

Yerkabuğunun Dinamiği ve Mühendislik Uygulamaları:

Bölgesel Yerbilimi Analizleri



Editör: Muzaffer ÖZBURAN

BİDGE Yayınları

Yerkabuğunun Dinamiği ve Bazı Mühendislik Uygulamaları

Editör: MUZAFFER ÖZBURAN

ISBN: 978-625-8673-18-0

1. Baskı

Sayfa Düzeni: Gözde YÜCEL

Yayınlama Tarihi: 2025-12-25

BİDGE Yayınları

Bu eserin bütün hakları saklıdır. Kaynak gösterilerek tanıtım için yapılacak kısa alıntılar dışında yayıncının ve editörün yazılı izni olmaksızın hiçbir yolla çoğaltılamaz.

Sertifika No: 71374

Yayın hakları © BİDGE Yayınları

www.bidgeyayinlari.com.tr - bidgeyayinlari@gmail.com

Krc Bilişim Ticaret ve Organizasyon Ltd. Şti.

Güzeltepe Mahallesi Abidin Daver Sokak Sefer Apartmanı No: 7/9 Çankaya /
Ankara



ÖNSÖZ

Modern yerbilimleri, artık sadece gezegenin geçmişini anlamakla kalmayıp, bu bilgiyi insanlığın güvenli geleceği ve sürdürülebilir kalkınması için kullanmayı hedefleyen çok boyutlu bir disipline dönüşmüştür. Anadolu ve Akdeniz havzası, karmaşık jeodinamik evrimi ve aktif tektonik süreçleriyle bu dönüşümü incelemek için dünyanın en kıymetli "açık hava laboratuvarlarından" biridir. Elinizdeki bu eser, yerkabuğunun derinliklerindeki manyetik izlerden yüzeydeki akarsu ağlarına, demiryolu teknolojisinden kentsel planlama kriterlerine kadar uzanan geniş bir perspektifte bütünleşik çözümler sunmaktadır.

Kitabın ilk bölümleri, yerbilimlerinin teorik ve metodolojik temellerini teknolojik verilerle birleştirmektedir. Özellikle Erzincan Havzası gibi aktif sismisiteye sahip bölgelerin gömülü tektonik hatları, EMAG2 global manyetik veri setleri ve gelişmiş türev bazlı sınır analizi yöntemleriyle (AS, TA, THDR) incelenerek yeraltı yapılarının dijital bir haritası çıkarılmıştır. Bu jeofiziksel yaklaşım, deprem risk yönetimi için önemli bir veri kaynağıdır.

Yeryüzünün dinamik şekillenme süreçleri ise Köprüçay Havzası örneği üzerinden morfometrik analizlerle ele alınmıştır. Havzanın drenaj yoğunluğu, çatallanma oranı ve hipsometrik integral gibi kantitatif parametreleri; bölgenin hidrolojik davranışını, sel riskini ve erozyon potansiyelini anlamada kritik bir rol oynamaktadır. Bu analizler, havza yönetiminin ekolojik direnç ve sürdürülebilirlik ilkeleriyle nasıl entegre edilebileceğini kanıtlamaktadır.

Çalışmanın mühendislik ve uygulama boyutu, ulaştırma sistemlerinin hem malzeme kalitesine hem de yapısal güvenliğine odaklanmaktadır. Kütahya-Işıkkara bazaltlarının mineralojik ve

mekanik özellikleri, bu kayaçların modern yüksek hızlı tren hatlarında "balast malzemesi" olarak yüksek performansla kullanılabileceğini bilimsel testlerle doğrulamaktadır. Diğer yandan, ulaşım altyapısının kent yaşamı üzerindeki etkileri; araç ve demiryolu kaynaklı titreşimlerin binalar üzerindeki rezonans etkileri ve "güvenli yapı yaklaşma mesafesi" kriterleri üzerinden detaylandırılmıştır.

Bu kitap, yerbilimleri ile mühendislik disiplinlerinin kesişim noktasında, teori ile pratiği bir araya getiren bir rehber niteliğindedir. Eserin, araştırmacılara, mühendislere ve şehir plancılarına ilham vermesini ve daha güvenli bir çevre inşasına katkı sağlamasını temenni ediyorum.

Doç. Dr. MUZAFFER ÖZBURAN

KÜTAHYA DUMLUPINAR ÜNİVERSİTESİ

İÇİNDEKİLER

ANALYSIS OF BURIED GEOLOGICAL/TECTONIC LINEAMENTS OF THE ERZINCAN BASIN AND ITS SURROUNDINGS USING EMAG2 MAGNETIC DATA	1
--	---

EREN PAMUK

MORPHOMETRY OF THE KÖPRÜÇAY WATERSHED (WESTERN MEDITERRANEAN), TÜRKİYE	21
---	----

ABDELHADI DRIBAT, AYL A BOZDAG

IŞIKKARA KÖYÜ (İLİCA/KÜTAHYA) BAZALTLARININ DEMİRYOLU BALASTI OLARAK KULLANILMASININ ARAŞTIRILMASI	39
--	----

METİN BAĞCI, MUSTAFA BAYHAN

ARAÇ VE DEMİRYOLU TİTREŞİMLERİNİN BİNALARA ETKİSİ VE GÜVENLİ YAPI YAKLAŞMA MESAFESİNİN TESPİTİ - EFFECTS OF VEHICLE AND RAILWAY VIBRATIONS ON BUILDINGS AND DETERMINATION OF SAFE BUILDING APPROACH DISTANCE	60
--	----

MUSTAFA CEVHER

BÖLÜM 1

ANALYSIS OF BURIED GEOLOGICAL/TECTONIC LINEAMENTS OF THE ERZİNCAN BASIN AND ITS SURROUNDINGS USING EMAG2 MAGNETIC DATA

EREN PAMUK¹

Introduction

Reliably determining the boundaries of subsurface geological structures is one of the most fundamental and important steps in potential field methods (gravity and magnetic). These boundaries include the locations of geological units within the ground, such as possible faults, contacts, and buried structural elements. Therefore, determining the geological structures within the ground is a fundamental step that increases the reliability of geological and geophysical interpretations and contributes to the understanding of tectonic structures.

In geophysics, many derivative-based boundary analysis methods are widely used in the literature for determining the boundaries of the structures using potential field data such as gravity

¹ Assoc. Prof. , EBYU, Institute of Earthquake Technologies, Orcid: 0000-0002-9511-7951.

and magnetic. Analytical Signal (AS) allows for the determination of the horizontal positions of sources in magnetic and gravity data, independently of the magnetization direction, and is advantageous in identifying shallow structures. The Tilt Angle (TA) method allows for the simultaneous evaluation of shallow and deep structures, while Total Horizontal Derivative (THDR) is preferred for more clearly revealing the edges of anomalies. Hyperbolic Tilt Angle (HTA) is used to strengthen weak anomalies and make structural boundaries more distinct. The 3D Euler deconvolution technique is an effective method for estimating the location and depth of sources causing anomalies.. A review of the literature shows that these techniques are used in boundary analyses in tectonic and geological investigations in different geological environments. Njeudjang et al. (2022) used EMAG2 magnetic data to analyze subsurface structures in the Adamawa region using Analytical Signal and Source Parameter Imaging (SPI) methods. Lei et al. (2022) investigated tectonic structures in the Longmenshan Fault Zone using EMAG2-v3 magnetic data with RTP, upward continuation, derivative-based techniques, Euler solutions, and Curie point depth. Armel et al. (2022) used EMAG2 magnetic and gravity data to determine and characterize major lineaments in Cameroon. Pamuk and Özsöz (2022) used the derivated boundary analyses methods such as Tilt TA, AS, and THDR) to obtain the Curie point depth (CPD) values, heat flow, and the structural boundaries of Cyprus using EMAG2 magnetic data with methods. Aktaş (2025) used EMAG2 global magnetic grid data to determine the edges of structural elements in Lake Van and its surroundings. Jiao et al. (2025) used EMAG2-v3 magnetic anomalies to reveal the 3D crustal magnetic and lithological structure of the Eastern Himalayan Syntaxis.

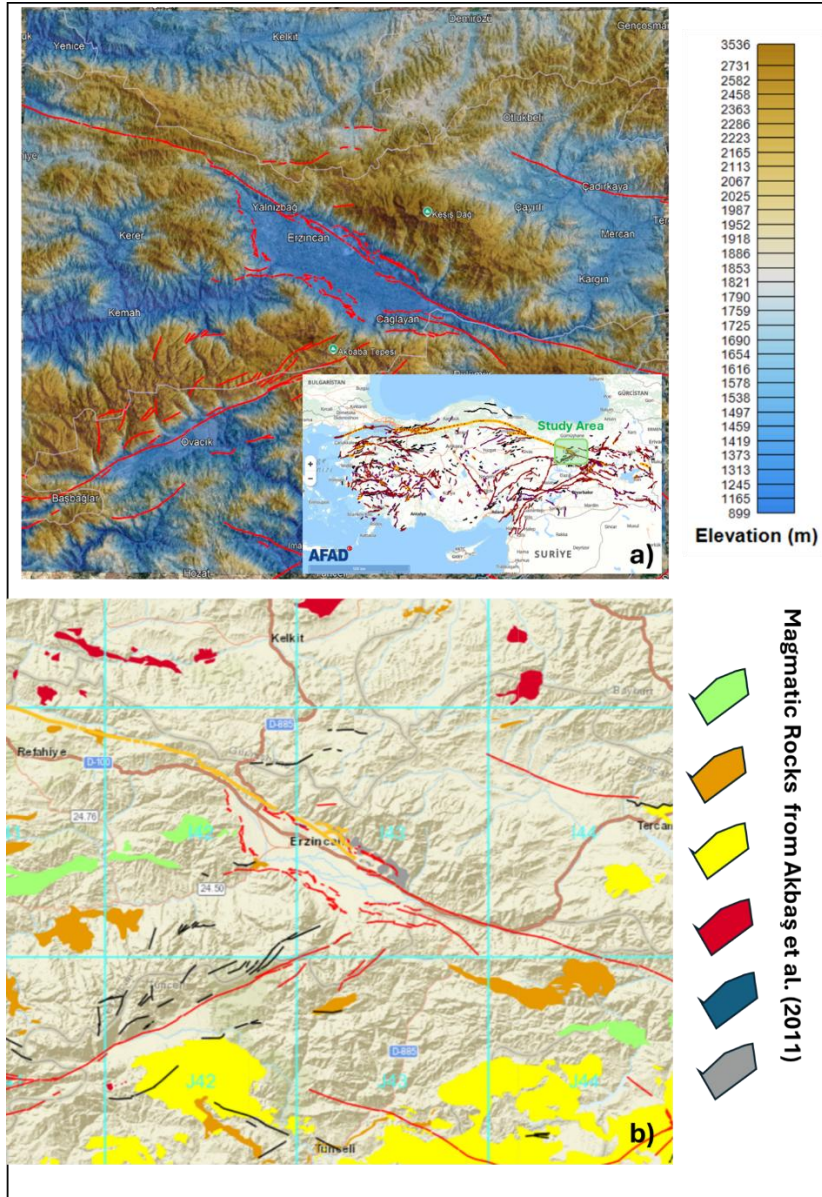
Due to its geodynamic and tectonic structure, Türkiye has numerous active faults, some of which extend along the North Anatolian Fault Zone (NAFZ) and the East Anatolian Fault Zone

(EAFZ) as well as the Aegean Extensional Region, possess the potential to generate earthquakes with magnitudes of 7.0 and above. Numerous destructive earthquakes have occurred in our country even within the last century (For example, the 1939 Erzincan earthquake (M7.9), the 1992 Erzincan earthquake (M6.9), the 1999 Gölcük (M7.4) and Düzce (M7.2) earthquakes, the 2011 Van–Erciş earthquake (M7.2), the 2020 Elazığ–Sivrice earthquake (M6.8), the 2020 Aegean Sea earthquake (M6.9), and the 2023 Kahramanmaraş earthquakes (M7.7 and M7.6)). The basin section, where the provincial center of Erzincan is located, consists of thick sedimentary and loose alluvial material formed due to fault movements along the NAFZ (Eyidoğan, 1993; Temiz, 2004; Uysal and Sunkar, 2024). This basin, which trends NW-SE with a length of 50 km and a width of approximately 15 km, is characterized as a pull-apart basin (Şengör, 1979; Aydın and Nur, 1982; Hempton and Dunne, 1984; Barka and Gülen, 1989; Akpınar, 2010) and encompasses the Erzincan Basin. The 1939 Erzincan Earthquake (M M7.9 to M8.0) is one of the largest earthquakes to occur in Anatolia during the last century, and According to Barka (1996), the westward progression of major earthquakes on the North Anatolian Fault began with this earthquake. The 1992 Erzincan earthquake, with a magnitude of 6.8, occurred within the Erzincan Basin a wide, complex, and thick sedimentary opening-extensional basin and along the Erzincan segment of the NAFZ (Eyidoğan, 1992).

In this study, I utilized EMAG2V3 magnetic data to reveal the the structural elements in and around the province of Erzincan. First, I applied reduction to pole (RTP) to the magnetic data. Then, the possible edges of subsurface geological structures were analyzed using derivative-based edge detection methods such as THDR, AS, and TA. The obtained results were evaluated together with the earthquake distribution, active fault zones, and magmatic rocks in the region. As a result, I made a geophysical interpretation of the

geological and tectonic structure of the Erzincan Basin and its surroundings based on magnetic data. Figure 1a, b shows the study area, its topography and active fault zones, and the locations of the magmatic geological units within the study area.

Figure 1. a) Topography and active fault zones of the Erzinçan Basin and its surroundings (active faults taken from Emre et al., 2013), b) Locations of magmatic geological units of the study area (geological units obtained from Akbaş et al., 2011)



Methods and Data

Magnetic Method

Magnetic methods, based on differences in magnetic properties between geological units, have been widely used for many years in numerous earth sciences research areas, primarily in geology, tectonics, archaeology, and metallic mineral exploration. In this method, the total component of the magnetic field is usually measured, and the obtained values are given in nanoteslas (nT). Modeling and interpretation studies can be carried out using this method, taking advantage of the differences in magnetic susceptibility values of geological units. The observed magnetic anomaly values vary depending on susceptibility as well as the geometry, location, and depth of the target structure. In this context, accurately defining the boundaries of subsurface geological structures plays a critical role in modeling and interpreting magnetic anomaly data.

EMAG2 Global Magnetic Grid Data

In this study, I performed boundary analysis using the Global Magnetic Anomaly Grid (EMAG2). The EMAG2 dataset integrates magnetic measurements obtained from satellites, marine and airborne vehicles (Maus et al., 2009). These data have a spatial resolution of approximately 2 arc minutes, referenced at an altitude of ~4 km above sea level (Maus et al., 2009; Meyer et al., 2017). The EMAG2 data consists of 5 different data processing stages. These are, respectively; grid merging, processing of magnetic data obtained from airborne and shipborne measurements, and line leveling. Additionally, an anisotropic correlation model is applied in ocean regions, and data with wavelengths ≥ 300 –330 km are updated according to the latest satellite-derived lithospheric magnetic field model (Maus et al., 2008; Maus et al., 2009; Meyer et al., 2017).

EMAG2 data is widely used in tectonic and crustal research, boundary analysis and interpretation of geological structures. It is also widely used in geodynamic studies such as calculating Curie point depth (CPD), indirectly determining heat flow (Pamuk and Özsöz, 2022).

Derivative-Based Boundary Analysis Methods

Determining the edges of subsurface geological bodies is a important step in the accurate and reliable interpretation of ground, airborne, and satellite magnetic data, etc. For this purpose, numerous derivative-based methods are widely used in the literature to reveal structural edges using magnetic data. Examples include AS, THDR, 3D Euler deconvolution, Theta Map, and TA. In geophysics, magnetic RTP Reduction to the Pole (RTP) is applied to correct anomaly shifts in the Earth's magnetic field depending on the measurement latitude. The RTP transformation is performed using the inclination and declination angle values of the magnetic field, and the maximum anomaly is shifted directly onto the magnetic source. For the study area, I performed an RTP transformation, and after, mapped the RTP total field magnetic anomaly values. It is given in Figure 2b.

The Analytical Signal (AS) is calculated by combining the horizontal and vertical derivatives of the magnetic anomaly, as originally defined by Roest et al. (1992). The amplitude of the AS is given by the following equation (1):

$$|AS| = \sqrt{\left(\frac{\partial M}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial M}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial M}{\partial z}\right)^2} \quad (1)$$

Here, M represents the magnetic anomaly values, while $\partial M/\partial x$ represents the vertical derivative of the anomaly; $\partial M/\partial x$ and $\partial M/\partial y$ represent the horizontal derivatives. The analytical signal offers significant advantages in determining source boundaries because it

is largely independent of the magnetic field direction. THDR is defined as the combination of the derivatives of the magnetic anomaly in the horizontal directions and is particularly effective in highlighting vertical or near-vertical structural boundaries (Cordell and Grauch, 1985). The THDR is calculated using the following equation: (2):

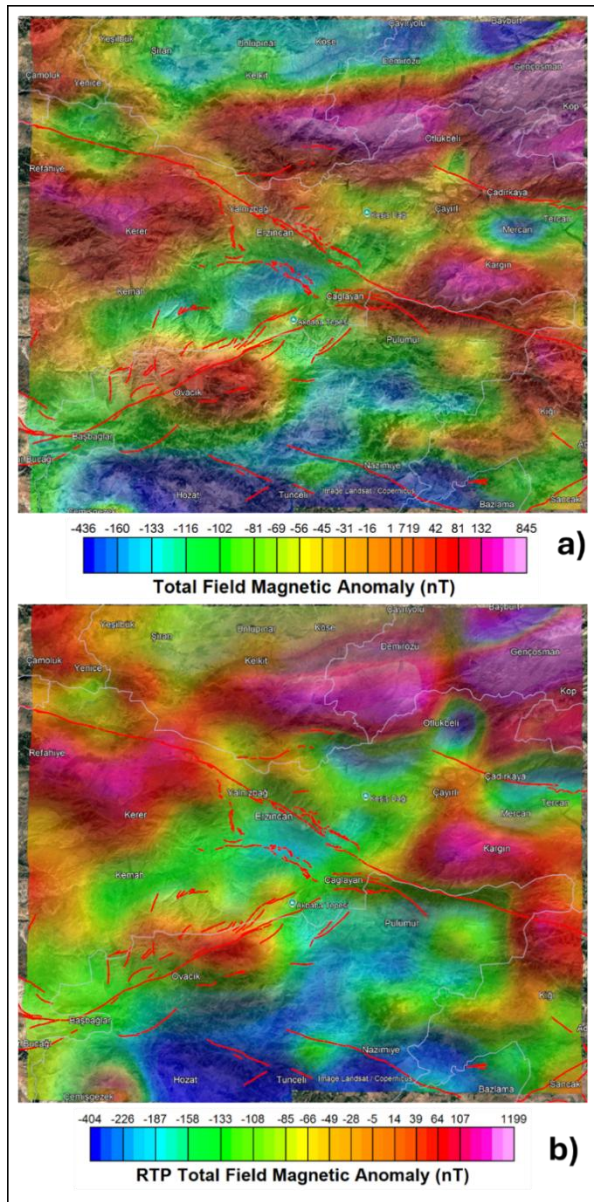
$$THDR = \sqrt{\left(\frac{\partial M}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial M}{\partial y}\right)^2} \quad (2)$$

In the Tilt Angle (TA) method, the ratio of the vertical derivative of the magnetic anomaly to the total horizontal derivative is used and its zero contours often correspond to geological structural edges (Miller and Singh, 1994). The TA is given as following eq. (3):

$$TA = \tan^{-1} \left(\frac{dM/dz}{THDR} \right) \quad (3)$$

Thanks to these features, TA, THDR and AS methods, when used together on RTP magnetic data, allow for a more reliable and detailed determination of the structures (Pamuk and Özsöz, 2022).

Figure 2. a) Total field magnetic anomaly map, b) Reduction to the Pole (RTP) total field magnetic anomaly distribution of the study area.



Results

The RTP-total field magnetic anomaly values more accurately reveals the location and distribution of structures causing magnetic anomalies in and around the Erzincan Basin. In the map, magnetic anomaly values range approximately between -400 nT and $+1200$ nT. This variation in the magnetic anomaly indicates the presence of lithological-geological units and tectonic structures with differing Magnetic properties in the Erzincan Basin and its surroundings. High positive magnetic anomalies (approximately $+300$ nT to $+1200$ nT) are particularly prominent in the north, northeast, and east of the Basin. Distinct positive anomalies were observed in the region between Refahiye and Kerer, the area between Kelkit-Demirözü-Otlukbeli, the Gençosman region, and around Kargın. These areas have been associated with potential magmatic rocks with high magnetic susceptibility, ophiolitic units, or regions where the magnetic basement is closer to the surface. Especially these high anomalies extending along the strike indicate the presence of magnetic sources uplifted along active fault zones (Figure 2b). Low and negative magnetic anomalies (approximately -400 nT to -100 nT) are predominantly observed within the Erzincan Basin and in around Hozat-Pülümür-Nazımiye regions. I interpreted as basin sections with thick alluvial infill, sedimentary units with low magnetic susceptibility, or regions where the magnetic basement is deeper (Figure 2b). Since the amplitude of the AS is largely independent of the magnetic field direction, the anomaly maximum generally coincides exactly with the top of the anomaly source. When I examined the AS map, it presents high-amplitude and continuous anomalies, particularly between Otlukbeli-Gençosman, Kargın-Tercan, and Refahiye-Kerer (Figure 3). The results indicate that the high anomaly values observed in the analytical signal correspond to shallow and mid-depth boundaries with significant

magnetic susceptibility contrasts. The prominence of analytical signal anomalies at the basin margins, especially the medium and high-amplitude AS values along the Refahiye–Erzincan trend, is consistent with active faults (Figure 3). Tilt angle (TA) is a derivative-based boundary analysis method calculated by taking the arctangent of the ratio between the vertical derivative and the total horizontal derivative of magnetic data. This process allows the edges of both strong and weak magnetic anomalies (from deep and shallow sources) to be displayed on the same scale. On tilt angle maps, 0 (zero) contours mostly correspond to the edges of magnetic sources or lithological contacts, while positive anomaly values show the interior of the magnetic source. Examining the tilt angle map, SW-NE trending structures are noteworthy in the Refahiye-Kelkit-Demirözü regions and the area between Kargın-Çağlayan-Ovacık-Başbağlar. I observed also high tilt angle values in the area between Kargın and Çayırılı. I obtained the locations and continuities of structures at both deep and shallow depths with the tilt angle map. Zero-tilt transitions observed particularly in and around the Erzincan Basin indicate sharp boundaries between the basin fill and the surrounding geological units with high magnetic susceptibility. The situation where these boundaries largely overlap with active faults shown in red lines in these regions demonstrates that fault zones create strong contrasts between magnetic units (Figure 4). The total horizontal derivative (THDR) is a derivative-based method that reduces sensitivity to deep magnetic sources while enhancing shallow structures with sharp contrasts. In THDR maps, maximum values are generally seen over lithological boundaries, faults, dykes, and contacts. Therefore, THDR is used to determine the horizontal positions of structural discontinuities rather than depth. In this study, THDR maxima are concentrated on SW-NE trending active faults, especially in the Çağlayan-Ovacık-Başbağlar region, north of Başbağlar, east of Pülümür, north of the Erzincan basin, and around Kelkit-Demirözü (Figure 5). These areas highly overlap with active

fault traces, indicating that magnetic source boundaries are controlled by active faults. The linear and continuous character of the THDR anomalies supports that these structures are effective tectonic lines on a regional scale. When the distribution of earthquakes exceeding magnitude 3, according to the Disaster and Emergency Management Authority of Türkiye (AFAD) is evaluated together with the zero contour of the tilt angle, it is seen that the earthquake foci are consistent with the tilt angle zero contours representing structural boundaries. The concentration particularly in the Erzincan basin and its southeast (Pülümür-Nazımiye-Kığı regions) shows that the earthquakes occur at the contacts of the structures causing the magnetic source (Figure 6).

Figure 3. Analytical Signal (AS) map of the study area (red lines represent active faults from Emre et al., 2013).

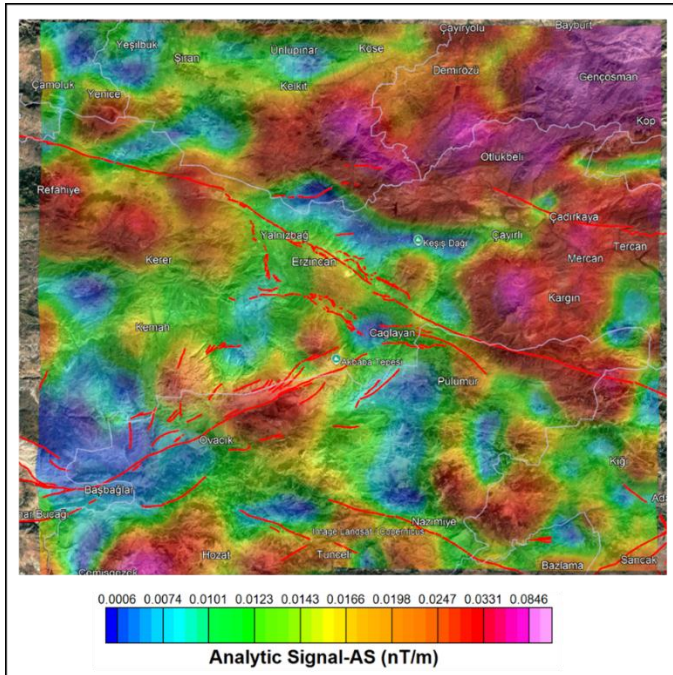


Figure 4. Tilt Angle (TA) map of the study area (solid black lines represent zero contours; red lines represent active faults from Emre et al., 2013).

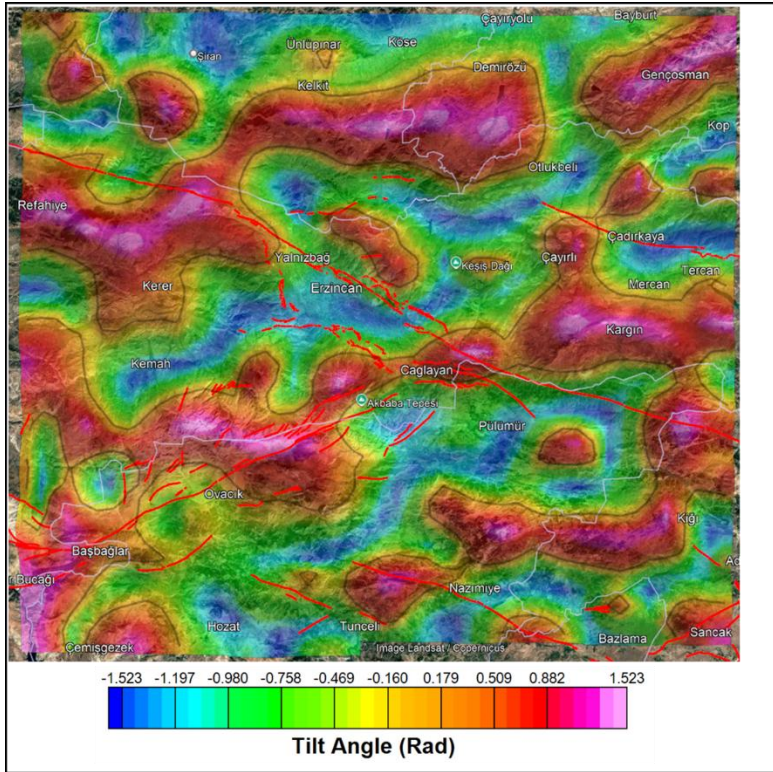


Figure 5. Total Horizontal Derivative (THDR) map of the study area (red lines represent active faults from Emre et al., 2013).

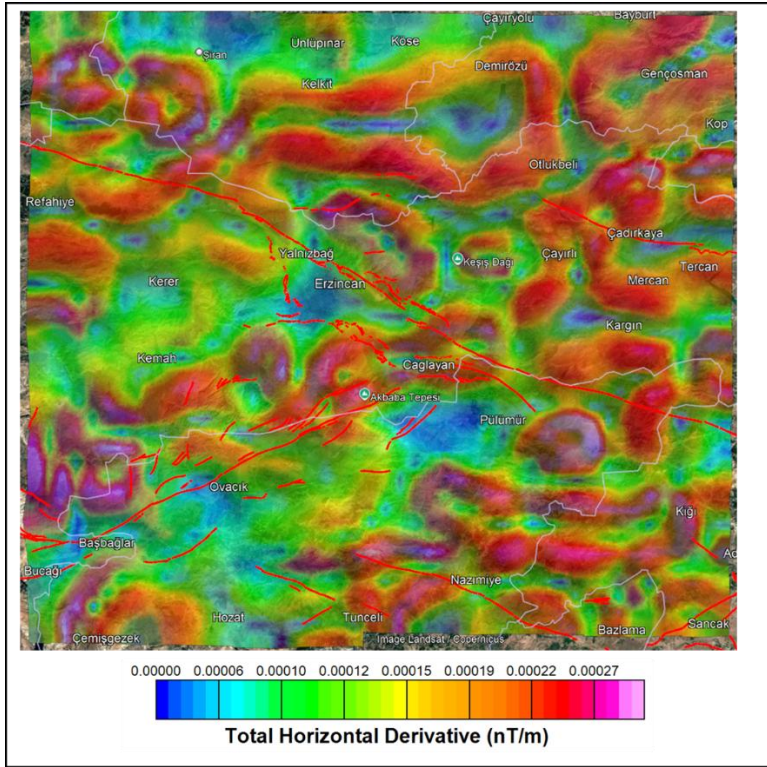
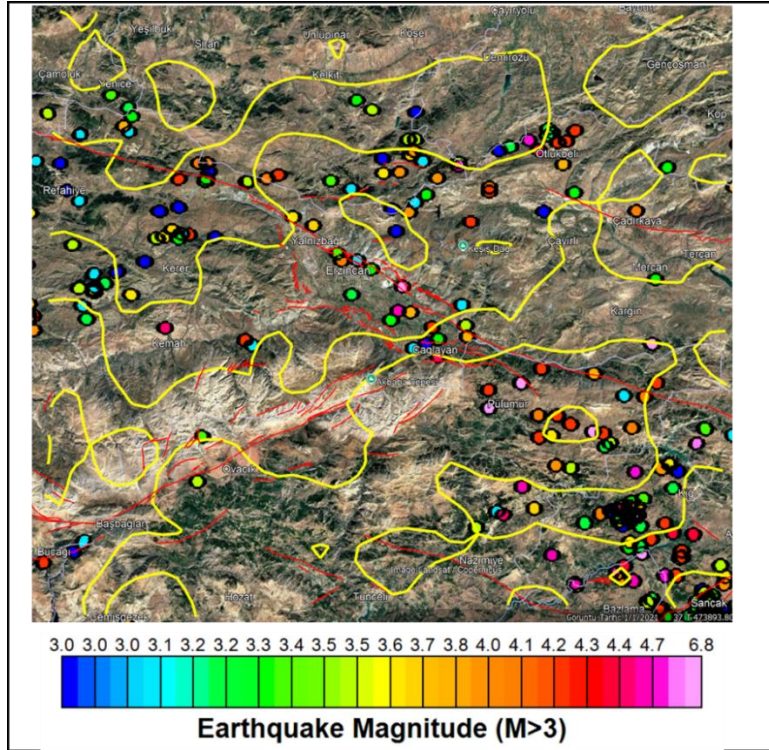


Figure 6. Distribution of $M > 3.0$ earthquakes in the study area overlaid with Tilt Angle zero contours (solid yellow lines represent zero contours; red lines represent active faults from Emre et al., 2013) (Earthquake data obtained from AFAD).



Conclusions

In this study, the integrated use of derivative-based edge detection methods on EMAG2 magnetic data has proven effective in the magnetic interpretation of the tectonic and geological structures of the Erzinçan Basin a pull-apart basin on the NAF and its surroundings. The combined application of Analytical Signal (AS) and Tilt Angle (TA) techniques allowed for the simultaneous determination of both shallow and deep-seated structural boundaries, such as lithological contacts and active fault segments.

In particular, the comparison between the zero contours of the tilt angle and earthquake distribution demonstrates that these geophysical boundaries correspond to active tectonic zones in certain regions. The fact that the analytical signal method is independent of the magnetic field direction enabled the determination of magnetic source locations and revealed that the high-amplitude anomalies observed at the basin margins are potentially associated with significant magnetic susceptibility contrasts located along the North Anatolian Fault Zone.

Although the EMAG2 dataset provides critical information for understanding the regional geodynamic environment, its resolution of 2 arc minutes remains limited to a regional scale. Its resolution is insufficient for small-scale studies. To identify smaller-scale structural features within the Erzincan Basin and improve the resolution of subsurface models, it is recommended that high-resolution aeromagnetic or ground-based magnetic measurements be used in future studies.

Acknowledgements

In this study, SRTM-1 digital elevation model was used for topography data provided by the NASA EOSDIS Land Processes DAAC. The Oasis montaj software was used magnetic data processing and boundary analysis of magnetic data. Earthquake data were taken from the Disaster and Emergency Management Authority (AFAD).

References

Akbaş, B., Akdeniz, N., Aksay, A., Altun, İ. E., Balcı,V., Bilginer, E., Bilgiç, T., Duru, M., Ercan, T.,Gedik, İ., Günay, Y., Güven, İ. H., Hakyemez, H.Y., Konak, N., Papak, İ., Pehlivan, ř., Sevin, M.,şenel, M., Tarhan, N., Turhan, N., Türkecan, A.,Ulu, Ü., Uğuz, M. F., Yurtsever, A. T. (2011).1:1.250.000 scaled Geological map of Turkey.General Directorate of Mineral Research and Exploration Publication, Ankara-Turkey

Akpınar, Z. (2010). Erzincan Havzasının Tektonik Gelişiminin Paleomanyetik Yöntemlerle Analizi. Cumhuriyet Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Doktora Tezi, Sivas. (in Turkish)

Aktaş, G. (2025). Edge Detection Analysis Using EMAG2 Magnetic Data in Lake Van and Its Surroundings, Türkiye. International Journal of Environment and Geoinformatics, 12(2), 25-33.

Armel, C. F. C., Mezoue, C. A., Pemi, M. M., Pierre, T. K. A., Nouayou, R., & Severin, N. (2022). Mapping of major tectonic lineaments across Cameroon using potential field data. Earth, Planets and Space (Online), 74(1).

Aydın, A., and Nur, A., 1982. Evolution of pull-apart basins and their scale dependence. Tectonics, 1, 91-105.

Barka, A. A., 1996. Slip distribution along the North Anatolian fault associated with the large earthquakes of the period 1939 to 1967, Bull. Seismol. Soc. Am., 86, 1238– 1254

Barka, A.A., ve Gülen, L., 1989. New constraints on the age and total offset of the North Anatolian Fault Zone: implications for tectonics of the Eastern Mediterranean Region, METU J. Pure Appl. Sci. 21, 39-63.

Emre Ö, Duman TY, Özalp S, Elmacı H, Olgun Ş, Şaroğlu F. Active Fault Map of Turkey with an Explanatory Text, 1:1.250.000 scale. Ankara, Türkiye: General Directorate of Mineral Research and Exploration, Special Publication, 2013 Series-30.

Eyidoğan, H. 1992. 13 mart 1992 erzincan depreminin ana şok ve art sarsinti özellikleri üzerine bir tartışma. Jeofizik, 6(2), 103-112. (in Turkish)

Eyidoğan, H. 1993. 13 Mart 1992 Erzincan Depremi: Faylanma Mekanizması ve Depremin Yeri Üzerine Bir Tartışma. 2. Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı, Sayfa: 404–415, 10 Mart 1993 Ankara. (in Turkish)

Hempton, M.R. ve Dunne, L.A., 1984. Sedimentation in pull-apart basins: active examples in eastern Turkey, J. Geol. 92, 513-530.

Jiao, L., Tu, J., Lei, Y., Zhao, J., & Wang, W. 2025. Crustal magnetic structure and implications for the Eastern Himalayan Syntaxis revealed by EMAG2-v3. Tectonophysics, 896, 230608.

Lei, Y., Jiao, L., Tu, J., Zhao, J., & Huang, Q. 2022. Magnetic structure and its tectonic implication around Longmenshan fault zone revealed by EMAG2v3. Frontiers in Earth Science, 10, 848824.

Maus, S., F. Yin, H. Lühr, C. Manoj, M. Rother, J. Rauberg, I. Michaelis, C. Stolle, and R.D. Müller (2008). Resolution of direction of oceanic magnetic lineations by the sixth-generation lithospheric magnetic field model from CHAMP satellite magnetic measurements, Geochem., Geophys., Geosys., 9, 7, <https://doi.org/10.1029/2008GC001949>.

Maus, S., U. Barckhausen, H. Berkenbosch, N. Bournas, J. Brozena, V. Childers, F. Dostaler, J.D. Fairhead, C. Finn, R.R. Bvon Frese, C. Gaina, S. Golynsky, R. Kucks, H. Lühr, P. Milligan, S. Mogren, R.D. Muller, O. Olesen, M. Pilkington, R. Saltus, B.

Schreckenberger, E. Thebault and F.C. Tontini (2009). EMAG2: A 2-arc min resolution EarthMagnetic Anomaly Grid compiled from satellite, airborne, and marine magnetic measurements. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems* 10, 8, <https://doi.org/10.1029/2009GC002471>

Meyer, B., Saltus, R., & Chulliat, A. 2017. EMAG2v3: Earth Magnetic Anomaly Grid (2-arc-minute resolution). Version 3. NOAA National Centers for Environmental Information. <https://doi.org/10.7289/V5H70CVX>. Accessed [10.12.2025].

Miller, H. G., & Singh, V. 1994. Potential field tilt—a new concept for location of potential field sources. *Journal of applied Geophysics*, 32(2-3), 213-217.

Njeudjang, K., Yandjimain, J., Bouba, A., Djousse Kanouo, B. M., Teikeu, W. A., Djongyang, N., & Ndougsa-Mbarga, T. 2022. Subsurface tectonic inferences of the Adamawa region of Cameroon from EMAG2 magnetic data. *International Journal of Geophysics*, 2022(1), 8451725.

Pamuk, E., & Özsöz, İ. 2022. Estimation of Curie-point depths and heat flow from spectral analysis of EMAG2 magnetic data in Cyprus Island. *Annals of Geophysics*, 65.

Roest, W. R., Verhoef, J., & Pilkington, M. 1992. Magnetic interpretation using the 3-D analytic signal. *Geophysics*, 57(1), 116-125.

Şengör, A.M.C., 1979. The North Anatolian transform fault: its age, offset and tectonic significance. *J. Geol. Soc. London* 136, 269–282

Temiz, H. 2004. The role of thrust ramp reactivation in pull-apart mechanism of the Erzincan basin, North Anatolian Fault Zone, Turkey. *Geodinamica Acta*, 17 (3), 219-228.

Uysal, A., & Sunkar, M. 2024. Erzincan Ovası Ve Çevresinin Depremselliği İle Depremlerin Mekânsal Ve Yoğunluk Analizleri. Fırat University Journal of Social Sciences, 34(2), 419-436. <https://doi.org/10.18069/firatsbed.1451933> (in Turkish)

BÖLÜM 2

MORPHOMETRY OF THE KÖPRÜÇAY WATERSHED (WESTERN MEDITERRANEAN), TÜRKİYE

ABDELHADI DRIBAT ¹

AYLA BOZDAĞ ²

Introduction

Watershed morphometry, which involves the quantitative analysis of a basin's geometric, topographic, and relief characteristics, is fundamental for understanding hydrological processes, geomorphological behavior, and informing sustainable watershed management. Parameters such as drainage density, stream frequency and bifurcation ratio are particularly important for evaluating runoff potential, soil erosion susceptibility, and flood risks. The Köprüçay watershed, located in the western Mediterranean region of Turkey, exhibits a complex terrain shaped by steep slopes, dissected landforms, and diverse lithological formations, making it an ideal subject for morphometric investigation. Despite its environmental

¹ Abdelhadi DRIBAT, Konya Technical University, Graduate Education Institute, Department of Geological Engineering, Orcid: 0000-0003-2579-5324

² Prof. Dr. Ayla BOZDAĞ, Konya Technical University, Department of Geological Engineering. ORCID: 0000-0002-6114-0678

and socio-economic significance, especially regarding water resources, agriculture, and ecological balance, comprehensive quantitative studies of the basin remain scarce. This study therefore aims to provide a detailed morphometric analysis of the Köprüçay watershed by integrating traditional cartographic methods with modern Geographic Information System (GIS)-based techniques. It is thought that the results will improve the understanding of the hydrological behavior and geomorphological dynamics of the basin and provide valuable information for sustainable water resources management, soil protection and flood mitigation strategies in the region.

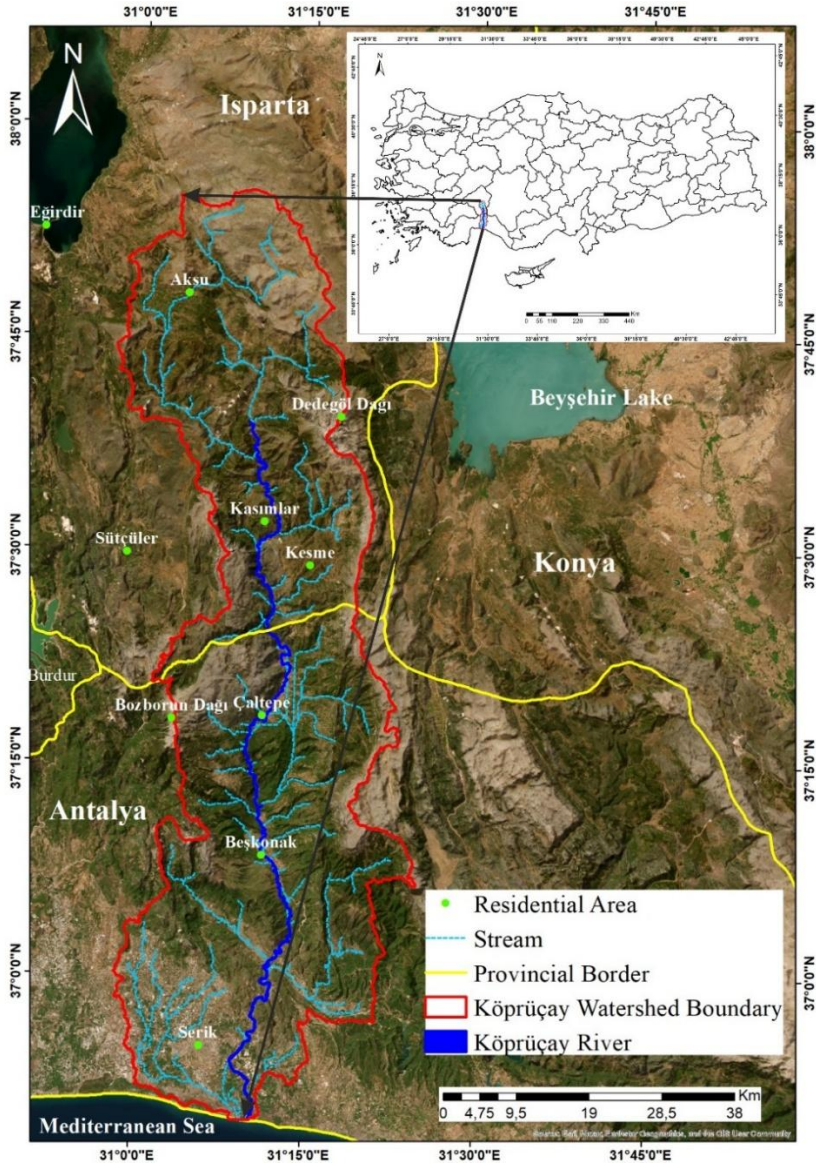
Physical Characteristics of the Köprüçay Watershed

Köprüçay Watershed Area: Accurate and reliable determination of the surface area of the Köprüçay Basin is of great importance for evaluating its hydrological potential. In this study, Digital Elevation Model (DEM) data obtained from Global Mapper were used to calculate the basin surface area. These high-resolution data were processed using ArcGIS geographic information systems software, and the basin boundaries were precisely delineated. As a result of the analyses, the total surface area of the Köprüçay Basin is 2,898.25 km² (Figure 1). This value has been considered a fundamental parameter in the management of water resources in the region and other related matters.

Köprüçay Watershed Perimeter: The perimeter of a basin is an important parameter in morphometric analyses of drainage basins and has direct impact on factors such as basin shape, drainage density, and slope characteristics. Accordingly, the perimeter of the Köprüçay Basin was calculated using ArcGIS software, based on data obtained with the help of Global Mapper. Based on the digitally delineated basin boundaries using DEM data, the perimeter of the basin is measured at 412.93 km. This length provides valuable

insights not only into the hydrographic structure of the basin but also into the direction and duration of water flow within it.

Figure 1 Location map of Köprüçay Watershed



Form Factor (Rf): The form factor is one of the most important parameters used to express the morphometric and hydrological shape characteristics of drainage basins quantitatively. Defined by Horton (1932), this parameter represents the ratio of the basin area (A) to the square of the basin's maximum length (Lb), thereby illustrating the relationship between basin shape and hydrographic behavior (Horton, 1932; Kutukcu et al., 2015; Coşkun & Öztürk, 2022).

The form factor is a significant indicator for understanding the relationship between basin morphology and flow behavior. An Rf value close to zero indicates an elongated basin, implying that surface runoff will take longer to reach the main channel and resulting in relatively lower peak discharges. Conversely, an Rf value approaching one suggests a circular basin shape, where runoff rapidly converges into the main channel, increasing peak flow intensity and flood potential (Kutukcu et al., 2015; Sidral & Zende, 2016; Rai et al., 2018).

Low form factor values are generally associated with long-term, stable hydrological regimes, whereas high values can lead to short-duration but high-intensity flows (Utlü, 2014; İmamoğlu, 2020). For the Köprüçay Basin, based on field and GIS-based measurements, the total basin area is 2898.25 km², and the maximum basin length is 121 km, yielding a calculated Rf value of approximately 0.20. This value clearly indicates that the Köprüçay Basin has an elongated form. Consequently, the basin's hydrological behavior is expected to be relatively stable, with lower flood peaks.

Stream Frequency (Fs): Stream frequency defined by Horton (1945) is expressed as the ratio of the total number of stream segments (Nu) to the basin area (A). It represents the number of stream channels per unit area within a basin and is calculated as:

$$F_s = \frac{\sum N_u}{A}$$

Where Nu is total number of stream segments, A is basin area (km^2)

Morphometric analysis of the Köprüçay Basin revealed a total of 489 stream segments, with a basin area of 2898.25 km^2 , resulting in an F_s value of approximately 0.17. This low F_s value indicates that the basin has a sparse drainage network. Such low values are typically associated with permeable lithological structures, high infiltration capacity, and relatively low relief. Therefore, in the Köprüçay Basin, the limited surface runoff, the dominance of subsurface flow processes, and the influence of relatively dense vegetation suggest that infiltration plays a significant role in the basin's hydrological regime. The low stream frequency is consistent with the geomorphological and hydrogeological characteristics of the basin, which are shaped by permeable lithology, moderate relief, and substantial vegetation cover.

Elongation Ratio (R_e): The elongation ratio (R_e) is a morphometric parameter used to describe the relationship between basin shape and hydrological behavior (Schumm, 1956). It is defined as the ratio of the diameter of a circle with the same area as the basin to the basin's maximum length (the distance from the source to the outlet), calculated as follows (Altıparmak & Türkoğlu, 2018):

$$R_e = 2/L_m \times [A/\pi]^{0.5}$$

Where L_m is Basin length (km), A is basin area (km^2).

A R_e value approaching 1 indicates a circular basin shape, while smaller values signify an elongated basin form (Reddy et al., 2004; Karataş, 2014). The Köprüçay Basin has a length of 412.93 km and an area of 2898.25 km^2 , resulting in an elongation ratio of approximately 0.15. Low R_e values are typically associated with dendritic drainage networks, where water flows swiftly through the system and sediment transport rates are relatively high (Utlü, 2014). Accordingly, the Köprüçay Basin's low elongation ratio and

elongated morphology indicate a higher susceptibility to erosion and flooding.

The R_e value calculated for the basin provides an important reference for watershed management, flood risk assessment, and sustainable water management planning. The elongated shape and dendritic drainage pattern of the Köprüçay Basin highlight the areas with steep slopes and high erosion potential, particularly in the sub-basins.

Drainage Density (Dd): Drainage density is one of the fundamental morphometric parameters that illustrates the development of drainage networks, their relationship with topography, and surface runoff characteristics. The concept, introduced by Horton (1932, 1945), represents the ratio of the total length of all streams in a basin to its total area. It is mathematically expressed as:

$$D_d = \frac{\sum L_x}{A}$$

Where D_d is drainage density (km/km²); L_x is total length of all stream segments (km) and A is basin area (km²).

In the Köprüçay Basin, GIS-based measurements determined that the total stream length is 834.74 km, while the basin area is 2898.25 km². Based on these values, the calculated drainage density is 0.29 km/km². According to the classification by Malik et al. (2011):

0–2 → Low drainage density

2–2.5 → Moderate

2.5–3 → High

3 < → Very high

Low drainage density is typically associated with lithological and structural controls such as high permeability, thick vegetation

cover, and gentle topographic gradients (Altıparmak & Türkoğlu, 2018; Çıtak & Kılıç, 2023). Calculated low drainage density value of the Köprüçay basin suggests that surface runoff across the basin is limited, and infiltration plays a dominant role in subsurface flow processes.

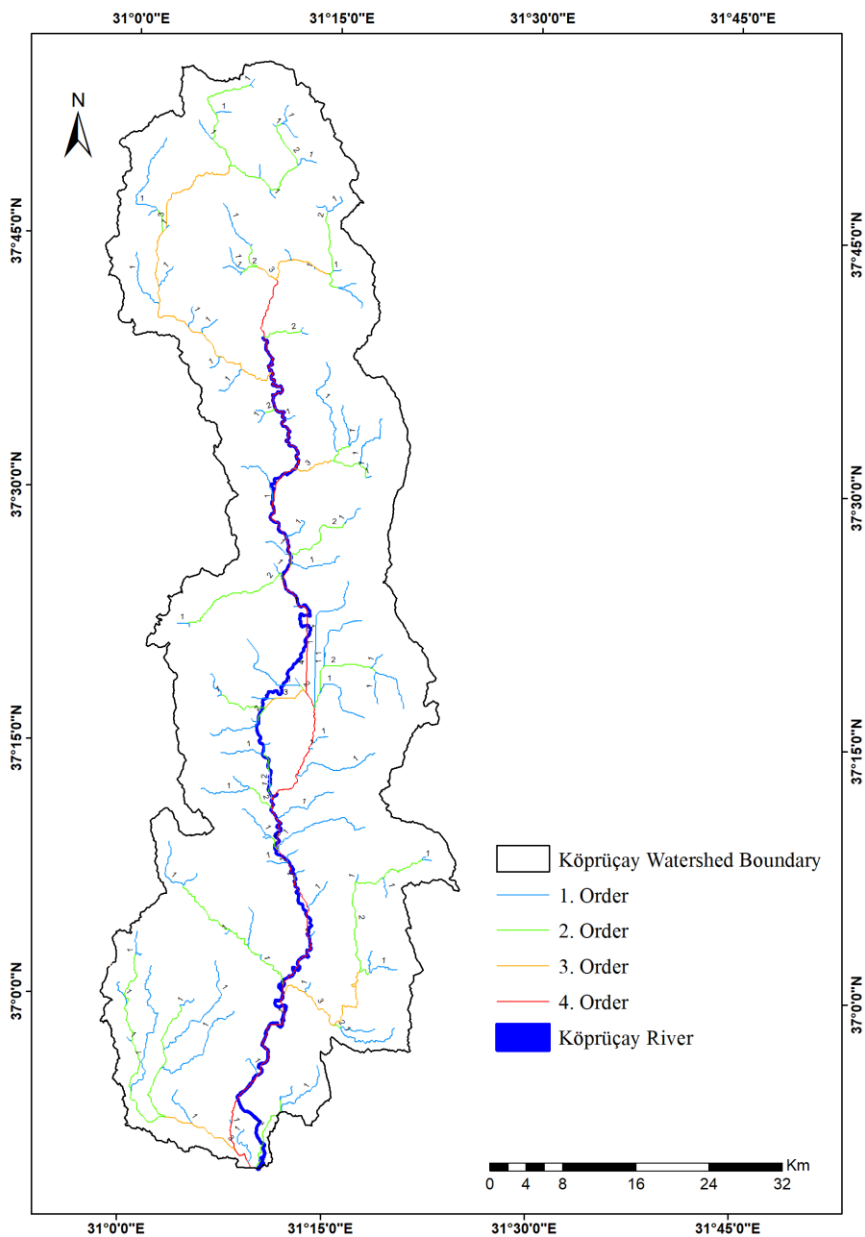
Stream Order: Stream ordering is a crucial method used to classify the hierarchical arrangement of streams within a drainage basin. It provides insight into the degree of basin development, water collection capacity, and potential flood behavior.

The method developed by Strahler (1957) assigns first-order status to unbranched streams. When two streams of the same order meet, a stream of the next higher order is formed. However, when streams of different orders join, the higher order is retained (Strahler, 1957; Leopold et al, 1964). The stream network within the Köprüçay Basin was analyzed using Strahler's (1964) ordering method, processed with ArcGIS software. The analysis revealed that the basin's stream system comprises four stream orders, indicating a moderately developed drainage network (Figure 2).

The distribution and hierarchy of the Köprüçay drainage system play an essential role in understanding the basin's hydrological response and the connectivity between sub-basins. Higher-order streams indicate integrated drainage evolution, while lower-order streams signify localized, steeper catchment areas with higher runoff rates.

Bifurcation Ratio (Rb): The bifurcation ratio (Rb) represents an essential morphometric used to quantitatively describe the branching pattern of a drainage network. It serves as an indicator of both the geological homogeneity and hydrological characteristics of a basin, and it is particularly valuable in assessing flow regimes and flood potential (Strahler, 1964). The bifurcation ratio between stream orders is defined as:

Figure 2 Stream orders of the Köprüçay Watershed generated based on the Strahler (1964) method.



$$Rb = \frac{N_u}{N_{u+1}}$$

Where N_u is number of streams of a given order, N_{u+1} is number of streams of the next higher order.

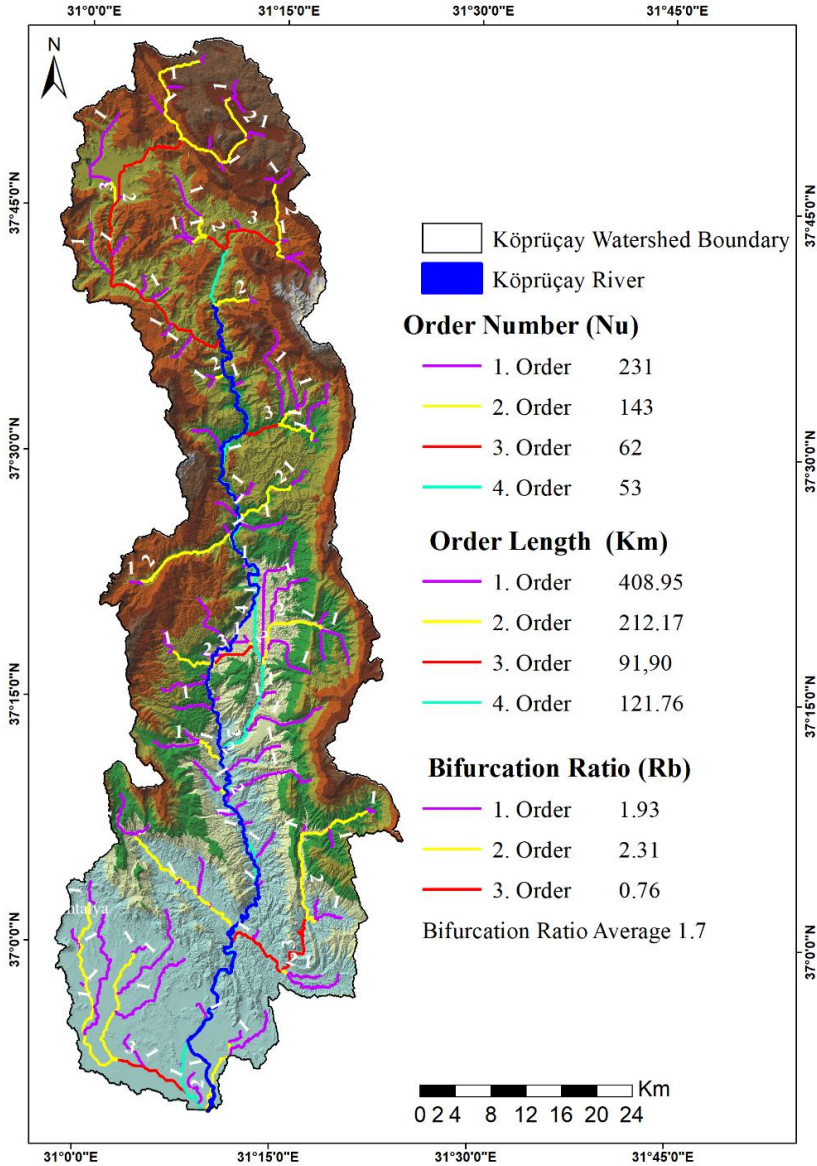
The overall bifurcation ratio for a basin is determined by averaging the Rb values for all successive orders (Schumm, 1956; Coşkun & Öztürk, 2022). The Rb value provides insights into geological control, infiltration capacity, drainage texture, and flow characteristics (Erdede & Öztürk, 2016). According to Strahler (1964) and Verstappen (1983), the average bifurcation ratio in structurally homogeneous basins typically ranges between 3 and 5. Lower values indicate resistant lithologies and homogeneous rock structures, while higher values (>5) suggest structural control and potential for higher erosion and flash flood activity (Chandrashekar et al., 2015; Altıparmak & Türkoğlu, 2018).

For the Köprüçay Basin, the mean Rb value was calculated as 1.7, which is considerably lower than the typical range (Figure 3). This indicates that the basin is dominated by geologically homogeneous and resistant lithologies. The low bifurcation ratio thus highlights the Köprüçay basin's susceptibility to sudden flood peaks and the need to consider this parameter in flood risk assessments.

Drainage Texture Ratio (R_t): The drainage texture ratio (R_t) is a morphometric parameter used to evaluate the hydrological characteristics and flow dynamics of a drainage basin. It represents the total number of stream segments (N_u) per unit basin area (A), and it is expressed mathematically as:

$$R_t = \frac{N_u}{A}$$

Figure 3 The bifurcation ratio and values of the Köprüçay Watershed generated according to the Strahler (1964) method.



Where Nu is total number of stream segments, A is basin area (km^2).

The Rt value reflects the degree of drainage dissection and provides insight into infiltration capacity, runoff intensity, and potential flood hazards (Çıtak & Kılıç, 2023; Yılmaz, 2022). According to Smith (1950), the classification of drainage texture ratio and corresponding hydrogeological characteristics is as follows (Table 1):

Tablo 1 The classification of drainage texture ratio and corresponding hydrogeological characteristics (Smith, 1950)

Rt Value	Drainage Texture Class	Hydrological Characteristics
$Rt < 2$	Very Coarse	High infiltration, low surface runoff
$2 \leq Rt < 4$	Coarse	Moderate infiltration and runoff
$4 \leq Rt < 6$	Moderate	Low infiltration, increasing surface runoff
$6 \leq Rt < 8$	Fine	Low infiltration, high surface runoff
$Rt \geq 8$	Very Fine	Very low infiltration, very high surface runoff

For the Köprüçay Basin, the total number of stream segments is 489, and the basin area is 2898.25 km², resulting in an Rt value of 0.17. This very low Rt value places the basin in the very coarse drainage texture class. It indicates that the Köprüçay Basin has low drainage density, high infiltration capacity, and limited surface runoff. Consequently, flood potential is relatively low, and much of the precipitation infiltrates into subsurface aquifers.

The Rt parameter is particularly important for flood management and land-use planning. In basins with low Rt values, surface runoff is minimal, leading to reduced flood hazards; however, in basins with high Rt values, flood risks increase significantly. The Köprüçay Basin’s low Rt value thus suggests a strong natural drainage capacity and high groundwater recharge potential.

Hypsometric Curve and Integral (Hi): Hypsometric analysis is an important method for assessing the topographic and morpho-dynamic characteristics of a drainage basin. The hypsometric curve illustrates the distribution of relative elevation (h/H) against the

relative area (a/A), and it was first developed by Strahler (1952) to evaluate the geomorphic evolution of basins.

Here h is elevation of a specific point above sea level; H is maximum basin elevation; a is area above elevation h ; A is total basin area. Normalization of these ratios allows for comparison between basins of different sizes. Hypsometric curves are also closely linked to lithology, hydrology, climate, and tectonic processes, providing valuable insights into erosion potential, surface stability, and watershed evolution (Weissel et al., 1994). According to Strahler (1964), convex-shaped curves represent youthful stages, S-shaped curves indicate mature stages, and concave curves correspond to old geomorphic stages (Willgoose & Hancock, 1998).

The hypsometric integral (H_i) quantifies the shape of the curve numerically and is calculated using the formula (Strahler, 1952):

$$H_i = (\bar{H} - H_{\min}) / (H_{\max} - H_{\min})$$

Where $\bar{H}$ is mean elevation of the basin; $H_{\min}$ is minimum elevation; $H_{\max}$ is maximum elevation. Based on the classification by Keller & Pinter (2002):

$H_i > 0.6 \rightarrow$ Youthful stage

$0.35 \leq H_i \leq 0.6 \rightarrow$ Mature stage

$H_i < 0.35 \rightarrow$ Old stage

The results of the hypsometric analysis provide significant data for evaluating the morpho-dynamic development processes of the basin and the potential tectonic influences that have shaped its evolution. Therefore, hypsometric data serve not only scientific purposes but also constitute a valuable tool for sustainable watershed management and planning. The hypsometric map of the Köprüçay Basin (Figure 4) and the corresponding hypsometric curve derived

from this map (Figure 5) clearly reveal the detailed topographic characteristics of the basin. The calculated hypsometric integral value for the Köprüçay Basin is 0.44, indicating that the basin is geomorphologically in or approaching a mature stage of development. The relatively balanced slope of the curve suggests that surface forms have largely stabilized, and that active vertical incision is limited.

Conclusion

The morphometric analysis of the Köprüçay Basin indicate that the basin is currently in an advanced stage of geomorphological evolution, approaching a mature landscape development. The hypsometric integral value ($H_i = 0.44$), together with the gently rising and relatively balanced hypsometric curve, reflects a geomorphic system that has largely stabilized, showing limited vertical incision due to reduced tectonic activity and the predominance of lateral erosion and surface leveling processes.

The basin exhibits an elongated geomorphic shape ($R_f \approx 0.20$; $R_e \approx 0.15$), characterized by a dendritic drainage pattern, low drainage density ($D_d = 0.29 \text{ km/km}^2$), stream frequency ($F_s = 0.17$), very coarse drainage texture ($R_t = 0.17$) and a low bifurcation ratio ($R_b = 1.7$). Collectively, these indices suggest high infiltration capacity, limited surface runoff, and a near-steady hydrological regime in which subsurface and baseflow components dominate.

The dendritic network with four orders also shows moderate drainage development. However, despite the overall maturity of the system, localized areas with relatively steeper slopes and structural or lithological controls may exhibit higher erosion susceptibility, particularly where channel gradients, relief contrasts, or anthropogenic disturbances enhance erosive forces.

Figure 4 Hypsometric map illustrating the elevation distribution of the Köprüçay Watershed

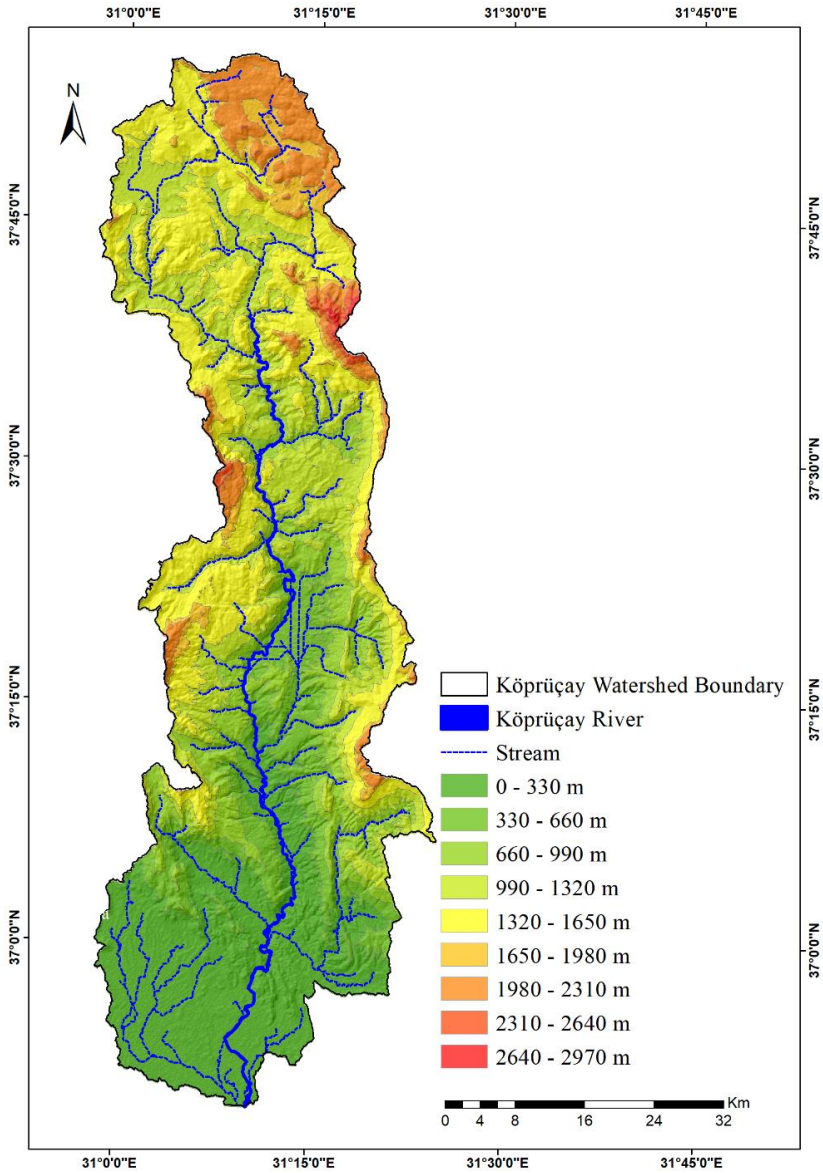
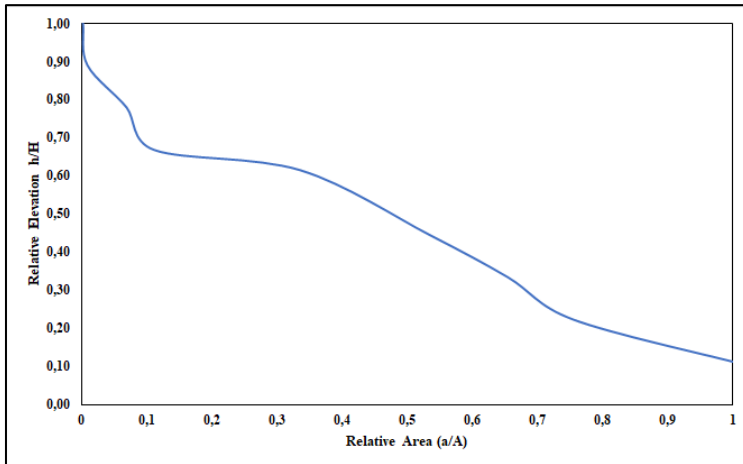


Figure 5 Hypsometric curve representing the hypsometric relationship of the Köprüçay Watershed



Overall, the Köprüçay Basin represents a relatively stable, natural and mature geomorphic system. The results provide a sound base for sustainable watershed management, flood-risk mitigation, soil- erosion control strategies, and regional planning. The study emphasizes the critical importance of integrating morphometric and geomorphological assessments into environmental management, hazard mitigation, and water-resource allocation to strengthen ecological resilience, optimize hydrological functioning, and support long-term landscape sustainability.

Kaynakça/References

Altıparmak, S. ve Türkoğlu, N. (2018). Yakacık Çayı Havzasının (Hatay) Morfometrik Analizi. *Ankara Üniversitesi Dil ve Tarih-Coğrafya Fakültesi Dergisi*, 58(1), 353-374.

Chandrashekar, H., Lokesh, K. V., Sameena, M., roopa, J., Ranganna, G. (2015). GIS –Based Morphometric Analysis of Two Reservoir Catchments of Arkavati River, Ramanagaram District, Karnataka. *Aquatic Procedia*, 4(Icwrcoe), 1345–1353.

Coşkun, M., Öztürk, A. (2022). Havza önceliklendirmesi bakımından Ermenek Çayı Havzası ve Gökçay Havzasının karşılaştırmalı morfometrik analizi. *Turkish Journal of Forestry*, 23(1): 1-10. DOI: 10.18182/tjf.1024569.

Çıtak, S., ve Kılıç, M. O. (2023). Yukarı Çekerek Havzası'nın Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) Kullanılarak Jeomorfometrik Analizi. *Multidisipliner Yaklaşımlarla Coğrafya Dergisi*, 1(4), 262-279.

Erdede, B. ve Öztürk, D. (2016). Kızılırmak Havzasının Taşkın Potansiyelinin Çizgisel, Alansal ve Rölyef Morfometrik İndisler Kullanılarak Değerlendirilmesi. 6. *Uzaktan Algılama-Cbs Sempozyumu* (UZAL-CBS 2016), Adana.

Horton, R. E. (1932). Drainage-basin characteristics. *Eos, transactions american geophysical union*, 13(1), 350-361.

İmamoğlu, A. (2020). Alaca Çayı Havzası Erozyon Durumunun Morfometrik Ölçümler ile İlişkisi. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (18), 868-878.

Karataş, A. (2014). Karasu Çayı Havzasının Hidrografik Planlaması, İstanbul Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, Coğrafya Anabilim Dalı, Doktora Tezi, İstanbul.

Keller, E. A., Pinter, N. (2002). Active Tectonics: Earthquakes, Uplift, and Landscape / Edition 2. Prentice Hall Inc., Upper Saddle River, 362.

Kutukcu A., Kaya S., Kabdasli S., Gazioglu C. (2015). Nehir Havzalarının Morfolojik Karakteristiklerinin CBS Destekli Nümerik Modeller Kullanılarak Analizi, *TUFUAB VIII. Teknik Sempozyumu*, 21-23 Mayıs 2015 / Konya.

Leopold. L. B., Wolman. M. G., Miller J. P. (1964). *Fluvial Processes In Geomorphology*. WH Freeman and Company; San Francisco and London.

Malik, M. I., Bhat, M. S., Kuchay, N. A. (2011). Watershed based drainage morphometric analysis of Lidder catchment in Kashmir valley using geographical information system. *Recent Research in Science and Technology*, 3(4), 118–126.

Rai, P.K., Chandel, R.S., Mishra, V.N., Singh, P. (2018). Hydrological inferences through morphometric analysis of lower Kosi river basin of India for water resource management based on remote sensing data. *Applied Water Science*, 8: 1-16. DOI: 10.1007/s13201-018-0660-7.

Reddy, G. P. O., Maji, A. K. and Gajbhiye, K. S. (2004). Drainage morphometry and its influence on landform characteristics in a basaltic terrain, Central India-a remote sensing and GIS approach. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 6(1), 1-16.

Schumm, S. A. (1956). Evolution of drainage systems and slopes in badlands at Perth Amboy, New Jersey. *Geological society of America bulletin*, 67(5), 597-646.

Sidral, A., Zende, A.M. (2016). Quantitative evaluation of morphometric parameters of Sakli River using geospatial techniques. *National Conference on Water Resources and Flood Management with special reference to Flood Modelling*, October 14-15, SVNIT Surat, pp. 1-14.

Smith, K. G. (1950) Standards for grading texture of erosional topography. *American Journal of Science*, 248(9), 655–668.

Strahler, A. N. (1957). Quantitative analysis of watershed geomorphology. *Trans American Geophysical Union*, 38, 913-920.

Strahler, A. N. (1964). Quantitative geomorphology of drainage basins and channel net work. In: Chow, V., Ed., *Handbook of Applied Hidrology*, McGraw Hill Newyork, 39-76.

Utlu M. (2014). Namnam ayı Havzasinin Uygulamali Hidrografya zellikleri, İstanbul Üniversitesi, *Yüksek Lisans Tezi*, İstanbul Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, Coğrafya Anabilim Dalı, 138 s.

Verstappen, H. T. (1983). Applied eomorphology: geomorphological surveys for environmental development (No. 551.4 VER).

Willgoose, G., Hancock, G. (1998). Revisiting the hypsometric curve as an indicator of form and process in transport-limited catchment. *S. Earth Surf. Process. Landf.* 23, 611-623.

Yılmaz M. (2022). Karasu ayı Havzası'nın Hidrografyası, *Yüksek Lisans Tezi*, Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, Coğrafya Ana Bilim Dalı, 109s.

BÖLÜM 3

İŞIKKARA KÖYÜ (İLİCA/KÜTAHYA) BAZALTLARININ DEMİRYOLU BALASTI OLARAK KULLANILMASININ ARAŞTIRILMASI

METİN BAĞCI¹
MUSTAFA BAYHAN²

Giriş

Hat olarak anılan özel bir yol üzerinde, mekanik olarak hareket eden araçlarla çekilen yük ve yolcu taşıma sistemlerine demiryolu denilmektedir (Kozak, 2010). Altyapı ve üstyapı olmak üzere iki ana bölümden oluşan demiryolu sistemlerinde; travers, ray, bağlantı malzemesi ve balasttan meydana gelen kısım "demiryolu üstyapısı" olarak adlandırılmaktadır (Kozak, 2011; Anonim, 2016). Bu yapının en kritik bileşenlerinden biri olan balast tabakası; hat geometrisinin korunması, yüklerin alt tabakalara etkin bir şekilde

¹ Doç. Dr. Afyon Kocatepe Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği,
Orcid: 0000-0002-1056-2854

² Jeoloji Müh. Ulaştırma Bakanlığı Devlet Demiryolları 7. Bölge
Müdürlüğü, Afyonkarahisar.
Orcid: 0009-0000-0137-7326

aktarılması ve güvenli tren işletmeciliğinin sağlanması açısından temel bir işlev üstlenir. Kırmataş niteliğindeki granüler malzemeden oluşan balast; yataklama, yük dağıtımı, suların drenajı, titreşim sönümleme ve hat stabilitesi gibi çok yönlü görevleri yerine getirerek üstyapı elemanlarının performansını doğrudan etkiler. Bu nedenle balast malzemesinin fiziksel ve mekanik özellikleri, tane boyutu dağılımı, dayanıklılığı ve uzun dönem davranışı, demiryolu sistemlerinin tasarım, bakım ve işletme süreçlerinde belirleyici rol oynamaktadır.

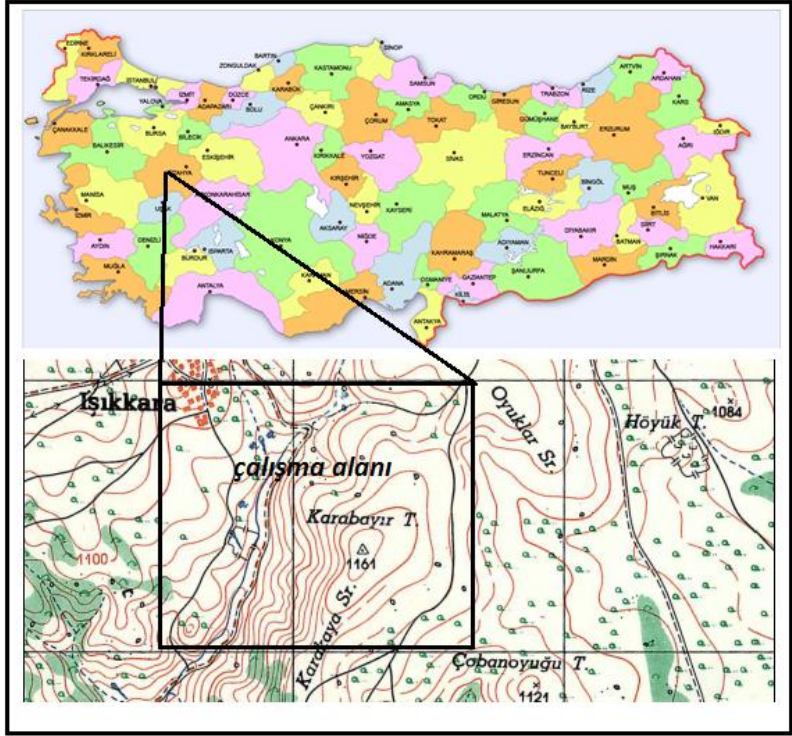
Günümüzde artan aks yükleri, yüksek hızlı tren uygulamaları ve yoğun trafik altında balast tabakasının maruz kaldığı tekrarlı dinamik yükler; parçalanma, şekil değiştirme, "fouling" (kirlenme/tıkanma) ve oturma gibi bozulma mekanizmalarını hızlandırmaktadır. Bu durum hem hat bakım maliyetlerinin artmasına hem de hat güvenliğinin olumsuz etkilenmesine neden olmaktadır. Dolayısıyla balastın performansını iyileştirmeye yönelik malzeme seçimi, geoteknik tasarım kriterleri, modern bakım yöntemleri ve alternatif granüler malzeme kullanımları son yıllarda araştırmaların odağı hâline gelmiştir. Sürdürülebilir altyapı yönetimi ve yüksek performanslı demiryolu hatlarının geliştirilmesi bağlamında; balastın üretim kaynakları, fiziksel özellikleri, laboratuvar ve saha performans testleri ile iyileştirme tekniklerinin kapsamlı biçimde anlaşılması gerekmektedir. Balast malzemeleri genellikle yüksek kaliteli magmatik veya metamorfik kayalardan elde edilir. Madencilik faaliyetleri sırasında patlatılan bu kayalar, istenilen tane boyutuna ulaşmak için kırma ve eleme işlemlerinden geçirilir. Bazalt, granit, granodiyorit, gabro, diyabaz, siyenit, riyolit, diyorit, andezit, gnays, kuvarsit, porfir, silttaşı, kumtaşı, dolomit ve kireçtaşı (kalker) gibi kayalar demiryollarında balast olarak kullanılmaktadır (Raymond, 1985; Okonta ve Magagula, 2011; Yılmaz, 2015; Bayrak, 2018; Bassey vd., 2020; Kozak, 2021). Balast

parçacıkları geleneksel olarak tek tip derecelendirilmiş, düzensiz şekilli, sert ve pürüzlü yüzeyli olarak tanımlansa da standartlar; kayanın kalitesi, uygunluğu, evre düzenlemeleri, ekonomikliği ve ana kayanın kaynağına bağlı olarak ülkeden ülkeye değişmektedir. Örneğin; TCDD Balast Teknik şartnamesi 'ne göre demiryolu balastı; kare gözlü 22,4 mm elek üzerinde en az %97'si kalan, 63 mm açıklıklı elekten ise %100 geçen, istenilen gradasyon şartlarını sağlayacak şekilde keskin kenarlı ve köşeli kırılmış, sağlam kayalarından üretilmelidir (Kozak, 2012; Oğul vd., 2012; Nlsund, 2014; Kozak, 2021). Bu alışma, demiryolu balastının fonksiyonlarını, malzeme özelliklerini, bozulma süreçlerini ve güncel mühendislik uygulamalarını literatür ışığında ele alarak demiryolu üstyapı tasarımı ve bakım stratejilerine katkı sağlamayı hedeflemektedir. Ayrıca farklı jeolojik ve çevresel koşullar için balast malzemesi seçim yöntemleri vurgulanarak, karmaşık durumlarda balast seçimi için bir referans oluşturulması amaçlanmıştır. Bu kapsamda, demiryolu projeleri için balast olarak kullanılacak kayaların uygunluğunun belirlenmesi büyük önem arz ettiğinden; çalışma özelinde Işıkkara Köyü (Ilıca/Kütahya) bazaltlarının demiryolu balastı olarak kullanılabilirliği araştırılmıştır (şekil 1).

Materyal ve Metot

Çalışma alanı, Kütahya ili Merkez ilçesine bağlı Işıkkara Köyü sınırları içerisinde yer almakta olup, il merkezinin 20 km kuzeydoğusunda, 13,54 hektarlık bir sahayı kapsamaktadır. Kütahya-I24-d4 paftasında konumlanan çalışma alanına ulaşım, Kütahya-Eskişehir karayolu üzerinden sağlanmaktadır.

Şekil 1. Çalışma alanının yer bulduru haritası



Çalışma kapsamında, sahadaki bazalt ocağından temsili nitelikte toplam 6 adet kayaç örneği alınmıştır. Mineralojik ve petrografik incelemeler amacıyla numunelerin hazırlanmasında TS EN 12407 (2008) standardında belirtilen yöntemler esas alınmıştır. Hazırlanan kesitler, Leica Dm 2500P polarizan mikroskop kullanılarak mineralojik bileşim, doku özellikleri, tane büyüklüğü ve kayaç türü açısından incelenmiştir. Örneklerin mineralojik fazlarının belirlenmesi için yapılan X-Işını Kırınımı (XRD) analizleri, AKÜ-TUAM merkezindeki Shimadzu XRD-6000 cihazı ile 2° - 70° (2θ) tarama aralığında gerçekleştirilmiştir. Jeokimyasal özelliklerin

tespiti amacıyla; ana ve iz element analizleri ICP (Inductively Coupled Plasma) emisyon spektrometresiyle, nadir toprak element (NTE) analizleri ise ICP-MS (Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometry) yöntemiyle Acme Analytical Laboratories (Kanada) bünyesinde yapılmıştır. Malzemenin uygunluğunu belirleyen fiziksel ve mekanik deneyler ise TCDD Demiryolu Araştırma ve Teknoloji Merkezi (DATEM) İşletme Müdürlüğü laboratuvarlarında tamamlanmıştır.

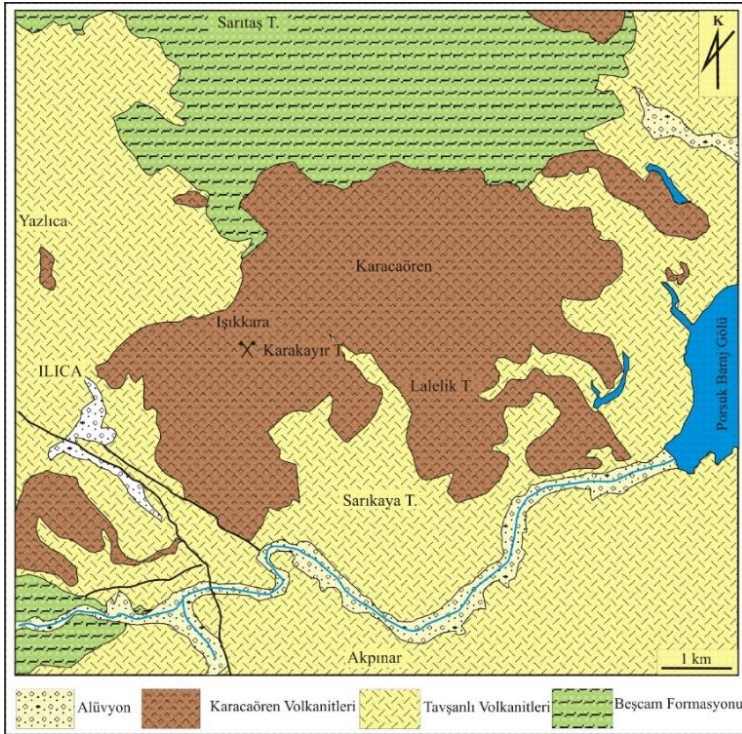
Bulgular

İnceleme Alanının Jeolojisi

İnceleme alanı; Pontitler veya Şengör ve Yılmaz (1981) tarafından tanımlanan Sakarya Kıtası'nın güney kenarı ile Anatolid Kuşağı'nın kuzey kenarı arasında yer almaktadır. Brinkmann'a (1966) göre bölgede, merkezi Kütahya olan ve Variskan orojenezine ait çok sayıda tektonik zon bulunmaktadır. Çalışma alanı ve yakın çevresi, bahsi geçen araştırmacının tanımladığı İzmir-Ankara Zonu içerisindeki bu tektonik yapıların merkezini teşkil etmektedir. Ayrıca saha; Okay (1981; 1986) tarafından tanımlanan Tavşanlı Zonu ve Özcan vd. (1988) tarafından belirtilen Kütahya-Bolkardağı Kuşağı içerisinde kalmaktadır. İnceleme alanındaki en yaşlı birimi, Üst Kretase yaşlı Beşçam Formasyonu oluşturmaktadır. Bu birimlerin üzerine, Orta-Üst Miyosen yaşlı tüf, tüfit, aglomera, üst seviyelere doğru volkano sedimander birimlerden oluşan Tavşanlı Volkanitleri uyumsuz (diskordan) olarak gelmektedir. Bu birimin üzerine ise Geç Pliyosen-Kuvaterner yaşlı Karacaören Volkanitleri uyumlu olarak yerleşmiştir (Şekil 1; Şekil 2). İnceleme alanında gözlenen volkanik

birimler üzerinde özellikle K–Ar yaş analizleri ve Sr–Nd–Pb–O izotop jeokimyasal verilerin sonucuna göre, volkaniklerin, şoşonitikten orta-yüksek potasyum (K) karakterlerine kadar jeokimyasal yakınlık gösterdiği belirlenmiştir (Özkul vd., 2022). Başka bir çalışmada, volkanitlerin mineral kimyası analizlerinden yararlanılarak volkanitlerin püskürme öncesi kristallenme koşulları belirlenerek volkanitleri oluşturan magmalarının üst kıtasal kabuktaki magma odalarında ayrımlaşarak geliştikleri belirtilmiştir (Temizel vd., 2024). Kuvaterner yaşlı alüvyon ve traverten birimleri ise diğer tüm birimleri uyumsuz (diskordan) olarak örtmektedir (Gün vd., 1979; Demirbilek, 2005).

Şekil 2. İnceleme alanının jeolojik haritası



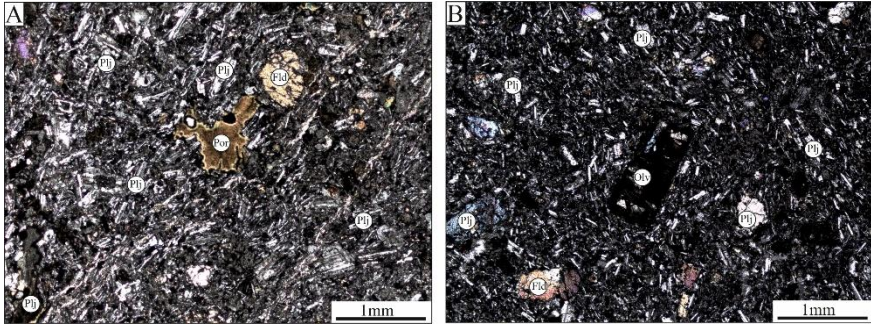
Kaynak: (Demirbilek, 2005 'den değiştirilerek Alınmıştır).

Mineralojik ve Petrografik İncelemeler

Polarizan Mikroskop İncelemeleri

Işıkkara (Ilıca) bazaltlarına ait örnekler; TS 5694 EN 12670 (2004) standardı esas alınarak tane büyüklüğü, doku özellikleri, mineralojik bileşim ve kayaç grubu açısından polarizan mikroskop altında incelenmiştir. Yapılan incelemeler neticesinde; örneklerin yoğun olarak camsı bir matrikse sahip olduğu ve hipokristalin (yarı kristalli) porfirik doku gösterdiği belirlenmiştir. Bazalt örneklerinin mineralojik bileşiminde; plajiyoklaz, olivin, piroksen, opak mineraller, mikrolitler ve volkan camı gözlenmiştir. Yarı özşekilli (subhedral) kristaller halinde gözlenen plajiyoklazların, tipik ikizlenme ve zonlanma yapıları sergilediği görülmüştür. Kayaç içerisindeki olivinler yarı özşekilli kristaller şeklinde olup, bu minerallerde iddingsitleşme ve opasitleşme (opaklaşma) türü bozunmalar tespit edilmiştir. Hamur (matriks) bileşeninin ise plajiyoklaz mikrolitleri ve volkanik camdan meydana geldiği belirlenmiştir (Şekil 3).

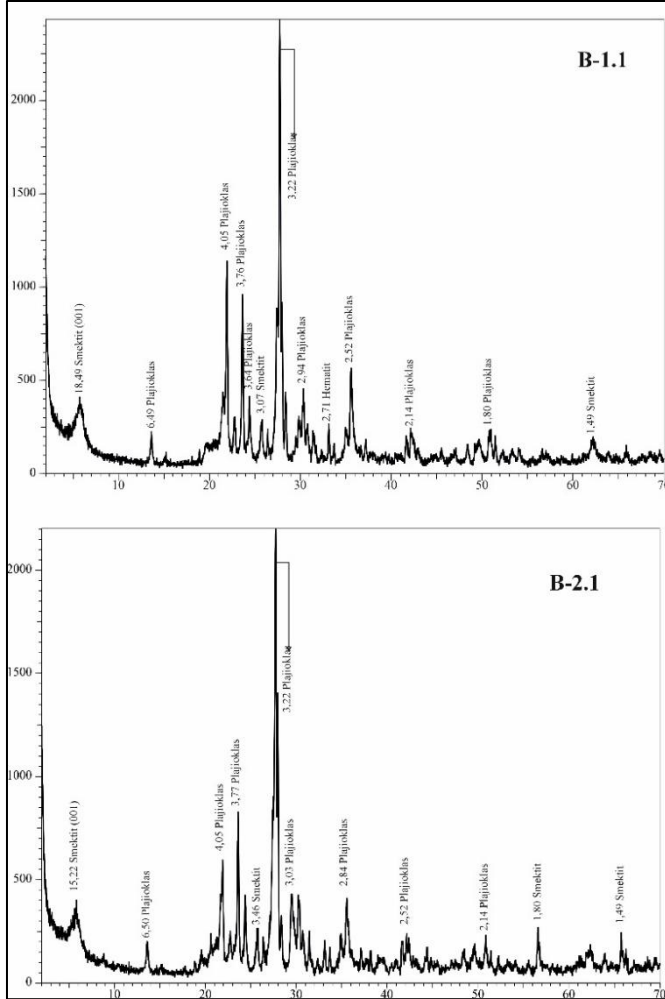
Şekil 3. Bazalt örneklerine ait polarizan mikroskop resimleri. Plj: Plajiyoklas, Fld: Feldispat, Por: Gözenek.



X-Işını Kırınımı (XRD) Analizleri

Işıkkara (Ilıca) bazaltlarının mineralojik bileşimini belirlemek amacıyla ocak sahasından toplam 6 adet numune alınmıştır. B1 ve B2 kodlu örneklerine ait XRD grafikleri Şekil 4’de verilmiştir.

Şekil 4. Işıkkara bazalt numunelerine ait XRD difraktogramı



Bu numuneler, kırma ve öğütme işlemlerinden geçirilerek analiz için hazır hale getirilmiştir. XRD analizleri, Afyon Kocatepe Üniversitesi Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezi (AKÜ-TUAM) bünyesindeki Shimadzu XRD-6000 cihazı kullanılarak, 2°-70° (2θ) tarama aralığında gerçekleştirilmiştir. Elde edilen difraktogramların değerlendirilmesi sonucunda; bazalt örneklerinde plajiyoklaz, simektit ve hematit minerallerine ait karakteristik pikler belirlenmiştir (Şekil 4).

Jeokimyasal İncelemeler

Işıkkara (Ilıca) bazaltlarından alınan 6 adet numunenin ana oksit ve iz element analiz sonuçları Tablo 1’de sunulmuştur. Analiz sonuçları incelendiğinde; numunelerin SiO₂ içeriğinin %51,34 ile %56,54 arasında değiştiği ve ortalama %53,55 olduğu görülmektedir. Toplam alkali (Na₂O+K₂O) değerleri ise ortalama %5,17 seviyesindedir. Numuneler, Winchester ve Floyd (1977) sınıflandırma diyagramında değerlendirildiğinde, kimyasal bileşimlerinin bazalt ve bazaltik andezit geçişinde yer aldığı görülmektedir (Şekil 5).

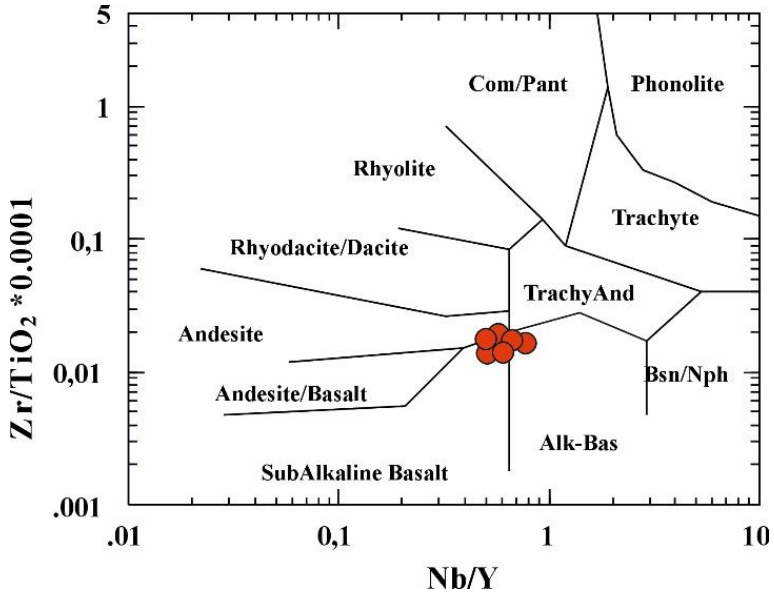
Balast malzemesinin dayanıklılığı (durabilitesi) açısından kritik öneme sahip olan Kızdırma Kaybı (LOI) değerleri, numunelerde %1,8 ile %6,6 arasında değişmektedir. EB3-1 numaralı örnek (%1,8 LOI) taze kayaç özelliği gösterirken; EB2-1 numaralı örnekte LOI değerinin %6,6’ya yükselmesi ve aynı örnekte CaO değerinin (%10,81) diğerlerine göre yüksek olması, bu numunede ikincil karbonat (kalsit vb.) dolgularının varlığına işaret etmektedir. Genel ortalamada ise LOI değeri %3,68 olup, kayaçların balast olarak kullanımına engel teşkil edecek düzeyde ileri derecede bir kimyasal

ayırışma (alterasyon) gözlenmemiştir. Yüksek sertlik sağlayan SiO_2 ve Al_2O_3 oranlarının nispeten yüksek olması, malzemenin aşınma direncinin iyi olacağının kimyasal bir göstergesidir.

Tablo 1. Işıkkara Köyü (Ilıca/Kütahya) bazalt örneklerine ait kimyasal analiz sonuçları.

	EB1-1	EB2-1	EB3-1	EB4-1	EB5-1	EB6-1
SiO₂	56,54	51,34	54,54	52,53	53,24	53,11
Al₂O₃	17,08	15,12	16,12	15,30	15,94	16,05
Fe₂O₃	7,87	7,02	7,67	7,78	7,54	7,74
MgO	1,56	2,23	4,88	4,87	5,00	4,83
CaO	5,80	10,81	8,24	8,95	8,42	8,23
Na₂O	3,05	2,77	2,89	2,72	3,04	3,02
K₂O	2,40	2,45	2,13	2,05	2,25	2,23
TiO₂	1,01	0,91	0,96	0,93	0,94	0,95
P₂O₅	0,27	0,24	0,24	0,23	0,25	0,26
MnO	0,05	0,14	0,11	0,19	0,13	0,12
Cr₂O₃	0,017	0,008	0,011	0,016	0,010	0,016
LOI	3,9	6,6	1,8	4,0	2,8	3,0
Sum	99,86	99,91	99,86	99,86	99,86	99,85
Ba	1220	1196	1064	1117	1131	1130
Sr	936	909	911	1023	972	970
Zr	161	145	154	139	162	151
Y	23	23	24	22	24	24
Nb	13	12	12	12	15	16
Sc	22	20	24	25	22	22

Şekil 5. Numunelerin (Winchester ve Floyd (1977) sınıflama diyagramı.



Kaynak: Winchester ve Floyd (1977)

Fiziksel ve Mekanik İncelemeler

Işıkkara (Ilıca) bazaltlarının demiryolu balastı olarak kullanılabilirliğinin belirlenmesi amacıyla, TCDD Demiryolu Araştırma ve Teknoloji Merkezi (DATEM) laboratuvarlarında ilgili TS EN standartlarına uygun olarak fiziksel ve mekanik deneyler gerçekleştirilmiştir.

Fiziksel ve Geometrik Özellikler

Kayaçların fiziksel ve geometrik özellikleri; balast tabakasının stabilitesi, yük dağıtma kapasitesi ve drenaj kabiliyeti üzerinde belirleyici rol oynamaktadır. TS EN 1097-6 standardına

göre yapılan deneyler sonucunda; numunelerin etüv kurusu tane yoğunluğu 2,77 t/m³ olarak belirlenmiştir. Yüksek yoğunluk, balastın hat üzerinde sabit kalmasına ve yanal kuvvetlere direnç göstermesine katkı sağlar. Su emme oranı ise %0,7 olarak tespit edilmiş olup, bu değer malzemenin donma-çözülme etkilerine karşı dirençli olduğunu ve düşük poroziteye sahip olduğunu göstermektedir.

Demiryolu balastında tanelerin şekli, hat stabilitesi için hayati öneme sahiptir. Yassı ve uzun taneler yük altında kolay kırılabilceği ve yeterli kenetlenmeyi sağlayamayacağı için istenmez. Bu kapsamda yapılan TS EN 933-3 deneyinde Yassılık İndeksi (FI) %11, TS EN 933-4 deneyinde ise şekil İndeksi (SI) %8 olarak  l lm ştir.

Elde edilen bu düşük indeks değerleri; Işıkkara bazaltlarının yassı veya iğnemsiz değil, kübik (eş boyutlu) ve köşeli bir yapıya sahip olduğunu kanıtlamaktadır. Bu geometrik yapı, balast tabakasında yüksek sürtünme açısı ve m kemmek bir kenetlenme (interlocking) sağlayarak hat bozulmalarını (oturma, eksen kayması) minimize edecektir.

Tane Boyutu Dağılımı (Granülometri)

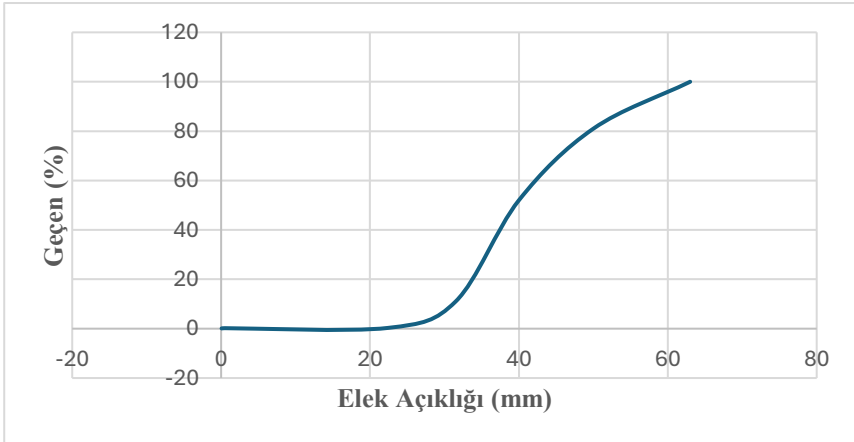
Demiryolu balastının yükleri traverslerden alıp alt yapıya güvenli bir şekilde iletmesi ve yeterli su drenajını sağlayabilmesi için uygun bir tane boyutu dağılımına (gradasyona) sahip olması gerekmektedir. Işıkkara bazaltlarının granülometrik özelliklerini belirlemek amacıyla TS EN 933-1 standardına uygun olarak kuru eleme analizi yapılmıştır. Toplam 52,115 kg numune üzerinde gerçekleştirilen elek analizi sonucunda elde edilen gradasyon eğrisi değerleri Tablo 2’de sunulmuştur (şekil 6). Analiz sonuçlarına göre; malzemenin %100’ünün 63 mm elekten geçtiği, ince malzeme oranının (elek altı) ise %1’in altında (%0,3) kaldığı görülmektedir.

Elde edilen dağılım, malzemenin üniform (eş biçimli) bir yapıya yakın olduğunu ve balast tabakasında boşluk oranını koruyarak yüksek drenaj kapasitesi sağlayacağını göstermektedir. Bu gradasyon özellikleri, TCDD teknik şartnamesinde belirtilen referans eğriler (zarf aralıkları) ile uyumluluk göstermektedir.

Tablo 2. Bazalt örneklerine ait tane boyut dağılım sonuçları

Tane Boyut Dağılımı TS EN 933-1				
Numune Ağırlığı:52.115 gr				
Elek Açıklığı (mm)	Elekte Kalan (gr)	Elekte Kalan (gr)	Elekte Kalan (gr)	Elekten Geçen (%)
63	0	0	0	100
50	9.858	9.858	19	81
40	15.362	25.220	48	52
31.5	21.196	46.416	89	11
22.4	5.553	51.969	99.7	0.3
0.5	40.1	52.009	99.8	0.2
0.063	38.9	52.048	99.9	0.1

Şekil 6. Işıkkara (Kütahya) kırma bazalt agregaların Tane boyut dağılım grafiği



Işıkkara bazaltlarının tane boyutu dağılım eğrisi (Semilogaritmik). Grafik incelendiğinde; malzemenin gradasyon eğrisinin TCDD teknik şartnamesinde 31,5-63 mm balast sınıfı için öngörülen referans zarf aralığına uyumlu olduğu ve "S" tipi (uniform) bir dağılım sergilediği görülmektedir.

Mekanik ve Atmosferik Dayanıklılık

Demiryolu balastı, üzerinden geçen tonlarca yükün yarattığı mekanik streslerin yanı sıra iklimsel zorluklara da direnç göstermelidir. Kayaçların donma-çözülme döngülerine ve atmosferik etkilere karşı direncini (sağlamlık/soundness) belirlemek amacıyla TS EN 1367-2 standardına uygun olarak Magnezyum Sülfat ($MgSO_4$) deneyi yapılmıştır.

31,5-50 mm fraksiyonu üzerinde gerçekleştirilen 5 döngülük test sonucunda kütle kaybı sadece %1 olarak ölçülmüştür. İlgili standartlarda (TS EN 13450) izin verilen maksimum kaybın %18 olduğu göz önüne alındığında, Işıkkara bazaltlarının atmosferik bozunmaya karşı direncinin çok yüksek olduğu görülmektedir.

Ayrıca, malzemenin dinamik yükler altındaki parçalanma direncini (mekanik aşınma) belirlemek için TS EN 1097-2 standardına göre Los Angeles (LA) aşınma deneyi gerçekleştirilmiştir.

Deney sonucunda %12,64'lük bir aşınma kaybı elde edilmiştir. Bu değer, TCDD teknik şartnamesinde belirtilen sınır değerlerin (genellikle <%15-20) oldukça altındadır. Elde edilen bu sonuçlar; malzemenin hem mekanik darbelere hem de fizikokimyasal ayrışmalara karşı uzun ömürlü, yüksek performanslı bir balast malzemesi olacağını kanıtlamaktadır (Tablo 3).

Tablo 3. Deney sonuçlarının standart değerler ile karşılaştırılması.

Deney Adı	Standart		Sonuç	TCDD Limiti	Değerlendirme
Tane Yoğunluğu	TS EN 1097-6	40 - 63 mm	2,77 t/m ³	-	Yüksek
Su Emme Oranı	TS EN 1097-6	40 - 63 mm	% 0,7	≤ % 1,5	Uygun
Yassılık İndeksi (FI)	TS EN 933-3	31.5-63mm	% 11	≤ % 35	Mükemmel
Şekil İndeksi (SI)	TS EN 933-4	31.5-50 mm	% 8	≤ % 20	Mükemmel
Los Angeles (LA)	TS EN 1097-2	25 - 40 mm	% 12,64	≤ % 20	Çok Sert
Magnezyum Sülfat	TS EN 1367-2	31,5 - 50 mm	% 1	≤ % 18	Dayanıklı

SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, Kütahya ili Işıkkara (Ilıca) mevkiinde yüzeylenen bazaltların demiryolu balast malzemesi olarak kullanılabilirliği; mineralojik, petrografik, jeokimyasal, fiziksel ve mekanik yöntemlerle detaylı bir şekilde araştırılmıştır. Elde edilen bulgular ve TCDD Teknik Şartnameleri (TS EN 13450) çerçevesinde yapılan değerlendirmeler aşağıda özetlenmiştir:

- Petrografik ve Mineralojik Uygunluk: İnceleme alanındaki bazaltlar, hipokristalin porfirik dokuya sahip olup; ana bileşen olarak plajiyoklaz (labrador), klinopiroksen (ojit) ve olivin minerallerinden oluşmaktadır. Kayaçların birbirine kenetlenmiş (interlocking) kristal dokusu, mekanik dayanımı artıran en temel faktör olarak belirlenmiştir. XRD analizlerinde yer yer alterasyon ürünlerine (smektit vb.) ve

jeokimyasal analizlerde (bazı numunelerde %6,6'ya varan LOI) ikincil dolgulara rastlanmış olsa da; bu oluşumların kayacın genel makro-performansını olumsuz etkileyecek boyutta olmadığı mekanik testlerle doğrulanmıştır.

- Mekanik Dayanım ve Sertlik: Balast malzemesinin tren yükleri altındaki performansını belirleyen en kritik parametre olan Los Angeles (LA) aşınma kaybı %12,64 olarak tespit edilmiştir. Bu değer, TCDD'nin Yüksek Hızlı Tren (YHT) ve Konvansiyonel Hatlar için öngördüğü sınır değer (LA $\leq$ 20) oldukça altındadır. Sonuçlar, Işıkkara bazaltlarının "çok sert/yüksek dayanımlı" kayaç sınıfında olduğunu ve işletme sırasında oluşacak dinamik darbelere karşı yüksek direnç göstereceğini kanıtlamaktadır.
- Atmosferik Dayanıklılık: Malzemenin iklimsel koşullara (donma-çözülme) karşı direncini simüle eden Magnezyum Sülfat deneyi sonucunda kütle kaybı sadece %1 olarak ölçülmüştür. Su emme oranının da %0,7 (düşük) seviyesinde olması, malzemenin gözenekliliğinin az olduğunu ve en zorlu kış koşullarında bile fiziksel bozunmaya uğramadan stabilitesini koruyacağını göstermektedir.
- Fiziksel ve Geometrik Yapı: Tane yoğunluğunun $2,77 \text{ t/m}^3$ olması, balast tabakasının yanal ve düşey kuvvetlere karşı direncini artıracak niteliktedir. Ayrıca, Yassılık İndeksi (%11) ve Şekil İndeksi (%8) değerlerinin standart limitlerin çok altında olması; malzemenin istenen kübik forma sahip olduğunu göstermektedir. Bu geometrik yapı, balast taneleri arasında maksimum kenetlenmeyi (interlocking) sağlayarak hat geometrisinin bozulmasını engelleyecektir.

Tüm laboratuvar verileri bütüncül olarak değerlendirildiğinde; Işıkkara (Ilıca) bazaltlarının TS EN 13450 standartlarına ve TCDD Balast Teknik Şartnamesi'ne tam uyum sağladığı belirlenmiştir. Söz konusu malzeme; yüksek aşınma direnci, mükemmel atmosferik dayanımı ve uygun geometrik yapısı sayesinde sadece Konvansiyonel Hatlarda değil, daha katı standartlar gerektiren Yüksek Hızlı Tren (YHT) ve Ağır Yük (Heavy Haul) demiryolu projelerinde balast malzemesi olarak güvenle kullanılabilir.

KATKI BELİRTME

Bu çalışma, Afyon Kocatepe Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü Mustafa BAYHAN' ın Bitirme Tezi çalışmasının bir bölümüne ait bilgileri kapsamaktadır.

KAYNAKLAR

Bassey, E. E., Okeke, O. C, Amadi, A. N. (2020). Geotechnical evaluation of some igneous rocks in parts of Oban Massif for use as railway ballast. Journal of King Saud University-Science, 32(8), 3376-3384.

Bayrak, M. (2018). Farklı kökenli kayaçların demiryolu balastı olarak kullanılabilirliğinin araştırılması (Yüksek Lisans Tezi). Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyonkarahisar.

Brinkmann, R. (1966). Geotektonische Gliederung von Westanatolien. Neues Jahrbuch für Geologie und Paläontologie-Monatshefte, 10, 603-618.

Demirbilek, M. (2005). Kütahya civarının jeolojisi ve aktif tektoniği (Yüksek Lisans Tezi). Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kütahya.

Gün, H. Akdeniz, N. Kaptan, R. (1979). Gediz ve Emet güneyi (Kütahya) ile Simav (Kütahya) ve Dursunbey (Balıkesir) yöresindeki Neojen havzalarının jeolojisi ve kömür olanakları (Rapor No: 6547). Ankara: Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü (Yayımlanmamış).

Kozak, M. (2010). Demiryolu mühendisliği. İzmir: TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası İzmir Şubesi Yayınları.

Kozak, M. (2011). Demiryolu balast malzemesi özellikleri ve deney yöntemleri. Yapı Dünyası Dergisi, 172, 35-42.

Kozak, M. (2012). Demiryolu balast malzemesi seçimi ve performans kriterleri. TMMOB Jeoloji Mühendisleri Odası Haber Bülteni, 1, 44-53.

Kozak, M. (2021). Demiryolu üstyapı tekniği ve bakımı. Ankara: Nobel Akademik Yayıncılık.

Nålsund, R. (2014). Railway ballast characteristics, selection criteria and performance (PhD Thesis). Norwegian University of Science and Technology (NTNU), Trondheim.

Oğul, K. Gürer, C. Çetin, T. (2012). Demiryolu balast malzemelerinin bozulma nedenleri ve performans değerlendirmesi. Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi, 12(1), 1-10.

Okay, A. I. (1981). Geology of the Tavşanlı Zone. Bulletin of the Mineral Research and Exploration, 95, 1-17.

Okay, A. I. (1986). High-pressure/low-temperature metamorphic rocks of Turkey. Geological Society of America Memoirs, 164, 333-348.

Okonta, F.N. Magagula, S.G. (2011). Railway ballast fouling and its implications on track performance. Proceedings of the 15th African Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Maputo, Mozambique.

Özcan, A. Göncüoğlu, M. C. Çakan, U. (1988). Kütahya-Çifteler-Bayat-İhsaniye yöresinin jeolojisi (Rapor No: 8156). Ankara: Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü.

Özkul, C. Temizel. İ. Özburan. M. Arslan, M. Kibici, Y. (2022). Geochronology and geochemistry of the Miocene volcanics from the Kütahya area: Constraints for postcollisional magmatism in western Anatolia, Turkey. Journal of African Earth Sciences, 195, 1-17, 2022.

Raymond, G. P. (1985). Research on geotechnical properties of ballast. Transportation Research Record, 1006, 16-24.

Şengör, A. M. C. & Yılmaz, Y. (1981). Tethyan evolution of Turkey: A plate tectonic approach. Tectonophysics, 75(3-4), 181-241.

TCDD. (2016). Demiryolu hat bakım el kitabı. Ankara: T.C. Ulaştırma Denizcilik ve Haberleşme Bakanlığı.

Temizel, İ. Arslan, M. Özkul, C. Özburan, M. (2024). Kütahya (Batı Anadolu) ve çevresinde yüzeylenen Miyosen yaşlı volkanik kayaların mineral kimyası ve püskürme öncesi kristallenme koşulları, Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi (PAJES), cilt. 30 (4), 564-585.

Türk Standartları Enstitüsü. (2004). Demiryolu balastı için agregalar (TS EN 13450). Ankara.

Türk Standartları Enstitüsü. (2004). Doğal taşlar- Terimler ve tarifler (TS 5694 EN 12670). Ankara.

Türk Standartları Enstitüsü. (2008). Doğal taşlar- Deney taşlar- Petrografik inceleme (TS EN 12407). Ankara.

Türk Standartları Enstitüsü. (2009). Agregaların geometrik özellikleri için deneyler- Bölüm 4: Tane şeklinin tayini- Şekil indisi (TS EN 933-4). Ankara.

Türk Standartları Enstitüsü. (2011). Agregaların termal ve bozunma özellikleri için deneyler- Bölüm 2: Magnezyum sülfat deneyi (TS EN 1367-2). Ankara.

Türk Standartları Enstitüsü. (2012). Agregaların geometrik özellikleri için deneyler- Bölüm 1: Tane büyüklüğü dağılımı tayini- Eleme metodu (TS EN 933-1). Ankara.

Türk Standartları Enstitüsü. (2012). Agregaların geometrik özellikleri için deneyler- Bölüm 3: Tane şeklinin tayini- Yassılık endeksi (TS EN 933-3). Ankara.

Türk Standartları Enstitüsü. (2013). Agregaların mekanik ve fiziksel özellikleri için deneyler- Bölüm 6: Tane yoğunluğunun ve su emme oranının tayini (TS EN 1097-6). Ankara.

Türk Standartları Enstitüsü. (2020). Agregaların mekanik ve fiziksel özellikleri için deneyler- Bölüm 2: Parçalanma direncinin tayini için metotlar (Los Angeles deneyi) (TS EN 1097-2). Ankara.

Winchester, J. A. & Floyd, P. A. (1977). Geochemical discrimination of different magma series and their differentiation products using immobile elements. Chemical Geology, 20, 325-343.

Yılmaz, N. (2015). Volkanik kayaçların demiryolu balastı olarak kullanılabilirliğinin araştırılması (Yüksek Lisans Tezi). Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.

**ARAÇ VE DEMİRYOLU TİTREŞİMLERİNİN
BİNALARA ETKİLERİ VE GÜVENLİ YAPI
YAKLAŞMA MESAFESİNİN TESPİTİ**

**EFFECTS OF VEHICLE AND RAILWAY
VIBRATIONS ON BUILDINGS AND
DETERMINATION OF SAFE BUILDING
APPROACH DISTANCE**

1. Mustafa CEVHER¹

2. Emir Yalçın AKSOP²

3. Mustafa SOYDABAŞ³

Abstract

The passage of road and railway vehicles causes vibrations in buildings, especially in areas with heavy traffic. These vibrations have negative effects on the durability, comfort and longevity of structures. Intermittent vibrations or continuous vibrations can cause damage to structural elements in continuity. When the frequency of vibration coincides with the frequency of structural elements such as walls, floors and load-bearing elements, each with different natural frequencies, it can be 0.5 - 5 times more effective

¹Kocaeli Büyükşehir Belediyesi, Ulaşım Planlama Müdürlüğü, Jeofizik Mühendisi, İzmit/KOCAELİ İlgili yazar /corresponding author: mcevher_@hotmail.com

² Kocaeli Büyükşehir Belediyesi, Ulaşım Planlama Müdürlüğü, İnşaat Yük. Mühendisi, İzmit/KOCAELİ

³ Kocaeli Büyükşehir Belediyesi, Mimar, İzmit/KOCAELİ

due to the resonance effect and causes various damages depending on the height or size of the building. The effect of vibrations on buildings in the city is a vital issue in terms of building safety, which combines the disciplines of construction, geophysical engineering and urban planning elements. Determining the correct approach distance ensures that buildings are long-lasting and safe, while also increasing user comfort. In this article, the effects of road and railway vehicle vibrations on buildings, the determination of safe building approach distances to railways and highways, and the measures that can be taken to reduce these effects will be examined.

Keywords: *Soil Dominant Period, Resonance, Buildings*

Giriş

Hızlı şehirleşme süreciyle birlikte ulaşım altyapısı kent yaşamının ayrılmaz bir parçası haline gelmiş, bu durum trafik kaynaklı titreşimlerin yapı ve insan üzerindeki etkilerini önemli bir araştırma konusu kılmıştır. Taşıt trafiğinden yayılan bu titreşimler, hem insan sağlığını tehdit etmekte hem de yapıların taşıyıcı sistemlerinde ve genel bütünlüğünde hasarlara yol açabilmektedir. Zemin içerisinde yayılan titreşim dalgaları, ortamın fiziksel ve mekanik parametrelerine bağlı olarak farklı frekans ve genlik değerleri sergilemekte; bu da zemin koşullarına göre değişkenlik gösteren yapısal davranışların ortaya çıkmasına neden olmaktadır. Bu kapsamda, zeminlerin dinamik yükler altındaki tepkilerinin önceden belirlenebilmesi, olası yapısal risklerin minimize edilmesi açısından kritik bir öneme sahiptir. Titreşim dalgalarının zemin ortamındaki iletimini belirleyen en temel unsurlardan biri, zeminin hakim titreşim frekansı veya doğal periyodudur. Teknik yönetmeliklerde bu etkiler sınır değerlerle tanımlanmış olsa da, farklı zemin türleri için yol ve bina arasında bırakılması gereken güvenli mesafelere dair literatürdeki çalışmaların oldukça sınırlı olduğu görülmektedir. Güvenli uzaklıkların saptanması ve iletilen titreşim enerjisinin azaltılması için yalnızca görsel incelemeler yeterli olmayıp; uluslararası standartlara uygun ölçüm, analiz ve teknik değerlendirmelerin yapılması gerekmektedir. Özellikle artan karayolu ve demiryolu yatırımları ışığında, zemin davranışlarının doğru analiz edilmesi hem ekonomik kayıpların önlenmesi hem de toplumsal faydanın artırılması adına zorunluluk arz etmektedir.

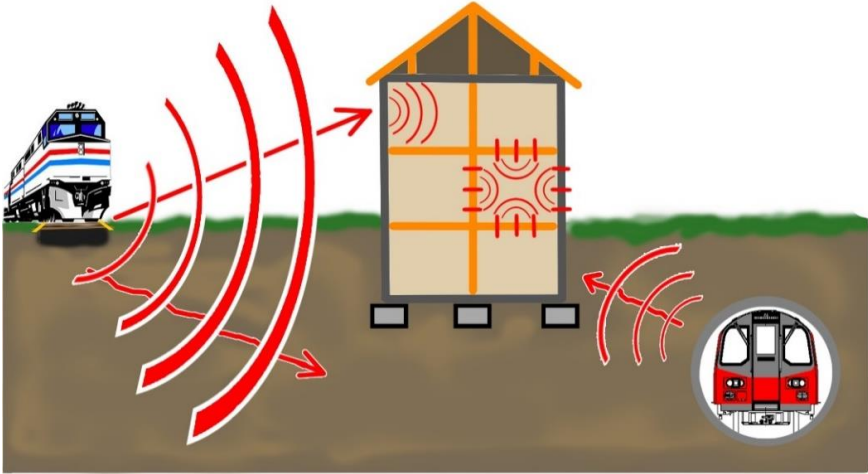
TİTREŞİMLERİN KAYNAKLARI

Karayolunda seyreden araçlar, yol yüzeyinde bulunan bozulmalar, çatlaklar ve benzeri düzensizlikler nedeniyle titreşim üretmektedir. Bunun yanı sıra, motor ile diğer mekanik aksamaların çalışması sırasında da belirli frekans aralıklarında titreşimler oluşur. Ortaya çıkan bu titreşimler zemin yüzeyine iletilerek çevredeki yapılara aktarılır. Karayolu trafiği, demiryolu taşımacılığı ve diğer titreşim kaynakları, oluşturdıkları titreşim düzeyleri bakımından birbirinden farklı özellikler gösterir. Bu kaynaklar, frekans, genlik ve yayılım yönü açısından değişkenlik göstermekle birlikte yaklaşık 0.1 Hz ile 500 Hz aralığında titreşimlere neden olmaktadır (Şekil 1). Titreşimin etkisi, uyarıcı kaynağın frekansının zemin ya da yapının doğal frekansına eşit veya bu değerlere yakın olması durumunda belirgin şekilde artmaktadır. Örneğin çakıllı bir yol üzerinde araç çok düşük ya da çok yüksek hızla ilerlediğinde, orta hızda seyredilmesine kıyasla daha az titreşim hissedilmesi, bu frekans uyumu etkisinin bir sonucudur (Şekil 2).



Şekil 1. Karayolu titreşiminin yayılımı

Yapının malzemesi, yüksekliği, temeli ve yapısal tasarımı, titreşimlerin etkisini belirler. Örneğin, yüksek binalar daha az titreşim alabilirken, düşük binalar daha fazla etkilenebilir. Zemin hakim titreşim frekansı ve bina yüksekliklerine göre rezonans bölgesi ve titreşimin etkisi $T_A = 0.5T_z$ ve $T_B = 1.5T_z$ formülleri ile hesaplanabilmektedir. (Keçeli & Cevher, Zemin Hakim Periyodu Bina Yüksekliği Rezonans İlişkisi, 2018). Zemin tipleri de titreşim iletiminde büyük rol oynar. Sert zeminler titreşimi daha az iletirken, yumuşak zeminler titreşimi daha fazla iletebilir. Raylı sistemlerde Enerjinin lokomotif ve vagonlardan tekerleklerle, oradan raya, rayın bastığı zemine ve toprağa iletilmesiyle oluşan titreşim yapının toprak altındaki bölgelerine ve temeline ulaşır. Raylardaki düzgünlük, lokomotifin mekanik durumu, vagonların bakımı ve tekerlekler titreşim açısından önemli etkenlerdir. Bu araçların ağırlığının ve hızının yüksek olması, elemanlar arasındaki temasların sert olması titreşim değerlerini karayoluna göre arttırıcı sebeplerdir (Şekil 2).



Şekil 2. Demiryolu titreşiminin yayılımı

Hız Tümsekleri

Yol tümsekleri ve hız yastıkları, yerleşim alanlarında araç hızlarını kontrol etmek için kullanılır. Araçlar bu profillerin üzerinden geçtiğinde zemin özelliklerine göre yerden kaynaklanan titreşimler üretilir ve bazı durumlarda bitişik binalarda algılanabilir seviyelere ulaşabilmektedir. Ortaya çıkan bu titreşimlerin genliği ve frekanslarını etkileyen faktörler arasında hız tümseğinin yapısı, zeminin jeolojik yapısı, tümsekten geçen araçların hızı ve ağırlıkları yer almaktadır. Özellikle, ağır vasıtaların yaratacağı titreşimlerin genliği daha fazla olacaktır. Bu durumu göz önüne alarak, ağır vasıtaların hız tümseklerinden geçişleri ile çeşitli yapılardaki titreşim etkileşimlerini dikkate alacak şekilde hız tümseklerinin yapılması gerekmektedir.

TİTREŞİMLERİN BİNALARA ETKİLERİ

Yapısal Etkiler Ve Titreşim Rezonans İlişkisi

Binalara ulaşan titreşimler, zamanla yapısal hasara yol açabilir. Özellikle zayıf zemin koşullarında inşa edilen yapılar, titreşimlerden daha fazla etkilenmektedir. Sürekli olarak titreşimlere maruz kalınan, binaların yapısal bütünlüğü zayıflayabilir. Özellikle eski binalarda bu durum daha belirgin olabilir. Yapıların çatlamasına veya deformasyona yol açabilir, taşıyıcı elemanlarında çatlaklar ve deformasyonlara neden olabilir. Titreşimlerde zemin-bina etkileşimi ile oluşan bina titreşim genliğinin büyümesi olayı bina rezonansa girmesi olarak adlandırılır. Zemin titreşim frekansı ile bina öz frekansının aynı olması durumunda binayı titreştiren kuvvet aynı doğrultuda olacağından, aynı doğrultudaki iki kuvvetin toplamı büyüyeceğinden bina titreşiminin genliği de büyür, daha büyük salınım yapar, dolayısıyla ivmesi büyür. Titreşim esnasında herhangi bir bina rezonansa girerse binanın titreşim genliği büyümesi oranında hasar derecesi de ona göre artar. Oluşabilecek hasarlar (ince çatlak), orta hasar (geniş çatlak), büyük hasar (yapı elemanlarının

zarar görmesi) olarak sınıflandırılmıştır. Kozmetik hasar: Bölme duvarda, sıvada, blok malzeme derzlerinde saç teli kalınlığında çatlaklar oluşmasıdır. Orta hasar: Duvarlarda, kirişlerde geniş (10 mm) çatlakların oluşması ve tavan sıvalarının dökülmesi durumudur. Büyük hasarlar: Kolon ve kirişlerde çok geniş (25 mm) çatlakların meydana gelmesi, bağlantıların gevşemesi, yapı elemanlarının bozulmasıdır.

İç Mekân Konforu

Titreşimler yalnızca yapının dış görünümünü değil, aynı zamanda iç mekân konforunu da etkiler. Sürekli olarak hissedilen titreşimler, iç mekanlardaki eşyaların yer değiştirmesine, gürültüye ve insanların rahatsız hissetmesine neden olabilir. Bu durum, kullanıcıların yaşam kalitesini olumsuz yönde etkiler.

Güvenli Yapı Yaklaşma Mesafeleri

Güvenli yapı yaklaşma mesafesinin belirlenmesi birçok değişkene bağlı bir süreçtir. Öncelikle titreşim kaynağının türü önem taşımaktadır; karayolu trafiği, demiryolu hatları ve diğer titreşim kaynakları, oluşturdukları titreşim düzeyleri açısından birbirinden farklı etkilere sahiptir. Bu kaynakların hangi frekans aralıklarında titreşim ürettikleri, yapıların maruz kalacağı etkiyi doğrudan belirleyen temel unsurlardan biridir. Bununla birlikte zemin koşulları da titreşimin yayılımında kritik bir rol oynamaktadır. Sert ve dayanımlı zeminler titreşimi daha sınırlı ölçüde iletirken, yumuşak zeminlerde titreşimlerin daha fazla büyüyerek iletildiği bilinmektedir. Zemin özelliklerine bağlı olarak yapılara aktarılan titreşimlerin farklı düzeylerde hasara yol açabilmesi nedeniyle, şehir içi ulaşım yolları, kavşaklar, hafif raylı sistem hatları ile alt ve üst geçitlerin planlandığı veya inşa edileceği alanlarda yol güzergâhlarının, binalara zarar vermeyecek mesafelerde tasarlanması gerekmektedir. Bu amaçla, farklı tonajlardaki araçların

oluşturacağı titreşimler, zemin türüne bağlı olarak arazide jeofizik yöntemler kullanılarak (ivmeölçer ve mikrotremor ölçümleri gibi) belirlenmeli; elde edilen veriler ilgili yönetmelik hükümleri doğrultusunda değerlendirilerek güvenli yapı yaklaşma mesafeleri hesaplanmalıdır. Zemin türünün alüvyon, kaya veya balçık gibi farklı özellikler göstermesi, söz konusu güvenli mesafelerin kimi durumlarda azalmasına, kimi durumlarda ise artmasına neden olabilmektedir.

İmar Planları Ve Güvenli Yapı Yaklaşma Mesafesi

İmar planları; yerleşme, çalışma, sosyal ve kültürel gereksinimler, dinlenme, ulaşım gibi kentsel fonksiyonlar arasında, olanaklar çerçevesinde en iyi çözümü, koruma ve kullanma dengesini en rasyonel biçimde belirleyerek, belde halkına iyi yaşam düzeyi koşulları ve fiziksel çevreyi oluşturmak amacı ile yapılır. Bu nedenle imar planlarının mevcut sorunlara çözüm üretmesi ve aynı zamanda gelecekteki ihtiyaçlara cevap verebilmesi gerekmektedir. İmar planlarında Yapı yaklaşma mesafeleri yol kademelenmesi ve genişliği, plandaki fonksiyon, parsel büyüklüğü, yapı nizamı ve mevcut teşekkül durumlarına göre ilgili mevzuat çerçevesinde belirlenir. Yapı yaklaşma Mesafeleri bırakılırken kriterler içinde karayolu araç ve demiryolu titreşimleri bir kriter olarak dikkate alınmamaktadır. Bu durum titreşimden kaynaklı yapı hasarlarını artırmakta ülkemiz ekonomisine büyük zararlar vermektedir. Yapılaşma öncesi 1/5000 Nazım ve 1/1000 Uygulama İmar planları yapımına esas zemin araştırma etütlerinde güvenli yapı yaklaşma mesafesinin belirlenmesine yönelik jeofizik titreşim ölçümleri yapılmalı ve şehir plancılarına bir kriter olarak değerlendirilmek üzere sunulmalıdır. Mevcut yapılaşmış şehir ve ilçelerde zarar azaltmak için yerleşim alanlarında titreşim haritaları yapılmalı yüksek titreşim ve az titreşim yaratan karayolu araç ve demiryolu güzergahları tespit edilmelidir. Yüksek titreşim yaratan binaların

etkilendiği güzergahlarda çeşitli inşa ve yalıtım önlemleri alınmalıdır. şehrin ihtiyacı doğrultusunda yol ve demiryolu geçirilecek yeni güzergah yapımlarında ise maksimum titreşim yaratabilecek ağırlıktaki araçların yarattığı titreşimler zeminlerde ölçölerek güzergah boyunca titreşim ölçölmleri yapılmalı güvenli şekil 3’de tanımlanan yapı yaklaşma mesafesi Çizelge 1’de verilen yönetmelik kapsamında binalar zarar görmeyecek şekilde belirlenmelidir. Titreşimlerden en çok etkilenen yol çevresindeki binalardır. Planlama sırasında titreşim değerlerine göre minimum mesafenin belirlenmesi gereklidir. Bu mesafenin uzunluğu planlamaya imkân tanı mıyorsa titreşimden korunmak için gerekli inşa tedbirlerin alınmasına yönelik plan notu işlenmesi önem arz etmektedir. Titreşim haritalarında Hesaplanan titreşim değerlerinin uzman şehir plancıları tarafından planlama sürecinde kullanılmasıyla, imar planlarında yapılacak değerlendirme ve hesaplamalar, titreşimin binalarda etkisini engellemede önemli rol oynayacaktır. Her türlü ulaşım güzergahlarının binalara yaklaşma mesafeleri zemin yapısı ve titreşime bağlı olarak değiştiği için ölçölmlere göre önceden önlem alınabilmektedir.



Şekil 3. Güvenli yapı yaklaşma mesafesi

TİTREŞİMLERİN ÖLÇÜLMESİ VE ANALİZİ

Türkiye’de titreşim ölçümleri ve değerlendirmelerine ilişkin yasal düzenlemeler, Çevre, Orman ve Şehircilik Bakanlığı tarafından yayımlanan ve 30.11.2022 tarihli, 32029 sayılı Resmî Gazete’de yürürlüğe giren Çevresel Gürültünün Değerlendirilmesi ve Yönetimi Yönetmeliği kapsamında tanımlanmıştır. Titreşim kaynaklı yapı hasarlarının önlenmesi amacıyla, imar planlarında ulaşım güzergâhları belirlenirken yapılara olan yaklaşma mesafelerinin dikkatle değerlendirilmesi gerekmektedir. Benzer şekilde, mevcut yerleşim alanlarında yeni yol güzergâhları planlanırken de zemin koşullarının oluşturduğu titreşim düzeylerinin, Çizelge 1’de belirtilen yönetmelik sınırları içerisinde kalıp kalmadığı mutlaka

incelenmelidir. Bu doğrultuda, yapıların zarar görmesini engelleyecek güvenli yaklaşma mesafeleri yönetmelik hükümlerine uygun şekilde belirlenmelidir. Zemin özelliklerinin mevcut titreşim etkilerini yeterince sönümleyemediği durumlarda ise, yapılan titreşim ölçümleri esas alınarak çeşitli mühendislik ve yapısal önlemler uygulanmakta; böylece titreşim frekansları düşürülebilmekte ve gerekli görüldüğünde yaklaşma mesafeleri yeniden düzenlenebilmektedir. Tüm ulaşım güzergâhlarının oluşturduğu titreşimlerin Çizelge 1’de, inşaat faaliyetlerinden kaynaklanan titreşimlerin ise Çizelge 2’de belirtilen sınır değerler içerisinde kalması, yönetmelik gereği zorunlu tutulmaktadır.

Çizelge 1. Demiryolu ve karayolu ulaşım araçları, işyerleri ve endüstri tesislerinin en yakın yapıda oluşturacağı zemin titreşimleri ile bina içindeki makine ve teçhizatın oluşturacağı zemin titreşimlerinin izin verilen en yüksek değerleri.

	<i>Titreşim Frekansı (Hz)</i>	<i>İzin Verilen En Yüksek Titreşim Hızı (rms değeri (mm/s))</i>
<i>Konutlarda</i>	<i>1⁽¹⁾</i>	<i>1.5</i>
	<i>8-100</i>	<i>0.3</i>
<i>Ofislerde</i>	<i>1⁽²⁾</i>	<i>3.5</i>
	<i>8-100</i>	<i>0.6</i>
<i>Tarihi ve doğal yapılarda ⁽⁴⁾</i>	<i>1⁽³⁾</i>	<i>0.8</i>
	<i>8-100</i>	<i>0.1</i>

(1) :İzin verilen en yüksek titreşim hızı belirtilen değerlerle logaritmik çizilen grafikte, titreşim frekansına göre belirlenir.

Örneğin 1 Hz-8 Hz arasında, 1.5 mm/sn'den 0.3 mm/sn'ye logaritmik çizilen grafikte doğrusal olarak azalmaktadır.

(2) :İzin verilen en yüksek titreşim hızı belirtilen değerlerle logaritmik çizilen grafikte, titreşim frekansına göre belirlenir.

Örneğin 1 Hz-8 Hz arasında, 3.5 mm/sn'den 0.6 mm/sn'ye logaritmik çizilen grafikte doğrusal olarak azalmaktadır.

(3) :İzin verilen en yüksek titreşim hızı belirtilen değerlerle logaritmik çizilen grafikte, titreşim frekansına göre belirlenir.

Örneğin 1 Hz-8 Hz arasında, 0.8 mm/sn'den 0.1 mm/sn'ye logaritmik çizilen grafikte doğrusal olarak azalmaktadır.

(4) :Tarihi ve doğal yapılar için belirlenen bu sınır değerler, yerinde yapılacak hassas, kapsamlı titreşim ölçümleri ve ilgili bilimsel çalışmalar ile kısıtlanabilir.

Çizelge 2. İnşaatlarda kazık çakma ve benzeri titreşim yaratan operasyonların ve inşaat makinelerinin en yakın yapının dışında oluşturacağı zemin titreşimlerinin izin verilen en yüksek değerleri (1 Hz- 80 Hz arasındaki frekans bantlarında)

İzin Verilen En Yüksek Titreşim Hızı

(Tepe Değeri-mm/s)

	Sürekli Titreşim	Kesikli Titreşim
Yerleşim Alanlarında	5	10
Ticari Alanlarda	15	30
Tarihi ve doğal yapılarda ⁽¹⁾	2	5

(1) Tarihi ve doğal yapılar için belirlenen bu sınır değerler, yerinde yapılacak hassas, kapsamlı titreşim ölçümleri ve bilimsel çalışmalar ile kısıtlanabilir.

Yapılaşmış bölgelerde, demiryolu hatları ve ana arterlerdeki araç trafiği gibi titreşim kaynakları ile yapılar arasındaki uygun mesafenin belirlenebilmesi için öncelikle zemin özelliklerinin ortaya konulması gerekmektedir. Bunun ardından, farklı ağırlıklardaki araçların geçişi sırasında ve trafiğin yoğun olduğu çeşitli zaman dilimlerinde, titreşimlerin kaynaktan yapıya doğru nasıl yayıldığı ve frekans değerlerinin mesafeye bağlı değişimi ölçülmelidir. Titreşim

kaynağından uzaklaştıkça titreşim düzeylerinin azaldığı bilinmekte olup, bu azalmanın gerçekleştiği mesafeler ilgili yönetmelik hükümleri çerçevesinde değerlendirilmelidir. Henüz yapılaşmanın bulunmadığı alanlarda ise, karayollarında taşınmasına izin verilen azami 24 tonluk araç yükünün oluşturacağı titreşimler esas alınmalıdır. Bu durumda, titreşim oluşturulduğu anda arazide hassas mikrotremor ölçüm cihazları kullanılarak kaynaktan itibaren farklı mesafelerde ardışık ölçümler yapılmalı; titreşim değerlerinin Çizelge 1’de belirtilen sınırlar içerisinde kaldığı uzaklık, güvenli yapı yaklaşma mesafesi olarak belirlenmelidir. Güvenli mesafelerin büyük ölçüde zeminlerin titreşim davranışına bağlı olması, bu konuda genel bir sınıflandırma yapılmasını da mümkün kılmaktadır. Kent genelinde benzer özelliklere sahip alüvyon, kaya ve balçık zeminlerde, maksimum taşıt yükleri dikkate alınarak oluşturulan titreşimler ve kaynaktan uzaklaşarak yapılan aralıklı ölçümler sayesinde, titreşimin sönümlendiği ve Çevresel Gürültünün Değerlendirilmesi ve Yönetimi Yönetmeliği’nin Çizelge 1’inde verilen sınır değerler içinde kaldığı mesafeler güvenli yapı yaklaşma mesafesi olarak tespit edilebilir. Bu zemin türlerine ait titreşim yayılımı ve sönümlenme mesafeleri belirlendiğinde, uygulamada kolaylık sağlayacak yaklaşık ve pratik güvenli yapı yaklaşma mesafelerinin tanımlanması mümkün olmaktadır.

ÇEŞİTLİ ZEMİN TÜRLERİNİN TİTREŞİM PERİYOTLARI

Türkiye Bina deprem yönetmeliğinde (TBDY, 2018) tanımlanan zemin gruplarının ZA, ZB, ZC, ZD, ZE, ZF zemin titreşim periyotlarının Çizelge 3’de sismik yöntemlere göre sırasıyla sert zeminlerden yumuşak zeminlere göre yapılan sınıflandırmada titreşim periyodunun zemin mukavemeti azaldıkça büyüdüğü görülmektedir. Zemin tiplerinde zemin titreşim periyodu zemin iyileştirmeleri dışında sabittir. Çizelge- 3 ‘de gösterildiği gibi TBDY, 2018 yerel zemin sınıflarına göre zemin titreşim periyodu 50 metre

derinlik için hesaplanmış (T_A-T_B) spektrum karakteristik periyot değerleri V_s kayma dalga hız değerlerine göre katman kalınlığı ve zemin türüne göre genel olarak tanımlanmıştır. Zemin koşullarına göre oluşan titreşimlere göre (T_A-T_B) aralığı bina doğal periyotlarının bu aralık içerisinde olması durumunda hasar derecesinin artacağını, aralıkların dışında olması durumunda azalacağını ifade etmektedir. Zemin titreşim uç periyotları T_A-T_B sert zeminlerde çok küçükken ($Z_A=0.01 - 0.20$ sn.) arasında iken yumuşak zeminlerde ($Z_F=0.60 - 1.8$ sn.) arasında oldukça büyüktür. Bu durumda yumuşak zeminlerin titreşimi büyütme potansiyelinin daha fazla olduğu ve titreşimin sönümlenme mesafesinin sert zeminlere göre daha uzun olduğu sonucunu çıkarabiliriz.

Çizelge 3. Yerel zemin sınıflarının sismik yöntemlere göre titreşim periyotları

Yerel zemin sınıfı	Zemin cinsi	V_s (m/sn)	Zemin Titreşim periyotları	Zemin Spektrum Karakteristik periyotları (Bina hasar aralığı) T_A-T_B
ZA	Sağlam, sert kayalar	> 1500	0,1	(0.01-0.2)
ZB	Az ayrıışmış, orta sağlam kayalar	760-1500	0,2 sn	(0.1-0.3)
ZC	Çok sıkı kum, çakıl ve sert kil tabakaları veya ayrıışmış, çok çatlaklı zayıf kayalar	360-760	0,3 sn	(0.2-0.5)
ZD	Orta sık - sıkı kum, çakıl veya çok katı kil tabakaları	180-360	0,6 sn	(0.2-0.8)
ZE	Gevşek kum, çakıl veya yumuşak - katı kil	≤ 180	0,8 sn	(0.4-1.2)

	tabakaları veya PI > 20 ve w > % 40 koşullarını sağlayan toplamda 3 metreden daha kalın yumuşak kil tabakası (Cu < 25kPa) içeren profiller		
	Sahaya özel araştırma ve değerlendirme gerektiren zeminler:		
ZF	1) Deprem etkisi altında çökme ve potansiyel göçme riskine sahip zeminler (sıvılaştırılabilir zeminler, yüksek derecede hassas killi, göçebilir zayıf çimentolu zeminler vb), 2) Toplam kalınlığı 3 metreden fazla turba ve/veya organik içeriği yüksek killi, 3) Toplam kalınlığı 8 metreden fazla olan yüksek plastisiteli (PI>50) 4) Çok kalın (>35 m) yumuşak veya orta katı killi.	1,2 sn	(0.6-1.8)

TİTREŞİMLERİN AZALTILMASI İÇİN ALINABİLECEK ÖNLEMLER

Zemin Koşulları

Deprem yer hareketi dışındaki Yoğun trafik yükleri, inşaat aktiviteleri ve patlamalar gibi yüksek frekansta titreşim kaynaklarının binalara etkisi titreşim dalgalarının karakterlerine ve zemin koşullarına bağlıdır. Titreşim kaynaklarının belirtilen zararlı etkilerinden korumak ve en uygun yalıtım modelini belirleyebilmek için zemin ortamında dalga yayılışını iyi anlamak gerekmektedir. Araç ve demir yollarına yakın binalarda araya sismik dalga bariyerleri veya zemin iyileştirmesi yapılarak titreşim seviyesi azaltılabilir. Titreşim etkisi, hasarı, azaltılması, yalıtımı ayrı bir araştırma konusu olduğundan detay verilmemiştir

Yapısal Tasarım

Binaların tasarım aşamasında titreşim etkilerinin en aza indirilmesi için özel mühendislik çözümleri uygulanabilir. Örneğin, titreşim yalıtım sistemleri ve esnek mühendislik tasarımları kullanılabilir.

Ulaşım Altyapısının İyileştirilmesi

Yol yüzeylerinin düzenlenmesi ve araçların hızlarının kontrol edilmesi, titreşimlerin azaltılmasına yardımcı olabilir. Ayrıca, trafikte araç yoğunluğunun azaltılması için toplu taşıma sistemleri teşvik edilebilir.

Yalıtım Malzemeleri

Bina temellerinde ses ve titreşim yalıtım malzemeleri kullanmak, dışarıdan gelen titreşimlerin bina içine girmesini sınırlayabilir. Bu tür yalıtımlar, titreşimlerin etkisini büyük ölçüde azaltabilir.

Sonuçlar

Araç trafiği, demiryolu hatları ve benzeri titreşim kaynakları, oluşturdıkları titreşim düzeyleri bakımından birbirinden farklı etkiler meydana getirmektedir. Bu nedenle, söz konusu kaynakların hangi frekans aralıklarında titreşim ürettiğinin ölçülmesi büyük önem taşımaktadır. Titreşimlerin olumsuz etkilerini azaltabilmek için yalnızca mühendislik temelli yapısal çözümler değil, aynı zamanda ulaşım altyapısına yönelik iyileştirmelerin de birlikte ele alınması gerekmektedir. Ölçülen titreşim değerlerine bağılı olarak alüvyon, kaya ve balçık gibi farklı zemin türleri için güvenli yapı yaklaşma mesafelerinin belirlenmesi, yapılarda oluşabilecek titreşim kaynaklı hasarların azaltılmasına katkı sağlayacaktır.

Mevcut imar planları kapsamında, kentin ihtiyaçları doğrultusunda yeni ulaşım yolları, kavşaklar, hafif raylı sistem hatları ile alt ve üst geçitlerin inşa edilmesi söz konusu olduğunda, yönetmelik hükümleri çerçevesinde araç geçişleri sırasında yol güzergâhı üzerindeki binaların içlerinde veya bina bitişigindeki zeminlerde titreşim ölçümleri yapılmalıdır. Elde edilen sonuçlara göre planlarda gerekli revizyonlar gerçekleştirilmeli ve yapıların zarar görmesini engelleyecek güvenli yaklaşma mesafeleri bırakılmalıdır. Ayrıca, binaların doğal titreşim frekansları ile dış kaynaklı titreşimlerin frekansları arasında rezonans oluşup oluşmadığı mutlaka değerlendirilmelidir. Mevcut yerleşim alanlarında titreşim kaynaklı yapı hasarlarını en aza indirmek amacıyla öncelikle kapsamlı bir titreşim haritası hazırlanmalı; yönetmelikte belirtilen sınır değerlerin aşıldığı bölgelerde uygun yalıtım ve azaltma önlemleri uygulanmalıdır. Şehir imar ve planlama çalışmalarında, bölgelere verilen bina yükseklikleri ve yol-yapı yaklaşma mesafeleri belirlenirken mevcut kriterlere ek olarak titreşim etkilerinin de dikkate alınması, titreşim ve rezonans kaynaklı hasarların azaltılmasında önemli rol oynayacaktır.

Ulaşım sistemlerinin planlama sürecinde, klasik ulaşım talep modelleme yöntemlerine ek olarak, özellikle yıpranmış ve yaşlanmış kent dokularında taşıt kaynaklı titreşimlerin de ulaşım analizlerine dahil edilmesi gerekmektedir. Geleceğin şehir planlamalarında bu konuya daha fazla önem verilmesi, hem toplum sağlığının korunması hem de yapı güvenliğinin sağlanması açısından kritik bir gereklilik olarak öne çıkmaktadır. Bina spektrum karakteristik periyotları olan (TA–TB) aralığında, yapıların doğal periyotlarının bu bant içerisinde yer alması durumunda hasar düzeyinin artacağı; bu aralığın dışında kalması hâlinde ise hasarın azalacağı bilinmektedir. Bu nedenle, zemin koşulları altında oluşan titreşimlere bağlı olarak (TA–TB) aralığının arazide ölçülmesi, olası hasar derecesinin belirlenmesi açısından önemli bir değerlendirme aracı niteliğindedir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışmada emeği geçen; Kocaeli Büyükşehir Belediyesi Ulaşım Daire Başkanlığı Planlama Şube Müdürlüğü'nden Anılcan Oymak, Muhammed Mustafa Göncü'ye ve Ulaştırma Mühendisi Şevval Özer'e içtenlikle teşekkür ederiz.

Kaynakça

- Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı. (2018). Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği.
- Anastasia, K. E., & Athanasios, I. K. (2013). Correlation of Structural Seismic Damage with Fundamental Period of RC Buildings. *Open Journal of Civil Engineering*, 3, 45-67.
- European Standard EN 1998-1:2004. (2004). Eurocode 8. *Design of Structures for Earthquake Resistance. Part 1: General Rules, Seismic Actions and Rules for Buildings*. Brussels: Comité Européen de Normalisation.
- Güler, H., & Aksop, E. Y. (2017). Sonlu elemanlar yöntemleri kullanılarak demiryolu alt ve üst yapısının analizi ve ray bileşenlerinin boyutlandırılması. 5. *Uluslararası Mühendislik ve Bilimde Yenilikçi Teknolojiler Sempozyumu 29-30 Eylül 2017 (ISITES2017 Bakü-Azerbaycan)*(ISSN: 2148-7464), 104-113.
- Işık, M. E., & Kuruşcu, A. O. (2018). Yapısal Titreşimlerin Kullanıcı Konforuna Etkisi. *Harran Üniversitesi Mühendislik Dergisi*.
- Karayolları Genel Müdürlüğü. (2016). *Karayollarında Ağır Taşıt Trafiklerinin Ve Yük Taşımacılığının Özellikleri Ve Eğilimleri 2010-2011-2021-2013-2014 Yılı Etüt Sonuçları*. Ankara.
- Keçeli, A., & Cevher, M. (2015). Soil dominant Period and Resonance Relation of Building Height. *Jeofizik: Vol. 17, 2015*, No 1-2.
- Keçeli, A., & Cevher, M. (2018). Zemin Hakim Periyodu Bina Yüksekliği Rezonans İlişkisi. *Kocaeli Üniversitesi Uygulamalı Yerbilimleri Dergisi*, Cilt:17, Sayı:2.

- Standard, A. N. (1997). ISO 2631. *Mechanical Vibration and Shock - Evaluation of Human Exposure to Whole-Body Vibration*. Amerika.
- Watts, G. R., & Krylov, V. V. (2000). Ground-Borne Vibration Generated By Vehicles Crossing Road Humps And Speed Control Cushions. *Applied Acoustics*, Vol.59 , 221-236.
- ZHAO , J. X. (2011). Comparison Between VS30 And Site Period As Site Parameters In Ground-Motion Prediction Equations For Response Spectra. *4th IASPEI / IAEE International Symposium: Effects of Surface Geology on Seismic Motion, August 23–26*. California: University of California Santa Barbara.
- .

