



Comparison between grid tomography and horizon-based tomography in prestack depth migration (PSDM)

Yığma Öncesi Derinlik Migrasyonunda (PSDM) grid tomografi ve tabaka bazlı tomografi karşılaştırmaları

SELİN CEREN ^{1*}, YELİZ İŞCAN ALP ², HAKAN ALP ³

^{1,3} İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, Mühendislik Fakültesi, Jeofizik Mühendisliği Bölümü
İstanbul, Türkiye

² İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Sualtı Teknolojisi Programı, İstanbul, Türkiye

Received (*geliş*): 7 Nisan (*April*) 2025 Accepted (*kabul*): 1 Temmuz (*July*) 2025

ÖZ

In this study, the pre-stack depth migration method was applied to obtain a depth section that provides the closest approach to the subsurface. PSDM, is now used as a processing method in many seismic explorations because of the increase of the hardware and related software capabilities. In geologically and tectonically complex study areas, depth migration is essential to obtain accurate subsurface depth images. Therefore, after deriving the initial interval velocity depth section, both post-stack and prestack depth migration techniques were applied to improve subsurface imaging accuracy. Non-flatness in common depth point (CDP) gathers from PSDM indicated the need to update the interval velocity model in depth. Grid tomography and horizon-based tomography were used to refine the interval velocity depth section. PSDM was then reapplied using the updated velocity model. These steps were iteratively repeated until the CDP gathers were flattened. Grid tomography was applied twice to update the interval velocity depth section. However, analysis of the depth section from the second PSDM iteration (using grid tomography-derived velocities) showed that deeper reflections remained poorly resolved. Consequently, five additional PSDM iterations were performed with horizon-based tomography-updated velocities, resulting in significantly improved imaging of both shallow layers and the basement. Finally, depth sections from post-stack depth migration, initial PSDM, and subsequent PSDM iterations were compared to highlight the critical role of PSDM in achieving a geologically realistic model.

Anahtar Kelimeler: Grid Tomography, Horizon-based Tomography, Prestack Depth Migration, Seismic Data Processing

ABSTRACT

Bu çalışmada yeraltına dair en yakın yaklaşımı sağlayan derinlik kesiti elde edebilmek için yığma öncesi derinlik migrasyonu (PSDM) yöntemi uygulanmıştır. PSDM, donanım ve ilgili yazılım kabiliyetlerinin artması nedeniyle artık birçok sismik araştırmada bir veri işleme yöntemi olarak kullanılmaktadır. Jeolojik ve tektonik olarak karmaşık araştırma alanlarında, doğru yeraltı derinlik kesitleri elde etmek için derinlik migrasyonu

esastır. Bu nedenle, ilk olarak ara hız derinlik kesiti üretildikten sonra, hem yığma sonrası hem de yığma öncesi derinlik migrasyonu yöntemleri, yeraltı görüntüleme doğruluğunu artırmak için uygulanmıştır. PSDM sonucu elde edilen CDP gruplarında yatay olmama durumu, ara hız modelinin güncellenmesi ihtiyacını göstermiştir. Ara hız derinlik kesitini güncelleyebilmek için grid tomografi ve tabaka-tabanlı tomografi yöntemleri kullanılmıştır. Sonraki adımda, PSDM yöntemi, güncellenmiş hız modeli kullanılarak CDP grupları tamamen yatay hale gelene kadar yinelemeli olarak tekrarlanmıştır. Ara hız derinlik kesitini güncelleyebilmek için grid tomografi yöntemi iki kez uygulanmıştır. İkinci PSDM yinelemesinden elde edilen derinlik kesitinin analizi, daha derin yansımaların çözünürlüğünün hala düşük olduğunu göstermiştir. Ancak, tabaka-tabanlı tomografi ile güncellenen hızlar kullanılarak PSDM yöntemi 5. yinelemeye kadar devam ettirildiğinde, hem sığ katmanların hem de temel kayanın görüntülenmesinde önemli ölçüde iyileşme sağlanmıştır. Son olarak, yığma sonrası derinlik migrasyonu sonucu elde edilen derinlik kesiti, ilksel PSDM sonucu elde edilen derinlik kesiti ve PSDM güncellemelerinde elde edilen derinlik kesitleri arasındaki karşılaştırmalar yapılarak, PSDM yönteminin doğru ara hız modeli ve derinlik kesiti elde etmede önemi vurgulanmıştır.

Keywords: Grid Tomografi, Tabaka-tabanlı Tomografi, Yığma Öncesi Derinlik Migrasyonu, Sismik Veri İşlem

<https://doi.org/10.17824/yerbilimleri.1664420>

*Sorumlu Yazar/ Corresponding Author: yeliziscanalp@iuc.edu.tr

INTRODUCTION

Migration is used to replace reflections to their correct vertical and horizontal positions (Bruno, 2023; Biondi, 2006; Sheriff and Geldart, 1983). The unmigrated stack section does not reflect the real subsurface. The velocities used in Normal Move-out (NMO) correction are offset-dependent, and only horizontal layers can be imaged accurately because of the hyperbolic assumption. In the presence of dipping layers and complex structures, events can be mispositioned. Therefore, migration is necessary to locate reflections in their correct positions. The selection of migration type is dependent on the geology of the area. When the subsurface is not complex, it is better to apply time migration (Yılmaz, 2001). However, time migration uses RMS velocity models that do not allow ray bending at layer boundaries; this situation can cause lateral mispositioning of the reflection events. For this reason, in the presence of lateral velocity variations and complex structures (salt domes, faults, overthrust), depth migration is required. Post-stack migration is convenient in the presence of a horizontal layer, because this

method assumes that the stack section is similar to a zero-offset section. However, when there are conflicting dips, the stack section is not similar to the zero-offset section. In the post-stack migration, reflection events with non-hyperbolic moveout can be distorted (Bruno, 2023; Yılmaz, 2001). In this case, prestack migration is needed. Prestack depth migration yields a better subsurface image in the presence of conflicting dips, lateral velocity variations, and complex structures. In this study, prestack depth migration was applied iteratively to obtain a better image of the subsurface. This study aims to emphasize the importance of the true interval velocity depth model, to obtain a depth section close to real geology, to view stratigraphic elements in their correct vertical and horizontal location, and to increase the resolution of the depth section to interpret layers. In the application of prestack depth migration, 2D Kirchhoff migration was used. This method can give better results because it handles irregularities in the data when compared to other methods (Rastogi, 2015;

Schneider, 1978). This method is based on the summation of scaled amplitudes along computed diffraction curves that are based on an integral solution to the scalar wave equation. The velocity model for prestack depth migration is so important to obtain high resolution subsurface image. The interval velocity depth model is used in PSDM. The interval velocity depth model contains the full complexity of the area because it uses actual ray paths from every source and every receiver to each subsurface point and allows ray bending at layer boundaries.

MATERIAL AND METHOD

Routine Data Processing Steps

In this study, multichannel seismic data collected by TPAO were used and processed via Echos-Paradigm software. The seismic data includes 120 channels. The shot interval and group interval are 26,67 m, the sampling rate is 2 ms, the record length is 7000 ms and the near offset is 160 m. The routine data processing steps applied to the data are data loading, editing, muting, bandpass filtering, predictive deconvolution, f-k filter, CDP sorting, and velocity analysis, as shown by the flowchart in Figure 1. The bandpass filter frequencies were optimally selected as 2-5-130-135 Hz through comprehensive analysis of shot gather amplitude spectra, ensuring preservation of all relevant signal components (Figure 2a). As shown in Figure 2a, the high-frequency noise at 160 Hz, attributed to operational noise, was filtered out after the application of the bandpass filter. In the predictive deconvolution process, the operator length and prediction lag are important (Dondurur, 2018). For this reason, by analyzing the autocorrelation function, the operator length and prediction lag were selected as 100 ms and 24 ms, respectively (Figure 2b). In the f-k filter, noises like refraction waves, direct waves, and back-scattered waves are close to the wavenumber axis. Therefore, these regions should be filtered. By analyzing f-k spectrum, the low dip and high dip rates were selected as -12 and 12 (ms/trace) respectively (Figure 2c). These rates were not selected too high, because when

high parameters were selected, it caused signal loss. However, the aliased energy remained, due to dip rate selection.

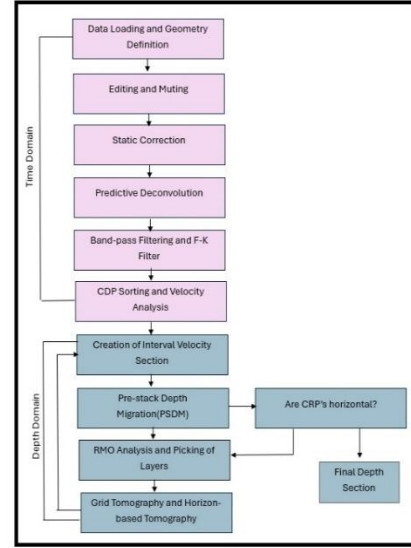


Figure 1. Flowchart of seismic data processing applied in this study.

Şekil 1. Çalışmada uygulanan sismik veri işlem akış şeması.

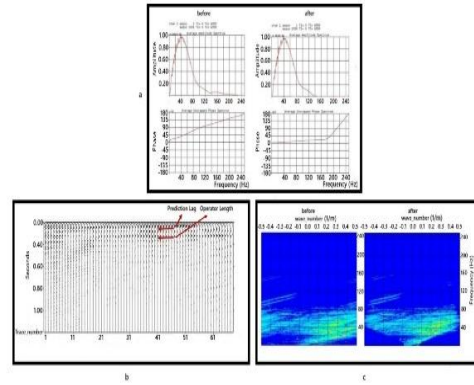


Figure 2. a) Amplitude spectrum images before and after applying the band-pass filter; b) selection of operator length and prediction lag based on autocorrelation function analysis; c) images before and after applying the f-k filter.

Şekil 2. a) Bant geçişli süzgeçleme uygulanmadan önce ve uygulandıktan sonra genlik spektrum görüntüleri; b) Otokorelasyon fonksiyonu analize dayalı operatör uzunluğu ve kestirim uzaklığı seçimi; c) f-k filtresi uygulanmadan önce ve sonra elde edilen spektrumların görünümü.

Application of Prestack-Depth Migration (PSDM) Method

Kirchhoff migration is an integral solution to scalar wave equation. Audebert (1997) evaluated migration methods for use as practical implementation and defined Kirchhoff migration as the best method. This method can be defined by Huygen's principle. According to this principle, seismic reflectors are composed of closely spaced depth points. Huygen's secondary source corresponds to semicircles in the depth domain and hyperboles in the time domain (Yılmaz, 2001). The integral solution to scalar wave equation is used in the practical implementation of the Kirchhoff migration based on diffraction summation (Richa Rastogi, 2017; Yılmaz, 2001). The summation approach can handle more irregular contents of data compared with other methods (Schneider, 1978). The geometry of the diffraction hyperbola depends on the rays traveling from the diffraction point to the receiver points at the surface.

$$\left[\frac{d^2}{dx^2} + \frac{d^2}{dz^2} - \frac{1}{V(x,z)^2} \frac{d^2}{dt^2} \right] P(x,z;t) = 0 \quad (1)$$

$$P_{out}(x_0, z) = \frac{\Delta x}{2\pi} \sum_x \left[\frac{\cos\theta}{\sqrt{Vr}} p(t) * P_{in}(x, z=0, t) \right] \quad (2)$$

Equation 1 is the scalar wave equation, $P(x, z=0, t)$ is the input wavefield and $V(x, z)$ is the velocity of the medium. Equation 2 is the discrete form of the integral solution to the scalar wave equation (Yılmaz, 2001). In equation 2, traveltimes are calculated from every receiver and source for each subsurface points. According to this equation $r = \sqrt{(x - x_0)^2 + z^2}$ is the distance between the observation and imaging point. The ρ filter $p(t)$ is the time derivative of the input wavefield. In the application of the 2D migration half derivative of the measured wavefield is used. $\cos(\theta)$ is an obliquity factor that defines the angle dependence of the amplitudes and $1/\sqrt{Vr}$ is proportional to spherical factor. $P_{out}(x, z=VT/2, t=0)$ is output wavefield at subsurface location (x_0, z) . In this study, time domain RMS velocity section was converted to interval velocity depth section via Dix conversion. RMS velocity section and interval velocity depth section is shown in the Figure 3 and Figure 4, respectively.

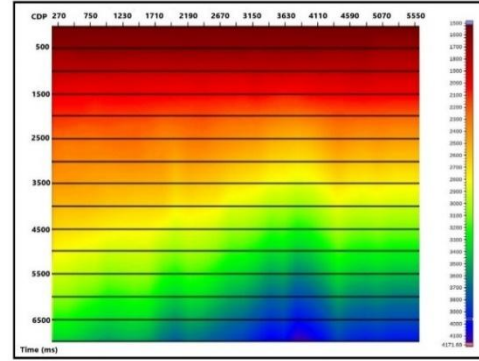


Figure 3 Image of the RMS velocity time section.

Şekil 3. Zaman ortamı RMS hız kesiti.

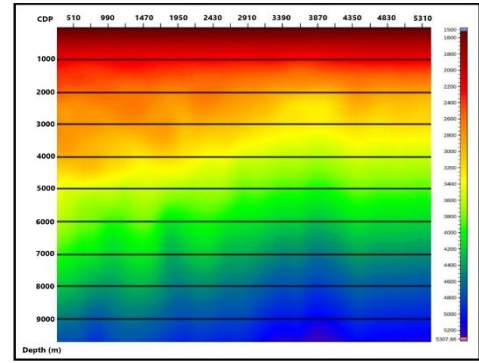


Figure 4. Image of the initial interval velocity depth section.

Şekil 4. Ara hız kesiti görünümü.

Then 2D Kirchhoff prestack depth migration was applied to the data. Aperture value selection is so important in the implementation of the Kirchhoff migration (Schleicher et al., 1997). While high aperture values correspond to more computer run time, low values correspond to a poor image (Rastogi et al., 2000). Therefore, in this study, the PSDM method was applied with aperture values that vary with depth. It was realized that the resolution of the depth section increased when the aperture value was high. However, it is necessary to consider that when the aperture value is too high, it can cause amplitude loss in the shallow layers. Figure 5 shows a comparison of the depth sections with aperture lengths of 4000 m and 10000 m for depths of up to 10500m. According to this comparison, an appropriate

aperture length of 500 m for depth of up to 300 m and an aperture length of 10000 m for depths of up to 10500 m was selected. In the Figure 6, depth section obtained from initial PSDM using parameters described in Table 1 is shown.

Table 1. The selection of the aperture lengths for depths of up to 300 m and 105000 m.

Tablo 1. 300 m ve 10500 m derinliğe kadar yarı açıklık genişliği değeri seçimi.

Depth(m)	Aperture Length(m)
300	500
10500	10000

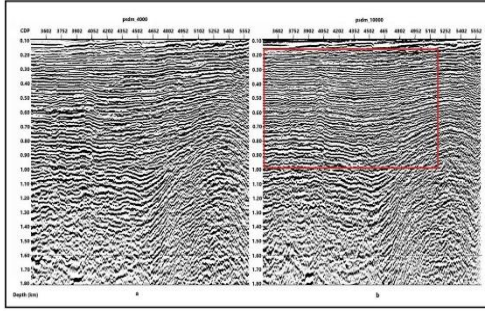


Figure 5. Application of Pre-Stack Depth Migration (PSDM) with aperture lengths of a) 4000 m and b) 10000 m for depths of up to 10500 m.

Şekil 5. 10500 m'ye kadar derinlikler için a) 4000 m ve b) 10000 m yarı açıklık genişliği değerleri ile yığma öncesi derinlik migrasyonu uygulaması.

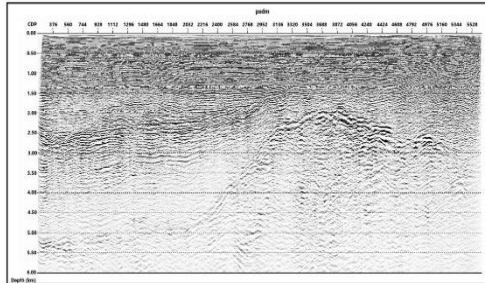


Figure 6. Initial depth section obtained from first iteration of PSDM.

Şekil 6. PSDM'nin ilk uygulamasından sonra elde edilen başlangıç derinlik kesiti.

Grid Tomography and Horizon-Based Tomography

If the initial interval velocity depth section is not accurate, there can be residual moveouts in the CDP gathers (Tian-wen Lo et.al, 1994) (Figure 7). The velocity model updating in PSDM method is based on reflection travel time tomography that use Residual Moveout Analysis (RMO) (Stork, 1992; Wang and Pratt, 1997; Woodward, 2008). Velocity model updating is based on RMO that requires careful picking in the gathers (Woodward et al., 2008). This method is based on the principle of obtaining the minimum difference between the observed travel times and the modeled travel times via the inverse solution of the process (Bruno, 2023; Yilmaz, 2001; Sherwood et al., 1986; Kosloff et al., 1996). In this study, grid tomography and horizon-based tomography were used to update the interval velocity depth model.

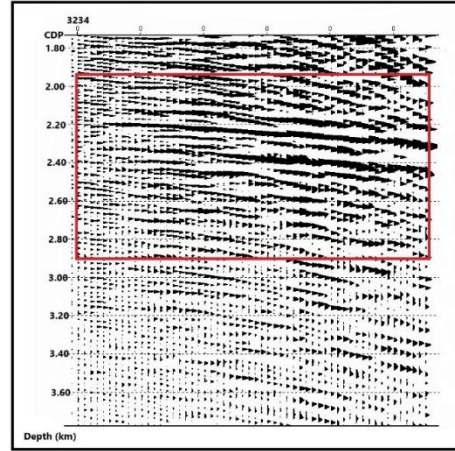


Figure 7. Initial CDP gathers obtained from first iteration of PSDM.

Şekil 7. İlk PSDM yinelemesinden elde edilen CDP grupları.

Both methods employ simultaneous equation systems to compute updated model parameters. The methods differ in their spatial distribution of input data and the pattern of parameter updates. Grid tomography that requires an interval velocity depth section and interpreted horizons updates velocities at equally spaced grid points. As in

horizon-based tomography, depth reflectors are used as a ray tracing grid source in grid tomography. On the other hand, horizon-based tomography requires a velocity-depth model to update both the velocity and depth of the reflector for each horizon. Horizon-based tomography offers several advantages over grid tomography, particularly in generating more geologically realistic velocity-depth models. This approach achieves superior results by updating velocity parameters independently for each interpreted horizon. Additionally, the drawback of the grid tomography is that even low relative residual RMS velocity selection rates can create artificial folding in the depth section. However, in the presence of complex structures, it can be difficult to define formation bottoms for use as ray-tracing sources. Therefore, in this study, grid tomography was applied before horizon-based tomography. The error in time at the CMP location can correspond to errors in the velocity for grid tomography and errors in both depth and velocity for horizon-based tomography. In the equation (3); $t'(n)$ is the modeled traveltimes, $(z - z_{k-1})$ is the depth of the layer, S_k is the slowness ($1/V_k$) and θ is the angle made with the vertical axis (Yılmaz, 2001). In the equation (4), t_{initial} is the initial traveltimes, $t'(n)$ is the modeled traveltimes and $t(n)_{\text{observed}}$ is the observed traveltimes. In the equation (5) $e(n)$ is the difference between observed traveltimes and modeled traveltimes.

$$t'(n) = (z_k - z_{k-1}) S_k \sec \theta \quad (3)$$

$$t'(n)_{\text{modeled}} = t'(n)_{\text{initial}} + \frac{dt'_n}{dp} \Delta p \quad (4)$$

$$e(n) = t(n)_{\text{observed}} - t'(n)_{\text{modeled}} \quad (5)$$

$$e(n) = \Delta t - \Delta t' \quad (6)$$

$$\Delta t' = \frac{dt'_n}{dp} \Delta p \quad (7)$$

$$\Delta t' = L \Delta p \quad (8)$$

In the equation (8) $\Delta t'$ is the column vector, L is the sparse matrix ($\frac{dt'_n}{dp}$) and Δp is the column vector.

According to equation (6) using least squares, the solution is achieved.

$$\Delta p = (L^T L)^{-1} L^T \Delta t \quad (9)$$

According to equation (9), Δt is the residual moveouts measured from gathers, L is the sparse matrix that represents first derivative of the parameters. Using equation (9) Δp is calculated and then parameter is updated ($p + \Delta p$). First, in the velocity updating process, horizons interpreted for use as a ray tracing source (Cerveny and Soares, 1992). The image of the picking of the interpreted horizons is shown in Figure 8.

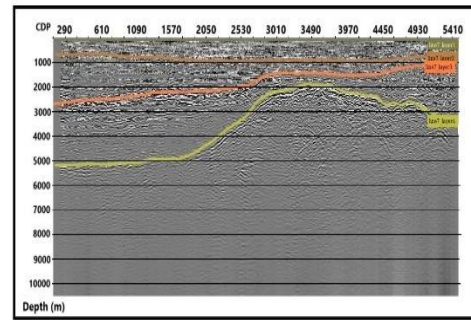


Figure 8. The image of the interpreted horizons.

Şekil 8. Yorumlanan tabakaların görünümü.

In grid tomography, to create a travel time error source relative residual RMS velocity picking was applied to the velocity panel of the spectrum. Figure 9 a-b shows the velocity panel and the CDP groups, respectively. The vertical axis of the velocity panel represents the depth of events, and the horizontal axis represents the relative residual RMS velocity. Residual moveouts in CDPs change according to velocity selection. When the true velocities are selected, CDPs become flat. After the picking of semblances in the velocity panel, the RMS residual section was created (Figure 10).

The RMS residual section, interpreted horizons, and the initial interval velocity depth section were used as inputs for grid tomography. In grid tomography, smaller grid spacing yields higher accuracy and resolution in the results. Therefore, a grid step (horizontal shooting grid) of 13 m and a ray step (depth step) of 10 m were adopted. After the second iteration of the grid tomography, an updated interval velocity depth section was created (Figure 11).

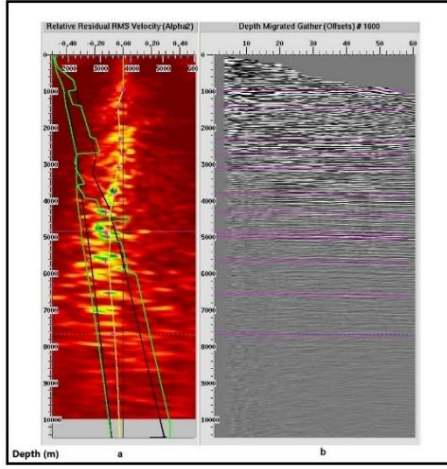


Figure 9. The image of the Residual RMS velocity selection. a) Residual moveout semblance spectra computed from CDP gathers, b) CDP gathers derived from PSDM. Selected residual RMS velocities, reference velocities previously assigned to interpreted horizons and interval velocities of events at depths are shown with yellow line, black line and green line respectively.

Şekil 9. Kalıntı RMS hız seçimi görünümü. a) CDP gruplarından hesaplanan kalıntı kayma spektrumu, b) PSDM sonucu elde edilen CDP grupları. Seçilen kalıntı RMS hızları, daha önce yorumlanmış tabakalara atanan referans hızları ve derinliklerdeki ara hızları sırasıyla sarı çizgi, siyah çizgi ve yeşil çizgi ile gösterilmiştir.

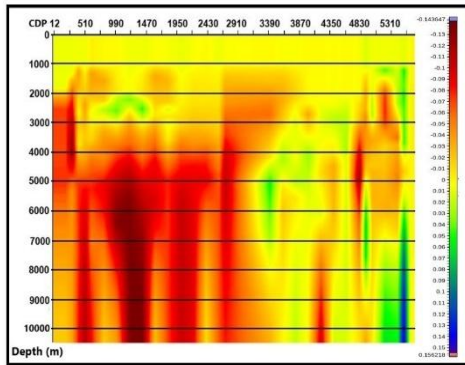


Figure 10. Relative Residual RMS velocity section obtained from the RMO analysis.

Şekil 10. RMO analizinden elde edilen bağıl kalıntı RMS hız kesiti.

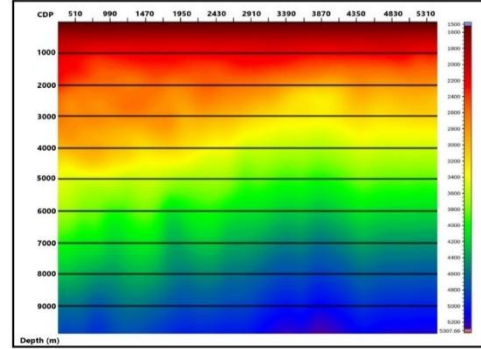


Figure 11: Updated interval velocity depth section after second iteration of grid tomography.

Şekil 11: Grid tomografi ile 2. Güncelleme sonucu elde edilen ara hız kesiti.

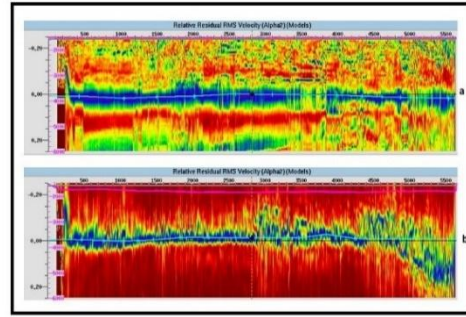


Figure 12. Residual moveout analysis for a) horizon and b) horizon2.

Şekil 12. Tabaka tabanlı tomografide tabaka 1 ve 2 için kalıntı kayma analizi.

Horizon-based tomography was then applied to derive a geologically realistic interval velocity depth section and reduce residual moveouts in CDPs. The inputs for horizon-based tomography are the interval velocity depth section obtained from the second iteration of grid tomography, interpreted horizons, and RMO pickings for each horizon. The vertical axis of Figure 12 represents the depth error of the horizon that corresponds to the relative residual RMS velocity. After relative residual RMS velocities were selected, an updated interval velocity depth section was created. Finally, Figure 13 shows the interval velocity depth section obtained from the fifth iteration of horizon-based tomography.

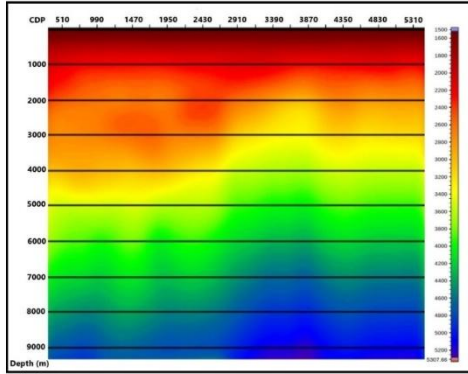


Figure 13. Updated interval velocity section obtained from fifth iteration of horizon-based tomography.

Şekil 13. Tabaka tabanlı tomografi ile 5. güncelleme sonucu elde edilen ara hız kesiti.

DISCUSSION

As a first step in this study, depth sections obtained from poststack and prestack depth migration were compared. Then, using PSDM, the initial depth section and updated depth sections were compared to each other. The iterative application of PSDM was discontinued when either excessive artificial folding of layers occurred or no further improvements were observed. This study highlights the importance of prestack depth migration (PSDM) for determining an accurate velocity model that yields optimal results in complex geological areas. A geologically realistic velocity model produces superior imaging results.

Figure 14 presents all CDP gathers from both initial and subsequent iterations, demonstrating non-flat events in the initial gathers and flattened events after velocity model updates. The CDPs became flat after further iterations. Figure 15 shows a comparison of depth sections from post-stack depth migration and PSDM. According to Figure 15, the horizons can be better distinguished, and faults can be tracked better with the application of PSDM up to 1 km depth.

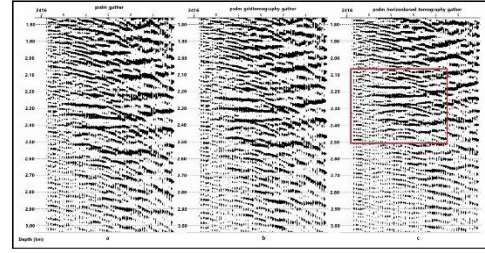


Figure 14. Image of CDP gathers obtained from a) initial PSDM b) the second iteration of PSDM using interval velocities derived from grid tomography and c) fifth iteration of PSDM using interval velocities derived from horizon-based tomography.

Şekil 14. a) Başlangıç ara hız kesiti ile uygulanan PSDM, b) grid tomografi ile güncellenen ara hızlar kullanılarak uygulanan 2. yineleme PSDM ve c) tabaka tabanlı tomografi ile güncellenmiş ara hızlar kullanılarak uygulanan 5. yineleme PSDM sonucu elde edilen CDP grupları görünümü.

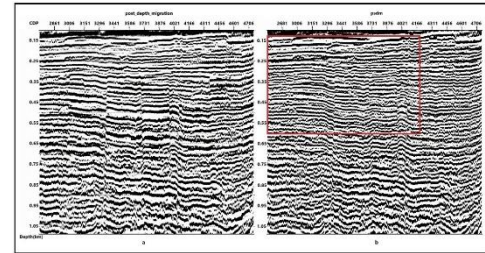


Figure 15. Image of a) depth section obtained from post stack depth migration and b) initial depth section obtained from PSDM.

Şekil 15. a) Yığma sonrası derinlik migrasyonu sonucu elde edilen derinlik kesiti ve b) PSDM sonucu elde edilen ilksel derinlik kesitinin görünümü.

The grid-tomography method was subsequently performed to update the interval velocity depth section. Performing more than two iterations of PSDM with updated interval velocities obtained through grid tomography led to excessive artificial folding in the shallow layers. Because of this, we decided to stop at the second iteration (Figure 16). In Figure 17, the initial depth section and

depth section from the second iteration of PSDM using grid tomography in interval velocity refinement are compared. Corresponding improvements in reflection amplitudes (indicated by red arrows) are evident at the basement interface in the updated depth section (Figure 17b). Furthermore, enhanced layer resolution is observed between 1.50-2.50 km depth (Figure 17d). To optimize basement delineation and shallow-layer imaging, we implemented horizon-based tomography for subsequent velocity model updates. The first input interval velocity model for horizon-based tomography is the second iteration of the interval velocity depth section updated by grid tomography. PSDM was performed six times using updated interval velocities derived from horizon-based tomography, and in the fifth iteration was stopped because there were no changes in layers in the depth section from the sixth iteration (Figure 18).

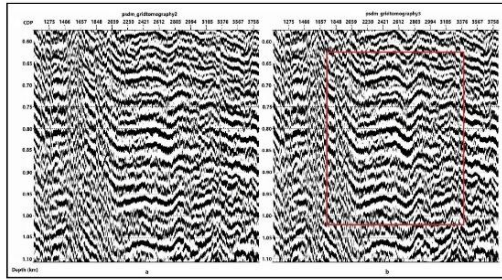


Figure 16. Comparison of images of depth sections obtained from a) second and b) third iteration of the PSDM using interval velocities derived from grid tomography.

Şekil 16. Grid tomografi ile güncellenmiş ara hızlar kullanılarak a) 2. yineleme PSDM sonucu ve b) 3. yineleme PSDM sonucu elde edilen derinlik kesitlerinin karşılaştırılması.

In Figure 19, the depth sections from the second iteration of PSDM and the fifth iteration of PSDM using grid tomography and horizon-based tomography, respectively, in interval velocity refinement, are compared. In this figure, it is seen that folding in a basement is imaged and distinguished in the depth section from the fifth iteration of PSDM. Additionally, when we analyze the comparison of colored views of depth

sections, layers are better recognized at depths between 3.75-5 km in Figure 20b.

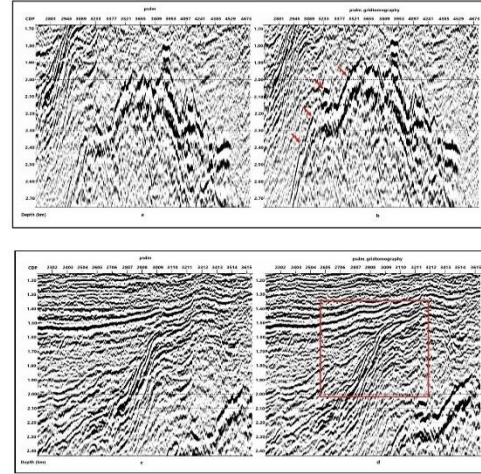


Figure 17. Comparison of images of basement in the depth sections obtained from a) initial PSDM and b) second iteration of PSDM using interval velocities derived from grid tomography. Comparison of images of shallow layers in the depth sections obtained from c) initial PSDM and d) second iteration of PSDM using interval velocities derived from grid tomography.

Şekil 17. a) İlk PSDM sonucu ve b) grid tomografi ile güncellenmiş ara hız modeli kullanılarak 2. yineleme PSDM sonucu elde edilen derinlik kesitlerinde temel kaya görünümünün karşılaştırılması. c) İlk PSDM sonucu ve d) grid tomografi ile güncellenmiş ara hız modeli kullanılarak 2. yineleme PSDM sonucu elde edilen derinlik kesitlerinde sığ tabakaların görünümünün karşılaştırılması.

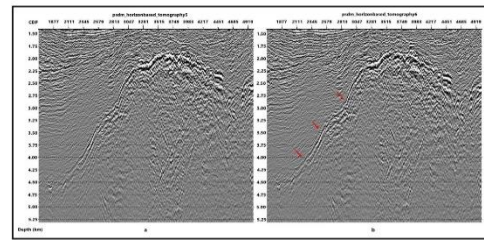


Figure 18. Image of the depth sections obtained from a) fifth and b) sixth iteration of PSDM using interval velocities derived from horizon-based tomography.

Şekil 18. Tabaka-tabanlı tomografi ile güncellenmiş ara hızlar ile uygulanan a) 5. yineleme PSDM ve b) 6. yineleme PSDM sonucu elde edilen derinlik kesitlerinin karşılaştırılması.

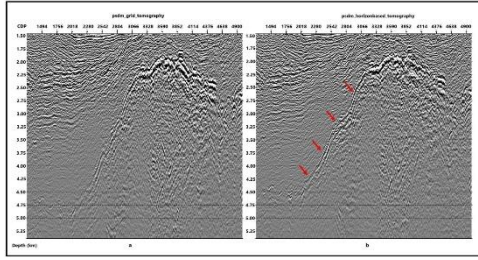


Figure 19. Comparison of depth sections from the a) second iteration of PSDM and b) fifth iteration of PSDM, utilizing interval velocities derived from grid tomography and horizon-based tomography, respectively.

Şekil 19. a) Grid tomografi ile güncellenmiş ara hızlar ile uygulanan 2. yineleme PSDM sonucu ve b) tabaka-tabanlı tomografi ile güncellenmiş ara hızlar ile uygulanan 5. yineleme PSDM sonucu elde edilen derinlik kesitlerinin karşılaştırılması.

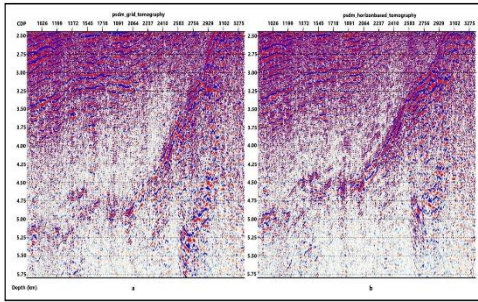


Figure 20. Comparison of colored depth sections from the a) second iteration of PSDM and b) fifth iteration of PSDM, utilizing interval velocities derived from grid tomography and horizon-based tomography, respectively.

Şekil 20. a) Grid tomografi ile güncellenmiş ara hızlar ile uygulanan 2. yineleme PSDM sonucu ve b) tabaka-tabanlı tomografi ile güncellenmiş ara hızlar ile uygulanan 5. yineleme PSDM sonucu elde edilen derinlik kesitlerinin renkli görünümünün karşılaştırılması.

Figure 21b demonstrates proper layer positioning with complete elimination of grid-tomography-induced folding artifacts, particularly in the upper 1 km section. In Figure 22, the initial depth section and updated depth sections using grid tomography and horizon-based tomography in interval velocity refinement are compared to each

other. According to Figure 22b-c, positioning changes are observed, especially at depths of 0.60-1.00 km. There is folding in layers in Figure 22b, and the dip of the layers increased after the fifth iteration of PSDM shown in Figure 22c. Furthermore, Figure 22 demonstrates that the 1.5 km horizon in the initial PSDM section appears deeper than its position in the updated depth sections, as indicated by the red arrows.

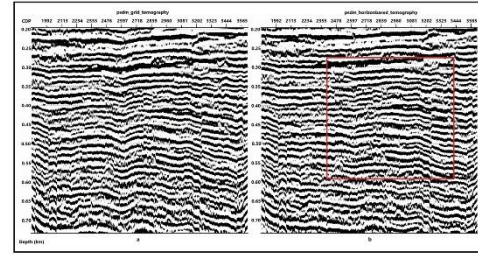


Figure 21. Comparison of shallow layers in the depth sections from the a) second iteration of PSDM and b) fifth iteration of PSDM, utilizing interval velocities derived from grid tomography and horizon-based tomography, respectively.

Şekil 21. a) Grid tomografi ile güncellenmiş ara hızlar ile uygulanan 2. yineleme PSDM sonucu ve b) tabaka-tabanlı tomografi ile güncellenmiş ara hızlar ile uygulanan 5. yineleme PSDM sonucu elde edilen derinlik kesitlerinde sıkı tabakaların karşılaştırılması.

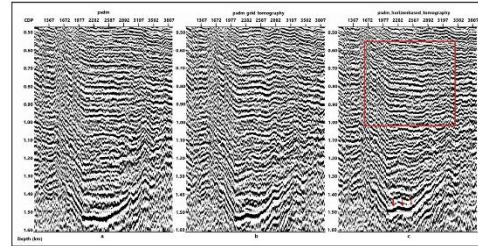


Figure 22. Comparison of shallow-layers in the depth sections from a) the initial PSDM, b) the second iteration of PSDM, and c) the fifth iteration of PSDM, utilizing interval velocities derived from grid tomography and horizon-based tomography, respectively.

Şekil 22. a) İlk PSDM sonucu, b) grid tomografi ile güncellenmiş ara hızlar ile uygulanan 2. yineleme PSDM sonucu ve c) tabaka-tabanlı tomografi ile güncellenmiş ara hızlar ile uygulanan 5. yineleme PSDM sonucu elde edilen derinlik kesitlerinde sıkı tabakaların karşılaştırılması.

The top of the basement is observed at depths of 2.00 km in Figure 23a, 1.90 km in Figure 23b, and 1.80 km in Figure 23c. As a result, to obtain a true, realistic depth image of the subsurface, PSDM is highly important. Because PSDM is dependent on the velocity model, it is important to obtain a true velocity-depth model. For this reason, updating the interval velocity section contributes to a better image of the subsurface. In conclusion, horizon-based tomography proved most effective for updating the interval velocity model. Using these updated velocities in the PSDM process resulted in a more accurate and geologically realistic depth section.

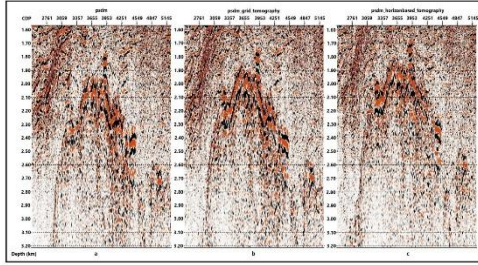


Figure 23. Comparison of basement in the depth sections from a) the initial PSDM, b) the second iteration of PSDM, and c) the fifth iteration of PSDM, utilizing interval velocities derived from grid tomography and horizon-based tomography, respectively.

Şekil 23. a) İlk PSDM sonucu, b) grid tomografi ile güncellenmiş ara hızlar ile uygulanan 2. yineleme PSDM sonucu ve c) tabaka-tabanlı tomografi ile güncellenmiş ara hızlar ile uygulanan 5. yineleme PSDM sonucu elde edilen derinlik kesitlerinde temel kayanın karşılaştırılması

CONCLUSION

The iterative application of the prestack depth migration (PSDM) combined with velocity model refinement via grid and horizon-based tomography demonstrates the critical role of accurate velocity modeling in resolving complex subsurface structures. In this study, the superiority of PSDM over post-stack depth migration is evident, particularly in areas with lateral velocity variations and steeply dipping reflectors. Post-stack depth migration, reliant on simplified velocity assumptions, fails to account

for ray-path bending and non-hyperbolic moveout, leading to mispositioned events and reduced resolution (Yılmaz, 2001). By contrast, PSDM using interval velocities derived from iterative tomography, enables precise imaging of geological features such as folds, faults, and basement structures. The initial velocity model, generated via Dix conversion of RMS velocities, provided a starting point but inherently lacked the resolution to capture lateral velocity gradients. Subsequent application of grid tomography enhanced shallow imaging through global velocity adjustments but proved insufficient for resolving deeper targets, particularly the basement. This aligns with known challenges of grid-based methods, which often oversmooth velocity gradients and lack geological constraints (Jones, 2010). Excessive PSDM application (>2 iterations) with grid tomography-updated interval velocities induced artificial folding artifacts in shallow layers, demonstrating the risks of over-automated velocity updates. In contrast, the fifth PSDM iteration employing horizon-based tomography for velocity refinement became crucial for resolving deeper structures. The fifth PSDM iteration significantly improved imaging quality throughout the section, enhancing both shallow-layer resolution and basement definition while addressing reflectivity ambiguities and amplitude fidelity (Figures 19–21). The CDP gathers after iterative velocity updates (Figure 14), validates the convergence of the velocity model toward geological plausibility. Residual moveout in initial CMP gathers indicated velocity model inaccuracies, while progressive flattening of gathers confirmed the reduction of travel-time errors through successive iterations. Notably, the final depth section revealed repositioned horizons (e.g., basement shifted below 1.70 km; Figure 23), emphasizing the dynamic interplay between velocity refinement and structural repositioning.

ACKNOWLEDGMENT

This manuscript is a part of Selin Ceren's Ph.D thesis. This study was supported by the Scientific and Technological Research Council of Turkey (TUBİTAK 121Y405) and Istanbul University – Cerrahpaşa Scientific Research Project FOA-2024-37535. We used the Echos Paradigm

software. We thank the Educational Grant Program for providing a free license to IU-C Department of Geophysical Engineering for the use of the package processing software for educational and research purposes. We are deeply grateful to the anonymous reviewers for their insightful comments and thoughtful recommendations, which helped us enhance the rigor and clarity of this manuscript.

REFERENCES

- Audebert F, Nichols D, Rekdal T, Biondi B, Lumley DE, Urdaneta H (1997). Imaging complex geologic structure with single-arrival Kirchhoff prestack depth migration, *Geophysics*, 62, 1533–1543, doi:10.1190/1.1444256.
- Biondi B (2006). Prestack exploding-reflectors modeling for migration velocity analysis, *SEG Technical Program Expanded Abstracts*, 25, 3056.
- Bruno PP (2023). Seismic exploration methods for structural studies and for active fault characterization: a review, DOI: 10.3390/app13169473.
- Dondurur D (2018). Acquisition and Processing of Marine Seismic Data, ISBN : 978-0-12-811490-2 <https://doi.org/10.1016/C2016-0-01591-7> Elsevier Pub. Pages 493-547
- Jones IF (2003). Velocity modeling for depth migration. *Geophysical Prospecting*, 51 (5), 435–442.
- Kosloff D, Sherwood J, Koren Z, Machet E, Falkovitz Y (1996). Velocity and interfaces depth determination by tomography of depth migrated gathers, *Geophysics*, 61, 1511-1523.
- Levin FK (1971). Apparent velocity from dipping interface reflections, *Geophysics*, 36, 510-516.
- Rastogi R, Londhe A, Srivastava A, Sirasala K, Khonde K (2017). 3D Kirchhoff migration algorithm: A new scalable approach for parallelization on multicore CPU based cluster,
- Rastogi R, Srivastava A, Khonde K, Sirasala KM, Londhe A, Chavhan H (2015). An efficient parallel algorithm: Poststack and prestack Kirchhoff 3D depth migration using flexi-depth iterations,
- Rastogi R, Yerneni S, Phadke S (2000). Aperture Width Selection Criterion in Kirchhoff Migration. *Association of Exploration Geophysicists Seminar on Exploration Geophysics*, Goa, India.
- Schleicher J, Hubral P, Tygel M, Jaya MS (1997). Minimum apertures and fresnel zones in migration and demigration. *Geophysics* 62 (1), 183–194.
- Schneider W (1978). Integral formulation for migration in two and three dimensions. *Geophysics* 43 (1), 49–76.
- Sheriff R, Geldart L (1983). *Exploration Seismology*. Cambridge University Press, UK.
- Stork C (1992). Reflection tomography in the post migrated domain. *Geophysics* 57, 680e692. <https://doi.org/10.1190/1.1443282>.
- Yilmaz O (1987). *Seismic Data Processing*: SEG, Tulsa, p. 240-353.
- Yilmaz O (2001). *Seismic Data Analysis: Processing, Inversion and Interpretation of Seismic Data*, vols. 1 and 2. Society of Exploration Geophysicists, Tulsa, U.S.A.
- Tian-wen Lo and Philip Inder Weisen (1994), *Fundamentals of seismic Tomography*, SEG monograph series.
- Wang Y, Pratt RG (1997.) Sensitivities of seismic traveltimes and amplitudes in reflection tomography. *Geophysics. J. Int.* 131, 618e642. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1997.tb06603.x>.
- Woodward MJ (1992). Wave-equation tomography. *Geophysics* 57, 15e26. <https://doi.org/10.1190/1.1443179>.
- Woodward MJ, Nichols D, Zdraveva O, Whitfield P, Johns T (2008). A decade of tomography. *Geophysics* 73, VE5–VE1.



Altınova Mahallesi Sahilinin (Ayvalık, Balıkesir) Sıvılaşma Duyarlılığı

Liquefaction Susceptibility of Altınova District Coast (Ayvalık, Balıkesir)

ŞENER CERYAN ^{1*}, AYŞEGÜL KILIÇ ², SAMET BERBER ³, NURCİHAN CERYAN ⁴

^{1,3} Balıkesir Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Çağış Yerleşkesi, Balıkesir

² İlbank Bursa Bölge A.Ş., Bursa

⁴ Balıkesir Üniversitesi, Balıkesir Meslek Yüksek Okulu, Madencilik ve Maden Çıkarma Bölümü, Çağış Yerleşkesi, Balıkesir

Geliş (received): 11 Nisan (April) 2025 Kabul (accepted): 8 Temmuz (July) 2025

Öz

Balıkesir ili Ayvalık ilçesi (Türkiye) Kuzey Anadolu Fay Zonu'nun güney kolu üzerinde yer almakta olup, tarihsel ve aletsel dönemde 1867 Edremit ($M=7,0$), 1919 Ayvalık-Sarmısaklı ($M_w=7,2$), 1944 Edremit ($M_w=6,4$) ve 1953 Yenice ($M_w=7,2$) depremleri meydana gelmiştir. Ayvalık ilçesi Altınova mahallesi sahilinde yeraltı suyu derinliği yüzeye yakın olup kumlu zeminler yayılım göstermektedir. Bu çalışmada Altınova mahallesi sahil kısmının (Ayvalık, Balıkesir) sıvılaşma potansiyeli ve sıvılaşma şiddeti haritaları üretilmiştir. Zemin tabakalarının sıvılaşmaya karşı güvenlik sayısı SPT-N değeri kullanan basitleştirilmiş prosedürle hesaplanmıştır. Bu çalışmada zemin tabakalarının sıvılaşmaya karşı güvenlik sayısının, sıvılaşma olasılıklarının ve düzeltilmiş SPT-N değerlerinin 4, 8, 12 ve 16 m'deki mekânsal dağılımları bulunmuştur. Sıvılaşma potansiyeli haritasına göre inceleme alanının % 11,8'inde sıvılaşma olmayacağı görülmektedir. İnceleme alanının %64,1'i "düşük", %20,5'i "orta", %3,6'sı "yüksek" sıvılaşma potansiyeline sahiptir. İnceleme alanında yer alan 4723 binadan 584'ü sıvılaşma olmayacak alanda, 3034'ü düşük sıvılaşma potansiyelli alanda, 909'u orta sıvılaşma potansiyelli alanda ve 196'sı yüksek sıvılaşma potansiyelli alanda bulunmaktadır. Bu çalışmada üretilen sıvılaşma şiddeti haritasına göre senaryo depremin gerçekleşmesi durumunda inceleme alanının %1,3'ünde sıvılaşma olmayacağı, %33,3'ünde sıvılaşmanın "çok düşük şiddetli", %65'inde sıvılaşmanın "düşük şiddetli" ve %0,3'ünde "orta şiddetli" gelişeceği görülmektedir.

Anahtar Kelimeler: Ayvalık, sıvılaşma potansiyeli indeksi, sıvılaşma şiddeti indeksi, zemin sıvılaşması

ABSTRACT

Balıkesir province of Ayvalık district (Turkey) is located on the southern branch of the North Anatolian Fault Zone where earthquakes 1867 Edremit ($M=7.0$), 1919 Ayvalık-Sarmısaklı ($M_w= 7.2$), 1944 Edremit ($M_w=6.4$) and 1953 Yenice ($M_w= 7.2$) occurred in the historical and the instrumental period. The groundwater depth is

shallow on the coast of Altınova neighborhood of Ayvalık district and sandy soil are widespread. In this study, liquefaction potential and liquefaction severity maps of the coastal part of Altınova district (Ayvalık, Balıkesir) were produced. The safety factor of the soil layers against liquefaction was calculated using the simplified procedure based on SPT-N value. Also, spatial distributions of safety factor against liquefaction, liquefaction probabilities and corrected SPT-N values of soil layers at 4, 8, 12 and 16 m were determined. According to the liquefaction potential map, it is seen that 11.8% of the study area will not liquefy. 64.1% of the study area has "low", 20.5% "medium" and 3.6% "high" liquefaction potential. Of the 4723 buildings in the study area, 584 are in areas where there will be no liquefaction, 3034 are in areas with low liquefaction potential, 909 are in areas with medium liquefaction potential and 196 are located areas with high liquefaction potential. According to the liquefaction intensity map, it is observed that in the event of a scenario earthquake, there will be no liquefaction in 1.3% of the study area, liquefaction will develop with "very low intensity" in 33.3%, liquefaction will develop with "low intensity" in 65% and "moderate intensity" in 0.3%.

Keywords: Ayvalık, liquefaction potential index, liquefaction severity index, soil liquefaction

<https://doi.org/10.17824/yerbilimleri.1674018>

*Sorumlu Yazar/ Corresponding Author: cedoglu61@gmail.com

GİRİŞ

Sıvılaşma terimi ilk olarak Terzaghi ve Peck (1948) tarafından hafif örselenme nedeniyle akış şeklindeki yenilmelere neden olan çok gevşek kumların önemli dayanım kaybını tanımlamak için kullanılmıştır. Daha genel terimlerle, sıvılaşma, tekrarlı yükleme altında aşırı boşluk suyu basıncı oluşumu nedeniyle doymuş gevşek kumlu zeminlerin hem makaslama dayanımının hem de sertliğinin azalması olarak tanımlanabilir (ElGhoraiby vd., 2020). 1964 Niigata (Japonya) ve Alaska (ABD) depremleriyle başlayarak, sismik zemin sıvılaşma davranışı jeoteknik deprem mühendisliğinde önemli bir araştırma konusu haline gelmiştir (Ishihara ve Koga, 1981). Zemin sıvılaşması 1989 Loma Prieta depreminde (Seed vd., 1991), 1995 Büyük Hanshin depreminde (Tanaka, 2000), 1999 Chi-Chi depreminde (Hwang vd., 2003), 1999 Kocaeli-Adapazarı depreminde (Bray vd., 2004), Canterbury depreminde (Quigley vd., 2013), 2018 Orta Sulawesi depreminde (Orense vd., 2012) ve 2023 Kahramanmaraş

depreminde (Türkiye) mühendislik yapılarında önemli hasarlara ve can kayıplarına neden olmuştur.

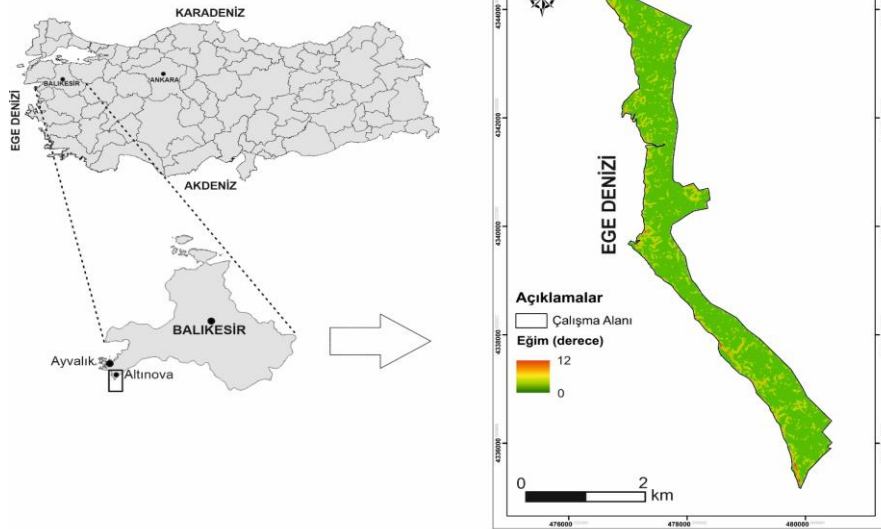
Zemin sıvılaşmasının depremlerin yıkıcı etkilerine katkıda bulunmasından bu yana, araştırmacılar sismik kaynaklı zemin sıvılaşmasını değerlendirmek için araştırmalar yapmaya başlamışlardır. Sismik zemin sıvılaşması tetikleme eğrileri ilk olarak Seed vd. (1984) tarafından Seed ve Idriss (1971)'de geliştirilen basitleştirilmiş prosedüre bağlı olarak tanıtılmıştır. Zeminlerin sıvılaşma potansiyelini değerlendirmek için geliştirilmiş farklı yöntemler vardır (Anon, 2016). Bu yöntemler, gerilme tabanlı yaklaşımlar (Seed ve Idriss, 1971), deformasyon tabanlı yaklaşımlar (Dobry ve Abdoun, 2011), enerji tabanlı prosedürler (Kayabali vd., 2018), laboratuvar testleri (Hakam vd., 2016), hesaplamalı mekaniğe dayalı yöntemler (Rapti, 2016) ve dinamik yükleme altında gözenek basıncı oluşumunun saha ölçümüdür (Anon, 2016).

Literatürde, zemin tabakasının sıvılaşmaya karşı dayanım kapasitesini elde etmek için jeoteknik ve jeofizik deneyler de dahil olmak üzere çok sayıda arazi deneyi kullanılmıştır. Bunlar standart penetrasyon testi (SPT), koni penetrasyon testi (CPT), Becker penetrasyon testi (BPT), dilatometre testi (DT) ve mikrotremordür (Seed ve Idriss 1967, 1971; Dobry vd.,1981; Seed vd.,1984; Robertson ve Campanella, 1985; Seed ve De Alba, 1986; Stokoe vd., 1988; Tokimatsu ve Uchida, 1990; Stark ve Olson, 1995; Olsen, 1997; Robertson ve Wride, 1998; Andrus vd., 1999 ve Andrus ve Stokoe, 2000, Andrus vd., 2004; Uyanık ve Taktak, 2009; Beroya vd., 2009; Setiawan, 2011; Ghafghazi vd., 2017).

Çalışma sahası olan Balıkesir ili Ayvalık ilçesi Altınova mahallesinin sahil kısmı (Şekil 1) aletsel dönemde önemli mal ve can kayıplarına neden olan Kuzey Anadolu Fay Zonu'na ait güney kollarında yer alan Havran-Balıkesir fay zonuna ve Edremit fay zonuna yakın

konumdadır. Altınova sahilinin Edremit fay zonuna uzaklığı 42,2 km, Havran-Balıkesir Fay zonuna uzaklığı 43,1 km'dir. Ayrıca Zeytinadağ fay zonunun inceleme alanına uzaklığı 33,6 km, Bergama fayının uzaklığı da 36 km'dir. Öte yandan inceleme alanında genellikle kumlu alüvyon zeminler yayılım göstermektedir. Söz konusu alanda yeraltı suyu seviyesi de yüksektir. Bu nedenle bu çalışmada Altınova mahallesi (Ayvalık, Balıkesir) sahil kısmının sıvılaşma potansiyeli incelenmiştir.

Bu çalışmada kullanılan SPT-N değerleri, yeraltı suyu seviyesi ve elek analizi sonuçları Analiz Mühendislik İnşaat Sondajcılık Madencilik Sanayi ve Ticaret Limited Şirketi tarafından 2017 yılında Balıkesir Büyükşehir Belediyesi için yaptığı "Balıkesir İli Ayvalık İlçesi 3125,83 Hektarlık Alanın İmar Planına Esas Mikrobölgeleme Etüt Raporunda verilen 96 adet sondaj logu ve bu sondajlara ait laboratuvar deney sonuçlarından alınmıştır.



Şekil 1. İnceleme alanının yer bulduru haritası.

Figure 1. Location map of the study area.

Bu çalışmada önce topoğrafya, yeraltı suyu derinliği, zemin türü ve göreceliği sıklığı sivilaşma duyarlılığı açısından incelenmiş, daha sonra zemin tabakalarının sivilaşmaya karşı güvenlik sayısı Youd vd. (2001)'de verilen ve SPT-N değerine dayanan basitleştirilmiş prosedürün güncellenmiş hali ile hesaplanmıştır (Cetin vd., 2018a, Cetin vd., 2018b). Youd vd. (2001)'in standart modeline efektif örtü yükü düzeltme katsayısı, deprem büyüklüğü ölçeklendirme faktörü ve yamaç eğimi için düzeltme faktörü eklenerek güncelleme yapılmış olup (Cetin vd., 2018a) bu çalışmada çalışma arazisi düz olduğu için yamaç eğimi için düzeltme faktörü dikkate alınmamıştır.

Çalışmanın en son aşamasında ise sondaj yapılmış noktadaki zemin profillerinin Sivilaşma Potansiyeli İndeksi ve Sivilaşma Şiddeti İndeksi değerleri hesaplanarak bunların mekânsal dağılımı bulunmuştur. Sivilaşma Potansiyeli İndeksinin hesaplanmasında Sönmez (2003), Sivilaşma Şiddeti İndeksinin hesaplanmasında ve sınıflandırılmasında Sönmez ve Gökçeoğlu (2005) esas alınmıştır. Ayrıca, bu çalışmada, farklı sivilaşma potansiyeline sahip alanlara düşen bina sayısı da bulunmuştur.

YÖNTEM

Sayısal yükseklik modelinin elde edilişi

Ayvalık ilçesi (Balıkesir) Altınova mahallesinin 12.5x12.5 metre çözünürlüğe sahip sayısal yükseklik modeli (DEM) <https://search.asf.alaska.edu/#/> adresli internet sitesinden indirilmiştir. Çalışma alanının eş yükselti eğrileri ve eğim haritası bu sayısal yükseklik modeli kullanılarak oluşturulmuştur. Eş yükselti eğrilerinin ve eğim haritasının elde edilmesinde ve bu çalışmada yapılan mekânsal analizlerde Balıkesir Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Bilgisayar Laboratuvarında lisanslı kurulu olan ArcGIS (V. 10.3) programı kullanılmıştır.

Senaryo depreminin oluşturulması

Zemin tabakalarının sivilaşmaya karşı güvenlik sayısının bulunması için en büyük yatay yer ivmesine ihtiyaç vardır. Bu nedenle çalışma alanını içine alan bölgenin sismotektonik özellikleri göz önünde bulundurularak, sivilaşma analizi için senaryo depremler deterministik olarak belirlenmiştir. Bu amaçla, öncelikle çalışma alanının merkezinden en fazla 100 km uzaklıkta bulunan aktif fay ve fay zonları belirlenmiştir (Şekil 2). Daha sonra, Eşitlik 1 (Well ve Coppersmith, 1994) yardımıyla söz konusu fayların/fay zonlarının üretebileceği en büyük deprem büyüklüğü bulunmuştur (Tablo 1).

$$M_w = a + b \log(SRL) \quad (1)$$

a ve b katsayıları fay türüne bağlıdır. Doğrultu atımlı faylar için a=5,16 b=1,12, normal fay için a=4,86 b=1,32, ters fay için a=5,00 b=1,22 ve tüm fay türleri için a=5,508 b=1,16'dır (Wells ve Coppersmith, 1994).

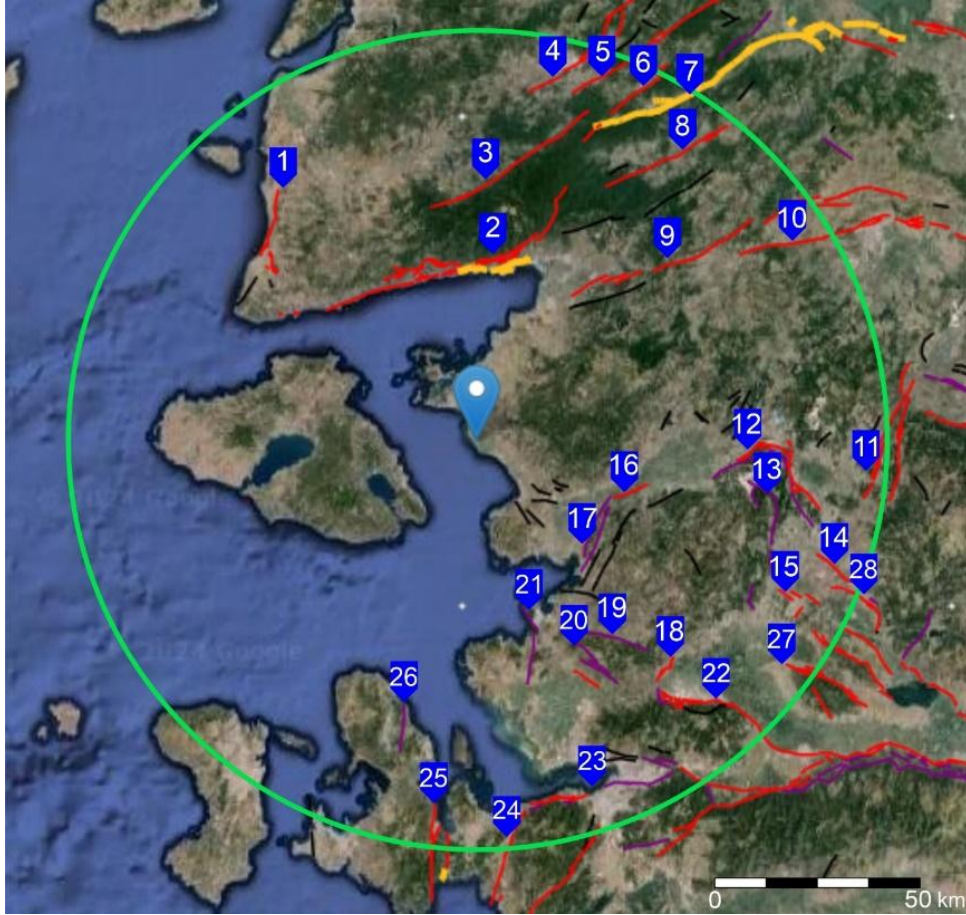
Bu çalışmada, yüzey kırığı uzunlukları (SRL, km), Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü tarafından hazırlanan Türkiye aktif fay haritasından (MTA 2018) alınmıştır.

Senaryo depremin oluşturulmasının en son aşamasında, çalışma alanını etkileyecek fayların/fay zonlarının üretebileceği olası en büyük olası depremlerin çalışma alanında oluşturacağı en büyük yatay yer ivmesi bulunmuştur (Tablo 1). Literatürde en büyük yer ivmesini bulmak için verilen çok sayıda azalım ilişkisi vardır. Bu çalışmada en büyük yer ivmesini (a_{max}) bulmak için Ulusay vd. (2004) tarafından verilen aşağıdaki Eşitlik 2 kullanılmıştır.

$$a_{max} = 2,18 e^{0,0218(33,3M_w - R_e + 7,8427S_A + 18,9282S)} \quad (2)$$

Eşitlikte, kaya için $S_A = 0$, $S_B = 0$, zemin için $S_A = 1$, $S_B = 0$ ve gevşek Zemin için $S_A = 0$, S_B

= 1, Re aktif fayın inceleme alanına en yakın mesafesidir. Re değerleri MTA (2018)'nin aktif fay haritasında inceleme alanının fay izine en yakın olduğu uzaklık olarak alınmıştır.



Şekil 2. Altınova sahiline (Ayvalık, Balıkesir) en fazla 100 km uzaklıktaki faylar (Fay numaraları Tablo 1’de açıklanmıştır).

Figure 2. Faults within 100 km of the Altınova coast (Ayvalık, Balıkesir) (Fault numbers are explained in Table 1).

Tablo 1. İnceleme alanına en fazla 100 km uzaklığındaki fay ve fay zonları ile bunların üretebileceği deprem büyüklüğü ile en büyük yer ivmesi değerleri.

Table 1. Faults and fault zones within a distance of 100 km from the study area, the earthquake magnitudes they can produce, and the maximum ground acceleration values.

No	Fay/Fayzonu	Segment	Fay izi uzunluğu SRL(km)	Merkeze uzaklık, Re (km)	Deprem büyüklüğü Mw	En büyük yer ivmesi a _{max} (g)
1	Kestanbol fayı		21,8	65,56	6,63	0,0657
2	Edremit fay zonu		71,7	42,22	7,23	0,1689
3	Evciler fayı		46,4	58,68	7,01	0,1006
4	Biga-Çan fay zonu	Çan	19,9	86,52	6,59	0,0402
5	Sarıköy fayı		66,6	88,20	7,2	0,0603
6	Bekten fayı		16,2	87,17	6,48	0,0368
7	Yenice-Gönen fayı		88,1	78,03	7,34	0,0834
8	Pazarköy fayı		34,5	70,13	6,86	0,0703
9	Havran-Balya fay zonu		85,3	43,31	7,32	0,1758
10	Balıkesir fayı	Gökçeyazı	39,2	79,84	6,93	0,0596
11	Gelenbe fay zonu	Batı	36,5	98,72	6,89	0,0385
12	Soma-Kırkağaç fay zonu	2	31,7	64,30	6,82	0,0774
13	Soma-Kırkağaç fay zonu	3	39,3	69,07	6,93	0,0755
14	Gediz Graben fay sistemi	Akhisar fayı	11,9	88,79	6,33	0,0317
15	Gediz Graben fay sistemi	Ozanca fayı	4,9	82,66	5,88	0,0262
16	Bergama fayı		9,3	36,08	6,2	0,0915
17	Zeytindağ fay zonu	1	17,3	33,67	6,52	0,1210
18	Gediz Graben fay sistemi	Muradiye fayı	7,8	72,46	6,11	0,0388
19	Güzelhisar fayı		23	53,67	6,66	0,0868

20	Menemen fay zone		8	56,31	6,13	0,0557
21	Yenifoça fayı		21	41,87	6,61	0,1086
22	Gediz Graben fay sistemi	Manisa fayı	46,3	77,44	7,01	0,0668
23	İzmir fayı		34,58	91,37	6,87	0,0443
24	Seferihisar fayı		25,97	92,40	6,72	0,0390
25	Gülbahçe fay zone		24,58	91,04	6,69	0,0394
26	Mordoğan fayı		12,02	65,39	6,33	0,0530
27	Gediz Graben fay sistemi	Halitpaşa fayı	24,48	95,30	6,69	0,0358
28	Gediz Graben fay sistemi	Akselendi fayı	19,64	95,58	6,58	0,0329

SPT-N Değerlerinin Düzeltilmesi

SPT-N değeri zeminin göreceliği sıklığını ifade etmektedir bu nedenle söz konusu değere bağlı sıvılaşma analizleri geliştirilmiştir. Arazide ölçülen SPT-N değeri tij uzunluğu, örnekleme türü, kuyu çapı, çekiç türü (enerji oranı), örtü yükü basıncı ve zemindeki ince tane oranına karşı duyarlıdır, söz konusu bu faktörlerden etkilenirler. Bu nedenle sıvılaşma analizlerinde söz konusu bu faktörler dikkate alınarak düzeltilmiş SPT-N değeri kullanılmaktadır. Tij uzunluğu faktörü (C_R), örnekleme türü faktörü (C_S), kuyu çapı faktörü (C_B), çekiç türü (enerji oranı) faktörü (C_E) ve örtü yüküne (C_N) göre düzeltilmiş SPT-N değeri ($(N_1)_{60}$) aşağıda verilen Eşitlik 3 (Youd vd., 2001) ile bulunmaktadır. ($N_1)_{60}$ değeri temiz kumlar (ince tane içermeyen kumlar) için hesaplanmaktadır.

$$(N_1)_{60} = C_R C_S C_B C_E C_N \quad (3)$$

$(N_1)_{60}$ 'ın belirlenmesi için düzeltme katsayılarının seçimi Robertson ve Wride

(1998) tarafından verilen tablodan yapılmaktadır (Tablo 2).

İnce tane oranına (İTO) göre düzeltilmiş SPT-N değeri aşağıdaki eşitliklerden (Eşitlik 4) (Youd vd., 2001) bulunmaktadır.

$$(N_1)_{60CS} = \alpha + \beta (N_1)_{60} \quad (4a)$$

$$\alpha=0 \quad (\text{İTO} \leq 5 \text{ için}) \quad (4b)$$

$$\alpha = \exp \left[1,76 - \left(\frac{190}{\text{İTO}^2} \right) \right] \quad (4c)$$

(%5 < İTO < %35 için)

$$\alpha=5 \quad (\text{İTO} > 35 \text{ için}) \quad (4d)$$

$$\beta=1 \quad (\text{İTO} \leq 5 \text{ için}) \quad (4e)$$

$$\beta = \left[0,99 + \frac{\text{İTO}^{1,5}}{1000} \right] \quad (4f)$$

(%5 < İTO < %35 için)

$$\beta=1,2 \quad (\text{İTO} > 35 \text{ için}) \quad (4g)$$

Tablo 2. Düzeltilmiş SPT-N değerinin $((N_1)_{60})$ belirlenmesi için düzeltme katsayılarının seçimi (Robertson ve Wride, 1998).

Table 2. Selection of correction coefficients for determining the corrected SPT-N value $((N_1)_{60})$ (Robertson and Wride, 1998).

Faktör	Ekipman değişkeni	Sembol	Düzeltilme
Örtü yükü basıncı		C_N	$C_N = (Pa/\sigma'_v)^{0.5}$ (Liao ve Whitman 1986) $C_N \leq 2$ $Pa = 101 \text{ kPa}$ veya 1 atm $\sigma'_v = \text{Efektif düşey gerilme}$
Enerji oranı	1-) Donut türü çekiç 2-) Safety türü çekiç 3-) Otomatik-Trip Donut türü çekiç	C_E	0,5-1,0 0,7-1,2 0,8-1,3
Kuyu çapı	1-) 65 mm ile 115 mm 2-) 150 mm 3-) 200 mm	C_B	1,00 1,05 1,15
Tij uzunluğu	1-) 3 m ile 4 m 2-) 4 m ile 6 m 3-) 6 m ile 10 m 4-) 10 m ile 30 m 5-) >30 m	C_R	0,75 0,85 0,95 1,00 >1,00
Örnekleme türü	Standart örnekleyci İç gömlek kullanmadan	C_S	1,0 1,1-1,3

Zemin tabakalarının sıvılaşmaya karşı güvenlik sayısının hesaplanması

Seed ve Idriss (1971) tarafından tanımlanan basitleştirilmiş prosedür, zemin tabakasının sıvılaşma potansiyelinin değerlendirilmesinde pratikte yaygın olarak kullanılan yöntemdir. Daha sonra, basitleştirilmiş prosedür

iki parametre dikkate alınır: (1) deprem olayının zemine verdiği tekrarlı yükleme oranının ifade eden tekrarlı gerilme oranı (CSR) ve (2) zemin tabakasının sıvılaşma tetiklemesine karşı dayanımını ifade eden tekrarlı dayanım oranı (CRR) (Eşitlik 5) $F_L \leq 1$ ise zemin sıvılaşmaya eğilimlidir ve $F_L > 1$ ise zemin sıvılaşmaya karşı dirençlidir (Youd vd., 2001).

güncellenen verilere dayalı olarak iyileştirilmiştir (Seed, 1979; Seed vd., 1985; Youd vd., 2001; Cetin vd., 2002, 2004; Idriss ve Boulanger, 2004, 2008, 2010; Boulanger ve Idriss, 2012; Cetin vd., 2018a). Zemin tabakasının sıvılaşmaya karşı güvenlik sayısının (F_L) hesaplanmasında temel olarak

$$F_L = \frac{CRR_{M=7,5}}{CSR_{M=7,5, \sigma'_p=1 \text{ atm}}} \quad (5)$$

Seed ve Idriss (1967), zemin profilindeki belirli bir derinlikteki tekrarlı gerilme oranını (CSR), maksimum döngüsel kesme gerilme oranının %65'ine eşit temsili bir değer olarak ifade ettiler (Eşitlik 6a). Seed ve Idriss (1971) ve Seed vd. (1975) tarafından önerilen basitleştirilmiş

yöntemde de düzgün tekrarlı kesme gerilmesini (CSR'yi) elde etmek için başlangıç formülü etkili örtü yükü gerilmesi kullanılarak normalleştirilmiştir (Eşitlik 6b). Daha sonra, belli büyüklükteki depremler için düzeltilmiş CSR değerlerini elde etmek için, Seed ve Idriss (1967) tarafından verilen formül, deprem büyüklüğüne göre değiştirilmiştir. Ayrıca, zeminin sıvılaşma potansiyelinin çevresel gerilmeye bağlı olduğu dikkate alınarak, Seed vd. (1983) örtü yükü gerilme düzeltme faktörünü önermişlerdir. Sonuç olarak CSR değeri $M_w=7,5$ 'den örtü yükü basınçları 1 atm'den farklı durumlar için düzeltilmiş duruma gelmiştir (Eşit 6c) (Cetin vd., 2018a).

$$CSR_{\sigma'_v} = 0,65 \frac{\tau_{max}}{\sigma'_v} \quad (6a)$$

$$CSR_{\sigma'_v} = 0,65 \frac{\sigma_v}{\sigma'_v} \frac{a_{max}}{g} r_d \quad (6b)$$

$$CSR_{M,\sigma'_v} = 0,65 \frac{\sigma_v}{\sigma'_v} \frac{a_{max}}{g} r_d \frac{1}{MSF} \frac{1}{K_\sigma} \quad (6c)$$

Burada CSR_{M,σ'_v} özgün deprem büyüklüğü ve arazideki efektif gerilme için bulunan tekrarlı gerilme oranı, τ_{max} en büyük kesme gerilmesi, σ_v toplam düşey gerilme, σ'_v efektif düşey gerilme, r_d makaslama gerilmesi azaltma faktörü, a_{max} gal cinsinden en büyük yatay yer ivmesi, g yerçekimi ivmesi, MSF deprem büyüklüğü ölçekleme faktörü ve K_σ efektif örtü yükü için düzeltme faktörüdür.

Literatürde, zemin profilindeki esneklik düzeltmesini sağlayan kayma gerilimi azaltma faktörü ile ilgili birkaç ampirik ilişki verilmiştir (Seed ve Idriss, 1971; Imai vd., 1981; Seed vd., 1984; Seed vd., 1985; Liao ve Whitman, 1986; Golesorkhi, 1989; Idriss, 1999; Cetin vd., 2004; Kishida vd., 2009; Cetin vd., 2018b). Bu çalışmada Seed ve Idriss (1971) tarafından önerilen ve Liao ve Whitman (1986) tarafından yaklaşık olarak hesaplamaya dönüştürülen

ilişki (Eşitlik 7) kullanılmıştır Eşitlik 7'de z metre cinsinden yer yüzeyinden itibaren derinliği göstermektedir.

$$r_d = \frac{(1,00 - 0,4113z^{0,5} + 0,0452z + 0,001753z^{1,5})}{(1,000 + 0,4177z^{0,5} + 0,05729z - 0,006205z^{1,5} + 0,001210z^2)} \quad (7)$$

Literatürde, MSF için çeşitli ilişkiler verilmiştir (Seed ve Idriss, 1982; Ambraseys, 1988; Arango, 1996; Youd ve Noble, 1997; Youd vd., 1997; Andrus ve Stokoe, 1997; Idriss, 1998, 1999; Youd vd., 2001; Boulanger ve Idriss, 2015). Bu çalışmada Idriss (1999) tarafından geliştirilen revize edilmiş büyüklük ölçekleme faktörü (Eşitlik 8) kullanılmıştır.

$$MSF = \frac{10^{2,24}}{M_w^{2,56}} \quad (8)$$

K_σ teriminin hesaplanmasında Hynes ve Olsen (1999) tarafından verilen formül (Eşitlik 9) kullanılmıştır.

$$K_\sigma = \left(\frac{\sigma'_v}{P_a} \right)^{(f-1)} \leq 1 \quad (9)$$

Burada P_a 1 atm basınçtır (101 kPa) σ'_v ise düşey efektif gerilmedir.

Bu çalışmada f 'nin bulunmasında Montgomery vd. (2012) tarafından önerilen doğrusal ilişki kullanılmıştır (Eşitlik 10 ve 11). C_d değeri 46 olarak alınmıştır (Idriss ve Boulanger, 2008). Eşitliklerde D_R göreceli sıkılık, $(N_1)_{60CS}$ ise ince tane oranına göre düzeltilmiş SPT-N değeridir.

$$f = 1 - \left(\frac{D_R}{2} \right) \quad 0,6 \leq f \leq 0,8 \quad (10)$$

$$D_R = \sqrt{\frac{(N_1)_{60CS}}{C_d}} \quad (11)$$

Literatürde, zemin tabakasının sıvılaşmaya karşı dayanım kapasitesi olan tekrarlı dayanım oranını (CRR) elde etmek için jeoteknik ve jeofizik deneyler de dahil olmak üzere çok sayıda arazi deneyi kullanılmıştır. Bu

çalışmada, $M = 7,5$ büyüklüğündeki depremler için CRR değeri, aşağıdaki ifade kullanılarak $(N_1)_{60cs}$ 'ye (ince tane oranına göre düzeltilmiş SPT-N değerine) göre hesaplanmıştır (Youd vd. 2001) (Eşitlik 12).

$$CRR_{7,5} = \frac{1}{34 - (N_1)_{60cs}} + \frac{(N_1)_{60cs}}{135} + \frac{50}{[10(N_1)_{60cs} + 45]^2} - \frac{1}{200} \quad (12)$$

Zemin tabakalarının sivilaşma olasılıklarının hesaplanması

Zemin profilinin Sivilaşma Şiddeti İndeksini (Lee vd., 2003) hesaplayabilmek için zemin tabakalarının sivilaşma olasılıklarına (P_L) (Chen ve Juang, 2000, Juang vd., 2003) ihtiyaç vardır. Juang vd. (2003) zemin tabakalarının sivilaşma olasılığını tahmin etmek için aşağıdaki denklemi (Eşitlik 13) önermişlerdir. P_L değeri zemin tabakalarının sivilaşmaya karşı güvenlik sayısı, F_L 'nin bir fonksiyonu olarak sıfırdan bire kadar değişir (Tablo 3).

$$P_L = \frac{1}{1 + \left(\frac{F_L}{0,96}\right)^{4,5}} \quad (13)$$

Tablo 3. Chen ve Juang (2000) tarafından önerilen sivilaşma olasılığının sınıflandırılması.

Table 3. Classification of liquefaction probability proposed by Chen and Juang (2000).

Olasılık (P_L) aralığı	Tanımlama	Güvenlik sayısı (F_L) aralığı
$0,85 \leq P_L < 1,00$	Sivilaşacağı neredeyse kesin	$0,653 \geq F_L > 0,000$
$0,65 \leq P_L < 0,85$	Sivilaşacağı çok muhtemel	$0,837 \geq F_L > 0,653$
$0,35 \leq P_L < 0,65$	Sivilaşma/sivilaşmama olasılığı eşit	$1,102 \geq F_L > 0,837$
$0,15 \leq P_L < 0,35$	Sivilaşacağı muhtemel değil	$1,411 \geq F_L > 1,102$
$0,00 \leq P_L < 0,15$	Sivilaşmayacağı neredeyse kesin	$F_L > 1,411$

Zemin profilinin sivilaşma potansiyeli indeksi değerlerinin bulunuşu

Sivilaşmanın yer yüzeyindeki hasar verici etkisinin değerlendirilmesinde ilk yaklaşım Iwasaki vd. (1982) tarafından önerilmiştir. Bu yaklaşımda ilk 20 m derinliğe kadar yer alan zemin tabakalarının kalınlığı, bu tabakaların yüzeye yakınlığı ve 1'den küçük olan sivilaşmaya karşı güvenlik sayısı dikkate alınmıştır. Söz konusu çalışmada verilen Sivilaşma Potansiyeli İndeksi, (L_I) zemin

profilinin sivilaşma potansiyellerini vermekte olup aşağıdaki formüllerle elde edilmektedir (Eşitlik 14 ve 15). Iwasaki vd. (1982) L_I değerlerine dayanarak sivilaşmanın şiddetini çok düşük ($L_I = 0$), düşük ($0 < L_I \leq 5$), yüksek ($5 < L_I \leq 15$) ve çok yüksek ($L_I > 15$) olarak sınıflandırmıştır.

$$L_I = \int_0^{20m} F(z)W(z)dz \quad (14)$$

$$\begin{aligned} F_L < 1,0 \text{ için } F(z) &= 1 - F_L & \text{ve} & \\ F_L \geq 1,0 \text{ için } F(z) &= 0 \end{aligned} \quad (15)$$

$$\begin{aligned} z \leq 20m \text{ için } W(z) &= 10 - 0,5z \\ \text{ve } z > 20m \text{ için } W(z) &= 0 \end{aligned} \quad (15b)$$

Sönmez (2003) L_1 hesaplanmasında ve sınıflandırılmasında bazı sınırlamalar olduğunu ortaya koymuştur. Sönmez (2003) sınıflandırmaya "sıvılaştırılmaz" ve "orta" kategorileri ekleyerek ve marjinal olarak sınıvlaşabilir ve sınıvlaşamaz sınırının $F_L = 1,2$ eşik değerini dikkate alarak değişiklik yapmıştır. Bu sınır Iwasaki vd. (1982)'de $F_L < 1$ 'dir. Söz konusu yazar sınıvlaşma şiddetini "sınıvlaşma yok" ($L_1=0$), "düşük" ($0 < L_1 \leq 2$), "orta" ($2 < L_1 \leq 5$), "yüksek" ($5 < L_1 \leq 35$) ve "çok yüksek" ($L_1 > 35$) olarak sınıflandırmıştır. Sönmez (2003) tarafından yapılan çalışmada, F_L değerinin 0,95-1,2 aralığında olması durumunda söz konusu eşik değeri dikkate alınarak $F(z)$ grafiği oluşturulmuştur (Eşitlik 16).

$$F_L \leq 0,95 \text{ için } F(z) = 1 - F_L \quad (16)$$

$$\begin{aligned} 0,95 < F_L \\ \leq 1,2 \text{ için } F(z) \\ = 2 \times 10^6 e^{-18,427 F_L} \end{aligned} \quad (16b)$$

$$F_L < 1,2 \text{ için } F(z) = 0 \quad (16c)$$

Bu çalışmada Sınıvlaşma Potansiyeli İndeksinin (L_1) hesaplanmasında ve sınıflandırılmasında Sönmez (2003) esas alınmıştır.

Sönmez (2003)'te zemin tabakasının sınıvlaşmama sınırını $F_L=1,2$ alınırken Sönmez ve Gökçeoğlu (2005)'te bu sınır kabul görmemiş, yazarlar Chen ve Juang (2000) çalışmasına dayanarak $F_L > 1,411$ için zemin tabakasının sınıvlaşmayacağı neredeyse kesin ifadesini kullanmışlardır.

Zemin profilinin sınıvlaşma şiddeti indeksi değerlerinin bulunuşu

Lee vd. (2003) 1999 Chi-Chi depremi sırasında kapsamlı zemin sınıvlaşmasının meydana geldiği Yuanlin bölgesinin sınıvlaşma potansiyelini değerlendirmişlerdir. Bu araştırmacılar, Juang vd. (2003) tarafından önerilen olasılık fonksiyonunu (Eşitlik 13) dikkate alıp Iwasaki vd. (1982) tarafından önerilen L_1 indeksinin $F(z)$ terimini P_L (Eşitlik 13) ile değiştirdiler ve ayrıca L_1 'yi sınıvlaşma risk indeksi (I_R) olarak (Eşitlik 17) yeniden adlandırmışlardır.

$$I_R = \int_0^{20m} P_L(z)W(z)dz \quad (17)$$

Lee vd. (2003) I_R 'nin 20'den küçük değerlerini "düşük", 20 ile 30 arasındaki değerlerini "yüksek" ve 30'dan büyük değerlerini de "çok yüksek" olarak sınıflandırmışlardır. Sönmez ve Gökçeoğlu (2005) I_R 'nin risk kavramını karşılamadığı, sadece L_1 gibi sınıvlaşma haritalarının üretiminde kullanıldığına dikkat çekerek Lee vd. (2003) tarafından önerilen indeksin adının "Sınıvlaşma Şiddeti İndeksi (L_S)" olmasını önermişlerdir. Sönmez ve Gökçeoğlu (2005) L_S 'nin hesaplanmasını aşağıdaki eşitliklerle yapılmasını önermişlerdir.

$$L_S = \int_0^{20m} P_L(z)W(z)dz \quad (18a)$$

$$\begin{aligned} z \leq 20m \text{ için } W(z) &= 10 - 0,5z \\ \text{ve } z > 20m \text{ için } W(z) &= 0 \end{aligned} \quad (18b)$$

$$F_L \leq 1,411 \text{ için } P_L = \frac{1}{1 + \left(\frac{F_L}{0,96}\right)^{4,5}} \quad (18c)$$

$$F_L > 1,411 \text{ için } P_L = 0 \quad (18d)$$

Sönmez ve Gökçeoğlu (2005) L_S değerine göre sınıvlaşma şiddetini aşağıdaki gibi sınıflandırmışlardır (Tablo 4).

Tablo 4. Sıvılaşma Şiddeti İndeksine göre sınıflandırma (Sönmez ve Gökçeoğlu, 2005).

Table 4. Classification according to Liquefaction Severity Index (Sönmez and Gökçeoğlu, 2005)

L_s	Tanımlama
$0,85 \leq L_s < 1,00$	Çok yüksek
$0,65 \leq L_s < 0,85$	Yüksek
$0,35 \leq L_s < 0,65$	Orta
$0,15 \leq L_s < 0,35$	Düşük
$0,00 < L_s < 0,15$	Çok düşük
$L_s=0$	Sıvılaşma yok

Bu çalışmada, zemin profilinin Sıvılaşma Şiddeti İndeksinin hesaplanmasında ve sınıflandırılmasında Sönmez ve Gökçeoğlu (2005) dikkate alınmıştır.

Mekansal enterpolasyonların yapılışı

Jeoteknik özelliklerin ve ilgili parametrelerin mekansal dağılımlarını tahmin etmek için deterministik bir yöntem olan Mesafe Ağırlıklandırmanın Ters (IDW) enterpolasyon yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntem iki nokta arasındaki ilişki ve benzerliğin aralarındaki mesafeye orantılı olduğu varsayımına dayanır. Shepard (1968) tarafından tanımlanan IDW'nin genel bir biçimi aşağıdaki şekilde verilmiştir (Eşitlik 19).

$$Z(x) = \frac{\sum_{i=1}^n \omega_i(x) z_i}{\sum_{i=1}^n \omega_i(x)}, \quad \omega_i(x) = 1/d_i^p \quad (19)$$

Burada, x bir tahmin konumunu, x_i bir veri noktasını, d bilinen veri noktasından bilinmeyen tahmin noktasına olan mesafeyi, n toplam veri noktası sayısını ve p güç

parametresini belirtir. Genellikle bu çalışmada olduğu gibi $p=2$ alınmaktadır. Jeoteknik özelliklerin ve ilgili parametrelerin mekansal dağılımları yönlendirme göstermediğinden bu çalışmada enterpolasyon yöntemi olarak IDW kullanılmıştır.

BULGULAR

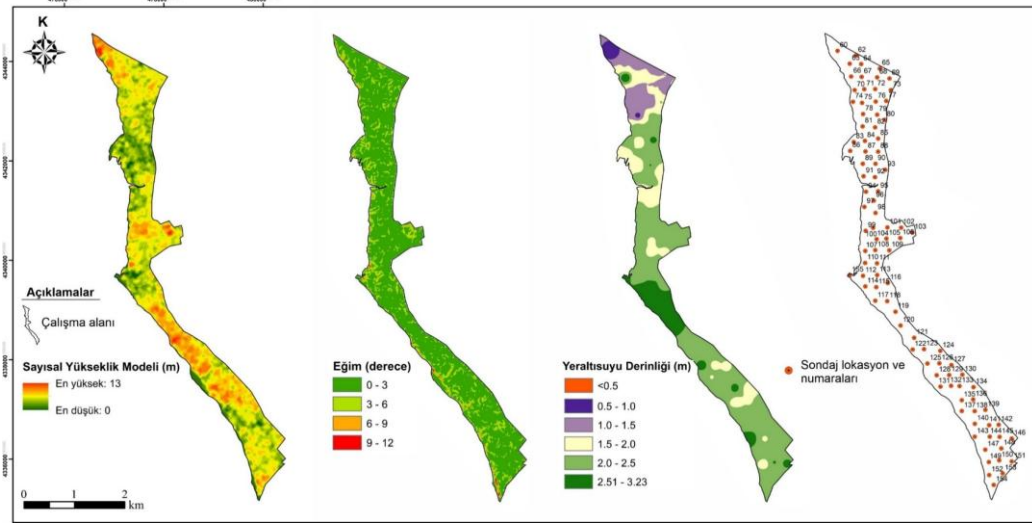
Sıvılaşma analizi için senaryo deprem

Zemin tabakalarının sıvılaşmaya karşı güvenlik sayısının bulunması için en büyük yatay yer ivmesine ihtiyaç vardır (bakınız Eşitlik 6c). İnceleme alanına en fazla 100 km uzaklıktaki fayların/fay zonlarının (Şekil 3) üreteceği en büyük deprem büyüklüğü ve bu depremlerin inceleme alanında oluşturacağı en büyük yer ivmesi Eşitlikler 1 ve 2 ile hesaplanmıştır (Tablo 1). Tablo 1 incelendiğinde olası senaryolar arasında en tehlikeli senaryonun Havran-Balya fayına bağlı olarak gerçekleşeceği görülmektedir. Yapılan hesaplamalara göre Havran-Balya fayı $M_w=7,3$ büyüklüğünde deprem üreteceği ve bu deprem inceleme alanında $0,1758$ g büyüklüğünde en büyük yer ivmesi oluşturacağı görülmüştür (Tablo 1). Bu nedenle zemin tabakalarının sıvılaşmaya karşı güvenlik sayısı hesaplanırken en büyük yer ivmesi $a_{max}=0,1758$ g olarak alınmıştır.

Topografya ve eğim

İnceleme alanının sayısal yükseklik modeli (DEM) Şekil 3'de verilmiştir. İnceleme alanında en düşük kot 0 m, en yüksek kot 13 m'dir. İncelene alanında deniz kıyısı 0 m kota sahip olup topoğrafya düzensiz olarak değişmektedir.

Eğim haritası DEM'den üretilmiştir (Şekil 3). İnceleme alanının eğimi 0 ile 12 derece arasında değişmektedir. İnceleme alanının %82,1'i 3 dereceden küçük, %16,6'sı 3 ile 6 derece arasında, %1,2'si 6 ile 9 derece arasında ve %0,1'i 9 ile 12 derece arasında eğime sahiptir.



Şekil 3. Altınova sahilinin (Ayvalık, Balıkesir) sayısal yükseklik modeli, eğim, yeraltı suyu derinliği ve sondaj lokasyon haritası.

Figure 3. Digital elevation model, slope, groundwater depth, and drilling location map of the Altınova coast (Ayvalık, Balıkesir).

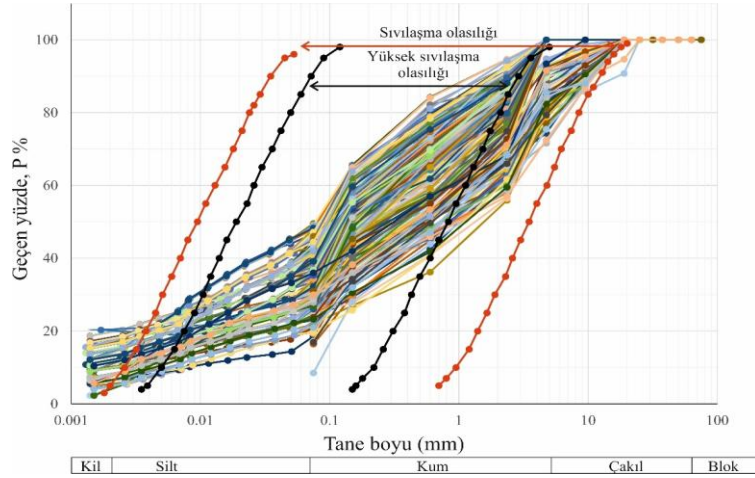
Yeraltı suyu derinliği

İnceleme alanında yeraltı suyu derinliği 0,5 m ile 3,23 m arasında değişmektedir (Şekil 3). Yeraltı suyu derinlikleri Nisan 2016'da ölçülmüştür. Yeraltı suyu derinliği inceleme alanının %1,6'sında 0,5 ile 1,0 m arasında, %10,6'sında 1,0 ile 1,5 m arasında, %19,0'da 1,5 ile 2,0 m arasında, %52,7'sinde 2,0 ile 2,5 m arasında ve %11,1'in de 2,5 ile 3,23 m arasında değişmektedir (Şekil 3). Çalışma

alanında deniz suyu girişi için bir çalışma yapılmamıştır.

Zemin türü ve zemin sıklığı

İnceleme alanındaki yayılım gösteren alüvyon zeminin elek analizi sonuçlarına göre söz konusu alüvyon iki tür zeminden oluşmaktadır (Şekil 4); Killi siltli kum ve az çakıl (çakıl %5-10, kum %51-56, silt %19-21 ve kil %18-20) ve çakıllı kum ve az silt (çakıl %15-24, kum %56-61, silt %13-14 ve kil %6-11). Tane dağılımı



Şekil 4. Tane boyu dağılımına bağlı olarak çizilen sıvılaşma potansiyeli seviyeleri (Tsuchida, 1970) ve çalışma alanındaki alüvyon zemine ait tane boyu dağılım eğrileri.

Figure 4. Liquefaction potential levels drawn depending on grain size distribution (Tsuchida, 1970) and grain size distribution curves of the alluvial soil in the study area.

dikkate alındığında söz konusu iki tür zemin de sıvılaşması olası zeminler grubuna girmektedir (Şekil 4).

Sıvılaşmanın gelişiminde zeminin göreceli sıkılığı önemlidir. Sıvılaşma gevşek zeminlerde gelişmektedir. Zeminin göreceli sıkılığı arttıkça sıvılaşmanın gelişme olasılığı düşmektedir. Bu nedenlerle farklı derinliklerdeki (4, 8, 12 ve 16

m derinliklerdeki) zemin tabakalarının düzeltilmiş SPT- N değerinin ($(N_1)_{60}$ değerinin) mekânsal değişimi incelenmiştir (Şekil 5). Bu inceleme amacıyla oluşturulan haritalarda zeminlerin ($(N_1)_{60}$ değerine göre göreceliği sıkılığının (D_r) sınıflandırılması için Duncan ve Buchignani (1976) sınıflaması esas alınmıştır (Tablo 5).

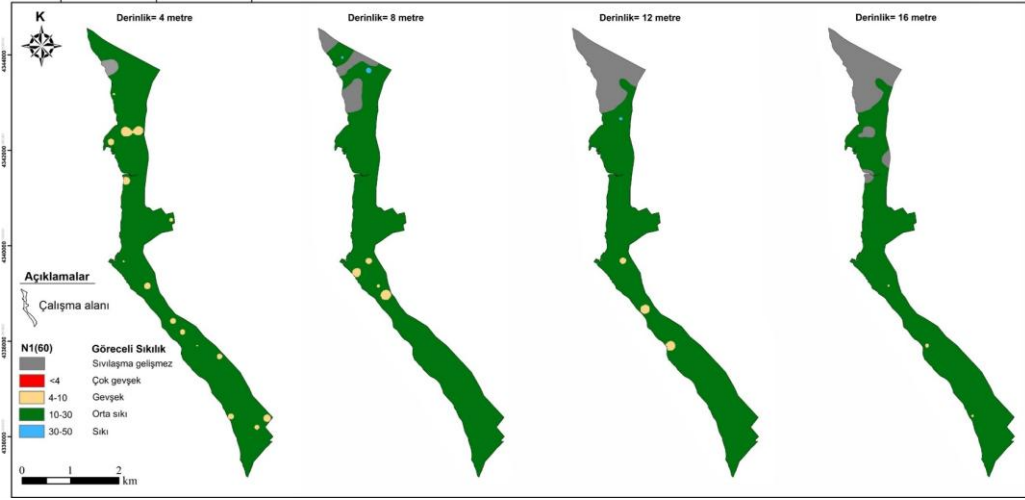
Tablo 5. Düzeltilmiş SPT-N değerine ($(N_1)_{60}$) göre göreceli sıkılığın (D_r) sınıflandırılması (Duncan ve Buchignani, 1976).

Table 5. Classification of relative tightness (D_r) according to the corrected SPT-N value ($(N_1)_{60}$) (Duncan and Buchignani, 1976).

$(N_1)_{60}$	Sıklık Durumu	D_r (%)
0-4	Çok gevşek	0-15
4-10	Gevşek	15-35
10-30	Orta sıkı	35-65
30-50	Sıkı	65-85
>50	Çok sıkı	85-100

Düzeltilmiş SPT-N değerinin $((N_1)_{60})$, zemin tabakalarının sıvılaşmaya karşı güvenlik sayısının ve sıvılaşma olasılıklarının farklı derinliklerde mekânsal dağılımını gösteren haritalarda (Şekil 6, 7 ve 8) kaya birimlerinin yayılım gösterdiği alanlar “Sıvılaşma gelişmez”

olarak tanımlanmıştır. Bu haritalarda 4 m derinlikte inceleme alanının %1,3’ünde, 8 m derinlikte %7,7’sinde, 12 m derinlikte %16,9’unda ve 16 m derinlikte %19,2’sinde sıvılaşmanın gelişmeyeceği görülmektedir (Şekil 6, 7 ve 8).



Şekil 5. Düzeltilmiş SPT-N değerinin $((N_1)_{60})$ farklı derinliklerde mekânsal dağılımı.

Figure 5. Spatial distribution of corrected SPT-N value $((N_1)_{60})$ at different depths.

Farklı derinlikte zeminin göreceli sıklığının mekânsal dağılımının gösterildiği haritalarda “Çok gevşek” ve “Çok sıkı” tür zeminlerin yer almadığı görülmektedir. 4 m derinlikte inceleme alanının %3,4’ünde “gevşek”, %95,3’ünde “orta sıkı” ve %0,0’ında “sıkı” zeminler, 8 m derinlikte inceleme alanının %1,3’ünde “gevşek”, %90,8’inde “orta sıkı” ve %0,2’sinde “sıkı” zeminler, 12 m derinlikte inceleme alanının %1,2’sinde “gevşek”, %81,8’inde “orta sıkı” ve %0,1’inde “sıkı” zeminler ve 16 m derinlikte inceleme alanının %0,1’inde “gevşek”, %98,7’sinde “orta sıkı” ve %0,0’ında “sıkı” zeminler yayılım göstermektedir (Şekil 5).

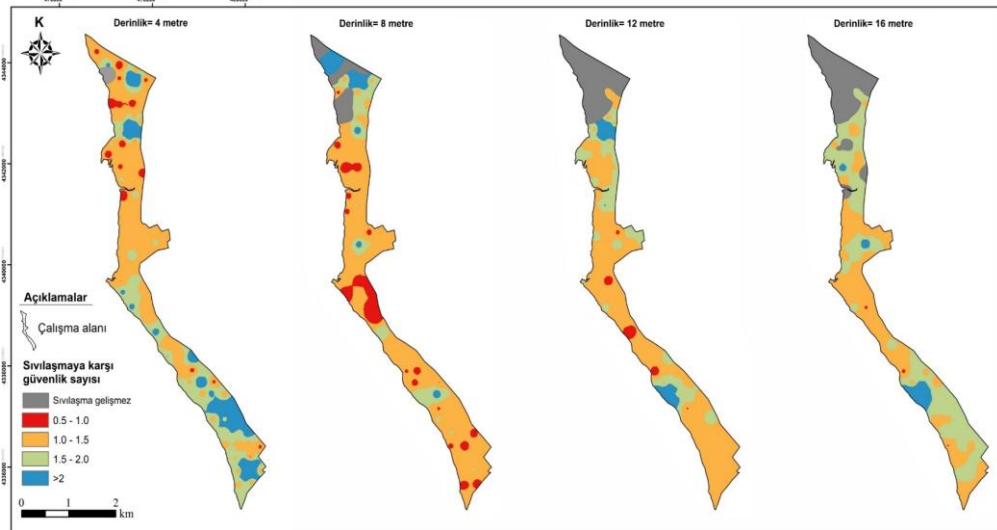
Zemin tabakalarının sıvılaşmaya karşı güvenlik sayısının ve sıvılaşma olasılıklarının farklı derinliklerde mekânsal dağılımı

Zemin tabakalarının sıvılaşmaya karşı güvenlik sayısının farklı derinliklerdeki mekânsal dağılımını gösteren haritalar incelendiğinde; 4 m derinlikte inceleme alanının %3,7’sinde F_L ’nin 0,5-1,0 arasında, %54,1’inde F_L ’nin 1,0-1,5 arasında, %26,5’inde F_L ’nin 1,5-2,0 arasında değiştiği, %14,4’ünde F_L ’nin 2,0’dan büyük olduğu, 8 m derinlikte inceleme alanının %9,6’sında F_L ’nin 0,5-1,0 arasında, %65’inde F_L ’nin 1,0-1,5 arasında, %11,9’unda F_L ’nin

1,5-2,0 arasında değiştiği, %5,8'inde F_L 'nin 2,0'dan büyük olduğu görülmüştür (Şekil 6). 12 m derinlikte inceleme alanının %1,9'unda F_L 0,5-1,0 arasında, %62,2'sinde F_L 1,0-1,5 arasında, %14,3'ünde F_L 1,5-2,0 arasında değişmekte ve %4,8'inde ise $F_L > 2,0$ 'dır. 16 m derinlikte inceleme alanının %0,1'inde F_L 0,5-1,0 arasında, %41,7'sinde F_L 1,0-1,5 arasında, %35'inde F_L 1,5-2,0 arasında değişmekte ve %4'ünde ise $F_L > 2,0$ 'dır (Şekil 6).

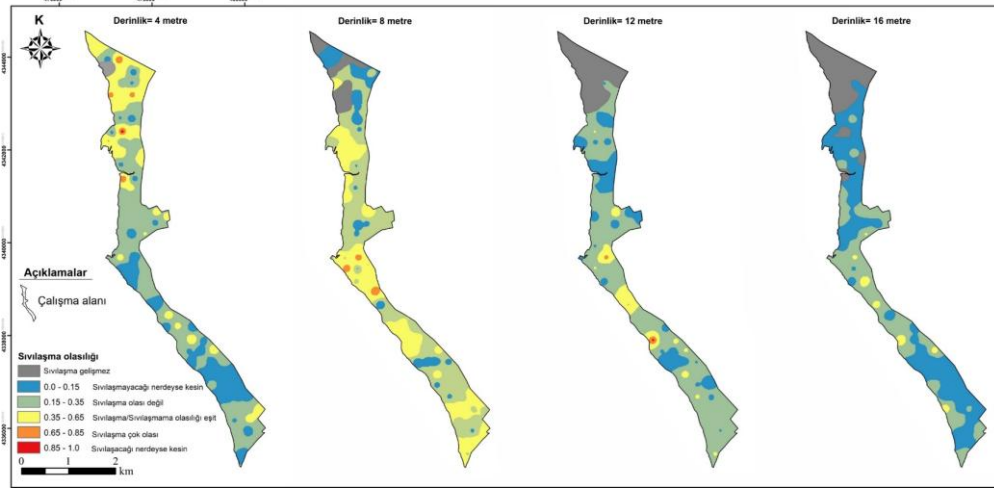
Zemin tabakalarının sıvılaşma olasılıklarının farklı derinlikteki mekânsal dağılımına göre; 4 m derinlikte inceleme alanının %21,9'unda zemin tabakalarının sıvılaşmayacağı neredeyse kesin, %52,3'ünde sıvılaşacağı muhtemel değil, %23,3'ünde sıvılaşma/sıvılaşmama olasılığı eşit, %1,1'inde sıvılaşacağı çok muhtemel, %0,1'inde

sıvılaşacağı neredeyse kesin durumdadır (Şekil 6). 8 m derinlikte inceleme alanının %11,3'ünde zemin tabakalarının sıvılaşmayacağı neredeyse kesin, %46,8'inde sıvılaşacağı muhtemel değil, %33,2'sinde sıvılaşma/sıvılaşmama olasılığı eşit, %1'inde sıvılaşacağı çok muhtemeldir. 12 m derinlikte inceleme alanının %17,4'ünde zemin tabakalarının sıvılaşmayacağı neredeyse kesin, %58,2'sinde sıvılaşacağı muhtemel değil, %7'sinde sıvılaşma/sıvılaşmama olasılığı eşit ve %0,4'ünde sıvılaşacağı çok muhtemel durumdadır. 16 m derinlikte inceleme alanının %45,4'ünde zemin tabakalarının sıvılaşmayacağı neredeyse kesin, %33,1'inde sıvılaşacağı muhtemel değil ve %2,3'ünde sıvılaşma/sıvılaşmama olasılığı eşit durumdadır (Şekil 7).



Şekil 6. Sıvılaşmaya karşı güvenlik sayısının (F_L) farklı derinliklerde mekânsal dağılımı.

Figure 6. Spatial distribution of the factor of safety against liquefaction (F_L) at different depths.



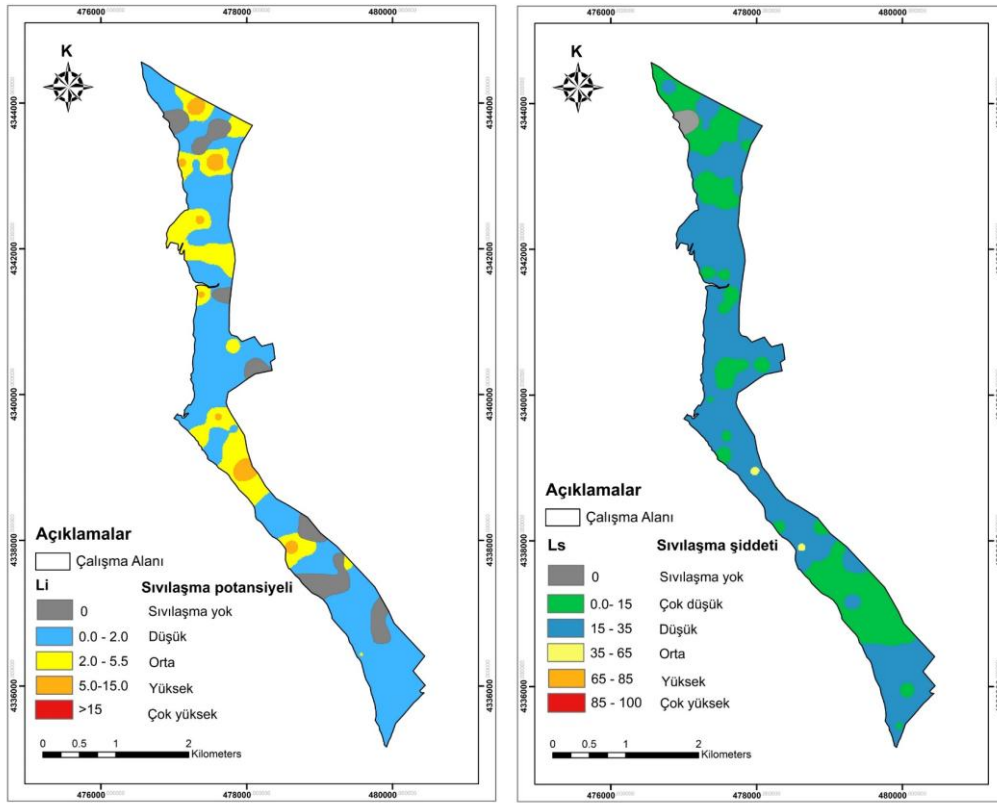
Şekil 7. Zemin tabakalarının sıvılaşma olasılıklarının farklı derinliklerde mekânsal dağılımı.

Figure 7. Spatial distribution of liquefaction probabilities of soil layers at different depths.

Altınova sahilinin sıvılaşma potansiteli haritası ve sıvılaşma şiddeti haritası

Altınova sahilinde (Ayvalık, Balıkesir) sondaj yapılmış yerdeki zemin profilleri için hesaplanmış Sıvılaşma Potansiyeli İndeksinin mekânsal dağılımı Şekil 7’de verilmiştir. Bu harita incelendiğinde, toplam alanın %11,8’inde sıvılaşma olmayacağı görülmektedir. İnceleme alanında toplam alanın %64,1’i “düşük”, %20,5’i “orta”, %3,6’sı “yüksek” sıvılaşma potansiyeline sahiptir. İnceleme alanında “çok yüksek” sıvılaşma

potansiyeli olan alan bulunmamaktadır (Şekil 8). Sondaj yapılan yerdeki zemin profilleri için hesaplanan Sıvılaşma Şiddeti İndeksinin mekânsal dağılımına göre senaryo depremin gerçekleşmesi durumunda inceleme alanının %1,3’ünde sıvılaşma olmayacağı, %33,3’ünde sıvılaşmanın “çok düşük şiddetli”, %65’inde sıvılaşmanın “düşük şiddetli” ve %0,3’ünde “orta şiddetli” gelişeceği görülmektedir. Sıvılaşma şiddeti haritasına göre inceleme alanında sıvılaşmanın “yüksek şiddetli” ve “çok yüksek şiddetli” gelişebileceği alanlar bulunmamaktadır (Şekil 8).



Şekil 8. Altınova sahilinin (Ayvalık, Balıkesir) sıvılaşma potansiyeli haritası ve sıvılaşma şiddeti haritası.

Figure 8. Liquefaction potential map and liquefaction intensity map of the Altınova coast (Ayvalık, Balıkesir).

SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada çalışma sahası olan Ayvalık ilçesi (Balıkesir) Altınova mahallesinin sahil kısmının sıvılaşma potansiyeli incelenmiştir. Çalışma sahası 6,32 km²'lik alanı kapsamaktadır

Bu çalışmada, çalışma alanına en fazla 100 km uzağındaki faylar dikkate alınarak oluşturulan senaryo depremlere göre, zemin sıvılaşması açısından en tehlikeli depremi Havran-Balıkesir fay zonuna bağlı Havran-Balya fayının üreteceği, söz konusu bu depremin $M_w=7,3$ büyüklüğünde olacağı ve inceleme alanında 0,1758 g büyüklüğünde en büyük yer ivmesi oluşturacağı görülmüştür. Bu nedenle, bu çalışmada zemin tabakalarının sıvılaşmaya

karşı güvenlik sayısı hesaplanırken en büyük yer ivmesi $a_{max}=0,1758$ g olarak alınmıştır.

İnceleme alanı olan Altınova sahilinde (Ayvalık, Balıkesir) alüvyon zemin yayılım göstermektedir. Elek analizi sonuçlarına göre söz konusu alüvyon killi siltli kum ve az çakıl ve çakıllı kum ve az silt türü zeminlerden oluşmaktadır. Her iki zemin türü de sıvılaşması olası zeminlerdir.

İnceleme alanında yeraltı suyu derinliği sıvılaşmanın gelişebileceği derecede düşüktür. Yeraltı suyu derinliği çalışma alanının %1,6'sında 0,5 ile 1,0 m arasında, %10,6'sında 1,0 ile 1,5 m arasında, %19,0'da 1,5 ile 2,0 m arasında, %52,7'sinde 2,0 ile 2,5 m arasında

ve %11,1'in de 2,5 ile 3,23 m arasında değişmektedir.

Bu çalışmada inceleme alanında yer alan 96 sondajın bulunduğu noktadaki zemin profillerinin sıvılaşma potansiyeli indeksi (L_i) hesaplanmış ve L_i 'nin mekânsal dağılımı bulunmuştur. Bu sıvılaşma potansiyeli indeksi haritasına göre inceleme alanının %11,8'inde sıvılaşma olmayacağı görülmektedir. İnceleme alanının %64,1'i "düşük", %20,5'i "orta", %3,6'sı "yüksek" sıvılaşma potansiyeline sahiptir. İnceleme alanında "çok yüksek" sıvılaşma potansiyeli olan alan bulunmamaktadır.

İnceleme alanı olan Ayvalık Mahallesi sahilinde (Ayvalık, Balıkesir) toplam 4723 tane bina bulunmaktadır. Bina bilgisi OpenStreetMap sitesinden(<https://www.openstreetmap.org/#map=14/39,21796/26,76673>) alınmıştır. 4723 binadan 584'ü sıvılaşma olmayacak alanda, 3034'ü düşük sıvılaşma potansiyelli alanda, 909'u orta sıvılaşma potansiyelli alanda ve 196'sı yüksek sıvılaşma potansiyelli alanda bulunmaktadır.

Sıvılaşma Şiddeti İndeksinin mekânsal dağılımına göre senaryo depremin gerçekleşmesi durumunda inceleme alanının %1,3'ünde sıvılaşma olmayacağı, %33,3'ünde sıvılaşmanın "çok düşük şiddetli", %65'inde sıvılaşmanın "düşük şiddetli" ve %0,3'ünde "orta şiddetli" gelişeceği görülmektedir. Sıvılaşma şiddeti haritasına göre inceleme alanında sıvılaşmanın "yüksek şiddetli" ve "çok yüksek şiddetli" gelişebileceği alanlar bulunmamaktadır. İnceleme alanının sıvılaşma şiddeti haritası dikkate alındığında, sıvılaşmanın olmayacağı alanda 83 binanın, çok düşük şiddette sıvılaşmanın gelişeceği alanda 1531 binanın, düşük şiddette sıvılaşmanın gelişeceği alanda 3070 binanın ve orta şiddette sıvılaşmanın gelişeceği alanda da 39 binanın bulunduğu görülmüştür.

Bu çalışmada üretilen sıvılaşma potansiyeli haritası ve sıvılaşma şiddeti haritası inceleme alanının mekânsal planlamasında bir altlık olarak kullanılabilir. İnceleme alanında orta ve yüksek sıvılaşma potansiyeline sahip alanlarda bina yapılmamalı mevcut binalarda boşaltılmalı veya zemin iyileştirilmesi yapılmalıdır. Düşük sıvılaşma potansiyeline sahip alanlarda zemin iyileştirilmesi yapıldıktan sonra bina yapımına izin verilmelidir.

KATKI BELİRTME

Yazarlar değerli yorumları için hakemlere teşekkür ederler.

KAYNAKLAR

- Ambraseys, N.N., 1988. Engineering seismology. *Earthquake Engrg. and Struct. Dynamics* 17:1–105
- Analiz Mühendislik İnşaat Sondajcılık Madencilik Sanayi ve Ticaret Limited Şirketi, 2017. Balıkesir İli Ayvalık İlçesi 3125.83 Hektarlık Alanın İmar Planına Esas Mikrobölgeleme Etüt Raporu, İstanbul
- Andrus, R.D., Piratheepan, P., Ellis, E., Zhang, J., Juang, C.H., 2004. Comparing liquefaction evaluation methods using penetration-Vs relationships. *Soil Dyn. Earthq. Eng.* 24(9–10): 713–721. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2004.06.001>
- Andrus, R.D. & Stokoe, K.H., 1997. Liquefaction resistance based on shear wave velocity. NCEER Workshop on Evaluation of Liquefaction Resistance of Soils, Technical Report NCEER-97-0022
- Andrus, R.D. & Stokoe, K.H., 2000. Liquefaction resistance of soils from shear wave velocity. *J Geotech Geoenviron Eng ASCE* 126(11):1015–1025. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2000\)126:11\(1015\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2000)126:11(1015))

- Andrus, R.D., Stokoe, K.H., Chung, R.M., 1999. Draft guidelines for evaluating liquefaction resistance using shear wave velocity measurements and simplified procedure, NISTIR 6277. Natl Inst Stand Technol, Gaithersburg
- Anon, 2016. State of the art and practice in the assessment of earthquake-induced soil liquefaction and its consequences. A report of The National Academies of Sciences, Engineering, Medicine, The National Academies Press, Washington, DC, pp.297. <https://doi.org/10.17226/23474>
- Arango, I., 1996. Magnitude scaling factors for soil liquefaction evaluations. J Geotech Eng 122(11):929-936. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9410\(1996\)122:11\(929\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9410(1996)122:11(929))
- Beroya, M.A.A., Aydin, A., Tiglao, R., Lasala, M., 2009. Use of microtremor in liquefaction hazard mapping. Engineering Geology 107 140–15. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2009.05.009>
- Boulanger, R.W. & Idriss, I.M., 2012. Probabilistic standard penetration test-based liquefaction-triggering procedure. J Geotech Geoenviron 138(10):1185–95. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0000700](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000700)
- Boulanger, R.W. & Idriss, I.M., 2015. Magnitude scaling factors in liquefaction triggering procedures. Soil Dyn Earthq Eng 79(B):296-303. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2015.01.004>
- Bray, J.D., Sancio, R.B., Durgunoglu, T., Onalp, A., Youd, T.L., Stewart, J.P., Seed, R.B., Cetin, O.K., Bol, E., Batuary, M.B., Christensen, C., Karadayilar, T., 2004. Subsurface characterization at ground failure sites in Adapazari, Turkey. J Geotech Geoenviron Eng 130(7):673-685. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2004\)130:7\(673\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2004)130:7(673))
- Ceryan, S. ve Ceryan, N., 2021. A new index for microzonation of earthquake prone settlement area by considering liquefaction potential and fault avoidance zone: an example case from Edremit (Balıkesir, Turkey). Arabian Journal of Geosciences (14), 1-21. <https://doi.org/10.1007/s12517-021-08573-3>
- Ceryan, S., Pijush, S., Samed, O.S., Berber, S., Tudes, G.S., Elci, H., Ceryan, N., 2023. Soil Liquefaction susceptibility of Akçay Residential Area (Biga Peninsula, Turkey) Close to North Anatolian Fault Zone. Journal of Mining and Environment, 14(4), 1141-1153. [10.22044/jme.2023.13145.2395](https://doi.org/10.22044/jme.2023.13145.2395)
- Cetin, K.O., Der Kiureghian, A., Seed, R.B., 2002. Probabilistic Models for the Initiation of Seismic Soil Liquefaction. Structural Safety 24:67-82. [https://doi.org/10.1016/S0167-4730\(02\)00036-X](https://doi.org/10.1016/S0167-4730(02)00036-X)
- Cetin, K.O., Seed, R.B., Kayen, R.E., Moss, R.E.S., Bilge, H.T., Ilgaz, M., Chowdhury, K., 2018a. SPT-based probabilistic and deterministic assessment of seismic soil liquefaction triggering hazard. Soil Dyn Earthq Eng. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2018.09.012>
- Cetin, K.O., Seed, R.B., Kayen, E.K., Moss, R.E.S., Bilge, H.T., Ilgaz, M., Chowdhury, K., 2018b. Examination of differences between three SPT-based seismic soil liquefaction triggering relationships. Soil Dyn Earthq Eng 113:75–86.

- <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2018.03.013>
- Cetin, K.O., Seed, R.B., Der Kiureghian, A., Tokimatsu, K., Harder, L.F., Kayen, R.E., Moss, R.E.S., 2004. Standard penetration test-based probabilistic and deterministic assessment of seismic soil liquefaction potential. *J Geotech Geoenviron Eng* 130(12):1314–1340.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2004\)130:12\(1314\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2004)130:12(1314))
- Chen, C.J. & Juang, C.H., 2000. Calibration of SPT- and CPT-based liquefaction evaluation methods. In: Mayne PW, Hryciw R (eds) *Innovations and applications in geotechnical site characterization*, Vol. 97. Geotechnical Special Publication, ASCE, Reston, pp 49–64
- Dobry, R., Stokoe, K.H., Ladd, R.S., 1981. Liquefaction susceptibility from S-wave velocity, In: *Proceedings of the ASCE national convention. In situ tests to evaluate liquefaction susceptibility*, ASCE, New York
- Dobry, R., Abdoun, T., 2011. An investigation into why liquefaction charts work: A necessary step toward integrating the states of art and practice. Pp. 1344 in *Proceedings of the 5th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering*, 10-13 January, Santiago, Chile. Ishihara Lecture.
- Duncan, J.M. & Buchignani, A.L., 1976. *An Engineering Manual for Settlement Studies*, Department of Civil Engineering, Virginia Polytechnic Institute and State University
- ElGhoraiby, M.A., Park, H., Manzar, M.T., 2020. Stress-strain behavior and liquefaction strength characteristics of Ottawa F65 sand. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 138, 106292.
<https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2020.106292>
- Esin, G. ve Ceryan, S., 2015. Burhaniye Balıkesir yerleşim alanının sıvılaşma potansiyelinin değerlendirilmesi. *Yerbilimleri*, 36(2), 81-96.
<https://doi.org/10.17824/yrb.47475>
- Ghafghazi, M., DeJon, J.T., Sturm, A.P., Temple, C.E., 2017. Temple instrumented becker penetration Test. II: iBPT-SPT correlation for characterization and liquefaction assessment of gravelly soils. *J Geotech Geoenviron Eng* 1-35.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.000171](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.000171)
- Golesorkhi, R., 1989. Factors influencing the computational determination of earthquake-induced shear stresses in sandy soils [Dissertation submitted in partial fulfillment of the requirement for the degree of doctor of philosophy]. University of California at Berkeley
- Hakam, A., Ismail, F.A., Fauzan, F., 2016. Liquefaction potential assessment based on laboratory test. *International Journal of Geomate* 11(26):2553-2557
- Hwang, J.H., Yang, C.W., Chen, C.H., 2003. Investigations on soil liquefaction during the Chi-Chi earthquake, *Soils and Foundations* 43(6), 107-123. DOI: 10.3208/sandf.43.6_107
- Hynes, M.E., Olsen, R.S., 1999. Influence of confining stress on liquefaction resistance. *Proc., Int. Workshop on Phys. And Mech. Of Soil Liquefaction*, Balkema, Rotterdam, The Netherlands, 145-152.
- Idriss, I.M., 1998. Evaluation of liquefaction potential, Consequences and Mitigation--An Update," Presentation notes for

- Geotechnical Society Meeting, Vancouver, Canada
- Idriss, I.M., 1999. An update of the Seed-Idriss simplified procedure for evaluating liquefaction potential, Presentation notes for Transportation Research Board Workshop on New Approaches to Liquefaction Analysis, Washington, D.C.
- Idriss, I.M. & Boulanger, R.W., 2004. Semi-empirical procedures for evaluating liquefaction potential during earthquakes In: Doolin D, editor. Proceedings of 11th international conference on soil dynamics and earthquake engineering and 3rd International conference on earthquake geotechnical engineering, 1. Stallion Press 1:32–56.
<https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2004.11.023>
- Idriss, I.M. & Boulanger, R.W., 2008. Soil liquefaction during earthquakes, Monograph MNO-12, Earthquake Engineering Research Institute, Oakland, CA
- Idriss, I.M. & Boulanger, R.W., 2008. Soil liquefaction during earthquakes, Monograph MNO-12, Earthquake Engineering Research Institute, Oakland, CA.
- Idriss, I.M. & Boulanger, R.W., 2010. SPT-Based liquefaction triggering procedures. Report No. UCD/CGM-10-02. Center for Geotechnical Modeling, Department of Civil and Environmental Engineering, University of California, Davis. 259 pp
- Imai, T., Tonouchi, K., Kanemori, T., 1981. The simple evaluation method of shear stress generated by earthquakes in soil ground, report no 3. Bur Pract Geol Investig 1981:39–58
- Ishihara, K., & Koga, Y., 1981. Case studies of liquefaction in the 1964 Niigata Earthquake, Soil and Foundation, 21(3):34-52.
- Iwasaki, T., Tokida, K., Tatsuoka, F., Watanabe, S., Yasuda, S., Sato, H., 1982. Microzonation for soil liquefaction potential using simplified methods. 3rd International Earthquake Microzonation Conf 1319–1330
- Juang, C.H., Yuan, H., Lee, D.H., Lin, P.S., 2003. A simplified CPT-based method for evaluating liquefaction potential of soils. J Geotech Geoenviron Eng 129 (1):66–80
- Kayabali, K., Yilmaz, P., Fener, M., Akturk, O., Habibzade, F., 2018. Assessment of soil liquefaction using the energy approach. Bulletin of the Mineral Research and Exploration 156:193-204.
<https://doi.org/10.19111/bulletinofmre.351257>
- Kishida, T., Boulanger, R.W., Abrahamson, N.A., Driller, M.W., Wehling, T.M., 2009. Seismic response of levees in Sacramento-San Joaquin Delta. Earthquake Spectra, 25(3):557-582.
<https://doi.org/10.1193/1.3157259>
- Lee, D.H., Ku, C.S., Yuan, H., 2003. A study of the liquefaction risk potential at Yuanlin. Taiwan Eng Geol 71:97–117.
[https://doi.org/10.1016/S0013-7952\(03\)00128-5](https://doi.org/10.1016/S0013-7952(03)00128-5)
- Liao, S., Whitman, R.V. (1986). Overburden correction factors for SPT in sand. J Geotech Eng 112(3):373–7.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9410\(1986\)112:3\(373](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9410(1986)112:3(373)
- Montgomery, J., Boulanger, R.W., Harder, L.F., 2012. Examination of the K_{σ} overburden correction factor on liquefaction resistance. Report No. UCD/CGM-12-02, Center for

- Geotechnical Modeling Department of Civil and Environmental Engineering University of California, Davis, California, pp.42. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0001172](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001172)
- MTA, 2018. Maden Tektik ve Arama Genel Müdürlüğü diri fay haritası. <https://yerbilimleri.mta.gov.tr/anasayfa.aspx>
- Olsen, R.S., 1997. Cyclic liquefaction based on the cone pen-etrometer test. In: Youd TL, Idriss I M (eds) National center for earthquake engineering research, Proceedings of the NCEER workshop on evaluation of liquefaction resistance of soils, Tech. Rep. NCEER-97-0022, Buffalo, pp 225–276
- Orense, R.P., Pender, M.J., Wotherspoon, L.M., 2012. Analysis of soil liquefaction during the Recent Canterbury (New Zealand) earthquakes. Geotechnical Engineering Journal of the SEAGS & AGSSEA 43(2), 8-17, ISSN 0046-5828. <https://doi.org/10.14456/seagj.2012.20>
- Quigley, M.C., Bastin, S., Bradley, B.A., 2013. Recurrent liquefaction in Christchurch, New Zealand, during the Canterbury earthquake sequence. Geology 41(4):419–422. <https://doi.org/10.1130/G33944.1>
- Rapti, I., 2016. Numerical modeling of liquefaction-induced failure of geostructures subjected to earthquakes (Doctoral dissertation, Université Paris-Saclay-CentraleSupélec).
- Robertson, P.K. & Campanella, R.G., 1985. Liquefaction potential of sands using the CPT. J Geotech Eng 111:384–403
- Robertson, P.K., Wride, C.E., 1998. Evaluating cyclic liquefaction potential using the cone penetration test. Can Geotech J 35(3):442–459
- Seed, H., Bolton, K.M., Clarence, K.C., 1975. Influence of seismic history on the liquefaction characteristics of sands. Report No, EERC 75-25, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley
- Seed, H.B., 1979. Soil liquefaction and cyclic mobility evaluation for level ground during earthquakes. J. Geotechnical Eng. Div, ASCE 105(GT2), 201–55
- Seed, H.B. & De Alba, P., 1986. Use of SPT and CPT tests for evaluating the liquefaction resistance of sands, use of in situ tests in geotechnical engineering, Geotechnical Special Publication 6, ASCE
- Seed, H.B. & Idriss, I.M., 1967. Analysis of liquefaction: Niigata earthquake. Proc., ASCE, 93(SM3):83-108
- Seed, H.B. & Idriss, I.M., 1971. Simplified procedure for evaluating soil liquefaction potential, Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division ASCE 97 (SM9, Proc. Paper 8371) 1249-1273
- Seed, H.B. & Idriss, I.M., 1982. Ground motions and soil liquefaction during earthquakes, Earthquake Engineering Research Institute, Oakland, CA, 134
- Seed, H.B., Idriss, I.M., Arango, I., 1983. Evaluation of liquefaction potential using field performance data. J Geotech Eng Div, 10.1061/ (ASCE)0733-9410(1983)109:3(458), 458–482
- Seed, H.B., Tokimatsu, K., Harder, L.F. Jr, Chung, R., 1984. The influence of SPT procedures in soil liquefaction resistance evaluations. Earthquake Engineering Research Center, University of California,

- Berkeley, Report No. UCB/EERC-84/15, 50 pp.
- Seed, H.B., Tokimatsu, K., Harder, L.F. Jr, Chung, R., 1985. Influence of SPT procedures in soil liquefaction resistance evaluations, *J Geotech Eng* 111(12):1425-1445
- Seed, R.B., Dickenson, S.E., Idriss, I.M., 1991. Principal geotechnical aspects of the 1989 Loma Prieta earthquake. *Soils and Foundations, Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering* 31(1):1-26.
- Setiawan, B., 2011. Assessing liquefaction potential of soils utilising in-situ testing. Master of Engineering Science Thesis, School of Civil, Environmental and Mining Engineering, University of Adelaide
- Shepard, D., 1968. A two-dimensional interpolation function for irregularly-spaced data. In *Proceedings of the 23rd ACM National Conference*, 517–524
- Sönmez, H., 2003. Modification of the liquefaction potential index and liquefaction susceptibility mapping for a liquefaction-prone area (Inegöl, Turkey). *Environ Geol* 44(7):862–871.
<https://doi.org/10.1007/s00254-003-0831-0>
- Sönmez, H., Gökçeoğlu, C., 2005. A liquefaction severity index suggested for engineering practice. *Environ Geol* 48(1):81–91.
<https://doi.org/10.1007/s00254-005-1263-9>
- Sözbilir, H., Özkaymak, Ç., Uzel, B., Sümer, Ö., Eski, S., Tepe, Ç., 2016b. Paleoseismology of the Havran-Balıkesir Fault Zone: Evidence for past earthquakes in the strike-slip-dominated contractional deformation along the southern branches of the North Anatolian fault in northwest Turkey. *Geodinamica Acta*, 28(4), 254–272.
<https://doi.org/10.1080/09853111.2016.1171111>
- Sözbilir, H., Sümer, Ö., Özkaymak Ç., Uzel, B., Güler, T., Eski, S., 2016a. Kinematic analysis and paleoseismology of the Edremit Fault Zone: evidence for past earthquakes in the southern branch of the North Anatolian Fault Zone, Biga Peninsula, NW Turkey. *Geodinamica Acta*, 28(4): 273–294.
<https://doi.org/10.1080/09853111.2016.1175294>
- Stark, T.D., Olson, S.M., 1995. Liquefaction resistance using CPT and field case histories. *Journal of Geotechnical Engineering* 121(12).
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9410\(1995\)121:12\(856\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9410(1995)121:12(856))
- Stokoe, L.H., Roesset, J.M., Biershwale, J.G., Aouad, M., 1988. Liquefaction potential of sands from shear wave velocity. In: *Proceedings of the 9th World Conference on Earthquake Engineering*, vol. III, 213–218
- Tanaka, Y., 2000. The 1995 Great Hanshin earthquake and liquefaction damages at reclaimed lands In Kobe Por. *International Society of Offshore and Polar Engineers* 10(1), 1-9, ISOPE-00-10-1-064.
- Terzaghi, K., Peck, R.B., 1948. *Soil Mechanics in Engineering Practice*. John Wiley.
- Tokimatsu, K. & Uchida, A., 1990. Correlation between liquefaction resistance and shear wave velocity. *Soils and Foundations, Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 30, 2:33-42
- Tsuchida, H., 1970. Prediction and countermeasure against liquefaction in

- sand deposits Sem. of the Port and Harbor Research Institute.
- Ulusay, R., Tuncay, E., Sönmez, H., Gökçeoglu, C., 2004. An attenuation relationship based on Turkish strong motion data and iso-acceleration map of Turkey. *Engineering Geology*, 74(3/4), 265-291.
<https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2004.04.002>
- Uyanık, O., Taktak, A.G., 2009. A new method for liquefaction analysis from shear wave velocity and predominant resonance period. *Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 13-1 74-81
- Wells, D. & Coppersmith, K., 1994. New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area and surface displacement. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 84:974-1002
- Youd, T.L., Idriss, I.M., Andrus, R.D., Arango, I., Castro, G., Christian, J.T., Dobry, R., Finn, W.D.L., Harder, L.F., Jr, Hynes, M.E., Ishihara, K., Koester, J.P., Liao, S.S.C., Marcuson, W.F., Martin, G.R., Mitchell, J.K., Moriwaki, Y., Power, M.S., Robertson, P.K., Seed, R.B., Stokoe, K.H., 2001. Liquefaction resistance of soils: summary report from the 1996 NCEER and 1998 NCEERINSF workshops on evaluation of liquefaction resistance of soils, *J Geotech Geoenviron Eng* 127(10):817-833
- Youd, T.L. & Noble, S.K., 1997. Liquefaction criteria based on statistical and probabilistic analyses. *Proceedings of the NCEER Workshop on Evaluation of Liquefaction Resistance of Soils*, December 31:201-205
- Youd, T.L., Willey, P.S., Gilstrap, S.D., 1997. Liquefaction hazard screening for Utah highway bridges: Fnl Rprt, UDOT Task Order 7RE0383 SPR-0012(018), Cntrct No. 93-8476, and FHWA (NCEER) Proj DTFH61-92-C-00106, Task 106-F-6.1



Kütle Hareketlerinde Afet Risk Azaltma: Jeolojik ve Mühendislik Yaklaşımlarının Türkiye ve Dünya Perspektifinden Değerlendirilmesi

Disaster Risk Reduction in Mass Movements: A Comparative Analysis of Geological and Engineering Approaches in Türkiye and International Perspectives

ÇİĞDEM TETİK BİÇER ^{1*} 

¹ T.C. İçişleri Bakanlığı, Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, Ankara, Türkiye

Geliş (*received*): 11 Mayıs (*May*) 2025 Kabul (*accepted*): 4 Ağustos (*August*) 2025

ÖZ

Bu çalışma, jeolojik afetlerin afet yönetim politikalarındaki yerini ve bu çerçevede kütle hareketlerine (heyelan, kaya düşmesi ve çığ) yönelik afet risk azaltma stratejilerin nasıl geliştirildiğini incelemektedir. Jeolojik afetler, hem fiziksel çevrenin yapısal özelliklerinden hem de insan kaynaklı etkilerden beslenen, geniş alanlarda yüksek yıkım gücüne sahip olaylardır. Çalışmada öncelikle, dünyada jeolojik kökenli afet risklerine karşı geliştirilen politika ve stratejiler değerlendirilmiş; ardından Türkiye'nin bu alandaki yaklaşımları, özellikle Türkiye Afet Risk Azaltma Planı (TARAP) ve İl Afet Risk Azaltma Planı (İRAP) gibi Türkiye'nin afet yönetim strateji belgeleri çerçevesinde analiz edilmiştir. Uluslararası örneklerle karşılaştırmalı bir çerçevede yapılan analiz sonucunda, Türkiye'nin mevcut durumu değerlendirilmiş ve geliştirilmesi gereken alanlara dair öneriler sunulmuştur. Kütle hareketlerine bağlı afet risklerinin azaltılması amacıyla yeni kuşak bilimsel çalışmalardan faydalanılarak SBAS-InSAR, CBS tabanlı modelleme ve yapay zekâ destekli erken uyarı sistemlerinin etkinliği tartışılmıştır. Ülkemizde kütle hareketleri riski taşıyan bölgelerin kurumsal haritalama ve veri tabanı altyapısı gelişmiş olsa da, bu sistemlerin şehir planlaması, erken uyarı ve toplumsal farkındalık gibi uygulama alanlarına entegrasyonunda bazı eksiklikler bulunmaktadır. Bu bağlamda, bu çalışma; teknoloji, mevzuat, katılım ve doğa temelli çözümler açısından Türkiye'nin kapasitesini geliştirmeye yönelik bütüncül öneriler sunmaktadır. Bilimsel temellere dayanan bu yaklaşım, yalnızca mevcut riskleri azaltmayı değil, aynı zamanda geleceğe yönelik dirençli toplumlar oluşturmayı da hedeflemektedir.

Anahtar Kelimeler: Afet risk azaltma, afet risk yönetimi, jeolojik afetler, kütle hareketleri

ABSTRACT

This study examines the place of geological disasters in disaster management policies and how disaster risk reduction strategies for mass movements (landslides, rockfalls, and avalanches) within this framework. Geological disasters are events fueled by both the structural characteristics of the physical environment and anthropogenic impacts, capable of significant destructive power over large areas. This study first evaluates policies and strategies developed globally to address geologically induced disaster risks. Türkiye's approaches in this area are then analyzed within the framework of Türkiye's disaster management strategy documents, particularly the Türkiye Disaster Risk Reduction Plan (TARAP) and the Provincial Disaster Risk Reduction Plan (IRAP). Following a comparative analysis with international examples, Türkiye's current situation is assessed, and recommendations for areas requiring development are presented. The effectiveness of SBAS-InSAR, GIS-based modeling, and artificial intelligence-supported early warning systems for reducing disaster risks due to mass movements is discussed, utilizing new generation scientific studies. While Türkiye has developed institutional mapping and database infrastructure for regions at risk of mass movements, there are still some shortcomings in integrating these systems into application areas such as urban planning, early warning, and public awareness. This study offers holistic recommendations to enhance Türkiye's capacity in technology, legislation, participation, and nature-based solutions. This scientifically based approach aims to reduce current risks and build resilient societies for the future.

Keywords: Disaster risk reduction, disaster risk management, geological disasters, mass movements

<https://doi.org/10.17824/yerbilimleri.1697088>

*Sorumlu Yazar/ Corresponding Author: cigdem.tetik@afad.gov.tr

GİRİŞ

Jeolojik afetler, yerkabuğundaki doğal ve içsel süreçler sonucu meydana gelen, insan yaşamı, altyapı, çevre ve ekonomi üzerinde ciddi olumsuz etkiler yaratabilen doğa kaynaklı olaylardır. Bu afetler genellikle ani gelişir, yerel ya da bölgesel ölçekte etkili olabilir ve çoğu zaman önceden kestirilemez. (Bell, 1999; UNDRR, 2023). Özellikle doğal tehlikeler üzerine yapılan disiplinler arası çalışmalarda, jeolojik afetler çoğunlukla “doğal olarak oluşan ve yer kabuğunun deformasyonu ya da dengesizliği sonucu gelişen olaylar” şeklinde tanımlanır (Smith, 2013; Alcántara-Ayala, 2002). Bu afetlerin etkileri sadece coğrafi ve fiziksel değil, aynı zamanda afet risk yönetimi, arazi kullanımı planlaması ve toplumsal dayanıklılık politikaları açısından da çok boyutlu olarak ele alınmalıdır. 21. yüzyılda

afetlerin sıklığı ve etkisi, artan nüfus, kontrolsüz kentleşme, iklim değişikliği ve doğal kaynakların aşırı kullanımıyla birlikte küresel ölçekte büyümeye devam etmektedir (Cui vd., 2021). Günden güne artan doğa kaynaklı afetlerin toplumlar üzerindeki yıkıcı etkisi, günümüzde yalnızca acil müdahale süreçleriyle değil, aynı zamanda önleyici ve azaltıcı stratejilerle de yönetilmeyi zorunlu kılmaktadır. Jeolojik afetler arasında önemli bir yer tutan kütle hareketleri (heyelan, kaya düşmesi, çığ, çamur ve moloz akması), fiziksel çevreyle doğrudan ilişkili olması nedeniyle, afet yönetimi ve arazi planlama politikalarında özel bir yer tutmaktadır. Topoğrafik eğim, litolojik yapı, yer altı su koşulları ve insan kaynaklı etkenlerin bir araya gelmesiyle tetiklenen bu afetler, hem kırsal hem de kentsel alanlarda

can ve mal güvenliğini tehdit etmektedir (Cruden ve Varnes, 1996; Highland ve Bobrowsky, 2008, Niu vd., 2023; Shao ve Xu, 2023). Birleşmiş Milletler tarafından yürürlüğe konulan Sendai Afet Risk Azaltma Çerçevesi (2015–2030), afet risklerinin yönetiminde kütle hareketlerini küresel risk haritasının bir parçası olarak ele almaktadır (UNDRR, 2020). Buna uygun olarak geliştirilen ulusal stratejilerde; coğrafi bilgi sistemleri (CBS), SBAS-InSAR gibi uzaktan algılama teknolojileri, yapay zekâ destekli modeller ve risk senaryoları kullanılmaktadır (Wang vd., 2022; Tang vd., 2023; Niu vd., 2023). Ancak, kütle hareketleri ile mücadele için yalnızca teknoloji odaklı çözümler yeterli olmayıp toplum temelli afet yönetimi yaklaşımları, yerel bilginin kurumsal politika ile bütünleştirilmesi ve saha gerçekliğinin göz önünde bulundurulması da gerekmektedir (Chen vd., 2021; MacAfee vd., 2024). Bu çok boyutlu yapının doğru anlaşılması ve uygulanması özellikle yüksek jeolojik risk barındıran ülkelerde hayati önem taşımaktadır. Türkiye özellikle son yıllarda yürürlüğe koyduğu Türkiye Afet Risk Azaltma Planı (TARAP), Türkiye Afet Müdahale Planı (TAMP) ve İl Afet Risk Azaltma Planı (İRAP) gibi afet yönetim stratejileriyle, afet risk azaltma süreçlerinde kütle hareketlerine özgü politikalar geliştirmeye başlamıştır. Bu çalışma, kütle hareketleri afet türünün Türkiye'deki bölgesel dağılımını inceleyerek, Türkiye'nin mevcut afet risk azaltma politika çerçevesini uluslararası örneklerle kıyaslamayı ve kütle hareketleri afet risk azaltma perspektifini ortaya koymayı amaçlamaktadır.

DÜNYADA KÜTLE HAREKETLERİNE YÖNELİK AFET RİSK AZALTMA STRATEJİLERİ

Jeolojik afetlerin insanlık tarihindeki etkileri, medeniyetlerin gelişimi ve çöküşünde önemli rol oynamıştır. Antik çağlardan bu yana büyük depremler, volkanik patlamalar ve toprak kaymaları insan yerleşimlerini etkilemiş;

şehirlerin yıkımına, göç hareketlerine ve tarımsal üretimde aksamalara neden olmuştur (Dynes, 2000; Chester vd., 2005). Modern çağda jeolojik afetlerin izlenmesi, 19. yüzyılda sismoloji ve jeoloji bilimlerinin gelişmesiyle daha sistematik hale gelmiştir. 20. yüzyıl, özellikle 1906 San Francisco Depremi ve 1960 Valdivia Şili Depremi gibi olaylarla afet yönetimi ve yapı mühendisliği politikalarının yeniden değerlendirilmesine neden olmuştur (Hough, 2016). 20. yüzyılın ortasından itibaren jeolojik afetlerin sistematik olarak sınıflandırılması ve bu afetlere karşı planlama yapılması yönünde ciddi gelişmeler yaşanmıştır. ABD, Japonya ve Avrupa ülkeleri; depremler, volkanlar ve heyelanlar için gözlem istasyonları, haritalama teknikleri ve risk analiz yöntemleri geliştirmiştir. Günümüzde jeolojik afetlerin izlenmesinde uydu görüntüleme (InSAR), yapay zekâ, makine öğrenmesi ve çoklu risk senaryoları gibi yöntemler kullanılmakta; jeostatistiksel yaklaşımlar afetlerin öngörülmesinde etkin rol oynamaktadır (Wang vd., 2022; Yang vd., 2025). Jeolojik afetler arasında önemli bir yer tutan kütle hareketleri özellikle heyelan, kaya düşmesi ve çığ sıklığı, oluşturduğu can ve mal kayıpları ile birlikte coğrafi yaygınlığı, birçok ülkenin ulusal afet stratejilerinde kütle hareketlerine özgü risk azaltma önlemleri geliştirmesine neden olmuştur.

Amerika Birleşik Devletleri'nde (ABD), 2021 yılında "Ulusal Heyelan Kayıplarını Azaltma Stratejisi" yürürlüğe koymuş, Ulusal Jeoloji Araştırmaları Kurumu (USGS) tarafından desteklenen bu strateji, heyelan tehlike haritalarının geliştirilmesini, erken uyarı sistemlerinin kurulmasını ve toplum temelli risk farkındalığı programlarının uygulanmasını içermektedir. Ayrıca "Ulusal Heyelan Hazırlık Yasası" (National Landslide Preparedness Act) ile federal düzeyde koordinasyon sağlanması da hedeflenmektedir (USGS, 2021).

Norveç'te "Klima 2050" isimli araştırma merkezi, iklim değişikliğine bağlı olarak artan

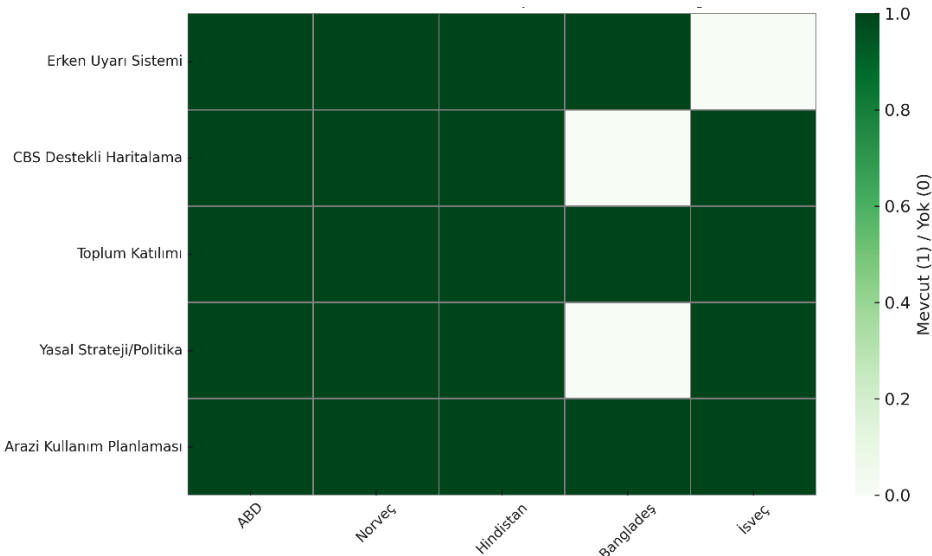
heyelan risklerine karşı doğa temelli çözümler ve erken uyarı sistemleri geliştirmekte, yerel yönetimler ve özel sektörle iş birliği çerçevesinde yamaç stabilitesi optimizasyonu ve kentsel planlama içinde heyelan risk analizleri yaparak sonuçlarını politika belgelerine entegre etmektedir (Solheim vd., 2022).

Hindistan'da Ulusal Afet Yönetim Kurumu (NDMA), 2007 yılında yayımladığı "Heyelan ve Kar Çıgları Yönetimi Rehberi" ile ulusal ölçekte heyelan riskine karşı bir strateji geliştirmiştir. Söz konusu stratejide erken uyarı sistemleri, coğrafi bilgi sistemleri (CBS) destekli risk haritalama ve eğimli alanlarda yapılaşmanın denetlenmesi ön plana çıkmaktadır (NDMA, 2007).

Chittagong Tepeleri gibi eğimli bölgelerde sıkça heyelanlar yaşayan Bangladeş, afet risk azaltma stratejilerini toplum merkezli yaklaşımla geliştirmiş; yerel halkla birlikte risk farkındalığını artırmayı, tahliye planları

geliştirmeyi ve yapılaşmayı denetlemeyi ön planda tutmuştur (Alam ve Islam, 2023).

İsveç, heyelan başta olmak üzere kütle hareketlerine karşı ayrıntılı risk haritaları oluşturmakta ve bu haritaları arazi kullanım planlarına entegre etmektedir. Belediyeler, bu bilimsel veriler ışığında yapılaşma izinlerini şekillendirmekte ve riskli alanlarda yapılaşmayı sınırlandırmaktadır. İsveç'te bu risklerin azaltılması hem çevre koruma hem de ekonomik kayıpların önlenmesi açısından önem taşımaktadır (Andersson-Sköld vd., 2013). Bahse konu ülkelerin kütle hareketleri ile ilgili risk azaltma stratejilerini karşılaştırmalı olarak Şekil 1'de gösterilmektedir. Şekildeki yeşil alanlar, stratejinin o ülkede uygulandığını, beyaz/koyu olmayan alanlar ise ilgili stratejinin eksik veya sınırlı olduğunu belirtmektedir. Buna göre, ABD, Norveç, Hindistan ve İsveç'in çok yönlü stratejiler uyguladığı, Bangladeş'in ise daha çok toplum katılımı ve erken uyarı sistemleriyle sınırlı kaldığı görülmektedir.



Şekil 1. Kütle hareketleri risk azaltma stratejilerinin ülkelere göre dağılımı.

Figure 1. Distribution of mass movement risk reduction strategies by country.

Dünya genelinde kütle hareketlerinden kaynaklanan afet risklerini azaltmak amacıyla çeşitli stratejiler geliştirilmiş ve uygulanmıştır. Bu yaklaşım, bilimsel-teknolojik gelişmeler, yasal ve kurumsal düzenlemeler, toplum temelli ve katılımcı yaklaşımlar olmak üzere üç alt başlıkta değerlendirilebilir.

Bilimsel ve Teknolojik Yaklaşımlar: Niu vd. (2023), SBAS-InSAR teknolojisi ile aktif heyelan sahalarında deformasyon hızlarını yüksek doğrulukla izleyerek erken uyarı mekanizmalarına temel oluşturduğunu göstermiştir. Benzer şekilde, Wang vd. (2022) tarafından geliştirilen bilgi değeri modeli, heyelan olasılığını mekânsal analiz yoluyla %85 doğrulukla tahmin etmektedir. Yapay zekâ algoritmalarının, özellikle çok büyük coğrafi veri kümelerinin işlenmesinde ve çok değişkenli risk analizi yapılmasında önemli avantajlar sunduğu görülmektedir (Shao ve Xu, 2023). ABD ve Japonya gibi ülkelerde bu teknolojiler, afet bilgi sistemlerine entegre edilmiştir. Örneğin, ABD Jeolojik Araştırmalar Kurumu (USGS) tarafından geliştirilen ulusal heyelan izleme sistemi, sensör verilerini gerçek zamanlı analiz ederek riskli bölgeleri sürekli izlemektedir. Tang vd. (2023), çığların, özellikle yüksek irtifada iklim değişikliğine duyarlılığı nedeniyle gelecekte daha sık ve daha yıkıcı hale gelebileceğini ifade etmektedir. Modern modeller, çığ riskini arazi eğimi, kar örtüsü kalınlığı ve sıcaklık verileriyle entegre ederek tahmin etmeye çalışmaktadır.

Yasal ve Kurumsal Yaklaşımlar: ABD, 2021 yılında "National Landslide Preparedness Act" kapsamında kütle hareketlerine özel yasal bir çerçeve oluşturmuş ve federal düzeyde erken uyarı ve izleme sistemlerini kurumsallaştırmıştır. Japonya, 2000'li yıllardan bu yana "Landslide Prevention Act" ile dik eğimli arazilerde yapılaşmayı yasaklamış; aktif heyelan alanlarının detaylı haritalanmasını zorunlu tutmuştur (MacAfee vd., 2024).

Toplum Temelli ve Katılımcı Yaklaşımlar:

Chen vd. (2021), Tayvan'da yürütülen saha araştırmasında, yerel halkın afet risk bilgisine ve deneyimine dayalı olarak geliştirilen politikaların daha sürdürülebilir olduğunu göstermiştir. Benzer şekilde, Hindistan ve Bangladeş gibi ülkelerde yerel yönetimlerin afet eylem planlarına halkın doğrudan katılımı, erken tahliye kararlarının etkinliğini artırmıştır. Tang vd. (2023), çığ ve obruk gibi ani gelişen afetlerde, yerel toplumun erken farkındalığı ve refleksi sayesinde kayıpların azaltılabildiğini belirtmektedir. Bu bağlamda, afet risk azaltma stratejilerinde yalnızca mühendislik çözümleri değil; eğitim, farkındalık ve sosyal dayanıklılık uygulamaları da önemli yer tutmaktadır. Genel olarak bakıldığında, gelişmiş ülkelerde daha teknolojik ve kurumsal risk azaltma çözümleri ön plandayken, gelişmekte olan ülkelerde yerel bilgiye dayalı ve katılımcı modeller daha belirgin bir şekilde görülmektedir.

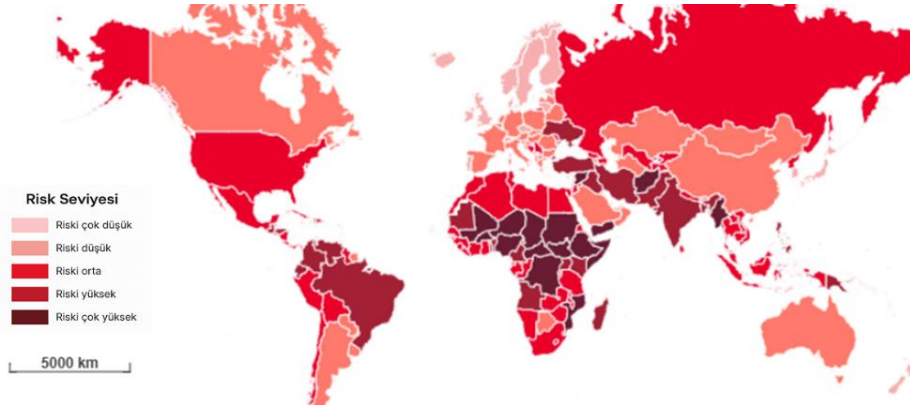
TÜRKİYE'DE KÜTLE HAREKETLERİ DAĞILIMI VE KÜTLE HAREKETLERİNİN AFET YÖNETİM STRATEJİLERİNDEKİ YERİ

Avrupa Birliği Komisyonunca kabul gören INFORM endeksi insani krizler ve afetlerle ilgili olarak açık kaynaklı ve küresel bir risk değerlendirmesi yapmaktadır. Türkiye 191 ülkenin risk potansiyelinin belirlendiği INFORM endeksinde 10 puan üzerinden 5.5 puan ile yüksek risk potansiyeli taşıyan ülkeler arasında yer almaktadır (Şekil 2).

INFORM endeksinde skorlar; 0-2 riski çok düşük, 2 – 3.5 riski düşük, 3.5 - 5 riski orta, 5 – 6.5 riski yüksek, 6.5 - 10 riski çok yüksek olarak tanımlanır (URL-1). Her ay yaşanan olaylar doğrultusunda güncellenen INFORM değerleri, insani krizler ve afetlerle ilgili nicel analizleri yansıtmaktadır. Elde edilen skorun ülkelerin afet yönetimi döngüsünün farklı aşamalarında, özellikle iklim adaptasyonu ve afet önleme, hazırlık ve müdahalede karar almaya yardımcı olması hedeflenmektedir.

Skorun hesaplanmasında doğal afetler ve savaş, ekonomik indeksler vb. birçok parametre dikkate alınmaktadır. Söz konusu endekste ülkemizin son 10 yıllık risk skoruna bakıldığında yüksek risk potansiyelinin değişmediği 5.3 - 5.6 arasında olduğu görülmektedir (Şekil 2, Çizelge 1). Türkiye 191

ülkenin değerlendirildiği 2025 INFORM Endeks sınıflamasında, endeks skoru sıralamasında 35. sırada yer almaktadır (Şekil 3) . Güney Sudan, 8.5 skor ile en yüksek riskli ülke olurken, 0.6 puanla Singapur 191. sırada yer almaktadır (URL-2).



Şekil 2. Inform indeksine göre 191 ülkenin global risk skorlamasının harita gösterimi.

Figure 2. Global risk scoring of 191 countries according to the Inform index.

Çizelge 1. 2016-2025 yılları arasında INFORM Endeksine göre Türkiye'nin risk skoru.

Table 1. Türkiye's risk score according to the INFORM Index between 2016-2025.

Yıllar	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025
Skor	5.3	5.5	5.4	5.4	5.4	5.4	5.3	5.4	5.6	5.5

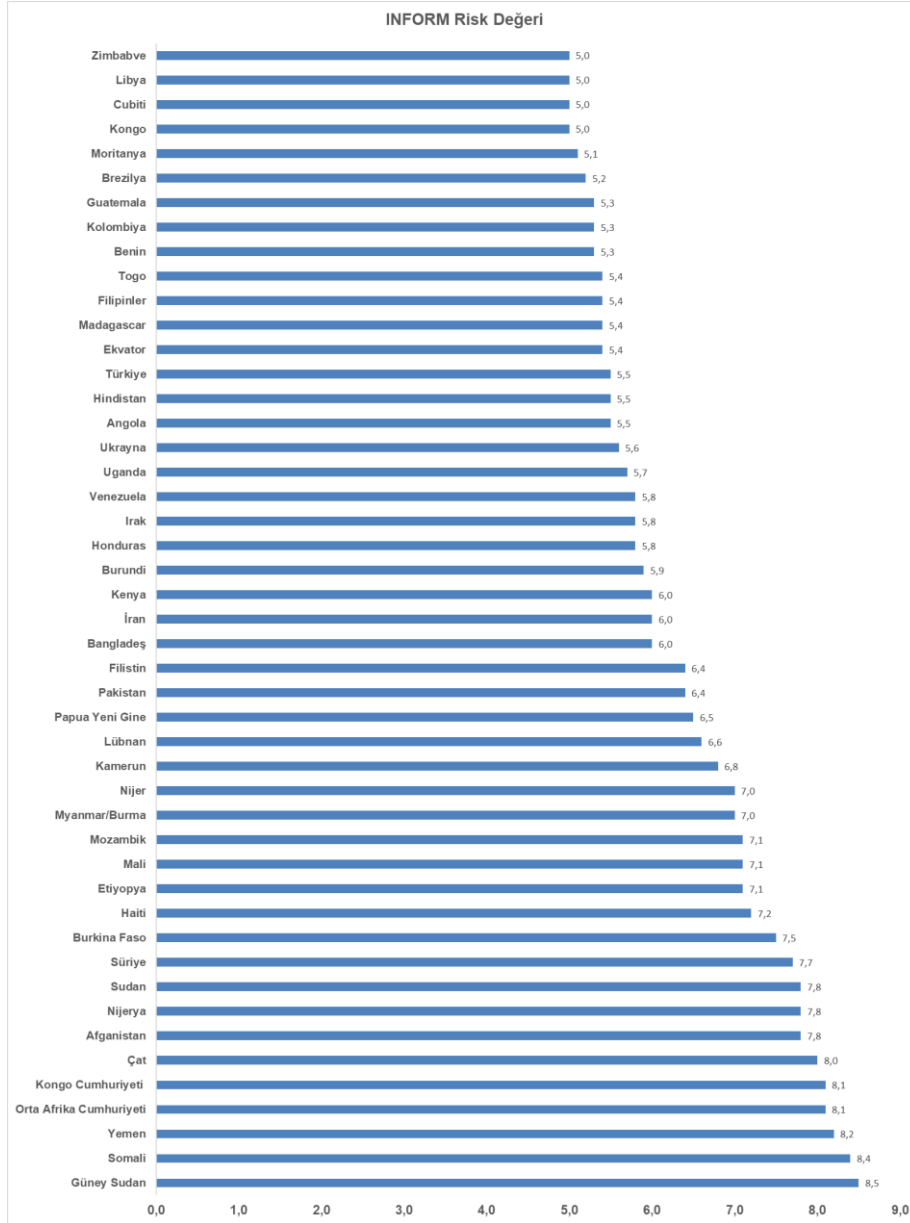
INFORM endekste sadece doğa kaynaklı afetler için 2016-2025 yılları arasında olan skor bakımından, Türkiye'nin en fazla maruz kaldığı ve yıkımlara sebep olan afetler ve afetlerin risk skoru sırasıyla deprem (9.3), tsunami (5), taşkın (5.9) ve kuraklık (2.6) olarak belirlenmiştir (URL-1). Türkiye'de Cumhuriyetin erken dönemlerinden itibaren, özellikle büyük depremlerle birlikte jeolojik afetlere yönelik farkındalık artmış, 1999 Marmara Depremi bu sürecin dönüm noktalarından biri olmuştur. Sonuç olarak, jeolojik afetlerin tarihsel gelişimi, yalnızca doğa olaylarının değil; insanın bu olaylara yüklediği anlamın, aldığı önlemlerin ve

geliştirdiği bilimsel araçların tarihidir. Bu tarihsel birikim, günümüzün afet risk azaltma politikalarının temelini oluşturmaktadır. Türkiye, genç ve aktif tektonik kuşaklar üzerinde yer alması nedeniyle dünyanın en yüksek jeolojik afet riski taşıyan ülkelerinden biridir. Levha hareketleri sonucu gelişen aktif fay hatları, sık sık depremler ve ikincil olarak da heyelan, tsunami gibi afetleri tetiklemektedir (Şaroğlu vd., 1992; Emre vd., 2018).

Deprem ve taşkın afetleri etki alanlarının genişliği bakımından Türkiye'de en fazla yaşanan ve en çok hasara neden olan afetler olup, kütle hareketleri vaka sayısı ve hasar

durumu bakımından onlardan sonra gelmektedir. Kütle hareketlerinin etki alanları sınırlı olmakla birlikte sayı olarak oldukça fazla yaşandığı tespit edilmiştir (Gökçe vd., 2018; Tetik Biçer, 2017). 1929 - 2019 yılları arasında meydana gelen heyelan olaylarının ölümle

sonuçlanan 1.348 vakanın analiz edildiği bir çalışmada 147 olay (%37.8) sonucu toplam ölümlerin %55.5'inin (745 ölü) kaydedildiği bölge Karadeniz Bölgesi'dir (Fidan ve Görüm, 2020).



Şekil 3. Inform Endekse göre risk skoru 5 ve üzeri olan ülkelerin sıralaması.

Figure 3. Ranking of countries with a risk score of 5 and above according to the Inform Index.

Diğer taraftan AFAD tarafından heyelan, kaya düşmesi ve çığ afetleri için duyarlılık, tehlike ve risk haritalarının üretilmesi, paylaşılması ve diğer kamu kurumları tarafından da üretilen sel-taşkın, çölleşme risk haritaları gibi haritaların da tek bir platform üzerinde toplanarak görüntülenebilmesi ve sorgulanabilmesi amacı ile web tabanlı bir CBS Sistemi olan Afet Risk Azaltma Sistemi (ARAS) geliştirilmiştir. 2018 yılı sonu itibarıyla, heyelan, 2019 yılı sonu itibarı ile de çığ ve kaya düşmesi duyarlılık ve tehlike haritalarının üretimi 81 ilde tamamlanmıştır. 2 Mayıs 2025 tarihi itibarıyla ARAS sisteminde 34.860 heyelan, 5.104 kaya düşmesi, 884 çığ ve 662 obruk olayı Envanter Modülünde kayıt altına alınmıştır. Bu envanterlere yeni oluşan heyelan, kaya düşmesi ve çığ olaylarının eklenmesi ile sistemin dinamik olarak sürdürülebilirliği sağlanmaktadır.

ARAS'da en fazla heyelan envanteri olan ilk beş il sırasıyla Erzurum, Rize, Sivas, Kastamonu ve Zonguldak'tır. Özellikle iklim değişikliğine bağlı olarak meydana gelen ani yağışlar ve mevcut topografyası nedeniyle Karadeniz Bölgesi heyelan açısından en yüksek riskli bölge olup AFAD verilerine göre de bölge heyelan riski taşıyan tüm alanların %52'sini oluşturmaktadır. Diğer taraftan ARAS sisteminde 5.104 kaya düşmesi envanter verisi bulunmakta olup, en fazla yaşandığı beş il sırasıyla İzmir, Konya, Karaman, Isparta ve Mersin'dir. ARAS'da yer alan 884 çığ envanter verisine göre de ülkemizde en fazla çığ afeti yaşanan ilk beş il ise Trabzon, Muş, Siirt, Gümüşhane ve Erzincan'dır.

ARAS sistemi üzerinden üretilen kütle hareketleri duyarlılık haritaları diğer kamu kurumlarının da risk azaltma faaliyetlerinde altlık olarak kullanabilmeleri amacıyla, TUCBS (Türkiye Ulusal Coğrafi Bilgi Sistemleri) kapsamında Çevre, Şehircilik ve İklim

Değişikliği Bakanlığı (Coğrafi Bilgi Sistemleri Genel Müdürlüğü) üzerinden tüm kamu kurumlarının kullanımına sunulmuştur. Ayrıca diğer kamu kurumları tarafından üretilen sel/taşkın, tsunami, erozyon ve volkanik tehlike haritaları da ARAS sistemine entegre edilmiştir.

ARAS, afetlerden etkilenen yerleşim birimlerinin risk değerlendirmesi için oldukça önemli bir çalışmadır. Dünyada risk değerlendirme çalışmaları gerek teknik destek yetersizliği gerekse altlık veri eksikliği gibi sebeplerden dolayı oldukça kısıtlı sayıda gerçekleşirken; AFAD'ın sahip olduğu yerbilimsel ve afetsellik verileri ve teknik personel kapasitesi ile bu çalışma başarı ile devam etmektedir. ARAS sayesinde adı geçen afetlerden etkilenmiş yerleşim birimlerinin risk potansiyeli belirlenebilecek; özellikle gelecekte güvenli yerleşim alanlarının tespiti için karar vericilere önemli bir bilimsel ve teknik altyapı sağlanmış olacaktır.

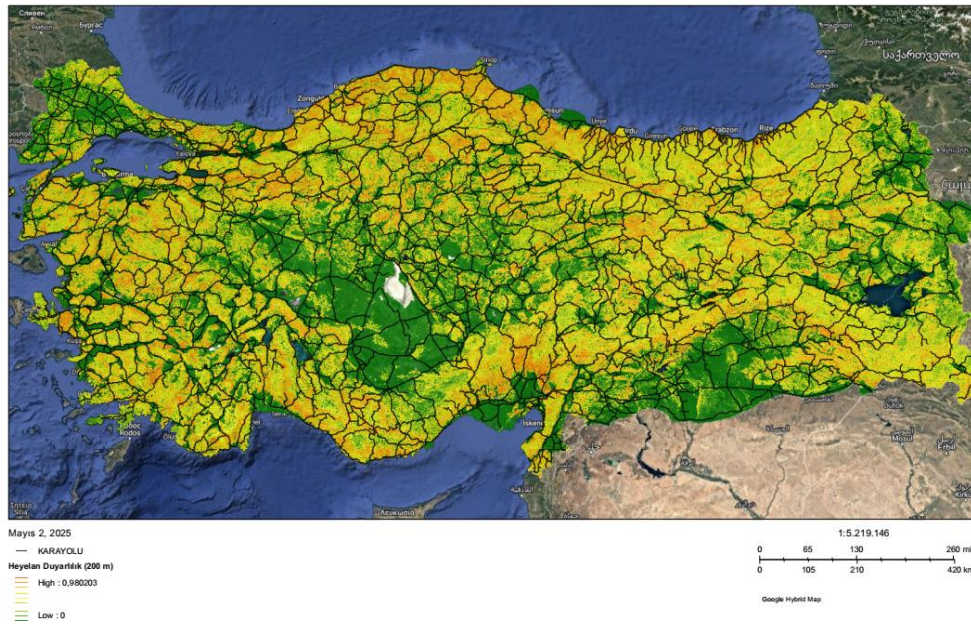
Heyelan duyarlılık haritasının analizine göre, Türkiye'nin Karadeniz Bölgesi'nin büyük bir kısmı, Doğu Anadolu'nun kuzey kuşağı ve Güneydoğu Anadolu'nun dağlık alanları, yüksek düzeyde heyelan potansiyeli taşıyan zonlar olarak öne çıkmaktadır (Şekil 4). Özellikle Doğu Karadeniz'de Rize, Artvin ve Giresun illeri ile birlikte Kuzeydoğu Anadolu'da Erzurum ve Bayburt çevresi; yüksek topoğrafik eğimler, yoğun yağış rejimi ve zayıf litolojik birimlerin birlikteliği nedeniyle aktif kütle hareketlerinin görüldüğü alanlardır (Ercanoğlu ve Gökçeoğlu, 2004; Bell, 1999).

Güneydoğu Anadolu'da ise Mardin, Siirt, Şırnak ve Hakkâri illerinin yüksek eğimli yamaç sistemleri, çoğunlukla altere olmuş ve kohezyonu düşük kayaçlardan oluştuğu için stabilite açısından risk taşımaktadır. Bu bölgelerdeki kırsal yerleşimlerin önemli bir kısmı eğimli ve suya doymuş zeminler üzerine kurulu olduğundan, yerleşimlerin fiziksel

kırılganlığı da oldukça yüksektir (Cruden ve Varnes, 1996; Van Westen vd.,2008).

Harita verileri, ülke genelindeki yüksek duyarlılığa sahip heyelan alanlarının yaklaşık %30'unun Karadeniz ve Doğu Anadolu kuşaklarında yoğunlaştığını ortaya

koymaktadır. Bu durum, özellikle eğim, litoloji, yağış ve arazi kullanımı gibi başlıca tetikleyici faktörlerin bir araya geldiği alanlarda, kütle hareketi kaynaklı afetlerin yüksek tekrarlamaya periyoduna sahip olduğunu göstermektedir (UNDRR, 2019; Jamali ve Majnounian, 2022).



Şekil 4. 2 Mayıs 2025 tarihi itibarıyla ARAS sisteminde üretilen heyelan duyarlılık haritası.

Figure 4. Landslide susceptibility map produced in the ARAS system as of May 2, 2025.

Kaya düşmesi duyarlılığı haritası değerlendirildiğinde, Toroslar kuşağı (Antalya, Mersin, Adana iç bölgeleri), Ege kıyı kuşağı ve Kuzeybatı Anadolu'daki kaya zemin alanlar (Bilecik, Bursa, Balıkesir) ile Doğu Anadolu'nun doğusunda yer alan dik vadiler belirgin biçimde yüksek duyarlılık göstermektedir (Şekil 5).

Bu bölgelerdeki yüksek eğimli, sert ve ayrışmaya müsait litolojiler (kalker, volkanit, şist), kaya bloklarının yenilmesine neden olmaktadır. Bunun yanı sıra, donma - çözünme döngüleri, sismik titreşimler ve yamaçta yapılan müdahaleler (yol açma, kazı çalışmaları vb.), yamaç stabilitesini azaltarak kaya düşmesi

riskini artırmaktadır (UNDRR, 2019; Jamali ve Majnounian, 2022). Harita verileriyle birlikte değerlendirildiğinde, kaya düşmelerine duyarlı bu alanların önemli kısmı, karayolları, geçit yolları ve kırsal yerleşimlerle örtüşmekte; bu durum da doğrudan insan güvenliğini tehdit eden bir kırılganlık yaratmaktadır.

Çığ duyarlılığı haritası incelendiğinde, Doğu Anadolu'nun yüksek rakımlı kesimleri, özellikle Bitlis, Van, Hakkâri, Erzurum, Bingöl ve Ağrı çevresi, yüksek çığ duyarlılığı taşıyan alanlar olarak dikkat çekmektedir (Şekil 6). Bu bölgelerdeki topografik yapı genellikle 30–45° eğim aralığında, kar birikiminin yoğun olduğu, kar örtüsünün istikrarsızlaştığı kuzey ve

kuzeydoğu bakılı yamaçlarla karakterizedir (Metin ve Yılmaz, 2019; Aydın, 2013). Kar tabakasında meydana gelen taban katman zayıflamaları, sıcaklık dalgalanmaları ve rüzgârla taşınan kar kütlelerinin üst katmanda birikmesi, çığ tehlikesinin artmasına yol açmaktadır (Höller, 2009). Türkiye genelinde çığ potansiyeli taşıyan bölgeler çoğunlukla 2000 metre üzerindeki yüksek dağlık alanlarla sınırlı olmakla birlikte, bu bölgeler içerisinde yer alan çığ geçmişi bilinen lokasyonların dikkatle izlenmesi gerekmektedir. Özellikle Bitlis ve Hakkâri çevresinde yaşanan geçmiş çığ felaketleri, bölgedeki kırılganlığı açıkça ortaya koymaktadır.

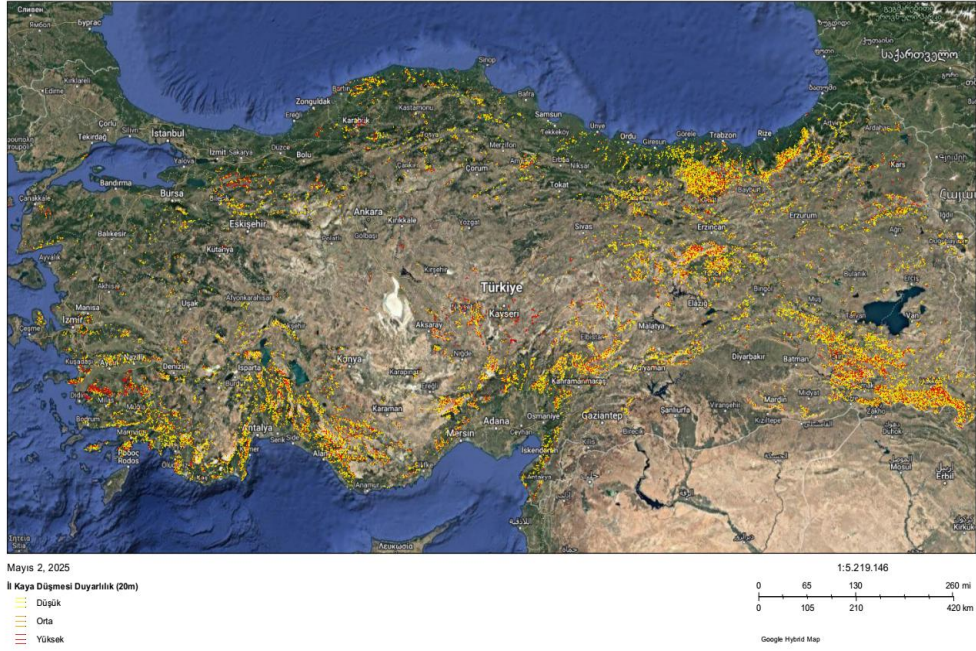
Türkiye’de Kütle Hareketlerinin Afet Risk Azaltma Politikalarına Entegrasyonu

Türkiye, sahip olduğu jeolojik yapı, eğimli topoğrafya ve iklimsel özellikler nedeniyle kütle hareketleri açısından yüksek risk barındıran ülkeler arasında yer almaktadır. Sıkça meydana gelen kütle hareketlerinin afet risk azaltma politikalarında özel olarak ele alınması büyük önem taşımaktadır. Son yıllarda Türkiye, TARAP, TAMP ve İRAP gibi afet yönetimi strateji belgeleriyle bu konudaki politika çerçevesini sistematik olarak yapılandırmaya başlamıştır (AFAD, 2020; AFAD, 2021; AFAD, 2022). 2022 yılında yayımlanan TARAP, ulusal düzeyde afet risklerinin sistematik olarak azaltılmasını hedefleyen ana strateji belgesidir. Plan kapsamında belirlenen 11 yaygın afet tehlikesi arasında kütle hareketleri açıkça tanımlanmıştır (AFAD, 2022; Tetik Biçer, 2024). TARAP kütle hareketlerine bağlı tehlike ve risklerin belirlenmesi, yeni planlanacak alanlarda ve/veya mevcut yerleşim alanlarında bu tehlike ve riskleri azaltacak önlemlerin alınması, CBS tabanlı erken uyarı sistemleri kurularak kütle hareketlerinin oluşturacağı olası zararların önüne geçilmesi ve halkın kütle hareketleri konusunda farkındalığının artırılması gibi eylemler içermektedir. TARAP’ta, kütle hareketleriyle ilgili;

- Ülkesel, bölgesel ve yerel ölçekte kütle hareketlerine yönelik tehlikelerin ve risklerin ortaya konulması ve haritalanması,
- Kütle hareketleri konusunda farkındalığın artırılması,
- Mevcut mevzuatın gözden geçirilerek görev, yetki ve sorumluluklardaki çakışmaların belirlenmesi ve ortadan kaldırılması,

stratejik hedefler arasında yer almaktadır. 227 risk azaltma eyleminden oluşan TARAP, AFAD koordinasyonunda yerli ve milli bir yazılım ile izlenmekte ve değerlendirilmektedir. Nisan 2025 itibarıyla, bu yazılımdan elde edilen bilgilere göre eylemlerin gerçekleşme oranı %59’dur. 11 farklı afet türü için uygulanan risk azaltma eylemlerinin %4,4’ü yani 10 tanesi, kütle hareketleri ile ilgilidir (Şekil 7).

On eylemin sekizinin sorumluluğu AFAD’a, ikisinin sorumluluğu ise Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı’na aittir (Çizelge 2). TARAP kapsamında yer alan bu 10 eylemden ikisi kısa vadeli (2022-2024), altısı orta vadeli (2022-2028) ve ikisi de uzun vadeli (2022-2030) olarak tanımlanmıştır. İki kısa vadeli eylemin %40’ı, altı orta vadeli eylemin %53’ü ve iki uzun vadeli eylemin ise %15’i tamamlanmıştır. Toplam 10 eylemin 2’si tamamlanmış olup, beşi hali hazırda devam etmekte, üçüne ise henüz başlanmamıştır. Ayrıca TARAP, yalnızca risklerin fiziksel yönlerini değil, aynı zamanda sosyo-ekonomik etkilerini de analiz ederek, kırılgan grupların bu tür afetlere karşı korunmasını hedeflemektedir. AFAD koordinasyonunda her il için ayrı ayrı geliştirilen İRAP’lar, yerel düzeyde tehlike ve risk analizlerini içermektedir. 81 ilin İRAP’larında Nisan 2025 itibarıyla 16.000’den fazla afet risk azaltma eylemi bulunmakta olup bu eylemlerin yaklaşık % 49’u tamamlanmıştır. Söz konusu eylemlerin de yaklaşık 2.000 tanesi kütle hareketleri ile ilgili olup, bu sayı toplam eylemlerin %12’sine karşılık gelmektedir.



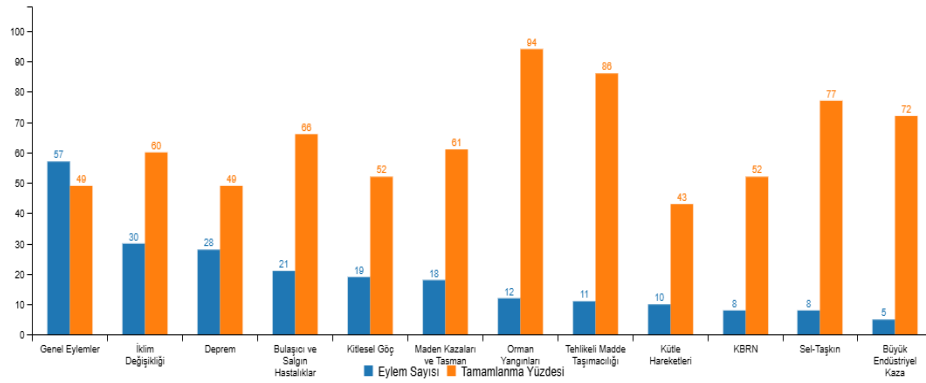
Şekil 5. 2 Mayıs 2025 tarihi itibarıyla ARAS sisteminde üretilen kaya düşmesi duyarlılık haritası.

Figure 5. Rockfall susceptibility map produced by ARAS system as of May 2, 2025.



Şekil 6. 2 Mayıs 2025 tarihi itibarıyla ARAS sisteminde üretilen çığ duyarlılık haritası.

Figure 6. Avalanche susceptibility map produced by the ARAS system as of May 2, 2025.



Şekil 7. Nisan 2025 itibariyle “tarap.afad.gov.tr” adresinden elde edilen verilere göre TARAP eylemlerinin eylem sayısı ve tamamlanma yüzdesi ilişkisi.

Figure 7. The relationship between the number of actions and the percentage of completion of TARAP actions, according to the data obtained from “tarap.afad.gov.tr” as of April 2025.

Çizelge 2. TARAP’da yer alan kütle hareketleri eylemlerinin vadeleri ve sorumlu kurum dağılımı (AFAD, 2022).

Table 2. Maturities of mass movement actions in TARAP and distribution of responsible institutions (AFAD, 2022).

Eylem No	Eylem	Vade	Sorumlu Kurum
K.H.1.1.	Kütle hareketleri tehlike ve risklerinin nasıl belirleneceğine yönelik usul ve esasların ortaya koyulması	Orta Vade	AFAD
K.H.1.2.	Yerleşim alanlarında kütle hareketlerden kaynaklanan tehlikelerin ve yerleşime uygunluk durumlarının belirlenmesi	Uzun Vade	ÇŞİDB
K.H.1.3	Kütle hareketleri tehlike haritalarının güncellenmesi	Kısa Vade	AFAD
K.H.1.4	Kütle hareketleri risk değerlendirmesi yapılması	Orta Vade	AFAD
K.H.1.5.	Kütle hareketlerinden kaynaklanan risklere ilişkin önlemlerin mekânsal planlara yansıtılması	Orta Vade	ÇŞİDB
K.H.1.6	Kütle hareketleri CBS tabanlı erken uyarı sistemlerinin kurulması	Uzun Vade	AFAD
K.H.2.1.	Kütle hareketleri öncesi, sırası ve sonrasında yapılması gerekenler konusunda bilinçlendirme yapılması	Kısa Vade	AFAD
K.H.2.2	Hazırlık bilincinin geliştirilmesi	Orta Vade	AFAD
K.H.3.1.	Görev, yetki ve sorumluluklardaki çakışan hususların belirlenmesi	Orta Vade	AFAD
K.H.3.2.	Mevzuatta kurumlar arası eşgüdüm sağlanarak dil birliğinin sağlanması	Orta Vade	AFAD

TÜRKİYE’NİN KÜTLE HAREKETLERİNE YÖNELİK RİSK AZALTMA STRATEJİLERİNİN DİĞER ÜLKELERLE KIYASLANMASI

Uluslararası düzeyde afet risk azaltma stratejileri, ülkelerin coğrafi, iklimsel ve sosyo-ekonomik koşullarına göre çeşitlenmektedir. Kütle hareketleri gibi jeolojik kökenli afetlerin yönetimi konusunda bazı ülkeler teknik kapasite ve kurumsal altyapı açısından ileri düzeyde uygulamalar geliştirmiştir. Türkiye’nin bu ülkelerle kıyaslanması, mevcut sistemin güçlü ve geliştirilmeye açık yönlerini ortaya koymaktadır. Türkiye’nin afet risk azaltma sistematığı, kurumsal çerçevesi açısından gelişmiş olsa da, teknoloji temellimodellerin entegrasyonu konusunda sınırlı kalmaktadır. Toplum temelli uygulamalar açısından da

Türkiye, Japonya ve Hindistan gibi ülkelerle karşılaştırıldığında katılımcılık düzeyini artırma potansiyeline sahiptir. Örneğin, Tayvan ve Bangladeş’te çığ ve heyelan riskine karşı halk bilgilendirme sistemleri, eğitim programları ve gönüllü afet gözlem ağıları aktif olarak kullanılmaktadır (Chen vd., 2021; Tang vd., 2023). Türkiye’de ise yerel yönetimlerin ve mahalle düzeyindeki afet bilinçlendirme faaliyetlerinin güçlendirilmesi gerektiği görülmektedir. Yukarıda verilen bilgiler doğrultusunda, Türkiye ile ABD, Japonya ve Norveç’in kütle hareketleri konusunda yapmış olduğu afet risk azaltma politikaları, erken uyarı sistemlerinin kullanımı, mevcut yasal düzenlemeler, CBS ve uzaktan algılama teknolojileri, farkındalık ve ekosistem tabanlı yaklaşımlar açısından karşılaştırmalı olarak Çizelge 3’te verilmiştir.

Çizelge 3. Türkiye, ABD, Japonya ve Norveç’in kütle hareketlerine yönelik risk azaltma politikalarının karşılaştırılması.

Table 3. Comparison of mass movement risk reduction policies of Türkiye, USA, Japan and Norway.

Ülke	Ulusal Strateji Belgesi	Erken Uyarı Sistemi	Yasal Düzenleme	CBS/Uzaktan Algılama	Toplum Katılımı	Doğa Tabanlı Çözüm
Türkiye	TARAP, İRAP	Pilot düzeyde	Genel çerçeve (AFAD, MTA)	MTA CBS haritaları	Sınırlı	Az sayıda örnek
ABD	National Landslide Plan	USGS sensör ağı	Landslide Preparedness Act	Lidar, AI, CBS	Orta düzey	Düşük
Japonya	National Landslide Map	Yaygın ve zorunlu	Landslide Prevention Act	SBAS-InSAR, Lidar	Yüksek	Sınırlı
Norveç	Klima 2050	Ulusal sistem	İklim tabanlı eylem planı	CBS, senaryo modelleme	Orta düzey	Yaygın

Bu karşılaştırmadan anlaşılacağı üzere, Türkiye güçlü bir stratejik planlama altyapısına sahip olmakla birlikte, teknolojik kapasitenin yaygınlaştırılması, doğa temelli çözümlerle risk azaltma ve toplum temelli yaklaşımların artırılması gibi alanlarda gelişmeye açıktır. ABD’nin yüksek teknoloji ve izleme ağı, Japonya’nın yasal sıkılığı ve afet haritalama

disiplini ile Norveç’in doğa temelli çözüm entegrasyonu (MacAfee vd., 2024; MLIT Japan, 2022; Solheim, vd., 2022) Türkiye için yol gösterici niteliktedir.

TARTIŞMA VE SONUÇLAR

Bu çalışma, jeolojik afetler içinde önemli bir yer tutan kütle hareketlerinin afet risk azaltma

politikalarındaki konumunu incelemiş ve hem ulusal hem de uluslararası düzeyde mevcut stratejileri karşılaştırmalı olarak değerlendirmiştir. Jeolojik afetler yalnızca doğa olayları değil; aynı zamanda insan yerleşimleri, planlama süreçleri ve yönetim kapasitesiyle doğrudan ilişkili karmaşık afetlerdir. Kütle hareketleri, bu bağlamda en az depremler kadar önemli ve çoğu zaman tetikleyici etkiye sahip afet türleri olarak öne çıkmaktadır. Türkiye, son on yılda afet yönetimi alanında önemli yapısal reformlar gerçekleştirmiş ve ilk kez yürürlüğe giren afet risk azaltma politika belgeleriyle risk temelli yaklaşıma geçiş yapmıştır. Ancak bu belgelerde yer alan stratejik hedeflerin sahada uygulanabilirliğinin artırılması, kütle hareketleri özelinde daha fazla bilimsel veriyle desteklenmesi ve mekânsal planlama süreçlerine entegre edilmesi gerekmektedir.

Uluslararası karşılaştırmalar, Türkiye'nin güçlü yönlerinin yanı sıra gelişmeye açık yönlerini de ortaya koymaktadır. Kütle hareketleri konusunda; ABD'nin gerçek zamanlı izleme sistemleri, Japonya'nın yasal sıkılık ve mikrobölgeleme disiplini, Norveç'in doğa tabanlı çözüm ve iklim temelli senaryo planlaması gibi uygulamalar, Türkiye açısından ilham verici modeller sunmaktadır. Ayrıca, Tayvan, Hindistan ve Bangladeş gibi ülkelerde uygulanan toplum temelli afet yönetimi yaklaşımları, yerel farkındalığın artırılması ve erken müdahale kapasitesinin geliştirilmesinde kritik bir rol oynamaktadır. Türkiye'de özellikle SBAS-InSAR, LIDAR ve yapay zekâ tabanlı kütle hareketleri izleme sistemlerinin yaygınlaştırılması; mevzuatta kütle hareketlerine özgüyapılaşma kısıtlamaları ile afet duyarlı alan tanımlamalarının netleştirilmesi; MTA ve AFAD gibi kurumların kütle hareketleri verilerinin merkezi, güncel ve erişilebilir bir CBS tabanlı sistemde birleştirilmesi; kütle hareketi potansiyeli yüksek bölgelerde ekosistem temelli yaklaşımların

(örneğin bitkilendirme, geçirgen yüzey uygulamaları vb.) teşvik edilmesi önem taşımaktadır. Bilimsel bilgiye dayalı, toplumu merkeze alan ve iklim değişikliği gibi geleceğin risklerini gözetten bir afet yönetimi yaklaşımı, Türkiye'nin jeolojik afetlere karşı daha dirençli bir yapıya kavuşmasında temel rol oynayacaktır.

Kütle hareketleri gibi jeolojik afetlerin etkilerinin azaltılmasında, karar vericilere teknik ve yönetsel anlamda yön gösterecek stratejik önceliklendirme mekanizmalarına ihtiyaç duyulmaktadır. Bu bağlamda geliştirilen Gelişim Öncelikleri Matrisi (GÖM), afet risk azaltma stratejilerinin hem etki düzeyini hem de uygulanabilirlik potansiyelini eş zamanlı olarak değerlendirmeyi esas alarak, kaynakların en etkin biçimde kullanılmasını sağlamayı amaçlamaktadır (UNDRR, 2019). GÖM yaklaşımı, afet risk azaltma planlamasında çok ölçütlü karar verme (Multi-Criteria Decision Analysis – MCDA) araçlarıyla paralel çalışabilecek nitelikte bir çerçeve sunmaktadır. Bu tür önceliklendirme modelleri yalnızca teknik etkileri değil, aynı zamanda kurumsal kapasite, ekonomik sürdürülebilirlik ve toplumsal kabul düzeylerini de dikkate alarak stratejik yönetim kabiliyetini güçlendirir (Van Westen et al., 2008). GÖM yaklaşımına göre, kütle hareketleri matrisi kapsamında yer alan önlemler, dört ana strateji kümesinde değerlendirilebilir (Çizelge 4).

1.Yüksek Etki / Orta Uygulanabilirlik: Özellikle uzaktan algılama ve veri temelli teknolojilerin yaygınlaştırılması, kısa vadede yüksek etki yaratabilecek ancak kurulum altyapısı ve teknik kapasite gerektirdiğinden dolayı orta düzeyde uygulanabilir stratejiler olarak öne çıkmaktadır. Örneğin; SBAS-InSAR ve LiDAR tabanlı deformasyon izleme sistemleri ile Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) destekli erken uyarı altyapıları, yüksek doğruluk ve geniş alan kapsama kapasitesi sayesinde yüksek öncelikli yatırımlardır.

Çizelge 4. Gelişim Öncelikleri Matrisine (GÖM) göre Türkiye'nin kütle hareketlerine yönelik afet risk azaltma politikalarının değerlendirilmesi.

Table 4. Assessment of Türkiye's Disaster Risk Reduction Policies for Mass Movements according to the Development Priorities Matrix.

Gelişim Alanı	Öneri Başlığı	Öncelik Düzeyi (Etki)	Kaynak	Önerilen Ölçek	Sorumlu Kurum*
Teknoloji ve İzleme Sistemleri	SBAS-InSAR ve LIDAR tabanlı deformasyon izleme sistemlerinin yaygınlaştırılması	Yüksek	Orta	Ulusal – Yerel	AFAD, MTA, TÜBİTAK
	CBS tabanlı erken uyarı sistemlerinin kurulması	Yüksek	Orta	Yerel – Bölgesel	AFAD, TOB, Belediyeler
	Kurumsal veri portallarının birleşik ve erişilebilir hale getirilmesi	Yüksek	Yüksek	Ulusal	MTA, AFAD, ÇŞİDB
	Yapılaşma kısıtlamaları içeren yeni yasal düzenleme	Yüksek	Düşük	Ulusal	TBMM, ÇŞİDB
Mevzuat ve Planlama	Mekânsal planlara risk zonlaması entegrasyonu	Orta	Yüksek	İl – İlçe düzeyi	ÇŞİDB
	Kurumlar arası görev yetki ayrımının mevzuatla netleştirilmesi	Orta	Orta	Ulusal	AFAD, ÇŞİDB
Ekosistem Tabanlı Yaklaşımlar	Geçirgen yüzey, doğal bitkilendirme uygulamalarının teşvik edilmesi	Orta	Yüksek	Yerel – Bölgesel	TOB, Belediyeler
	Eğimli alanlarda ormanlaştırma – risk entegrasyon projeleri	Yüksek	Orta	Bölgesel	TOB, AFAD
Toplum Temelli Faaliyetler	Afet eğitim modüllerinin okullara entegrasyonu	Yüksek	Orta	Ulusal – Yerel	MEB, AFAD
Uluslararası İşbirlikleri	Horizon, IPA, UCPM gibi fonlardan finansman sağlanması	Yüksek	Düşük	Ulusal	TÜBİTAK, Dışişleri Bk. AFAD
	Ülkelerle teknoloji paylaşımı	Orta	Orta	Ulusal – Teknik Kurumlar	AFAD, MTA, TÜBİTAK

*AFAD: Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, MTA: Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, TOB: Tarım ve Orman Bakanlığı, ÇŞİDB: Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, TBMM: Türkiye Büyük Millet Meclisi, MEB: Milli Eğitim Bakanlığı.

2.Yüksek Etki / Düşük Uygulanabilirlik: Bu kategoriye giren önlemler, büyük ölçekli yapısal değişiklikler veya politika reformları gerektiren ancak uygulama süreçlerinde yasal, kurumsal

veya ekonomik engellerle karşılaşılabilen stratejilerdir. Yapılaşma kısıtlamaları, risk zonlamasının mekânsal planlamaya entegrasyonu ve ulusal mevzuat reformları, bu

grupta yer alır. Uygulanabilirliğin düşük olmasının başlıca nedeni, bu önlemlerin politik sahiplenme, yasal uyum ve fon gereksinimlerine olan yüksek bağımlılığıdır (Aitsi-Selmi vd., 2016; Cutter ve Finch, 2008).

3.Orta Etki / Yüksek Uygulanabilirlik: Bu alanda yer alan önlemler genellikle düşük maliyetli, teknik olarak erişilebilir ve sosyal kabulü yüksek uygulamalardır. Toplum temelli farkındalık artırıcı eğitimler, okullarda afet modüllerinin entegrasyonu, geçirgen yüzey uygulamaları ve yerel ekosistem temelli peyzaj düzenlemeleri bu strateji kümesinde değerlendirilmektedir. Bu önlemlerin etkileri genellikle uzun vadede ortaya çıkmakta; ancak sürdürülebilirlik açısından oldukça değerlidir (Djalante vd., 2012).

4.Uygulama Önceliği (Kısa Vadeli Stratejiler): Analiz sonuçlarına göre, ilk etapta uygulanması gereken stratejiler arasında veri sistemlerinin entegrasyonu, kurumlar arası bilgi paylaşımının artırılması, CBS tabanlı uygulamaların yaygınlaştırılması ve toplum temelli eğitim programlarının genişletilmesi yer almaktadır. Bu stratejiler, teknik kapasitenin mevcut olduğu veya geliştirilebilir olduğu alanlarda hızla hayata geçirilebilir. Orta ve uzun vadede ise mevzuat reformları, ulusal planların risk temelli entegrasyonu ve uluslararası fonların etkin biçimde mobilizasyonu gündeme alınmalıdır.

Matrisin genel değerlendirmesi, Türkiye'nin mevcut politika çerçevesinin özellikle stratejik planlama düzeyinde güçlü olduğunu; ancak uygulama, teknolojik entegrasyon, mevzuat bütünlüğü ve yerel kapasite geliştirme boyutlarında önemli iyileştirme alanlarının bulunduğunu göstermektedir. Bu nedenle, kütle hareketlerine ilişkin afet risklerini azaltmada kısa, orta ve uzun vadeli hedefleri kapsayan bütüncül bir dönüşüm vizyonunun benimsenmesi gerekmektedir.

Sonuç olarak, kütle hareketlerinin yalnızca teknik veya jeolojik değil; aynı zamanda

yönetişim, eğitim, toplum katılımı ve ekolojik uyum boyutlarını içeren çok katmanlı bir yaklaşımla ele alınması gerektiği açıktır. Türkiye'nin kısa, orta uzun vadeli risk azaltma planlamasında, yukarıda tanımlanan çok boyutlu stratejileri eş zamanlı ve birbirini tamamlayıcı biçimde uygulamasıyla, kütle hareketlerine karşı hem kırılganlığın azaltılması hem de afetlere karşı dirençli bir yönetim sistematığının oluşturulması mümkündür. Bu vizyon, Sendai Afet Risk Azaltma Çerçevesi, Paris İklim Anlaşması ve Avrupa Yeşil Mutabakatı gibi küresel hedeflerle de tam uyumludur ve Türkiye'nin jeolojik afetlerle mücadelede ileri düzey bir uygulama ülkesi haline gelmesi açısından büyük önem taşımaktadır.

KATKI BELİRTME

Yazar, bu çalışmada TARAP, İRAP ve ARAS sistemlerine dair verinin sağlanması noktasında AFAD Afet Risklerini Azaltma ve Önlem Daire Başkanlığı ve İklim Kaynaklı Afet Risklerini Azaltma Dairesi'nin kıymetli personeline teşekkür eder.

KAYNAKLAR

- AFAD, 2020. T.C. İçişleri Bakanlığı Afet Ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, Türkiye Afet Müdahale Planı (TAMP). <https://www.afad.gov.tr>
- AFAD, 2021. T.C. İçişleri Bakanlığı Afet Ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, İl Afet Risk Azaltma Planları (İRAP). <https://irap.afad.gov.tr>
- AFAD, 2022. T.C. İçişleri Bakanlığı Afet Ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, Türkiye Afet Risk Azaltma Planı (TARAP). Ankara. <https://www.afad.gov.tr>
- Aitsi-Selmi, A., Murray, V., Wannous, C., Dickinson, C., Johnston, D., Kawasaki, A., Yeung, T., 2016. Reflections on a science and technology agenda for 21st century disaster risk reduction. International Journal of Disaster Risk Science, 7(1), 1–29. <https://doi.org/10.1007/s13753-016-0081-x>

- Alam, E., Islam, Md. K., 2023. Enhancing landslide risk reduction strategies in Southeast Bangladesh. *Journal of Disaster Risk Studies*, 15(1), a1541. <https://doi.org/10.4102/jamba.v15i1.1541>
- Alcántara-Ayala, I., 2002. Geomorphology, natural hazards, vulnerability and prevention of natural disasters in developing countries. *Geomorphology*, 47(2-4), 107-124. [https://doi.org/10.1016/S0169-555X\(02\)00083-1](https://doi.org/10.1016/S0169-555X(02)00083-1)
- Andersson-Sköld, Y., Bergman, R., Johansson, M., Persson, E., Nyberg, L., 2013. Landslide risk management—A brief overview and example from Sweden of current situation and climate change. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 3, 44-61. <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2012.11.002>
- Aydin, A., 2013. Avalanche risk assessment using snowpack stability, topography and climate data: A case study from Eastern Turkey. *Natural Hazards*, 68(2), 1093-1108. <https://doi.org/10.1007/s11069-013-0672-9>
- Bell, F. G., 1999. *Geological Hazards: Their Assessment, Avoidance and Mitigation*. CRC Press.
- Chen, Y., Wu, H., Huang, Y., 2021. Community-based landslide disaster risk reduction: A Taiwan case. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 60, 102284. <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2021.102284>
- Cruden, D. M., Varnes, D. J., 1996. Landslide types and processes. In A. K. Turner & R. L. Schuster (Eds.), *Landslides: Investigation and Mitigation* (pp. 36-75). Transportation Research Board Special Report 247, National Academy Press.
- Cui, P., Peng, J., Shi, P., Tang, H., et al., 2021. Scientific challenges of research on natural hazards and disaster risk. *Geography and Sustainability*, 2, 216-223. <https://doi.org/10.1016/j.geosus.2021.09.001>
- Cutter, S. L., Finch, C., 2008. Temporal and spatial changes in social vulnerability to natural hazards. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 105(7), 2301-2306.
- DSİ, 2021. Yeraltı Suyu İzleme ve Obruk Raporu. <https://www.dsi.gov.tr>
- Djalante, R., Shaw, R., DeWit, A., 2012. Building resilience to natural hazards in Indonesia: Progress and challenges. *Natural Hazards*, 62(3), 779-803.
- Emre, Ö., Duman, T. Y., Özalp, S., Elmacı, H., Olgun, Ş., 2018. Active Fault Map of Turkey (1:1,250,000 scale). MTA Genel Müdürlüğü, Ankara.
- Ercanoğlu, M., Gökçe, O., 2004. Use of fuzzy relations to produce landslide susceptibility map of a landslide-prone area (West Black Sea region, Turkey). *Engineering Geology*, 75(3-4), 229-250. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2004.06.001>
- Fidan, S., Görüm, T., 2020. Türkiye'de ölümcül heyelanların dağılım karakteristikleri ve ulusal ölçekte öncelikli alanların belirlenmesi. *Türk Coğrafya Dergisi*, 74, 123-134. <https://doi.org/10.17211/tcd.731596>
- Gökçe, O., Özden, Ş., Demir, A., 2008. Türkiye'de Afetlerin Mekânsal ve İstatistiksel Dağılımı: Afet Bilgileri Envanteri. Afet İşleri Genel Müdürlüğü, Afet Etüt ve Hasar Tespit Daire Başkanlığı, Ankara.
- Highland, L. M., Bobrowsky, P. T., 2008. The landslide handbook: A guide to understanding landslides. U.S. Geological Survey Circular 1325.
- Hoek, E., David, M., 1990. Estimating Mohr-Coulomb friction and cohesion values from Hoek-Brown failure criterion. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 27(3), 201-215. [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(90\)94333-O](https://doi.org/10.1016/0148-9062(90)94333-O)
- Jamali, B., Majnounian, B., 2022. Landslide hazard mapping using GIS-based multi-criteria decision analysis. *Natural Hazards*, 110, 347-372. <https://doi.org/10.1007/s11069-021-05105-9>
- MLIT Japan, 2022. Landslide Disaster Countermeasures and Risk Zoning. Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism. <https://www.mlit.go.jp>

- MTA, 2021. Türkiye Kütle Hareketleri Haritası. Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü. <https://www.mta.gov.tr>
- MacAfee, R., Larson, P., Goodwin, T., 2024. National framework for landslide policy implementation in the U.S. *Natural Hazards Review*, 25(1), 04024001. <https://doi.org/10.1061/NHREFO.0000537>
- Metin, A., Yılmaz, I., 2019. Snow avalanche hazard zonation using GIS and analytic hierarchy process (AHP): A case study from Eastern Anatolia, Turkey. *Natural Hazards*, 99(2), 889–911. <https://doi.org/10.1007/s11069-019-03745-w>
- NDMA, 2007. Guidelines on Management of Landslides and Snow Avalanches. National Disaster Management Authority of India. <https://ndma.gov.in>
- Niu, W., Hua, X., Lin, B., et al., 2023. Detection and monitoring of potential geological disasters using SBAS-InSAR. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 27(11), 4884–4896. <https://doi.org/10.1007/s12205-023-0759-8>
- Shao, J., Xu, L., 2023. Artificial intelligence in landslide early warning systems: A comprehensive review. *Engineering Geology*, 320, 107020. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2023.107020>
- Smith, K., 2013. *Environmental Hazards: Assessing Risk and Reducing Disaster* (6th ed.). Routledge.
- Solheim, A., Kalsnes, B., Strout, J., Piciullo, L., Heyerdahl, H., Eidsvig, U., Lohne, J., 2022. Landslide risk reduction through close partnership between research, industry, and public entities in Norway: Pilots and case studies. *Frontiers in Earth Science*, 10, 855506. <https://doi.org/10.3389/feart.2022.855506>
- Şaroğlu, F., Emre, Ö., Kuşçu, İ., 1992. *Active Fault Map of Turkey*. MTA Publications.
- Tang, H., Cui, P., Hu, K., 2023. Chain disasters and integrated management: Insights from mountain hazards. *Natural Hazards*, 117, 2991–3011. <https://doi.org/10.1007/s11069-023-05970-y>
- Tetik Biçer, Ç., 2017. Heyelan risk haritalaması üzerine yarı sayısal bir değerlendirme. Hacettepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Jeoloji Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Doktora Tezi, 353s.
- Tetik Biçer, Ç., 2024. Afetlerde Risk Azaltma Stratejileri. Afet Yönetimi El Kitabı. Cilt 1, 211-247s., Gazi Kitabevi, Ankara.
- UNDRR, 2019. Global Assessment Report on Disaster Risk Reduction. United Nations Office for Disaster Risk Reduction. <https://www.undrr.org/publication/global-assessment-report-2019>
- UNDRR, 2020. Hazard definition and classification review: Technical report. United Nations Office for Disaster Risk Reduction. <https://www.undrr.org/publication/hazard-definition-and-classification-review>
- UNDRR, 2023. Hazard Definitions and Classification Review. United Nations Office for Disaster Risk Reduction. <https://www.preventionweb.net>
- URL-1, 2025. European Commisison, INFORM, Home (Erişim Tarihi: 07.04.2025) <https://drmkc.jrc.ec.europa.eu/inform-index/>
- URL-2, 2025. European Commisison, INFORM DRMKC, Map Explorer. (Erişim tarihi: 09.04.2025) <https://drmkc.jrc.ec.europa.eu/inform-index/INFORM-Risk/Map-Explorer>
- USGS, 2021. National Landslide Preparedness Act. U.S. Congress. <https://schrier.house.gov/media/press-releases/rep-schrier-introduces-legislation-improve-landslide-preparedness-and-safety>
- Van Westen, C. J., Castellanos, E., Kuriakose, S. L., 2008. Spatial data for landslide susceptibility, hazard, and vulnerability assessment: An overview. *Engineering Geology*, 102(3–4), 112–131. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2008.03.010>
- Wang, J., Zhang, L., Zhou, Y., 2022. GIS-based information value model for landslide susceptibility mapping. *Landslides*, 19, 1123–1136. <https://doi.org/10.1007/s10346-021-01773-5>
- Yang, S., Lee, W., Chen, H., 2025. Global research trends in seismic landslide disasters: A bibliometric approach. *Landslides*, 22(3), 657–678. <https://doi.org/10.1007/s10346-025-01820-4>



Yüksek Mn İçeriğine Sahip Bir Cüruf Üzerinde Mineralojik ve Kimyasal Değerlendirme

Mineralogical and Chemical Evaluation of a Slag with High Mn Content

GÜLLÜ DENİZ DOĞAN-KÜLAHÇI ^{1*} 

¹ Hacettepe Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, 06800, Beytepe, Ankara, Türkiye

Geliş (received): 24 Haziran (June) 2025 Kabul (accepted): 4 Ağustos (August) 2025

ÖZ

Kırıkkale/Erenler çevresinde yürütülen arazi çalışmaları sırasında, sedimanter kayalarla birlikte gözlemlenen, parlak metalik gri-siyah renkli, yüksek yoğunluklu ve çevresindeki litolojiden belirgin biçimde farklı bir örnek (D1) dikkat çekmiştir. D1, yaklaşık 6 cm çapında, 200 g ağırlığında, nodüler, yüzeyinde yer yer vesiküler doku içeren ve manyetik özellik göstermeyen bir yapıya sahiptir. Kırık yüzeylerinde metalik parlaklık sergiler ve iç yapısında belirgin tane yapıları ya da konsantrik zonlanmalar bulunmaz. SEM- EDS analizleri, örneğin yüksek Mn (%61–88) içeriği ve düşük Fe (%5–6) içeriğine sahip olduğunu göstermektedir. XRD analizlerinde, örnekte manganozit (MnO) ve kohenit ((Fe,Ni,Co)₃C) mineralleri saptanmıştır. Bu mineral birlikteliği ve kimyasal bileşim, örneğin yüksek sıcaklık, indirgen atmosfer ve karbonca zengin koşullarda oluştuğuna işaret etmektedir. Aynı zamanda EDS analizleri, örneğin düşük düzeyde P, S ve Ni içerdiğini de göstermektedir. Tüm bu veriler (morfolojik, mineralojik ve kimyasal özellikleri) birlikte ele alındığında, D1'in doğal bir oluşum olmadığı, yüksek sıcaklık ve indirgen ortam koşullarında manganez ve demirin birlikte ergitilmesi sonucu oluşmuş, ferromanganez cürufu niteliğinde, endüstriyel metalürjik süreçler sonucunda meydana gelen ve büyük olasılıkla ferromanganez üretimi sırasında oluşan bir endüstriyel cüruf parçası olduğu değerlendirilmiştir. Bu çalışma, doğal görünümlü fakat yapay kökenli materyallerin mineralojik ve jeokimyasal açıdan detaylı analizlerle ayırt edilebileceğini ortaya koymaktadır. Ayrıca, benzer endüstriyel atıkların yanlış jeolojik sınıflandırmalara konu olmaması adına da önemli bir örnek sunmaktadır. Cüruf örneğin bulunduğu lokasyonun demiryolu yakınında yer alması, bu tür atıkların dolgu malzemesi olarak kullanıldığı alanlarla da örtüşür niteliktedir. D1 cüruf örneğinin, yüksek fırında manganez ve demir karışımının ısıtılmasıyla oluşmuş ferromanganez gibi metal bakımından zengin endüstriyel cüruf özelliklerine sahip bir parça, olduğu sonucuna varılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Cüruf, demir, endüstriyel, manganez, nodül

ABSTRACT

During fieldwork conducted in the Kırıkkale/Erenler area, a bright metallic gray-black, high-density sample (D1), markedly distinct from the surrounding lithology, was observed in association with sedimentary rocks. D1 measures approximately 6 cm in diameter, weighs 200 g, is nodular in form, exhibits locally vesicular textures on its surface, and is non-magnetic. Its fractured surfaces display a metallic luster, and its internal

structure lacks distinct grain textures or concentric zoning. SEM–EDS analyses reveal that the sample contains high Mn (61–88%) and low Fe (5–6%). XRD analyses identified the presence of manganosite (MnO) and cohenite ((Fe,Ni,Co)₃C) minerals. This mineral assemblage and chemical composition indicate formation under high-temperature, reducing, and carbon-rich conditions. Furthermore, EDS analyses show that the sample contains low levels of P, S, and Ni. Considering all these data (morphological, mineralogical, and chemical characteristics) together, it is concluded that D1 is not a natural formation, but rather a piece of industrial slag with the characteristics of ferromanganese slag, formed by smelting manganese and iron together under high-temperature and reducing conditions, produced through industrial metallurgical processes, and most likely generated during ferromanganese production. This study demonstrates that materials of artificial origin but natural appearance can be distinguished through detailed mineralogical and geochemical analyses. It also provides an important example to prevent similar industrial residues from being mistakenly classified in geological contexts. The location of the slag sample near a railway is consistent with the use of such waste materials as fill. It is concluded that the D1 slag sample possesses the characteristics of an industrial slag fragment rich in metals, formed by heating a manganese-iron mixture in a blast furnace, similar to ferromanganese.

Keywords: Slag, iron, Industrial, manganese, nodule

<https://doi.org/10.17824/yerbilimleri.1726193>

*Sorumlu Yazar/ Corresponding Author: gdeniz@hacettepe.edu.tr

GİRİŞ

Makalenizin Endüstriyel metalürjik süreçler, yüksek sıcaklık ve kimyasal reaksiyonlar sonucu çeşitli yan ürünlerin (cüruf, toz ve partiküller, atık sular, ağır metal içeren çeşitli gazlar, asitli ve alkali çamurlar) oluşmasına neden olur. Bu yan ürünlerden biri olan ferromanganez cürufu, yüksek fırınlarda mangan ve demirin birlikte eritilmesiyle oluşan metal açısından zengin bir endüstriyel atıktır (Ünal vd. 2014). Mangan (Mn), yüksek kaliteli çelik üretmek için önemli bir hammadde (Gürsoy, 2021). Türkiye'deki mangan tüketimi, dünya ile benzerlik göstermekte ve büyük ölçüde, parça mangan cevheri ve manganlı demir alaşımları şeklinde değerlendirilir. Sıcaklığı 1750 oC'den daha yüksek fırınlarda, manganezin oksijen ve karbona olan yüksek afinitesi nedeniyle mangan rafinasyonu işlemi gerçekleşir (Özdemir, 2015). Bu şekilde yüksek fırınlarda oluşan cüruflar, demir-çelik üretimi ve alaşımların oluşumu süreçlerinde meydana gelir ve genellikle silikatlar, oksitler ve kükürt içeren bileşenler içerir. Ferromanganez

cürufları, makro görüntüleri, ağırlıkları ve metalik görünüşleriyle ilk anda meteoritlere, içerdiği yüksek Mn ve Fe konsantrasyonu nedeniyle de mineralojik olarak doğada bulunan peridotit gibi, bantlı demir oluşumları gibi koyu renkli ve ağırlığı fazla olan farklı kayalara benzerlik gösterebilir. Ancak, bileşimlerinde bulunan Mn, Fe, C ve Si gibi metal fazları, kohenit gibi alaşım fazları, bu malzemelerin doğal oluşumlar yerine endüstriyel süreçler sonucunda oluşmuş ürünler olabileceğini ortaya koyar. Ferromanganez üretimi sırasında ortaya çıkan bu fazlar ve kimyasal bileşimler, kullanılan hammaddeye, proses koşullarına (sıcaklık, redüksiyon ortamı), karbon miktarına ve soğuma hızına bağlı olarak değişiklik gösterir. Ferromanganez cürufu, metal geri kazanımı ve endüstriyel atık yönetimi açısından önemli bir üründür (Vapur vd. 2013). Demir çelik üretiminde kullanılan manganezin %90'ı ferromanganez formunda bulunur (DPT, 2001). Yüksek Mn içeriği ve ürünün fiziksel

özelliklerinin yanında, mineralojik-petrografik analizler ve kimyasal bileşimlerinin belirlenmesi ile hem jeolojik, metalürjik araştırmalar açısından hem de kayaç sınıflandırması ile endüstriyel yan ürünlerin değerlendirilmesi açısından önem taşır. Birçok farklı özelliğe sahip demir-çelik cürufu gibi atık malzemelerin kimyasal bileşimi ve maliyetinin uygun olması cürufun yeniden değerlendirmesinde önemli bir rol oynar (Kaya ve Turan, 2003). Çelik üretimi sırasında, toplam üretimin %15-20'i cüruf olarak hesaplanır. Avrupa Birliği'nde yılda 30 Mt ve Türkiye'de 9 Mt çelik üretimi gerçekleşmekte ve Dünya genelinde de çelik üretimi giderek artmaktadır. Endüstriyel metalürjik süreçlerin yanında, arkeometalürjik süreçlerle oluşmuş cüruflar da bulunur. 2002–2008 yılları arasında Kırklareli, Demirköy ilçesinde gerçekleştirilen arkeolojik kazılarda, kazı alanın güneydoğusunda iki tane ocağı olan bir demirci işliği ortaya çıkarılmıştır (Özbal, 2009). Bu kazılarda bölgede çok sayıda demir atığı, demirci cürufu ve üretimle ilişkili diğer arkeolojik buluntulara rastlanıldığı belirtilmiş ve demirci ocağı cürufu ve diğer örnekler Taramalı Elektron Spektrometresi (SEM)- X-ışını Enerji Dağılım Spektrometresi (EDS) ve X-ışını Kırınımı (XRD) analizleriyle incelenmiştir (Özbal, 2009). Örneklerin çoğunda yüksek oranda (%60-90) demir oksit içerirken, bazı örneklerde metalik demir damlacıkları da gözlemlendiği belirtilmiştir. Elektron mikroskobu analizlerinde de genelde wüstit (FeO) niteliğinde demir oksit yapısında oldukları belirlenmiştir. Burdur/Sagalassos'da, Eekellers vd. (2016) tarafından yapılan çalışmada da Helenistik Bizans dönemine ait tarihsel cüruflar bulunmuş ve örnekler üzerinde yaptıkları XRD analizleri sonucunda üç örnekte de yine

demirce zengin kohenit minerali tespit edilmiştir. Türkiye'de demir-çelik üretiminden elde edilen yan ürün cüruflar, çoğunlukla saklama alanlarında depolanır (Uysal ve Bahar, 2018). Ayrıca endüstriyel çelik cürufu, yol ve demiryollarında balast malzemesi (demiryolu raylarının altına serilen, fazla suyun boşaltılmasını sağlayan ve rayların sabit bir şekilde kalmasını destekleyen kırılmış taş veya benzeri malzeme) olarak, kıyı yapılarında dolgu malzemesi olarak, cam-seramik üretiminde de kullanılır (Ünal vd. 2014). Cüruflar ayrıca bünyelerinde bitkiler için önemli elementleri (P, S, Mn, Fe ve Mo) içerdiklerinden dolayı gübre ve bitkisel ve hayvansal atıklarla karıştırılarak kompost olarak kullanılabilir ve tarımsal faaliyetlerde daha yararlı şekillerde değerlendirilebilirler (Tozsın ve Öztaş, 2023). Çalışma, D1 olarak adlandırılan parçanın (Şekil 1), fiziksel özellikleri açısından meteorit'e benzerlik gösterdiği düşünülerek araştırılmaya başlanmış ancak ilerleyen süreçte örnek üzerinde yapılan mineralojik incelemeler ve XRD analizleri sonucunda MnO ve kohenit minerallerinin varlığı, endüstriyel kökenli bir cüruf olduğu belirlenmiştir. Çalışma, jeolojik ve metalürjik araştırmaların yanı sıra endüstriyel yan ürünlerin değerlendirilmesine yönelik katkı sağlamayı amaçlamaktadır. Literatürde genellikle kayaç, cevher veya volkanik ürünler üzerine yoğunlaşan çalışmalardan farklı olarak, bu çalışma doğal görünüme sahip endüstriyel kökenli oluşumların, jeolojik materyallerle karıştırılmaması için özgün bir yaklaşım sunmaktadır. Tüm bunlara ek olarak, benzer endüstriyel atıkların gelecekte yanlış yorumlanmasını engelleyecek nitelikte somut bir vaka analizi sunmasıyla da önemli bir katkı sağlamaktadır.

MATERYAL VE METOT

Mineralojik-petrografik incelemeler için, Hacettepe Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü İnce Kesit Laboratuvarı'nda hazırlanan incekesit, aynı bölümde bulunan Leica DM/LP marka/model, 10x oküler büyötmeye ve 2,5x, 10x, 20x ve 63x büyötmeli lens sistemine sahip alttan aydınlatmalı polarizan mikroskop kullanılarak incelenmiştir. Fotoğraflar ise Leica DFC-280 marka/model mikroskop kamerası kullanılarak çekilmiştir. Leica DM 2500 P model, üstten aydınlatmalı mikroskop ile de örnekte bulunan kristalen kısım incelenmiş ve fotoğraflanmıştır. XRD analizleri Hacettepe Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, XRD laboratuvarında Rikagu D / max 2200 PC model X-ray diffraktometresinde (Cu K α , 40 kV, 30 mA, 2°/dak tarama hızı, 2 θ = 2- 50 ve 70°) gerçekleştirilmiştir. Bu çekimler için öğütölüp, toz haline getirilmiş örnek lam üzerine sıvanarak hazırlanmıştır. Minerallerin SEM görüntölemeleri ve noktasal kimyasal analizleri için Hacettepe Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliğinde bulunan Carl-Zeiss EVO 50 EP SEM ve bütünleşik Bruker XFlash 3001 EDS, 10 keV ivmelendirici gerilim, 5nA demet akımı, 40 saniye sayma zamanı ve 10 mm çalışma mesafesi uygulanarak kullanılmıştır. SEM ile incelenecek örnek yüzeyleri, vakum altında EMS 5000 SC (Sputter Coater) marka/model kaplama cihazı kullanılarak ince bir karbon tabakası ile kaplanmıştır. Minerallerin kimyasal konsantrasyonlarını elde edebilmek için EDS analizleri ise Potsdam Üniversitesi (Almanya), Yer Bilimleri Enstitüsünde bulunan JEOL JXQ-8200 elektron mikroprobunda, 15 keV ivmelendirici gerilim, mineral fazlar için 15 nA ışın akımı ve odaklanmış bir elektron demeti (2 μ m ϕ) kullanılarak analiz edilmiştir. Minerallerin

kimyasal konsantrasyonlarının elde edilmesiyle (örn: FeO, MnO, CaO vb.) D1 örneğinin hangi koşullarda (indirgen ya da yükseltgen ortam) oluştuğu konusunda bilgi sahibi olunması amaçlanmıştır.

CÜRUF ÖRNEĞİNİN MAKROSKOBİK, MİKROSKOBİK VE KİMYASAL ÖZELLİKLERİ

D1 örneği, yaklaşık 6 cm ϕ ında, nodüler morfolojiye sahip bir parçadır (Şekil 1).



Şekil 1. Gri-siyah renkli ve sol üst kısımlarında metalik parlaklığın görüldüğü D1 el örneği.

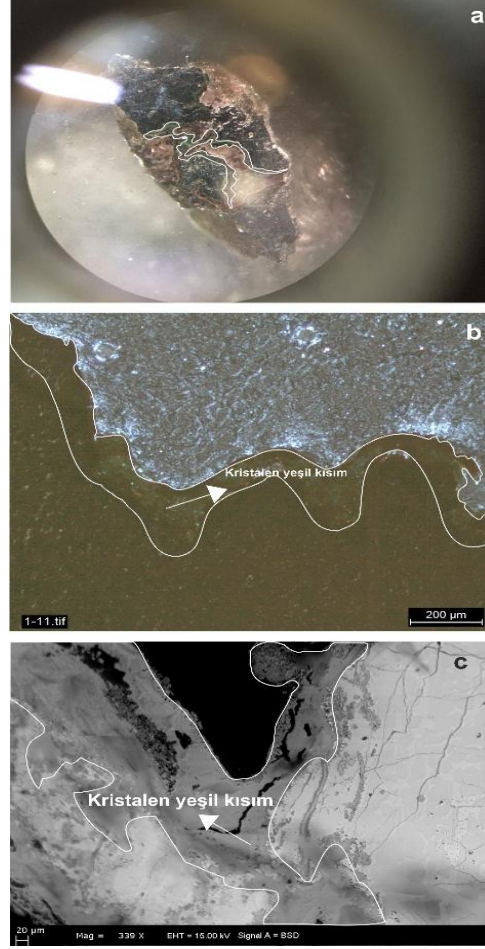
Figure 1. (D1 hand specimen with a gray-black color and metallic luster observed on the upper-left side)

Yapılan ölçümler sonucunda 200 g ağırlığında ve manyetik özellik göstermeyen bir yapıda olduğu tespit edilmiştir. Makroskobik incelemede, metalik gri-siyah parlaklığı ve yoğunluğu nedeniyle bazı meteoritlerle benzerlik gösterdiği düşünülmüştür. Literatür bilgilerine göre mangan cüruflarının özgül ağırlıkları (2.88 -3.17 g/cm³) aralığında değişmektedir ve buna göre D1 örneğinin özgül ağırlığının da bu aralıkta olduğu düşünülmektedir. Siyah renkte olan D1'in

kırılmış veya kesilmiş yüzeylerinde belirgin bir metalik parlaklık mevcuttur. Örnek, genel olarak pürüzsüz bir yüzey morfolojisi sergilemekle birlikte, yer yer gözenekli yapılar içerir. Seramik bir karonun sırsız yüzeyine sürtüldüğünde herhangi bir çizik iz bırakmamıştır. Çizik bırakmaması ise örneğin sertliğinin seramiğe eşit veya ondan düşük olduğunu, yani $\leq 6,5-7$ olduğunu gösterir. Örnek, kesilmesi sonucu homojen ve düzgün dokulu bir iç yapı ortaya sunar. Örnekten hazırlanmış incekesitin, polarizan mikroskop ile gerçekleştirilen optik incelemelerinde, belirgin mineral kristalleri gözlenmemiştir. Ancak, parçanın gözeneklerinin kenar kısımlarını çevreleyen yeşilimsi kristalin bir hat belirlenmiştir (Şekil 2). Bu kısımlarda gerçekleştirilen SEM-EDS analizleri, örneğin yüksek Mn, Fe ve O konsantrasyonu içerdiğini gösterir (Şekil 3 – Ölçüm 1). Ayrıca, bu tanelerin yanı sıra çevresindeki bölgelerin de Mn (%61-88), Fe (%5-6), O (%2-31), Si (%4-5) ve düşük oranlarda P, S ve Ni içerdiği de belirlenmiştir (Şekil 3 – Ölçüm 3 ve 4). Örnek üzerinde gerçekleştirilen XRD analizleri, cüruf içinde manganozit (MnO) ve kohenit ($(Fe,Ni,Co)_3C$) minerallerinin varlığını gösterir (Şekil 4). Bu iki mineralin D1 örneğinde birlikte görülmesi, D1'in yüksek sıcaklıkta, indirgen atmosferde ve karbonca zengin koşullarda oluştuğuna işaret eder. Bu durum, arkeometalurjik süreçlerle uyumlu olabileceği gibi, modern endüstriyel süreçlerde de görülebilmektedir.

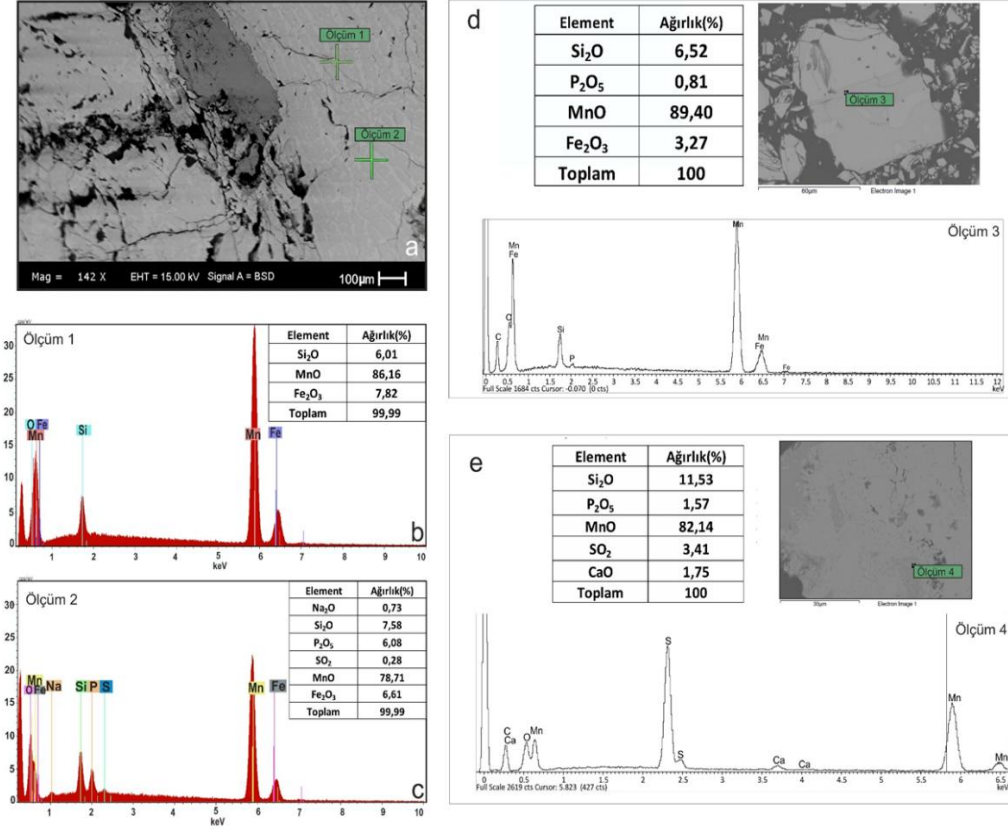
BULGULAR VE TARTIŞMA

D1 örneği, içerdiği yüksek Mn ve Fe konsantrasyonu ile birlikte nodüler morfoloji, metalik parlaklık ve vesiküler doku gibi fiziksel özellikler sunar. Petrografik incelemelerde, örneğin belirgin mineral kristalleri içermediği, ancak gözenekli yapıların kenarlarında yeşilimsi kristalin bir çerçevenin geliştiği gözlenir (Şekil 2).



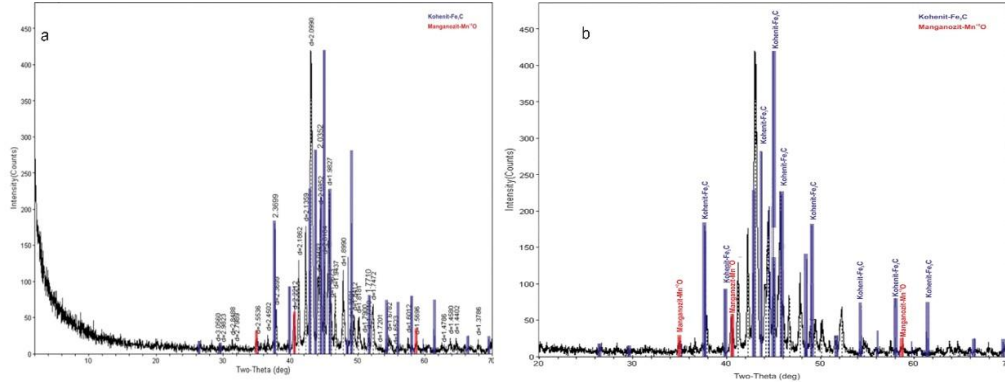
Şekil 2. D1 'in a) Üstten aydınlatmalı mikroskop görüntüsü, b) Optik mikroskop ikinci nikol görüntüsü. Koyu renkli kısımda çizilen hat, yüksek Mn, Fe ve O konsantrasyonu içeren kristalen yeşil kısmı temsil etmektedir. c) Yüksek Mn, Fe ve O konsantrasyonu içeren kristalen yeşil kısmın elektron mikroskop görüntüsü (SEM).

Figure 2. a) Reflected light microscopy image of D1, b) Optical microscope image of under crossed polars. The line drawn in the dark-colored area represents the crystalline green portion containing high Mn, Fe, and O concentrations. c) Scanning Electron microscope image of the green crystalline part containing high Mn, Fe, and O concentrations (SEM).



Şekil 3. a) D1 örneğinin EDS (Enerji Dağılımlı X-ışını Spektroskopisi) ile yapılan yeşil kristalen bölgesi (Ölçüm 1) ve matriks alanındaki (Ölçüm 2) analiz noktaları b) Ölçüm 1 noktasına ait spektrumlar ve element (oksit yüzdeleri) c) Ölçüm 2 noktasına ait spektrumlar ve element (oksit yüzdeleri) d) D1 örneğinin EPMA-EDS ile yapılan toz halinden ölçülen Ölçüm 3 noktasına ait spektrumlar ve element (oksit yüzdeleri) e) D1 örneğinin toz halinden EPMA-EDS ile yapılan Ölçüm 4 noktasına ait spektrumlar ve element (oksit yüzdeleri).

Figure 3. a) Analysis points obtained by EDS (Energy-Dispersive X-ray Spectroscopy) from the green crystalline region (Measurement 1) and the matrix area (Measurement 2) of sample D1 b) Spectra and oxide percentage data for Measurement 1 c) Spectra and oxide percentage data for Measurement 2 d) Spectra and oxide percentage data for Measurement 3, taken from the powdered form of D1 e) Spectra and oxide percentage data for Measurement 4.



Şekil 4. (a,b) D1 örneğinin tüm kayaç XRD çekimi.

Figure 4. (a,b) XRD analysis of the whole sample of D1.

SEM-EDS analizleri, bu bölgelerde yoğun Mn (%61–88), Fe (%5–6), O (%2–31) ve Si (%4–5) varlığına işaret eder. Ayrıca, düşük oranlarda P, S ve Ni elementlerinin varlığı da SEM-EDS ile gözlenir. XRD analizlerinde, manganozit (MnO) ve kohenit ((Fe,Ni,Co)₃C) minerallerinin baskın olarak yer aldığı da gözlenir (Şekil 4). Bu mineral birlikteliği, örneğin yüksek sıcaklıkta, indirgen ve karbonca zengin bir atmosferde oluştuğuna işaret eder. Kohenit oluşumu, özellikle metalurjik eritme süreçlerinde, dökme demir ve alaşımlı çelik üretimi gibi uygulamalarda ortaya çıkan karbür fazları ile ilişkilidir (Brearley, 2014; Brett, 1967). MnO fazı ile birlikte kohenitin varlığı, D1'in doğal çökelimle oluşmadığını, tersine kontrollü eritme ve soğuma koşullarında meydana geldiğini gösterir. Tüm bunlara ek olarak, EDS analizlerinde P ve S elementlerinin varlığı, modern demir-çelik üretimi süreçlerinde cüruf fazına geçen safsızlık unsurlarıyla uyumluluk gösterir. Fosfor, çelik üretiminde CaO gibi bazik fazlarla reaksiyona girerek fosfatlara dönüşürken, kükürt indirgen fırın atmosferinde katı sülfürlü fazlar (örneğin FeS, CaS) olarak cürufa geçer (Yao-hui Yu vd., 2023; Schrama

vd., 2017). D1'in yer yer gözlenen vesiküler dokusu, bu tür cüruflarda soğuma sırasında hapsolmuş gazların dışarı çıkamamasına bağlı olarak gelişen tipik bir dokusal özelliktir (Dikme, 2010). Tüm bu mineralojik ve jeokimyasal bulgular, D1'in, demir ve manganın birlikte eritildiği yüksek fırın koşullarında oluşmuş, ferromanganez üretimine ait endüstriyel bir cüruf olduğunu ortaya koyar. Bunun yanında EDS ölçümlerinde, P ve S'nin tespit edilmesi de endüstriyel cüruf parçası olduğu görüşünü desteklemektedir (Matinde, 2024). Endüstriyel fırınlarda kullanılan hammadde bileşimi, redüksiyon atmosferi ve karbon aktivitesi gibi etkenler, bu tür cüruflarda MnO ve kohenit fazlarının birlikte kristalleşmesine neden olur (National Academies of Sciences, 2023). Ayrıca soğuma hızına bağlı olarak gelişen vesiküler yapı, D1'in hızlı bir şekilde katılaştığını ve kristal büyümesinin sınırlı kaldığını da işaret eder (Kumar Tripathy vd., 2020).

SONUÇ

Cüruflar, meteoritlere veya cevher nodüllerine benzeseler de bu parçaların mineral özelliklerine sahip değildir. D1 örneği, EDS analizlerine göre Mn içeriği %61 ve daha düşük

oranlarda (%) O ile Fe'ye sahip endüstriyel bir cüruf parçasıdır. Bu çalışma, doğal ve endüstriyel oluşumların ayrımında mineralojik ve jeokimyasal analizlerin önemli rolünü vurgulamakta ve benzer nitelikteki malzemelerin yanlış sınıflandırılmasını önleyici bir örnek sunmaktadır. Cüruflar, P, S, Mn, Fe ve Mo gibi bitkiler için gerekli elementleri içerdiklerinden, gübre ve organik atıklarla karıştırılarak tarımsal faaliyetlerde daha yararlı biçimlerde değerlendirilebilirler. Ayrıca çelik cürufundan, metalleri ayrılarak doğal kaynaklarımızın korunması sağlanabilir.

KATKI BELİRTME

Yazar, SEM-EDS analizlerinin gerçekleşmesinde Hacettepe Üniversitesi Jeoloji Mühendisliğinden Doç. Dr. Evren Çubukçu ve Potsdam Üniversitesin Jeoloji Enstitüsü'nde bulunan Dr. Seann McKibbin ve Christina Guenter'e, ayrıca makaleyi değerlendirip yapıcı eleştirileriyle katkı koyan hakemlere ve editöre teşekkür eder.

KAYNAKLAR

- Brearely, A.J., 2014. 1. 9 - Nebular Versus Parent Body Processing. ss 309-334. Holland, Heinrich D., Turekian, Karl K., ed. 2014 .Treatise on Geochemistry (Second Edition), Elsevier, <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-095975-7.00106-6>.
- Brett, R., 1967. Cohenite: its occurrence and a proposed origin, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 31(2) 143-159. [https://doi.org/10.1016/S0016-7037\(67\)80042-5](https://doi.org/10.1016/S0016-7037(67)80042-5).
- Criado, M., Ke, X., Provis, J. L., & Bernal, S. A. 2017. Alternative inorganic binders based on alkali-activated metallurgical slags. In H. Savastano Junior, J. Fiorelli, & S. F. dos Santos (Eds.), *Sustainable and nonconventional construction materials using inorganic bonded fiber composites*

(185–220). Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102001-2.00008-5>

- Dikme, D. 2010. Doğal Sülfat İçeriği Yüksek Olan Kumlarla Üretilen Harçlarda Sülfat Etkisinin İncelenmesi Ve Mineral Katkıların Etkisi. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, 77 s, İstanbul.
- DPT, 2001. Sekizinci kalkınma planı. Madencilik özel ihtisas komisyonu raporu, Devlet Planlama Teşkilatı, Metal Madenler Alt Komisyonu, Diğer Metal Madenler Çalışma Grubu, Ankara. <https://www.sbb.gov.tr/wpcontent/uploads/2022/08/Sekizinci-Bes-Yillik-Kalkinma-Plani-Madencilik-OIK-Raporu-MetalMadenlerAltKomisyon-Degerli-Metaller-Calisma-Grubu-Raporu.pdf> (Erişim Tarihi: 18.06.2025)
- Eekelers, K., Degryse, P., Muchez, P., 2016. Petrographic investigation of smithing slag of the Hellenistic to Byzantine city of Sagalassos (SW-Turkey), *American Mineralogist*, 101, 1072–1083. <https://doi.org/10.2138/am-2016-5390>
- Gürsoy, Y.G., 2021. Düşük Tenörlü Mangan Cevherinin Kuru Manyetik Ayırma Yöntemi İle Zenginleştirilmesinde Tane Boyutunun Etkisi, *ESOGÜ Müh Mim Fak Dergisi*, 29(3), 337-345.
- Kaya G., Turan S, 2003. Yüksek Fırın Cüruflarının Seramik Sektöründe Katma Değeri Yüksek Ürünlerin Eldesinde Değerlendirilmesi, *Mühendis ve Makine*, 45, 536,48-60.
- Matinde, E. 2024. Presidential Address: Metallurgical slags: A drive to circularity and search for new research agenda. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 124,9,491–506.

- <http://dx.doi.org/10.17159/2411-9717/2024/2024>
- National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. 2023. Health Risk Considerations for the Use of Unencapsulated Steel Slag. Washington, DC: The National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/26881>.
- Özdemir, İ, 2015. Yüksek Fırın Baca Tozlarının Ferromanganez Üretiminde Kullanılması, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi (yayımlanmamış), 77 s, İstanbul.
- Uysal F.F, Bahar, S, 2018. Cüruf Çeşitleri Ve Kullanım Alanları. Trakya University Journal of Engineering Sciences, 19(1),37-52.
- Ünal S., Yücel O., Kurt M., Gül S. 2014. Atık'tan Ürün'e Demir-Çelik Cürufu, İleri Teknolojiler Çalıştayı, 255-267.
- Vapur, H., Top, S., Teymen, A., Türkmenoğlu, M, 2016. Elazığ Ferrokrom Tesisi Cüruflarının Agregat Özelliklerinin Araştırılması. Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi, 28(1), 77-88.
- Yao-hui Yu, Chuan-ming Du, Xiao Yang. 2023. Recovery of phosphorus from steelmaking slag and phosphate tailings by a collaborative processing method, Separation and Purification Technology, 313, 123499. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2023.123499>
- Tozsin, G., Öztas, T. 2023. Utilization of Steel Slag as a Soil Amendment and Mineral Fertilizer in Agriculture: A Review. Journal of Agricultural Sciences (Tarım Bilimleri Dergisi), 29(4): 906-913. doi: 10.15832/ankutbd.1197239
- Schrama, F. N. H., Beunder, E. M., van den Berg, B., Yang, Y., Boom, R. 2017. Sulphur removal in ironmaking and oxygen steelmaking. Ironmaking & Steelmaking: processes, products and applications, 44(5), 333-343. doi.org/10.1080/03019233.2017.130391
- Kumar Tripathy, S., Jayalaxmi Dasu, Y. Rama Murthy, Gajanan Kapure, Atanu Ranajan Pal, Lev O Filippov, 2020. Utilisation perspective on water quenched and air-cooled blast furnace slags, Journal of Cleaner Production, 262 121354. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121354>
- Özbal, H, 2009. Demirköy Demirci İşliği, Kültür Ve Turizm Bakanlığı Kültür Varlıkları ve Müzeler Genel Müdürlüğü, 25-29 Mayıs 2009 Denizli 25. Arkeometri Sonuçları Toplantısı, T.C. Kültür ve Turizm Bakanlığı Yayın No:3251, Kültür Varlıkları ve Müzeler Genel Müdürlüğü Yayın No:144