatma işlemleri ile gevşetme sonrası tekrar aynı çekme kepçeli yerkazara ile söz konusu üç sahada da kazı operasyonları tekrarlanarak çekme kepçeli yerkazara ait birim kazı maliyetleri hesaplanmıştır. Bunlar yine sırasıyla 0,506, 0,589 ve 0,644 TL/m³ değerleridir. En sonunda tüm çalışma sahaları için birim patlayıcı madde, birim delik delme ve gevşetme işlemi sonrası çekme kepçeli yerkazara ait birim kazı maliyetleri toplanarak delme-patlatmaya ilaveten birim kazı maliyetleri ortaya çıkarılmıştır. Bunlar birinci sahada 1,105, ikinci sahada 1,226 ve üçüncü sahada da 1,385 TL/m³ olarak bulunmuştur. Yapılan değerlendirmeler sonucunda kayaç dayanımı 9,80 MPa ve daha yukarisına sahip olan sahalarda, delme-patlatma işleminden sonra kazı yapılmasının daha ekonomik olduğu tespit edilmiştir.

KAYNAKLAR

- Abdüllatif, O.M., Cruden, D.M., 1983. The relationship between rock mass quality and ease of excavation. Bulletin of the International Association of Engineering Geology, 28, 183-187.
- Bieniawski, Z.T., 1973. Engineering classification of jointed rock masses. The Civil Engineer in South Africa, 15, 335-343.
- Franklin, J.A., Broch, E., Walton, G., 1971. Logging the mechanical character of rock. Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy, 80, A1-A9.
- Göktan, R.M., Eskikaya, Ş., 1991. Prediction of ripping machine performance in terms of rock mass properties. The Civil Engineer in South Africa, 31, 13-24.
- Karpuz, C., 1990. A classification system for excavation of surface coal measures. Mining Science and Technology, 11, 157-163.

- Kirsten, H.A.D., 1982. A classification system for excavation in natural materials. *Die Sivele Ingenieur in Suid-Afrika*, 82, 293-307.
- Müftüoğlu, Y.V., Scoble, M.J., 1985. Kömür açık işletmeciliğinde kazılabilirliği belirleme yöntemleri. Türkiye Madencilik Bilimsel ve Teknik 9. Kongresi, Ankara. 29-37.
- Pettifer, G.S., Fookes, P.G., 1994. A revision of the graphical method for assessing the excavatability of rock, *Quarterly Journal of Engineering Geology*. 27, 145-164.
- Singh, R.N., Denby, B., Egretli, I., Pathan, A.G., 1986. Assessment of ground rippability in opencast mining operations. *Mining Magazine, University of Nottingham*, 38, 21-34.
- Weaver, J.M., 1975. Geological factors significant in the assessment of rippability. *Die Sivele Ingenieur in Suid-Afrika*, 17, 313-316.



Bir Yeraltı Altın Madeninde Kişisel Koruyucu Donanımlar İçin Risk Değerlendirilmesi *Risk Assessment for Personal Protective Equipment in an Underground Gold Mine*

İBRAHİM ÇAVUŞOĞLU^{*1}, HATUN EKTİ², ASLIHAN GÜVENDİ², AHMET GÖKCAN², HATİCE DEMİR²

¹Gümüşhane Üniversitesi, Maden Mühendisliği Bölümü, 29100, Gümüşhane, Türkiye

²Gümüşhane Üniversitesi, İş Sağlığı ve Güvenliği Bölümü, 29100, Gümüşhane, Türkiye

Geliş (received): 23 Aralık (December) 2019

Kabul (accepted) : 27 Nisan (April) 2020

ÖZ

İş sağlığı ve güvenliği bakımından güvenli çalışma ortamlarının oluşturulması için öncesinde yapılan risk değerlendirilmesi ile olası tehlikeler belirlenerek onlara karşı koruyucu ve önleyici tedbirler alınarak toplu koruma sağlanmaktadır. Ancak toplu korumanın sağlanamadığı durumlarda Kişisel Koruyucu Donanımların (KKD) kullanımları ortaya çıkmaktadır. Bu çalışmada ilk olarak bir yeraltı altın madeninde çalışanların kullandıkları KKD'lar belirlenmiş ve sonrasında çalışanların KKD kullanmadığı durumlara yönelik Risk değerlendirme matrisi (L-Tipi) metodu kullanılarak risk analizi yapılmıştır. KKD kullanılmadığında ortaya çıkabilecek olan tehlike ve riskler yeraltı koşullarında yerinde inceleme yapılarak belirlenmiştir. Çalışma sonucunda yeraltı altın madeninde kullanılan hemen hemen tüm KKD materyalleri için risk değerlendirmeleri Kabul Edilemez ve Dikkate Değer Risk olarak çıkmıştır. Bu çerçevede alınması gereken önlemler de çalışmada değerlendirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: İş Sağlığı ve Güvenliği, Kişisel Koruyucu Donanımlar, L-Tipi Matris Yöntemi, Risk Değerlendirmesi, Yeraltı Altın Madeni.

<https://doi.org/10.17824/yerbilimleri.664025>



*İbrahim ÇAVUŞOĞLU cavusogluibrahim@hotmail.com

¹Gümüşhane Üniversitesi, Maden Mühendisliği Bölümü, 29100, Gümüşhane, Türkiye, ORCID 0000-0003-0145-7523

²Gümüşhane Üniversitesi, İş Sağlığı ve Güvenliği Bölümü, 29100, Gümüşhane, Türkiye, ORCID 0000-0002-5044-8992

²Gümüşhane Üniversitesi, İş Sağlığı ve Güvenliği Bölümü, 29100, Gümüşhane, Türkiye, ORCID 0000-0002-8331-232X

²Gümüşhane Üniversitesi, İş Sağlığı ve Güvenliği Bölümü, 29100, Gümüşhane, Türkiye, ORCID 0000-0002-2257-4668

²Gümüşhane Üniversitesi, İş Sağlığı ve Güvenliği Bölümü, 29100, Gümüşhane, Türkiye, ORCID 0000-0003-2585-4777

ABSTRACT

To create safe working environments in terms of occupational health and safety, the possible risks are first determined by the risk analysis method and collective protection is provided by taking protective and preventive measures against these risks. However, when collective protection cannot be provided, the use of Personal Protective Equipment (PPE) occurs. In this study, first of all, the PPE used by the mine workers in an underground gold mine was determined and then the risk analysis was performed by using the Risk Assessment Matrix (L-Type) method for the cases where the employees did not use PPE. Hazards and risks that may arise when PPE is not used have been identified by making on-site investigations in underground conditions. As a result of the study, the risk assessments for almost all PPE materials used in underground gold mine were found to be Unacceptable and Notable Risk. Measures to be taken were also evaluated in the study.

Keywords: *Occupational Health and Safety, Personal Protective Equipment, L-Type Matrix Method, Risk Assessment, Underground Gold Mine.*

GİRİŞ

Madencilik insanoğlunun hayatında vazgeçilmez bir yer tutarak tarih boyunca toplumların gelişmelerine katkıda bulunan bir sektördür. Özellikle tarım ile birlikte tüm dünyada hammadde ihtiyacını karşılayan iki temel üretim alanından birisi konumundadır (Ernst & Young, 2012). Ancak sektörde yoğun iş gücü olması iş kazalarının ve meslek hastalıklarının görülme sıklığını arttırmaktadır. Madencilik sektörü, iş kazaları ve meslek hastaları bakımından değerlendirildiğinde tüm dünyada tehlikeli ve riskli sektörler arasında kabul edilmektedir (Yaşar vd., 2015). Bundan dolayıdır ki çalışan sayısının yüksek ve emeğin yoğun olduğu bu sektörde iş sağlığı ve güvenliği tedbirlerine önem verilmesi gerektiği açıktır.

Tüm alanlarda iş sağlığı ve güvenliğinin asıl amacı; çalışma yaşamında çalışanların sağlığına zarar verebilecek hususları önceden belirleyerek gereken önlemleri almak, rahat ve güvenli bir ortamda çalışmalarını sağlamak, iş kazaları ve meslek hastalıklarına karşı çalışanların psikolojik ve bedensel sağlıklarını korumaktır (Cervatoğlu, 2003). Diğer bir ifadeyle, iş yerlerinde sağlıklı ve güvenli çalışma ortamlarının oluşturulması için riskleri önceden belirlemek ve bu risklere karşı koruyucu ve önleyici tedbirleri alarak toplu

korumayı sağlamaktır. Ancak işyerindeki risklerin önlenmesinin veya yeteri derecede azaltılmasının, toplu koruma, iş organizasyonu veya çalışma yöntemleri ile sağlanamadığı durumlarda Kişisel Koruyucu Donanım (KKD) kullanım gereksinimi ortaya çıkmaktadır (Kahya vd., 2019). KKD'lar çalışanların sağlıklı ve güvenli olarak çalışmalarını sağlamak amacıyla, kaynağında kontrol altına alınamayan risklere, çalışma ortamında zarar verici etkenlere maruz kalmaya ve tehlikelerden olumsuz etkilenmeye karşı koruyucu olarak kullanılırlar.

İş kazaları ve meslek hastalıkları bakımından en riskli sektörler arasında yer alan madencilikte çalışanlar yeraltı ve yerüstü ocaklarda göçük, gaz ve toz patlamaları, yeraltı yangın ve su baskınları vb. gibi birçok riskli durumlarla karşı karşıya kalabilmektedir (Önder vd., 2011a). Bunların yanında toz kaynaklı Pnömonyoz, Silikozis, Antrakozis gibi bazı bazı meslek hastalığı riskleri de madencilik sektöründe sıkça görülmektedir. Bu tip risk faktörlerini açığa çıkmadan kaynağında kontrol altına almak veya yok etmek için alınan tedbirlerin bazen yeterli olamayacağı durumlarda KKD kullanılması bireysel korunmada kaçınılmazdır (Tozman, 2010). Bu durumda özellikle madencilik gibi tehlikeli sektörlerde işverenin ve çalışanların ortak çabaları çalışanlar için mümkün olan en iyi korumanın sağlanması, sağlıklı bir çalışma ortamı oluşturulması ve bunun sürdürülebilmesi için önemlidir (OSHA, 2004; Akpınar, 2015; Karaahmetoğlu, 2019). Sağlıklı bir çalışma ortamının sağlanması için de işveren ve çalışanların KKD'lara yönelik bazı sorumluluklarını yerine getirmeleri elzem olmaktadır.

Genel olarak işveren sorumlulukları (OSHA, 2004):

- Fiziksel ve sağlık tehlikelerini tanımlamak ve kontrol etmek için işyerinde “risk değerlendirmesi” yapmak,
- Çalışanlar için uygun KKD belirlemek ve sağlamak,
- Çalışanları KKD kullanımı ve bakımı konusunda eğitmek,
- Aşınmış veya hasar görmüş KKD'ın değiştirilmesi de dahil olmak üzere KKD'ı korumak,
- KKD programının etkinliğini periyodik olarak gözden geçirmek, güncellemek ve değerlendirmek,

Genel olarak çalışan sorumlulukları (OSHA, 2004):

- Uygun KKD giymek,
- KKD ile ilgili eğitim oturumlarına katılmak,
- KKD'ye özen göstermek, temizlemek ve bakımını yapmak,
- KKD'yi tamir etme veya değiştirme ihtiyacı konusunda bir amiri bilgilendirmek.

Risk değerlendirmesi tüm tehlike sınıfında yer alan (az tehlikeli, tehlikeli ve çok tehlikeli) işletmelerde yapılacak olan iş sağlığı ve güvenliği risk yönetimi adımlarının en başında gelmektedir (Resmi Gazete, 2012). Risk değerlendirmesi çalışma ortamında önleyici bir yaklaşım sergileyerek güvenli ve sağlıklı bir çalışma ortamı oluşturmak amacıyla yapılmaktadır. Risklerin belirlenmesi için literatürde bulunan risk metotlarından bir veya birkaçı kullanılabilir (Özkılıç, 2005). Genel olarak Nitel (kalitatif), Nicel (kantitatif) ve hem nicel hem de nitel (Karma) olmak üzere üç farklı biçimde metotlar mevcuttur. Her bir metot kendi içerisinde farklı analiz yöntemleri barındırmaktadır. Uygulamada en çok kullanılan yöntemlerinden birisi ise risk değerlendirme karar matris metodolojisidir. Bu metot uygulamada kullanımı açısından basit ve sade olması analistler için ideal durmaktadır. Ancak çok farklı ve karmaşık süreçlere sahip işletmeler için tek başına yeterli olmayabilir. Ayrıca risk değerlendirmesi yapan uzmanın bilgi birikimine göre de metodun başarısı değişkenlik gösterebilmektedir (Karvan, 2019).

Bugüne kadar madencilik sektörüne yönelik yapılan risk değerlendirme çalışmalarının genel olarak çalışma alanında oluşabilecek tehlike ve riskler veya uygun risk metodu seçimleri üzerine olduğunu görmekteyiz (Karadağ, 2000; Kasap ve Subaşı, 2011; Önder vd., 2011b; Çolak vd., 2018; Koçak, 2019; Hasanhanoglu, 2020). Madencilik sektöründe KKD kullanımlarına yönelik yapılmış risk değerlendirme çalışmalarının hemen hemen olmadığını görmekteyiz. ÇSGB (2016) yaptığı çalışmasında madencilik sektöründe olası tehlike ve risklerden bahsetmiş ve sektörde çalışanların KKD kullanımına yönelik mevcut durum analizi yapmıştır. Eser (2015) çalışmasında ise maden işlerinde çalışma ortamında solunumun korunması gereken durumları ve ortamları incelenmiş ve madenlerde çalışma ortamında solunum koruyucular için uygun ekipmanlar ve ekipman seçimindeki parametreleri irdelenmiştir.

Bu çalışmada, Gümüşhane ilinde yeraltı üretim yöntemiyle faaliyetlerine devam eden bir altın madeninde yeraltında çalışanların, kullanmaları gereken KKD'lar ve kullanım durumları belirlenecek sonrasında KKD'ları uygun kullanmadıkları veya hiç kullanmadıklarında oluşabilecek tehlikeler risk değerlendirme karar matris metoduyla analiz edilmiştir.

MATERYAL VE METOT

Materyal

Bu çalışmada, Gümüşhane ilinde faaliyet gösteren ve yeraltı üretim yöntemiyle üretim gerçekleştiren bir altın madeninde yeraltı çalışanlarının kullandıkları KKD'lar ve yeraltı çalışma ortamı ve şartları incelemeye konu olmuştur.

Metot

Çalışmada ilk önce yeraltında kes-doldur üretim metoduyla faaliyet sürdüren bir altın madeninde yeraltında çalışanların kullanması gereken KKD'lar işletmelerde gözlem ve deneyimler sonrasında belirlenmiştir.

Belirlenen KKD'lar toplu korumdan çok bireysel korumayı hedeflemiştir. Ancak çalışma ortamında çalışanların KKD'ları kullanmaması durumunda ortaya birtakım risklerin çıkabileceğini doğurmuştur. Bununla ilgili olarak da bu çalışmada bir risk değerlendirilmesi yapılmıştır. Buradan yola çıkarak tehlikelerin belirlenmesi için çalışma ortamı ziyaret edilmiş, ortamdaki tehlikeli durumlar ve riskler belirlenmiştir. Tehlike ve risk durumları belirlenirken sadece ortam ziyareti değil aynı zamanda yeraltı çalışanlarından da (mühendis ve işçi) yardım alınmıştır.

Risk değerlendirmesi analizinde Risk değerlendirme matrisi (L-Tipi) metodu kullanılmıştır. Risk matrisi değerlendirmesinde, riskin olma olasılığı ve olduktan sonra yaratacağı etki gibi iki değişken analiz edilir. Belirlenen risklerin her birine bir olasılık değeri (düşük ihtimalden yüksek ihtimale kadar) ve ayrıca riskin sonunda yaratacağı etkiye de bir şiddet değeri (çok hafiften çok ciddiye kadar) verilir. Şiddet ve olasılık düzeyleri için en düşük 1, en yüksek 5 değeri kullanılır (Çizelge 1). Burada risk değerlendirmesi şiddet ve olasılık düzeylerinin çarpılması sonucu elde edilen risk skoru (veya puanı) ile analiz edilir (Eşitlik 1).

$$R = \text{Olasılık} \times \text{Şiddet} \quad (1)$$

Belirlenen skorlar için Çizelge 2'deki risk değerlendirme tablosu kullanılarak bir analiz ve değerlendirme yapılır.

Değerlendirme sırasında risk skoru 2-6 arasında ise “düşük”, 8-15 arasında ise “orta” ve 16-25 arasında ise “yüksek” risk durumu olduğu anlamına gelmektedir (Çizelge 3).

Çizelge 1. Risk değerlendirmesi için Olasılık ve Şiddet tanımlamaları.

Table 1. Probability and severity definitions for risk assessment.

Olasılık	1-Yılda bir	2-Üç ayda bir	3-Ayda bir	4-Haftada bir	5-Sürekli (vardiyada)
Şiddet	1- Hafif	2-İlkyardımlı	3-İstirahatli	4-Üç günden çok	5- İş görmez/Ölümlü

Çizelge 2. Risk matrisi değerlendirme çizelgesi.

Table 2. Risk matrix assessment chart.

Risk Analizi Matrisi (R)						
R=Olasılık X Şiddet		Şiddet				
		1	2	3	4	5
Olasılık	1	1	2	3	4	5
	2	2	4	6	8	10
	3	3	6	9	12	15
	4	4	8	12	16	20
	5	5	10	15	20	25

Çizelge 3. Risk değeri aksiyon ve zamanlama çizelgesi.

Table 3. Risk value action and timing chart.

Risk Değeri		Aksiyon ve Zaman Planlaması
2-6	Kabul Edilebilir Risk	Riski bu seviyede tutmak için mevcut kontroller sürekli takip edilmelidir.
8-15	Dikkate Değer Risk	Bu Risklere Mümkün Olduğu Kadar çabuk Müdahale Edilmelidir. (Birkaç Ay İçerisinde)
16-25	Kabul Edilemez Risk	Hemen Gerekli Önlemler Alınmalıdır. En azından Dikkate Değer Risk (8-15 puan) düzeyine indirilmeden işe başlanmamalı veya işe devam edilmemelidir.

BULGULAR VE TARTIŞMA

Kullanılan KKD'ler

Genel olarak bu tip madenlerde ve araştırmaya konu olan madende kullanılan KKD'lar aşağıdaki gibidir;

- CO maskesi
- Baret
- Toz Maskesi
- Tepe lambası
- İş gözlüğü
- İş ayakkabısı
- Tulum
- Kulak tıkacı şeklindedir.

Çalışmada, yeraltı altın madeninde bazı spesifik işlerde çalışan kişilerin kullandığı özel KKD dikkate alınmamıştır. Çalışmada yeraltında tüm çalışanlar tarafından yaygın biçimde kullanılan KKD hedef seçilmiştir.

Belirlenen Tehlikeler

Çalışmada Altın madeninde yeraltı çalışanlarının kullandığı Baret, İş gözlüğü, İş ayakkabısı, CO maskesi, Tepe lambası, Tulum, Toz Maskesi gibi KKD'lar üzerine Tehlike ve Riskler belirlenmiştir. Bunları belirlemek için yeraltı çalışma ortamı ziyaret edilerek çalışma esnasında oluşabilecek tehlike ve riskler üzerine tespitler yapılmış ve ayrıca yeraltı çalışanlarından bu konuda yardım alınmıştır. Yapılan tespitler sonucu belirlenen Tehlike ve Risk durumları Çizelge 4'te verilmiştir.

Çalışma ortamındaki tehlike durumları ana galeri, yan galerileri, üretim alanı ve yeni açılan galeriler olmak üzere farklı alanlarda belirlenmiştir. Ayrıca galerilerde makine ekipman içerisinde çalışma ortamı da tehlike ve risklerin belirlenmesine kaynak olmuştur. Buralarda olası tehlikeler ve sonrasında oluşması muhtemel riskler iş sağlığı ve güvenliği biriminin daha önceki kayıtlarında da faydalanılarak belirlenmiştir. Kullanılan KKD'lara göre çalışanlar üzerinde oluşması muhtemel risk durumları ortaya çıkartılmıştır. En büyük risk durumu iş görmezlik/ölümlü şeklinde olurken, en düşük risk ise yaralanma şeklinde ifade edilmiştir.

Çizelge 4. Altın madeninde yeraltında kullanılan KKD'lar ve kullanılmama durumunda oluşacak muhtemel tehlike ve risk durumları.

Table 4. PPE used underground in the gold mine and possible danger and risk situations in case of non-use.

KKD Kaynağı	Tehlike	Risk
CO Maskesi	<ul style="list-style-type: none"> • Yeraltı gazlarına maruz kalınması. • Maskenin yeraltında kullanılmaması. • CO maskesinin deforme olması ve basıncının düşmesi. 	<ul style="list-style-type: none"> • Zehirlenme. • İş görmez/Ölümlü.
Baret	<ul style="list-style-type: none"> • Galeride göçük durumu veya kaya vb. parçalar düşmesi. • Düşme veya çarpma sonucu başına ağır darbe alma. 	<ul style="list-style-type: none"> • Yaralanma. • Ağır yaralanma. • İş görmez/Ölümlü.
Toz Maskesi	<ul style="list-style-type: none"> • Tozlu ortamda bulunma. 	<ul style="list-style-type: none"> • Tozlardan kaynaklı meslek hastalıkları.
Tepe Lambası	<ul style="list-style-type: none"> • Yeraltına girerken tepe lambasının kontrollerinin yapılmaması. 	<ul style="list-style-type: none"> • Araç çarpması. • Yaralanma. • Ağır yaralanma. • İş görmez/Ölümlü.
İş Gözlüğü	<ul style="list-style-type: none"> • Çalışma esnasında ortaya çıkan parçacıkların ve ortamdaki tozun göze kaçması. • İşe uygun gözlüklerin kullanılmaması. 	<ul style="list-style-type: none"> • Parça Batması. • Geçici ya da sürekli görme kaybı.
İş Ayakkabısı	<ul style="list-style-type: none"> • Ayağa sert malzemenin düşmesi veya çivi vb. malzemelerin batması. • Giyilen çizmenin su geçirmesi. • Ayakkabıdan kaynaklı mantar oluşması. • Uygun iş ayakkabısının giyilmemesi. 	<ul style="list-style-type: none"> • Ezilme, yaralanma. • Enfeksiyon, kırık, çıkık. • Uzuv kaybı.
Tulum	<ul style="list-style-type: none"> • Personelin yeraltına girerken çalışacağı bölgeye uygun tulumu giymemesi (görünürlüğe sahip vb.). 	<ul style="list-style-type: none"> • Yeraltında fark edilmeme, • Vücuda makine ekipman, kayaç vb. madde teması sonucu yaralanma. • Toz ve çeşitli kimyasalların cilde teması.
Kulak Tıkacı	<ul style="list-style-type: none"> • Çalışılan ortamın gürültülü olması. 	<ul style="list-style-type: none"> • Kulak çınlaması, • İşitme kaybı (uzun süre maruziyet)

Risk Derecelendirme

Risk değerlendirmesi yapabilmek için riskin meydana gelme olasılığı ve oluşması muhtemel şiddeti ile ilgili tanımlamalar yapmak gerekir. Yeraltı madeninde çalışanların KKD'ları kullanmadıklarında risklerin meydana gelme ihtimali ve olası şiddeti tanımlamaları Çizelge 1'den yararlanılarak yapılmıştır. Risklerin olasılık değerleri 1'den 5'e kadar olacak biçimde sırasıyla yılda bir, üç ayda bir, ayda bir, haftada bir ve sürekli (vardiyada) olarak belirlenmiştir. Şiddetleri ise benzer şekilde 1'den 5'e kadar olacak biçimde sırasıyla hafif, ilk yardımcı, istirahatli, üç günden çok ve iş görmezlik/ölümlü olarak belirlenmiştir.

Risk Analizi ve Değerlendirme

Olasılık ve şiddet tanımlamalarından sonra bu çalışmada materyal olarak kullanılan KKD kaynakları için risk skoru belirlenmiştir (Çizelge 5). Risk skoru belirlenirken mevcut yeraltı koşulları ve yeraltında çalışanların daha önceki gözlem ve deneyimlerden faydalanılmıştır. Yeraltında kullanılan KKD'lar için yapılan risk analizinde en yüksek risk skoru 25 ile CO Maskesine ait çıkmıştır. Toz Maskesi ve Baret için ise 20 risk skoru belirlenmiş ve CO Maskesinden sonra en yüksek risk skoruna sahip KKD'lardır. Tulum, İş ayakkabısı ve İş Gözlüğü ise 12 risk skoru ile orta seviyede risk skoruna, Kulak tıkacı ise 6 risk skoru ile en düşük skora sahiptir (Şekil 1).

Çizelge 5. KKD'lar için belirlenen risk skoru ve şiddet derecesi.

Table 5. Risk score and severity rating for PPE.

KKD Kaynağı	Olasılık	Şiddet	Risk Skoru	Öncelik Sırası	Şiddet Derecesi
CO Maskesi	5	5	25	1	Yüksek
Baret	4	5	20	1	Yüksek
Toz Maskesi	4	5	20	1	Yüksek
Tepe Lambası	3	5	15	2	Orta
İş Gözlüğü	3	4	12	2	Orta
İş Ayakkabısı	4	3	12	2	Orta
Tulum	3	4	12	2	Orta
Kulak Tıkacı	2	3	6	3	Düşük

KKD'ların yeraltı maden işletmelerinde çalışanların kullanmama durumlarıyla ilgili yapılan risk analizi sonucu hemen hemen tüm materyaller için risk değerleri Kabul Edilemez Risk ve Dikkate Değer olarak çıkmıştır. Bu risk değerleri orta ve yüksek şiddet derecesine sahip olup mümkün olduğunca erken müdahale gerektiren ve hatta bir önceki risk derecesine indirilmeden bu risk derecelerinde işe devam edilmemesi gerektiren durumlardır.

Alınması Gereken Önlemler

Tehlike durumları belirlenen ve risk dereceleri kabul edilemez ve Dikkate Değer çıkan KKD'lar ile ilgili bazı düzeltici ve önleyici faaliyetler yapılması gerekliliği ortaya çıkmaktadır. Bu faaliyetler kapsamında alınması gereken önlemlerin (kontrol tedbirleri) planlaması yapılır ve uygulamaya konur. Bu çerçevede alınması gereken önlemler Çizelge 6'da verilmiştir.

Risk Kaynağı	Risk Skoru ve Şiddeti	
CO maskesi	25	Yüksek
Baret	20	Yüksek
Toz Maskesi	20	Yüksek
Tepe Lambası	15	Orta
İş Gözlüğü	12	Orta
İş Ayakkabısı	12	Orta
Tulum	12	Orta
Kulak Tıkacı	6	Düşük

Şekil 1. Yeraltı altın madeni işletmesinde kullanılan KKD'ların risk dereceleri.

Figure 1. Risk grades of PPE used in underground gold mine.

Özellikle çok tehlikeli ve tehlikeli çalışma koşullarında işletmelerin iş sağlığı ve güvenliği ile ilgili politikalarının başında toplu korumaya öncelik verilmesi gelmektedir. Ancak toplu koruma tedbirlerinin yapılamadığı durumlarda KKD'ların kullanılması gerekmekte ve iş sağlığı ve güvenliği mevzuatlarında da bu durum ifade edilmektedir (Resmi Gazete, 2012). Özellikle, yeraltı maden işletmeleri gibi çalışma ortamlarının çok tehlikeli olduğu durumlarda toplu koruma tedbirlerinin yanında KKD'ların kullanılmasının da zorunlu olduğu bir gerçektir. Yapılan risk analizi sonucu KKD'lara işveren ve çalışanların önem vermesi gerektiği ortaya çıkmaktadır. Ayrıca, yeraltı maden işletmesinde çalışanların kaza ve/veya meslek hastalıklarına yakalanmalarının önüne geçilmesi için bu çalışmada ortaya konan tehlike ve risklere karşı alınması gereken önlemlerin uygulanmasının, sürekli izlenmesinin ve eğitimlerde bahsedilmesinin gerekliliği de ortaya çıkmıştır.

Demirbilek ve Çakır (2008) yaptıkları çalışmalarında KKD'nin uygun kullanımı açısından çalışanların eğitiminin gerekliliğine vurgu yapmıştır. Yapılması gerekli olan bu eğitimlerde KKD'nin ne zaman gerekli olduğu, hangi türüne ihtiyaç duyulduğu, uygun kullanımı, sınırlılıkları ve bakımının nasıl uygun şekilde yapılması gerektiği konularına değinilmesi gerektiğini belirtmişlerdir. Ancak yapılan bu çalışma göstermektedir ki, eğitimlerde bahsedilen bu konuların dışında KKD yönelik yapılan risk analizleri sonucu ortaya çıkan tehlike ve risklerin ve alınması gereken önlemlerin öneminin de eğitimin konularının bir parçası olması gerektiğidir.

Çizelge 6. Alınacak önlemler (Kontrol tedbirleri)

Table 6. Measures to be taken (Control measures).

KKD Kaynağı	Alınacak Önlemler (Kontrol Tedbirleri)
CO Maskesi	<ul style="list-style-type: none"> • CO maskesi yeraltına giren tüm personelin acil bir durumda kolay şekilde kullanabileceği şekilde olmalı. • CO maskesini takmadan önce kullanılabilir olup olmadığını kontrol ederek üzerine almalıdır. • Deforme olan ya da kullanım süresi bitmiş maskeler kullanılmamalı maskelerin nasıl kullanılması ile ilgili hem teorik hem de uygulamalı eğitimlerin verilmesi. • OFK maskesini yanına almadan yapılması gereken kontroller; OFK maskesinin mührünün üzerinde olması, darbe almamış olması, nemli olmaması, sabitlemek için deforme olmamış bel kayışı.
Baret	<ul style="list-style-type: none"> • Yeraltında baret kullanması zorunlu olmalı. • Baretin nesne çarpmalarına karşı dirençli. • Baret içi süspansiyonu olmalı ve çarpma şiddetini emmeli. • Suya dayanıklı ve yanmaya karşı dirençli. • Kolayca kafaya oturacak şekilde ayarlanabilir olmalı.
Toz Maskesi	<ul style="list-style-type: none"> • Toz maskelerinin alana uygun olarak ffp1, ffp2, ffp3 maskelerinin kullanım alanlarının belirlenmesi. • Çalışanlara bununla ilgili eğitimlerin verilerek uygulamalı olarak taktırılması ve yüze oturması sağlanmalıdır. • Maskeden kaynaklı buharlaşmayı önlemek için burun üzerinde bulunan demir aparatın burun üzerine tam oturtulması.
Tepe Lambası	<ul style="list-style-type: none"> • Tepe lambasının çalıştığından emin olduktan sonra yanına almalı. • Yeraltında nasıl kullanılması gerektiği ile ilgili bilgilere sahip olmalıdır.
İş Gözlüğü	<ul style="list-style-type: none"> • Ortamda gözler için zararlı gaz ve taş sıçrama ihtimali bulunması halinde çerçeve gövdesi gözleri sıkıca çevreleyen göz koruyucular kullanılmalıdır. • Koruyucu gözlükler EN 166 standardına uygun olarak üretilmiş olmalıdır. • Göz koruyucuların kullanım alanları ve performans değerleri ürün üzerinde sembol ve işaretlemeler ile ifade edilmektedir. Tespit edilen riskler dahilinde bu semboller kontrol edilerek seçim yapılmalıdır.
İş Ayakkabısı	<ul style="list-style-type: none"> • Madenin kuru ya da ıslak olmasına bağlı olarak, deri ya da lastik iş ayakkabıları kullanılabilir. • Ayakkabılarda delinme ve kırılmaya dayanıklı, kaymayı önleyici bir taban, darbeye karşı dayanıklı bir dış yüzey ve parça düşmelerine karşı burunda çelik maskarat bulunmalıdır. • Çalışma esnasında ayağa gelebilecek darbe, çarpma ve malzeme düşmesine karşı koruyucu özelliği olan iş ayakkabısı, bot veya çizme giyilmelidir. • Oluşabilecek mantar vb. ayak hastalıklarına karşı koruyucu ayakkabılar çorapsız ve ıslak ayak ile giyilmemelidir. • Madencilik sektöründe çalışan ve sahaya dahil olan kişilerin tümü koruyucu ayakkabı giymelidir.
Tulum	<ul style="list-style-type: none"> • Yeraltına girmeden önce giyilecek tulumun çalışılan alana uygun olup olmadığı kontrol edilmeli. • Üzerinde fark edilmeyi sağlayan fosfor kısmı olmalı. • Tek kullanımlıksa kullanıldıktan sonra uygun atık kutularına bırakılmalıdır.
Kulak Tıkacı	<ul style="list-style-type: none"> • Kulağa zarar verecek sertlikte olmamalı. • Ortamda bulunan ses şiddetini makul seviye indirecek kalitede olmalı.

SONUÇLAR

Madencilik gibi çok tehlikeli iş kolu sınıfında bulunan iş yerlerinde mutlaka faaliyetler öncesinde sağlıklı ve güvenli çalışma ortamlarının oluşturulması için risk analizleri yaparak tüm risklerin belirlenmesi ve bu risklere karşı gerekli tedbirlerin alınarak toplu korumanın sağlanması gerekmektedir. Toplu korumanın yapılamadığı durumlarda ise uygun KKD kullanımının yapılarak bireysel korumanın gerçekleştirilmesi gerekmektedir.

Ancak madencilik gibi benzer çok tehlikeli iş kollarında KKD kullanımının yapılmadığı durumlarda risk ve tehlikenin boyutu artmaktadır. Bu çalışmada özellikle yeraltı madenlerinde bazı KKD'ların kullanılmamasının çok çeşitli tehlike ve risklere neden olduğu yapılan Risk değerlendirme matrisi (L-Tipi) yöntemiyle belirlenmiştir. Yapılan analiz yöntemi sonrasında en yüksek risk skorlarının CO maskesi, Baret ve Toz Maskesinde olduğu belirlenmiştir. Tepe Lambası, İş Gözlüğü, İş Ayakkabısı ve Tulum ise orta düzey risk grubunda yer almış, kulak tıkacı ise düşük risk derecesine sahiptir. Sonuç olarak, yapılan risk analizi ile hemen hemen tüm materyaller için risk değerleri Kabul Edilemez Risk ve Dikkate Değer seviyede çıkmıştır. Bu durumda özellikle yeraltı maden işletmelerinde işverenler ve çalışanların KKD temini ve kullanımına yönelik sorumlulukları artmaktadır. İş verenlerin çalışma ortamına uygun KKD'ların belirlemesi ve sağlanması, çalışanlara KKD eğitimi vermesi gerekmektedir. Ayrıca KKD eğitim içeriklerinde sadece hangi türü, uygun kullanımları ve ne zaman kullanıldıklarına yönelik değil, KKD'in kullanılmadığında ortaya çıkabilecek olası tehlike ve risklerin boyutu ve alınması gereken önlemlerin öneminin de anlatılması ve bu konudaki eğitimleri arttırması gerekmektedir.

KAYNAKLAR

- Akpınar, T., 2015. İş Sağlığı ve İş Güvenliği İşçi İşveren Rehberi. İstanbul On İki Levha Yayıncılık, İstanbul.
- Cervatoğlu, E., 2003. İş Sağlığı ve Güvenliği Konusunda Bir Değerlendirme. Türk Tabipler Birliği Mesleki Sağlık ve Güvenlik Dergisi, 13, 23-29.
- Çolak, M., Aygürler, C., Çetin, T., 2018. Madencilik Sektöründe İş Sağlığı ve Güvenliği Açısından Risk Analizi, 4th Global Business Research Congress (GBRC -2018), Vol.7, pp.285-289.
- ÇSGB, 2016. Maden Sektörü Kişisel Koruyucu Donanım Rehberi, İş Sağlığı ve Güvenliği Genel Müdürlüğü Piyasa Gözetimi ve Denetimi Daire Başkanlığı, Ankara, sayfa;1-32.

- Demirbilek, T., Çakır, Ö., 2008. Kişisel Koruyucu Donanım Kullanımını Etkileyen Bireysel ve Örgütsel Değişkenler, Dokuz Eylül Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi, 23, 2, 173-191.
- Ernst & Young, 2012. Dünyada ve Türkiye’de Madencilik Sektörü. <https://madencilikrehberi.files.wordpress.com/2012/04/madencilik-sekct3b6rc3bc.pdf>, 31 Temmuz 2019.
- Eser, A., 2015. Maden İşlerinde Solunum Koruyucu Donanımlar, Maden İşletmelerinde İşçi Sağlığı ve İş Güvenliği Sempozyumu’2015, 21-22 Aralık, Adana, sayfa:301-311.
- Hasanhanoğlu, C., 2020. Çalışanların Korunmasına Yönelik İşletme Öncelik ve İsg Politikaları Kapsamında Çalışanlarda Kişisel Koruyucu Donanım Kullanma Farkındalığı ve Bilinç Düzeyinin İncelenmesi-Çiftay A.Ş. İşletmesi Maden Sahası KKD Kullanım Etkinliği Çalışması, Journal of Advance Research in Business Management and Accounting, Volume-6, Issue-1, 1-23.
- Kahya, E., Ulutaş, B., Özkan, N. F., 2019. Metal Endüstrisinde Kişisel Koruyucu Donanım Kullanımının Analizi. Selçuk Üniversitesi Mühendislik, Bilim ve Teknoloji Dergisi, 7 (2), 420-433.
- Karaahmetoğlu, A., 2019. 6331 Sayılı İş Sağlığı ve Güvenliği Kanunu Bağlamında Soma Madenlerinin İş Sağlığı ve Güvenliği Açısından Değerlendirilmesi. Sosyal Siyaset Konferansları Dergisi, 76, 89-128.
- Karadağ, K.Ö., 2000. Ankara ilinde üç taş ocağı ile iki kum ocağının ve çalışanlarının işçi sağlığı ve iş güvenliği açısından değerlendirilmesi. Hacettepe Üniversitesi Sağlık Bilimleri Enstitüsü Bilim Uzmanlığı Tezi, Ankara.
- Karvan, R., 2019. Risk Değerlendirme Metotları. <https://docplayer.biz.tr>, 31 Temmuz 2019.
- Kasap, Y., Subaşı E., 2011. Analitik hiyerarşi prosesi ile açık işletme madenciliğinde risk denetimi. Maden İşletmelerinde İşçi Sağlığı ve İş Güvenliği Sempozyumu Bildiriler Kitabı, Zonguldak.
- Koçak, D., 2019. Bir Kömür Madeninde İş Sağlığı ve Güvenliği Risk Değerlendirmesi İçin Uygun Yöntem Seçimi. Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- OSHA (Occupational Safety and Health Administration), 2004. Personal Protective Equipment. U.S. Department of Labor, Washington D.C., pp. 1-44.
- Önder, S., Suner, N., Önder, M., 2011a. Madencilik Sektöründe Meydana Gelen İş Kazalarının Risk Değerlendirme Karar Matrisi ile İncelenmesi. Türkiye 22. Uluslararası Madencilik Kongresi ve Sergisi, Ankara, pp.399-406.

- Önder, S., Mutlu, M., Önder, M., 2011b. Açık İşletme Kömür Madenciliğindeki İş Kazalarının Risk Değerlendirme Karar Matrisi ile Değerlendirilmesi. Maden İşletmelerinde İşçi Sağlığı ve İş Güvenliği Sempozyumu'2011 Bildiriler Kitabı, 24-25 Kasım 2011, Zonguldak, sayfa:155-162.
- Özkılıç, Ö., 2005. İş Sağlığı ve Güvenliği, Yönetim Sistemleri ve Risk Değerlendirme Metodolojileri. Türkiye İşveren Sendikaları Konfederasyonu, Ajans-Türk Matbaacılık, Ankara.
- Resmi Gazete, 2012. İş Sağlığı ve Güvenliği Risk Değerlendirmesi Yönetmeliği. <https://www.mevzuat.gov.tr/Metin.Aspx?MevzuatKod=7.5.16925&MevzuatIliski=0&so urceXmlSearch>, 29 Mart 2020.
- Tozman, B., 2010. Türkiye Madencilik Sektöründe İş Kazalarının İstatistiksel Analizi. Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.