

TÜRKİYE VE DÜNYADA İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ

Editör: Dr.Öğr.Üyesi İbrahim PINARCI

yaz
yayınları

Türkiye ve Dünyada İnşaat Mühendisliği

Editör

Dr.Öğr.Üyesi İbrahim PINARCI

yaz
yayınları

2025

© YAZ Yayınları

Bu kitabın her türlü yayın hakkı Yaz Yayınları'na aittir, tüm hakları saklıdır. Kitabın tamamı ya da bir kısmı 5846 sayılı Kanun'un hükümlerine göre, kitabı yayınlayan firmanın önceden izni alınmaksızın elektronik, mekanik, fotokopi ya da herhangi bir kayıt sistemiyle çoğaltılamaz, yayınlanamaz, depolanamaz.

E_ISBN 978-625-8678-44-4

Aralık 2025 – Afyonkarahisar

Dizgi/Mizanpaj: YAZ Yayınları

Kapak Tasarım: YAZ Yayınları

YAZ Yayınları. Yayıncı Sertifika No: 73086

M.İhtisas OSB Mah. 4A Cad. No:3/3
İscehisar/AFYONKARAHİSAR

www.yazyayinlari.com

yazyayinlari@gmail.com

İÇİNDEKİLER

Analysis Using Innovative Trend Analysis Method of Annual Total Precipitation Data of Central Anatolia Region in Türkiye.....	1
<i>Gökmen ÇERİBAŞI, Ahmet İyad CEYHUNLU</i>	
Analysis of Monthly Average Temperature Data of Eastern Anatolia Region in Türkiye Using Innovative Triangular Trend Analysis Method.....	20
<i>Ahmet İyad CEYHUNLU, Gökmen ÇERİBAŞI</i>	
HBIM Use in Turkey Restoration: Literature-Based Study	39
<i>Ahmet GÖKDEMİR, Kadir Mohamed IBRAHİM, Oğuzhan ERKOÇ, Güray KARAKAYA</i>	
Study of Surface Structural Damage at Çakaloğlu Han.....	54
<i>Ahmet GÖKDEMİR</i>	
Use of Waste and Alternative Materials for the Production of Sustainable Ultra-High-Performance Concrete	74
<i>Şirin KURBETCİ, Mahmut Cenk SAYIL</i>	
Modelling Railway Passenger Demand: Approaches and Current Trends.....	95
<i>Mebrure İtir GEVREK, Mustafa Kürşat ÇUBUK</i>	
Betonarme Kirişlerde Lif Tabanlı Alternatif Donatıların Eğilme Performansı.....	115
<i>Ahmet Hamdi SERDAR, Gökhan DOK</i>	

Köpük Betonun Özellikleri ve Üretim Yöntemleri127

İbrahim PINARCI

Yüzey Drenaj Sistemlerinde Akış Kapasitesi136

Ramazan MERAL

Kıyı Kentsel Ortamlarda Yaya Üst Geçitlerinin

Yapısal, Kullanıcı Odaklı ve Sürdürülebilirlik

Açısından Çok Boyutlu Değerlendirilmesi.....151

Sina ATABEY, Abdullah BOSTANCI

Uçucu Kül Kullanılarak Üretilen Harçların Isı ve Ses

Yalıtım Özellikleri Üzerine Bir Çalışma170

Elif Tuğçe KOCABEYOĞLU, Barış ERKOÇ, Can ARTAN

"Bu kitapta yer alan bölümlerde kullanılan kaynakların, görüşlerin, bulguların, sonuçların, tablo, şekil, resim ve her türlü içeriğin sorumluluğu yazar veya yazarlarına ait olup ulusal ve uluslararası telif haklarına konu olabilecek mali ve hukuki sorumluluk da yazarlara aittir."

ANALYSIS USING INNOVATIVE TREND ANALYSIS METHOD OF ANNUAL TOTAL PRECIPITATION DATA OF CENTRAL ANATOLIA REGION IN TÜRKİYE

Gökmen ÇERİBAŞI^{1*}

Ahmet İyad CEYHUNLU²

1. INTRODUCTION

Climate change has become one of the fundamental environmental problems, significantly impacting the hydrological cycle, water resources, ecosystems, and socio-economic structures on a global scale in recent years (IPCC, 2021). Like many semi-arid regions in the mid-latitudes, Türkiye is highly susceptible to climate change due to rising temperatures, irregular precipitation regimes, and the exacerbation of extreme climate events (Türkeş, 1996; Turkes et al., 2019).

Central Anatolia Region, which constitutes approximately one-quarter of Türkiye, is one of the regions most vulnerable to climatic changes due to its low annual precipitation, high evapotranspiration rate, and extensive agricultural areas (Yıldız, 2014; Bayer-Altın et al., 2023). This makes long-term analysis of precipitation trends in the region critical for both hydrological and agricultural sustainability.

¹ Prof. Dr., Sakarya University of Applied Sciences, Faculty of Technology, Department of Civil Engineering, ORCID: 0000-0003-3145-418X.

² Assist. Prof. Dr., Sakarya University of Applied Sciences, Faculty of Technology, Department of Civil Engineering, ORCID: 0000-0003-3192-6132.

Precipitation time series often have a complex structure, including nonlinearities, sudden jumps, and asymmetric distributions. Therefore, classical nonparametric methods may not always be sufficient to reveal the details of changes in precipitation. In this context, the Innovative Trend Analysis method developed by Şen (2012) is widely used in hydrology and climatology due to its ability to avoid distribution assumptions, evaluate low, medium, and high value ranges separately, and identify nonlinear trends (Şen, 2012). Innovative Trend Analysis (ITA) method allows for more precise spatial and statistical analysis of precipitation changes, especially in semiarid regions (Kadioğlu, 2000; Turkes et al., 2009; Şen, 2012).

Studies on Türkiye's climatic variability and precipitation trends reveal that climate change has significant impacts, particularly in semiarid areas such as Central Anatolia Region. Numerous studies assessing precipitation trends across Türkiye demonstrate significant fluctuations in precipitation patterns, both spatially and temporally (Türkeş et al., 2009; Kadioğlu, 2000). More detailed regional analyses in recent years have highlighted Central Anatolia Region as one of the regions most vulnerable to drought and decreased precipitation.

When scientific studies on both the selected region and the applied method are examined in the literature, Tokgöz and Partal aimed to determine climate trends in the region by examining annual precipitation and temperature data from 16 meteorological stations in Black Sea Region between 1960 and 2015. In this context, trend analysis was conducted using Mann-Kendall test and Innovative Şen method. The results revealed that, especially in temperature data, Innovative Şen method showed an increasing trend at all stations, while Mann-Kendall test detected an increase at only seven stations. Similarly, in precipitation data, Innovative Şen method detected significant trends at a greater number of stations, and it was concluded that annual precipitation and

temperatures in the region generally tended to increase (Tokgöz and Partal, 2020).

Aydın conducted a trend analysis of seasonal and annual total precipitation data for five precipitation observation stations within the borders of Elazığ province in his study. Mann-Kendall, Spearman-Rho, and Innovation Şen methods were used in the study; Data sets were also evaluated using Pettitt homogeneity test, and missing data were completed using appropriate statistical methods. According to the analysis results, a significant decreasing trend was determined in winter precipitation at Palu station and in spring precipitation at Keban station, compared to all three trends. No clear and common trend was observed at the other stations. In general, the study showed a decreasing trend in seasonal precipitation in some regions of Elazığ (Aydın, 2023).

Katipoğlu et al. examined monthly and annual hydrological drought trends using Stream Drought Index (DRI) using data from seven stream monitoring stations in Yeşilırmak Basin between 1970 and 2011 in their study. Mann-Kendall, Innovative Şen, and Thiel-Sen methods were used in the trend analysis, and a trend-free prewhitening procedure was also applied to eliminate internal dependence in the series. The study results showed that Innovative Şen method reveals drought trends more accurately, both graphically and numerically. Increasing hydrological drought trends were determined to be dominant in both monthly and annual time periods throughout the basin, highlighting the importance of drought risk management and early warning systems for the region (Katipoğlu et al., 2022).

Acar analyzed long-term temperature data from 52 meteorological stations in Central Anatolia Region. Kruskal-Wallis and Mann-Kendall tests were used to examine the variability in extreme temperature indicators, and an increasing trend was identified in nighttime temperatures, particularly

during the summer months. The study identified statistically significant increases in the number of tropical nights, hot days, and extremely hot days, emphasizing the potential socio-economic impacts this could have on the region (Acar, 2018).

In a study conducted by Özfıdaner et al., precipitation data from seven precipitation monitoring stations in Central Anatolia Region between 1960 and 2013 were analyzed using Mann-Kendall rank correlation test. The analysis found that precipitation trends decreased by 42.9% and increased by 57.2%. However, only 2.38% of these increases were found to be statistically significant. Decreasing trends in precipitation were particularly prominent at Ankara, Nevşehir, and Kırşehir stations, while increasing trends were observed in Sivas and Niğde (Özfıdaner et al., 2016).

Kızılelma et al. investigated temperature and precipitation trends at meteorological stations in Central Anatolia Region between 1970 and 2010 in their study. Analyses using the nonparametric Mann-Kendall test and linear regression methods revealed statistically significant increases in maximum and minimum temperature trends across the study area. Average temperatures increased within the 95% confidence interval at all stations except Ürgüp, while overall decreasing trends were observed in precipitation data (Kızılelma et al., 2015).

This study aims to examine in detail the long-term changes in precipitation in Central Anatolia Region of Türkiye using annual total precipitation data covering the period 1991–2020 from six meteorological stations (Ankara, Kayseri, Kırşehir, Konya, Niğde, and Yozgat). This comprehensive analysis reveals the nonlinear behavior of precipitation in Central Anatolia Region at a high resolution, providing decision-makers and researchers with a scientific basis for sustainable water resources management, agricultural production planning, and climate

change adaptation strategies. Furthermore, the study's methodology can contribute to similar analyses under different climatic conditions and contributes a significant innovative approach to the scientific literature.

2. MATERIAL AND METHOD

2.1. Study Area

Central Anatolia Region is the second largest geographical region in Türkiye in terms of surface area, accounting for approximately one-quarter of the country. It is surrounded by the Black Sea Region to the north, Taurus Mountains to the south, Eastern Anatolia to the east, and Aegean and Marmara regions to the west. The region, with an elevation ranging from 1,000 to 1,500 meters above mean sea level, has a topography dominated by extensive plains and plateau-like areas (Yıldız, 2014). In Central Anatolia Region, where a semi-arid climate prevails, precipitation falls primarily in winter and spring, while summers are quite hot and dry. The region's average annual precipitation ranges from 300 to 500 mm, well below Türkiye average (Türkeş, 1996). Figure 1 shows the location of Central Anatolia Region on the map of Türkiye's regions and the locations of the stations used in the study.

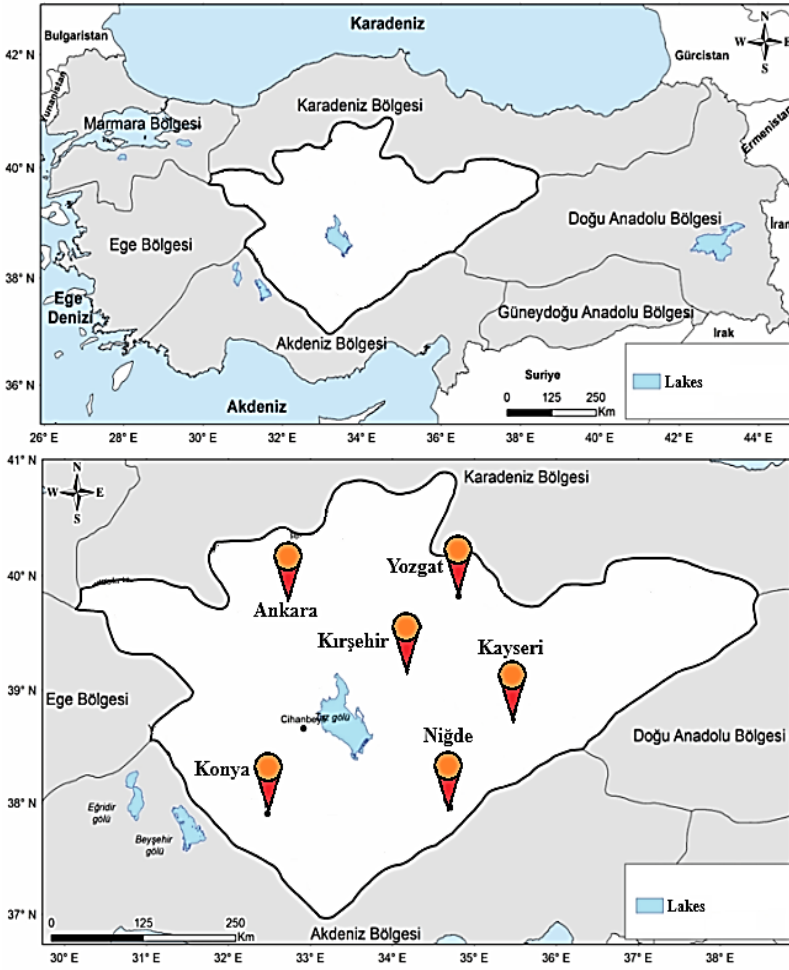


Figure 1. Location of Central Anatolia Region and Stations (Acar, 2018).

The course lines of the annual total precipitation data used in the study for each station are given in Figure 2.

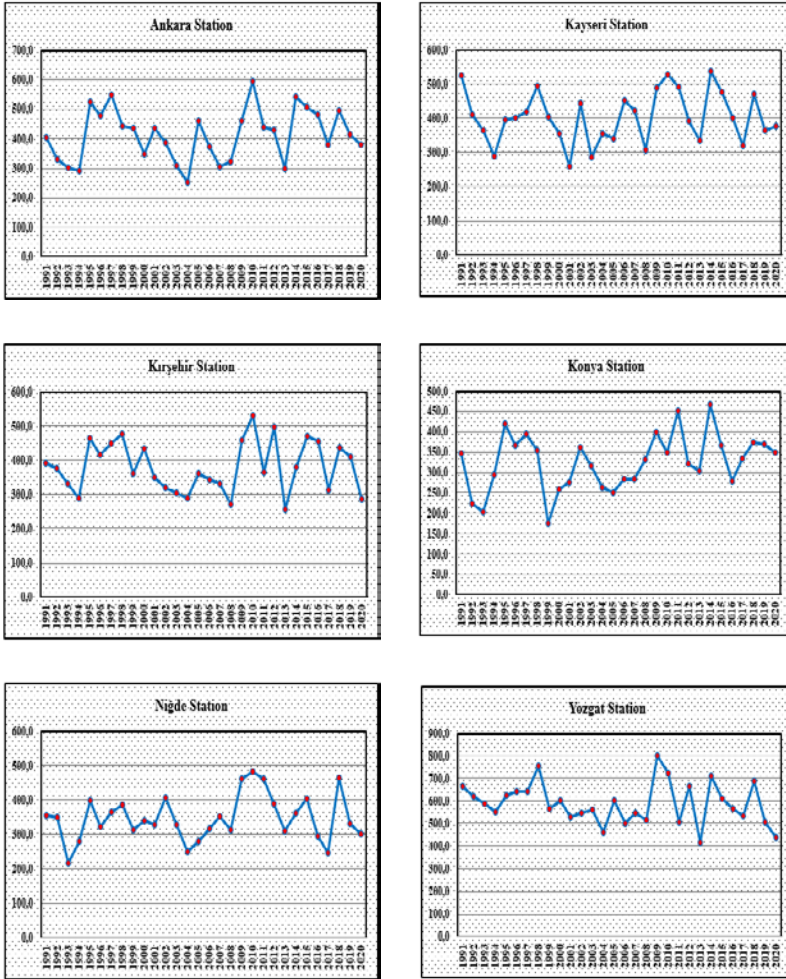


Figure 2. The Course Lines of Annual Total Precipitation Data.

2.2. Innovative Trend Analysis Method

The total data is divided into two equal subseries. Each subseries is sorted from smallest to largest in this method developed by Şen. The first subseries (X_i) is placed on the X-axis and the second subseries (X_j) is placed on the Y-axis in Cartesian coordinate system (Şen, 2012). A hypothetical Innovative Trend Analysis method is shown in Figure 3.

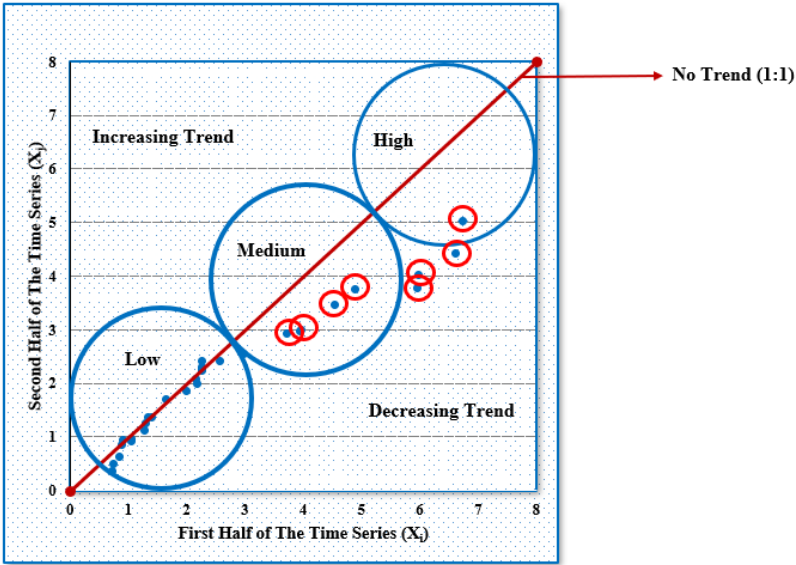


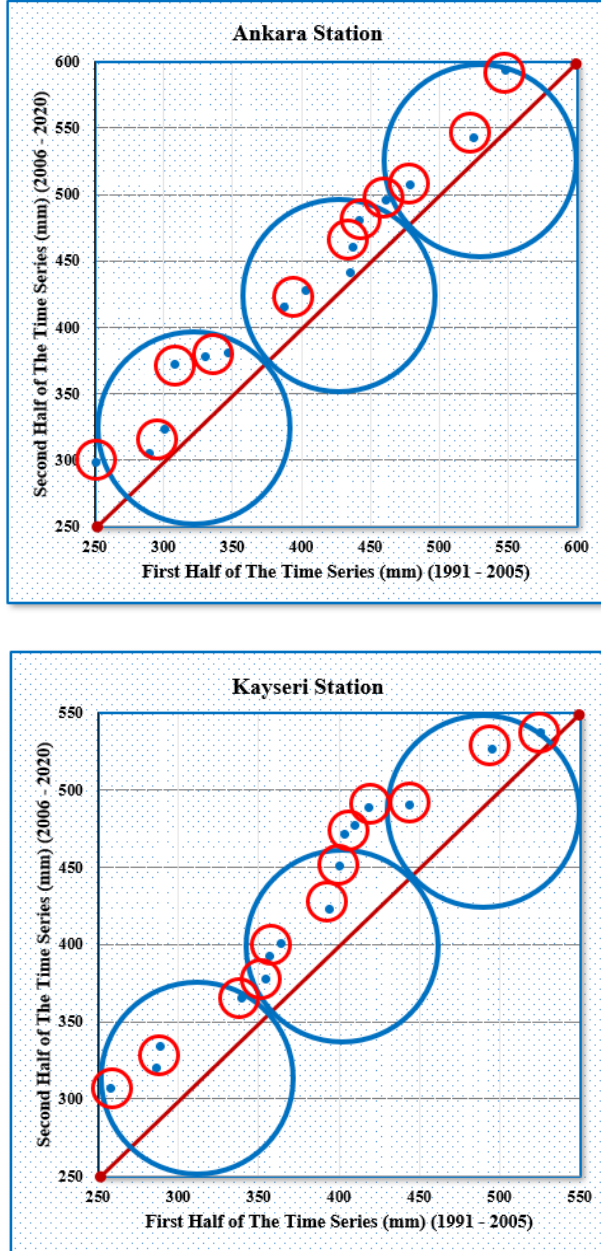
Figure 3. Hypothetical Innovative Trend Analysis Method.

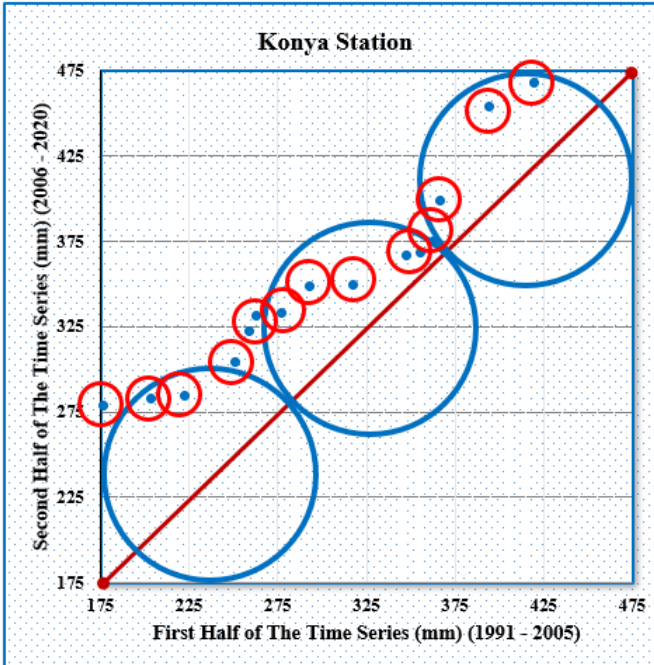
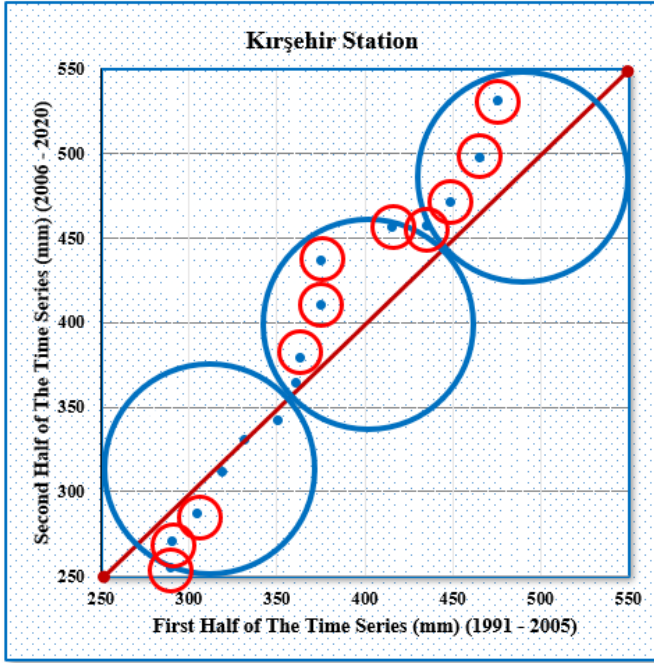
If the data are aligned on the 1:1 line, there is no trend. If the data are in the lower triangle of the 1:1 line and located in the low area, this indicates a low decreasing trend; if they are in medium area, this indicates a moderate decreasing trend; and if they are in the high area, this indicates a high decreasing trend. If the data are in the upper triangle of the 1:1 line and located in the low area, this indicates a low increasing trend; if they are in medium area, this indicates a moderate increasing trend; and if they are in the high area, this indicates a high increasing trend. (Şen, 2012; Ceribasi, 2018).

3. RESULT AND DISCUSSION

In this study, Innovative Şen Method was applied to the annual total precipitation data taken from Meteorological Observation Station for 6 stations located in Central Anatolia Region of Türkiye (Ankara, Kayseri, Kırşehir, Konya, Niğde, and

Yozgat) and the analysis results for each station are given in Figure 4.





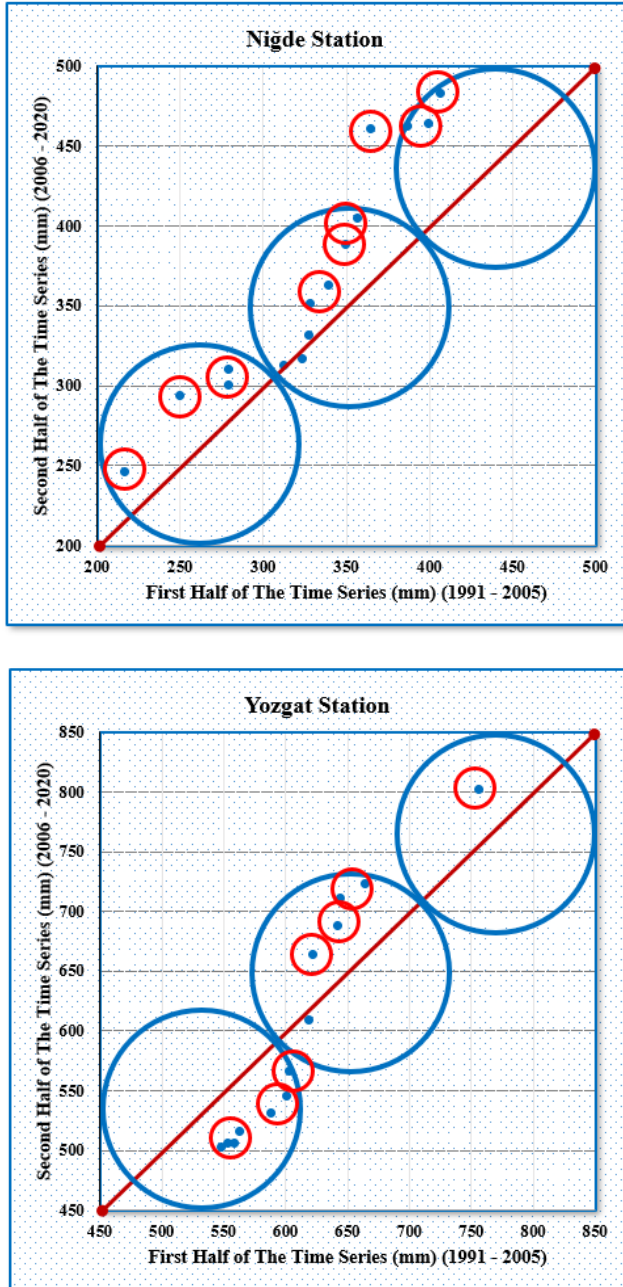


Figure 4. Innovative Sen Method Analysis Results of Annual Total Rainfall Data for Each Station.

The analysis results shown in Figure 4 yield the following results; An analysis of the annual total precipitation data from Ankara station using Innovative Şen Method reveals a generally increasing trend across all three regions (Low, Medium, and High). This increasing trend can be considered monotonically increasing. No trend is observed in the medium region between approximately 400-450 mm. An analysis of the annual total precipitation data from Kayseri station using Innovative Şen Method reveals a similar result to Ankara station. An overall increasing trend is observed across all three regions (Low, Medium, and High). This increasing trend is observed as monotonically increasing between 250-400 mm. An analysis of the annual total precipitation data from Kırşehir station using Innovative Şen Method reveals a decreasing trend in the low region between 250-300 mm and no trend between 300-350 mm. An increasing trend is observed in the medium and high regions. On the other hand, a non-monotonic increasing trend is observed between 250-400 mm, while a monotonic increasing trend is observed between 400-500 mm. Analysis of the results of Innovative Şen Method analysis of the annual total precipitation data from Konya station reveals a similar result to Ankara and Kayseri stations. Generally, the trend is increasing in all three regions (Low, Medium, and High). This increasing trend appears as a monotonic increasing trend between 325-425 mm. Analysis of the results of Innovative Şen Method analysis of the annual total precipitation data from Niğde station shows a generally increasing trend in all three regions (Low, Medium, and High). This increasing trend can be considered as monotonic increasing between 200-400 mm. It was concluded that there is no trend in the medium region between approximately 300-350 mm. Analysis of the results of Innovative Şen Method analysis of the annual total precipitation data from Yozgat station reveals a decreasing trend in the low region. An increasing trend is observed in the medium and high regions. On the other hand, a

non-monotonous increasing trend is observed between 550-750 mm.

These findings are in significant agreement with the precipitation and temperature trends identified in previous studies on Central Anatolia Region. A study by Kızılelma et al. (2015) examined temperature and precipitation data for Central Anatolia Region for the period 1970–2010 and identified a decreasing trend in annual precipitation values across the region. The decrease in low precipitation values observed at Kırşehir and Yozgat stations in this study supports the decreasing trends reported by Kızılelma et al. (2015). Furthermore, the significant increasing trends in temperature values in the same study, combined with the decrease in precipitation, indicate that the region is more vulnerable to drought. The decrease in low precipitation values in the current study also confirms this finding.

Özfidaner et al. (2016) examined precipitation data in Central Anatolia Region for the period 1960–2013 using Mann-Kendall test and found that some stations exhibited decreasing trends and others increasing trends, but only a limited portion of these trends were statistically significant. These results are largely consistent with spatial trend differences found in study. For example, the decreasing precipitation trend observed at stations such as Ankara and Kırşehir in Özfidaner et al.'s study parallels the decreasing trend observed at low values in Kırşehir in study. Conversely, the increasing trends identified at stations such as Konya, Niğde, and Kayseri support the findings of Özfidaner et al., who reported increasing trends at some stations. However, by applying Innovative Şen Method in study, the low, medium, and high value ranges in the precipitation series were analyzed separately, revealing nonlinear trends that may be difficult to detect with classical methods in more detail.

An analysis of extreme temperatures in Central Anatolia Region conducted by Acar (2018) revealed that the region has warmed significantly in recent years, particularly in summer, with significant increases in extreme temperature indicators such as tropical nights and hot days. While this study did not directly examine precipitation trends, these pronounced upward trends in temperatures are important for the relationship between precipitation and drought. The decreasing trends observed in low precipitation values at some stations, such as Kırşehir and Yozgat, in study, when considered together with the warming trends identified in Acar (2018), suggest that the region is becoming more susceptible to low precipitation conditions concurrent with temperature increases. This could pose a higher risk of drought in the future, particularly for Central Anatolia Region, which has a semiarid climate.

Overall, study demonstrates that annual precipitation trends in Central Anatolia Region vary significantly across stations, and the nonlinear structure of precipitation can be revealed in detail through Innovative Şen Method. While the weakening trend at low values along Kırıkkale–Yozgat line increases the risk of regional drought, increasing trends observed across all value ranges at stations such as Niğde, Konya, and Ankara demonstrate that precipitation dynamics in the region are not spatially homogeneous. In conclusion, while this study is broadly consistent with trends identified by both Kızılelma et al. (2015) and Özfıdaner et al. (2016), when considered alongside temperature increase trends identified by Acar (2018), it suggests that the hydroclimatic structure of Central Anatolia Region may become more complex in the future. The attenuation of low precipitation values revealed by Innovative Şen Method is particularly critical for the region's drought management, water resources planning, and agricultural production.

4. CONCLUSIONS

In this study, annual total precipitation data for the period 1991–2020 from Ankara, Kayseri, Kırşehir, Konya, Niğde, and Yozgat meteorological stations located in Central Anatolia Region of Turkey were analyzed using Innovative Şen Method, and the nonlinear behavior of the precipitation series was revealed in detail at each station. The analysis results showed that the region exhibits a spatially variable precipitation regime reflecting the semi-arid climate. While increasing trends were detected in all low, moderate, and high precipitation values at Ankara, Kayseri, Konya, and Niğde stations, decreasing trends were detected in low precipitation values, while increasing trends were detected in moderate and high precipitation values at Kırşehir and Yozgat stations. This weakening in low precipitation values, in particular, may indicate an increased risk of drought in some parts of the region in the long term.

The findings are generally consistent with previous studies on precipitation and temperature variability in Central Anatolia Region. The spatial irregularity in precipitation and the decreasing trend at low values indicate that the region is becoming increasingly vulnerable to hydroclimatic risks associated with climate change. Innovative Şen Method's separate analysis of low, medium, and high value ranges revealed nonlinear trends that are difficult to detect with conventional methods and significantly contributed to the understanding of the region's precipitation dynamics.

Based on these results, the following recommendations have been developed:

1. Increasing the capacity of drought early warning systems in areas such as Kırşehir and Yozgat, which tend to decrease with low precipitation, is critical for water management.

2. Local and regional water resources planning should be revised to take into account spatial differences in precipitation patterns; different strategies should be developed for stations with increasing trends and areas with decreasing trends.
3. Agricultural production patterns, especially in regions where low precipitation tends to decrease, should be reviewed, drought-resistant crop varieties should be supported, and water-efficient irrigation techniques should be expanded.
4. Increasing the number of stations in the region and strengthening the integrity of long-term measurement data will increase the accuracy of future trend analyses.
5. In future studies, findings obtained with Innovative Şen Method should be combined with climate change projections and modeling to provide more comprehensive assessments of the region's long-term water security.
6. Nonlinear methods such as Innovative Şen Method can be applied to semiarid regions outside Central Anatolia Region and contribute to a better understanding of precipitation patterns across Türkiye.

Acknowledgments

We would like to sincerely thank Turkish State Meteorological Service for providing the meteorological data for this study and hydroelectric power plant officials for providing data on the energy produced by these hydroelectric power plants.

Data availability

Data can be provided upon reasonable request.

Author contribution

G.C.; Formal analysis, Methodology, Resources, Software, Writing – original draft, Writing – review & editing

A.I.C.; Formal analysis, Methodology, Resources, Software, Writing – original draft, Writing – review & editing

Competing Interests

The authors declare no competing interests.

REFERENCES

- Acar, Z. (2018). Extreme temperature characteristics of Central Anatolia Region. *Turkish Geographical Review*, (71), 93-99.
- Aydın, M. (2023). Trend Analysis of Elazığ Province Precipitation Data. *Fırat University Journal of Engineering Sciences*, 35(1), 159-173.
- Bayer-Altın, T., Türkeş, M., & Altın, B. N. (2023). Evolution of drought climatology and variability in the Central Anatolia Region, Turkey, for the period 1970–2020. *Pure and Applied Geophysics*, 180(8), 3105-3129.
- Ceribasi, G. (2018). Analysis of meteorological and hydrological data of Iznik lake basin by using innovative sen method. *Journal of Environmental Protection and Ecology*, 19(1), 15-24.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). (2021). Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2391 pp.
- Kadioğlu, M. (2000). Regional variability of seasonal precipitation over Turkey. *International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society*, 20(14), 1743-1760.
- Katipoğlu, O. M., Yeşilyurt, S. N., & Dalkılıç, H. Y. (2022). Trend analysis of hydrological droughts in Yeşilırmak basin by Mann Kendall and Sen Innovative Trend Analysis. *Gümüşhane University Journal of Science and Technology*, 12(2), 422-442.

- Kızılelma, Y., Çelik, M., & Karabulut, M. (2015). Trend analyses of temperature and precipitations in Central Anatolia. *Turkish Geographical Review*, (64), 1-10.
- Özfidaner, M., Şapolyo, D., & Topaloğlu, F. (2016). Trend Analysis of the Central Anatolia Region Precipitation Data. *Nevşehir Science and Technology Journal*, 5, 161-168.
- Şen, Z. (2012). Innovative trend analysis methodology. *Journal of Hydrologic Engineering*, 17(9), 1042-1046.
- Tokgöz, S., & Partal, T. (2020). Trend Analysis with Innovative Sen and Mann-Kendall methods of Annual Precipitation and Temperature data in the Black Sea Region. *Journal of the Institute of Science and Technology*, 10(2), 1107-1118.
- Turkes, M., Koç, T., & Saris, F. (2009). Spatiotemporal variability of precipitation total series over Turkey. *International Journal of Climatology*, 29(8), 1056.
- Turkes, M., Turp, M. T., An, N., Ozturk, T., & Kurnaz, M. L. (2019). Impacts of climate change on precipitation climatology and variability in Turkey. In *Water resources of Turkey* (pp. 467-491). Cham: Springer International Publishing.
- Türkeş, M. (1996). Spatial and temporal analysis of annual rainfall variations in Turkey. *International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society*, 16(9), 1057-1076.
- Yıldız, O. (2014). Spatiotemporal analysis of historical droughts in the Central Anatolia, Turkey. *Gazi University Journal of Science*, 27(4), 1177-1184.

ANALYSIS OF MONTHLY AVERAGE TEMPERATURE DATA OF EASTERN ANATOLIA REGION IN TÜRKİYE USING INNOVATIVE TRIANGULAR TREND ANALYSIS METHOD

Ahmet İyad CEYHUNLU^{1*}

Gökmen ÇERİBAŞI²

1. INTRODUCTION

Global climate change is causing significant changes in temperature, precipitation patterns, evaporation, and extreme weather events in Türkiye, as it is worldwide (Keskin and Saplıoğlu, 2023). Eastern Anatolia Region in Türkiye, with its high altitude and continental climate, is particularly susceptible to temperature increases and seasonal anomalies (Senocak and Emek, 2017). Rising temperatures lead to shorter snow cover, irregular stream flows, increased drought frequency, and altered regional hydrological balance (Keskin and Saplıoğlu, 2023; Elmastas et al., 2025).

Türkiye is among the countries with high vulnerability to climate change, and climate change, particularly in the eastern regions, directly affects agricultural activities, water resources, and ecosystem services (Keskin et al., 2018). Numerous studies in Eastern Anatolia Region indicate that temperature trends are increasing throughout the region (Bakirci and Kirtiloglu, 2022).

¹ Assist. Prof. Dr., Sakarya University of Applied Sciences, Faculty of Technology, Department of Civil Engineering, ORCID: 0000-0003-3192-6132.

² Prof. Dr., Sakarya University of Applied Sciences, Faculty of Technology, Department of Civil Engineering, ORCID: 0000-0003-3145-418X.

In a study conducted by Keskin et al., temperature trends were analyzed for 14 provinces; a significant increasing trend was detected in all provinces except Erzurum and Bitlis (Keskin et al., 2018). Similarly, Keskin and Saphioğlu used Mann–Kendall and Innovative Trend Analysis methods and reported positive temperature trends at 12 stations, with a decreasing trend observed only in Erzurum (Keskin and Saphioğlu, 2023). These studies reveal that the general warming trend in the region has been confirmed by both classical statistical and innovative methods.

In parallel with increases in temperature, the region's drought characteristics are also showing significant changes (Çelik et al., 2018). Çelik et al., in their seasonal drought analysis using Standardized Precipitation Index, reported that drought tendencies have strengthened in the provinces of Malatya, Elazığ, Tunceli, Van, and Kars, while seasonal humidity trends have increased in some provinces such as Bingöl, Bitlis, Hakkari, and Iğdır (Çelik et al., 2018). These findings indicate a highly spatially variable drought dynamic in the region.

Precipitation and temperature trend studies conducted on Eastern Anatolia Region reveal the region's sensitivity to climatic changes (Şenocak and Emek, 2019; Bakirci and Kirtiloglu, 2022). In a comprehensive study conducted by Şenocak and Emek (2019), data from 46 precipitation stations between 1960 and 2013 were evaluated in terms of homogeneity using the Run test and Pettitt test, and trend analyses were performed on 38 homogeneous stations using the Mann–Kendall, Spearman Rho, and Sen's Slope methods. As a result of the study, it was determined that precipitation generally tended to increase in the summer months and to decrease in the winter months. It was also reported that the decreasing precipitation trend across the region in June turned to an increase in July (Şenocak and Emek, 2019). These findings reveal a significant change in the seasonal

precipitation regime of Eastern Anatolia Region and support the effects of climate change on the regional hydrological cycle.

A review of the literature regarding trend analysis methods reveals that nonparametric methods (Mann–Kendall, Spearman Rho, Sen’s Slope) are widely used in hydrometeorological time series. However, innovative methods developed to address some of the limitations of classical methods have also begun to gain importance. One of these is Innovative Trend Analysis, an alternative approach based on comparing time series by dividing them into two subseries. Innovative Triangular Trend Analysis, a two-dimensional version of Innovative Trend Analysis, is a more advanced method that allows comparison of multiple subseries (Güçlü et al., 2020; Sarioz et al., 2024). Therefore, the current study makes a significant contribution to the evaluation of monthly mean temperatures in the Eastern Anatolia Region using Innovative Triangular Trend Analysis method, a gap in the literature.

2. MATERIAL AND METHOD

2.1. Study Area

Eastern Anatolia Region in Türkiye has the highest average elevation and is the most topographically rugged region in Türkiye (Unver, 1997; Şenocak and Emek, 2019). The second largest region in the country in terms of surface area, Eastern Anatolia has a complex geomorphological structure characterized by extensive plateaus, high mountains, deep valleys, and volcanic formations (Erk et al., 2000; Çelik et al., 2018).

The elevation in the region generally ranges between 1,500–2,000 meters, causing harsh and continental climatic conditions; long and cold winters and short but relatively cool summers constitute the main climatic characteristics of the region

(Keskin and Saplıoğlu, 2023; Elmastas et al., 2025). During the winter months, temperatures drop below zero for extended periods in many settlements, and snow cover remains on the ground in large areas for months (Keskin et al., 2018; Özdemir et al., 2019). Although the summer season is short, daily temperature differences are quite significant (Belli, 1994; Keskin et al., 2018; Özdemir et al., 2019).

Microclimatic differences are common due to the influence of topography; for example, the area around Lake Van offers a milder climate, while high plateaus such as Erzurum and Kars represent the coldest points (Litt et al., 2011; Şenocak and Emek, 2019). The region also has a strategic hydrological position as it is the birthplace of major river basins such as the Euphrates and Tigris (Ay et al., 2018; Çamur-Elipek et al., 2021). With its rich natural resources, extensive pastures, ecosystems specific to the continental climate, and cultural diversity, Eastern Anatolia Region in Türkiye is one of the most unique and striking geographies in Türkiye in terms of both natural and socio-economic characteristics (Çamur-Elipek et al., 2021; Taşkolcu et al., 2025).

This study was conducted in Eastern Anatolia Region in Türkiye, a region characterized by high altitude, harsh continental climate, and pronounced seasonal temperature differences. Monthly average temperature data from meteorological stations in Bingöl, Erzincan, Erzurum, Kars, Malatya, and Van provinces, representing the region's diverse climatic and topographic features, were used for the period 1991–2020. A map of both Eastern Anatolia Region in Türkiye and the selected stations is shown in Figure 1.

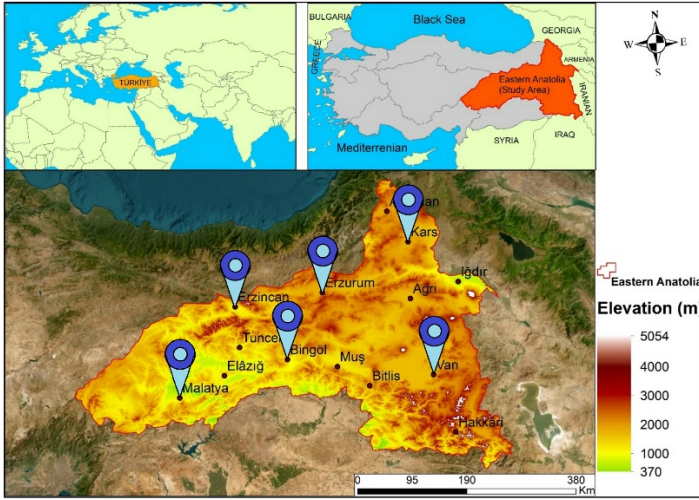


Figure 1. Map showing both the Eastern Anatolia Region and selected stations (Bakirci and Kirtiloglu, 2022).

2.2. Innovative Triangular Trend Analysis

Innovative Triangular Trend Analysis method is similar to Innovative Trend Analysis method in terms of its internal methodology. The calculation steps for Innovative Triangular Trend Analysis method are as follows.

- First, any time series is divided into consecutive sub-series of equal length (t) [$r_1, r_2, \dots, r_n$], without regard to the order $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$, so that they do not overlap each other.
- Each sub-series is sorted from smallest to largest [$r_1 = 1, 2, \dots, n$].
- The sub-series are arranged side by side to create a working plane for creating graphs.
- Graphs are created by comparing the series in the created working plane, with the first series being fixed, $y_1 = [r_1-r_2, r_1-r_3, \dots, r_1-r_n]$, $y_2 = [r_2-r_3, r_2-r_4, \dots, r_2-r_n]$

Unlike Innovative Trend Analysis method, Innovative Triangular Trend Analysis method produces multiple graphical series. These graphs allow for detailed analysis of time series and facilitate easier visual interpretation of the data and quantitative calculations. A hypothetical Innovative Triangular Trend Analysis graph is shown in Figures 2.

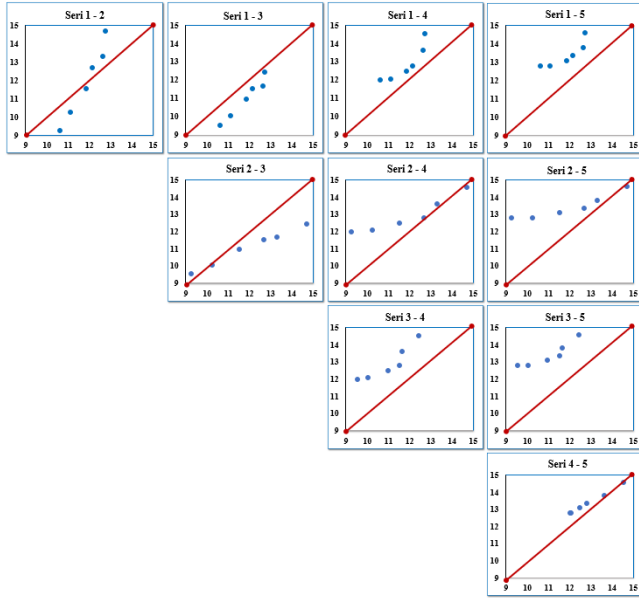


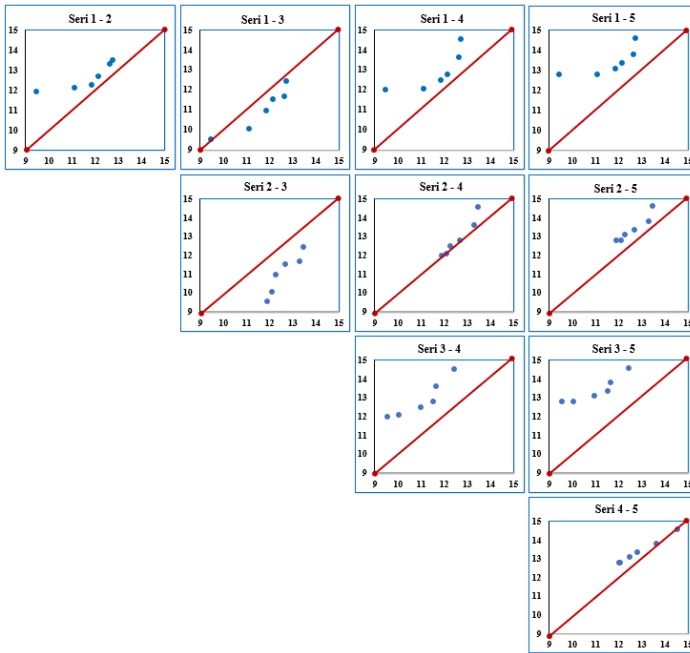
Figure 2. Hypothetical Innovative Triangular Trend Analysis Method Graph.

Examining Hypothetical Innovative Triangular Trend Analysis Method graph in Figure 2; Series 1-2 show a non-monotonous increasing trend, Series 1-3 show a monotonous decreasing trend, and Series 1-4 and 1-5 show a monotonous increasing trend. Series 2-3, Series 2-4, and Series 2-5 show a non-monotonous decreasing trend. Series 3-4 and Series 3-5 show a monotonous increasing trend. Series 4-5 show a non-monotonous decreasing trend.

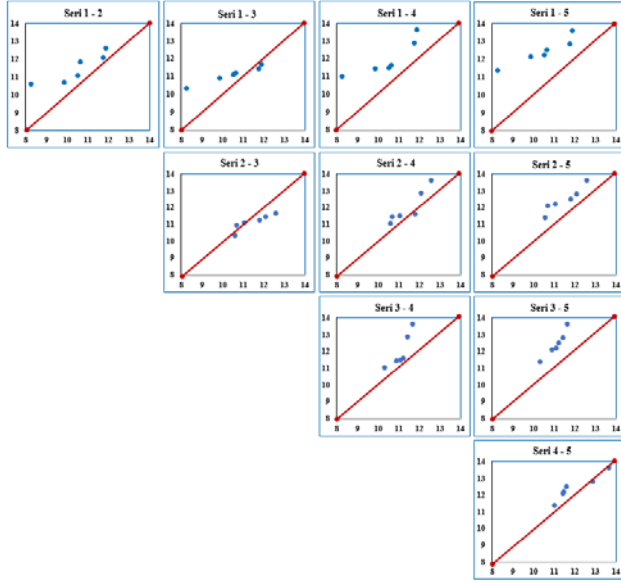
3. RESULT AND DISCUSSION

In this study, the annual average temperature data taken from meteorological stations of Bingöl, Erzincan, Erzurum, Kars, Malatya and Van provinces located in Eastern Anatolia region in Türkiye were analyzed using Innovative Triangular Trend Analysis method and the graphs showing the analysis results are given in Figure 3.

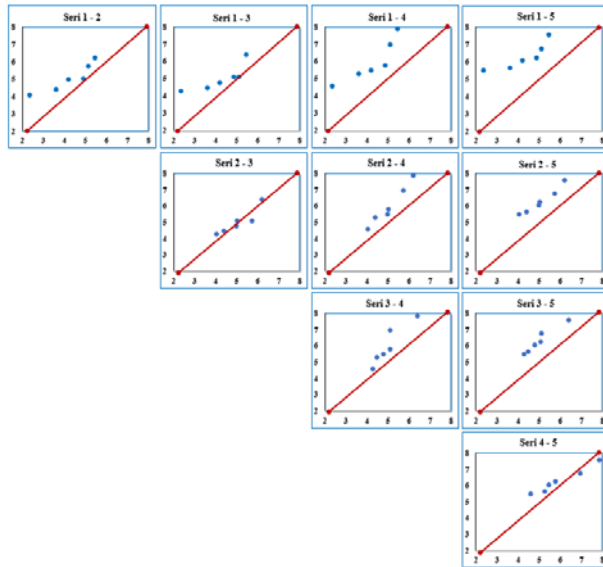
Bingöl Station



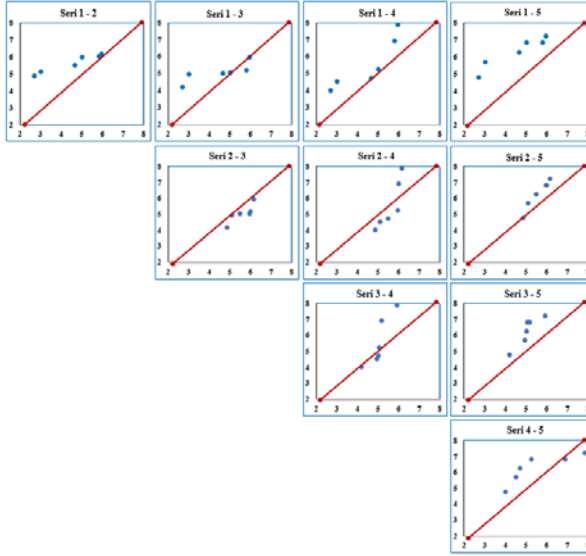
Erzincan Station



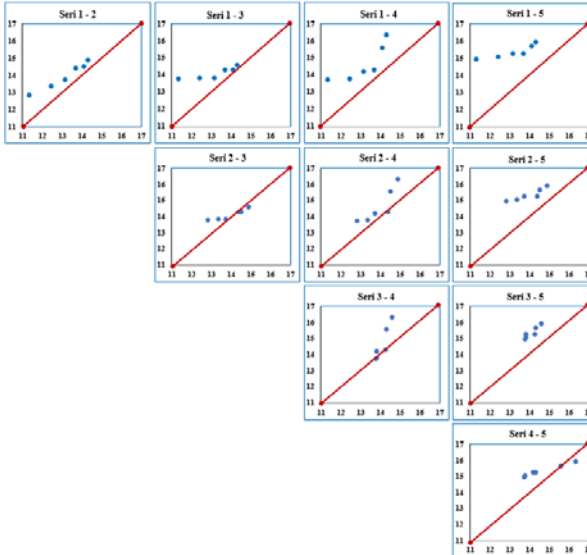
Erzurum Station



Kars Station



Malatya Station



Van Station

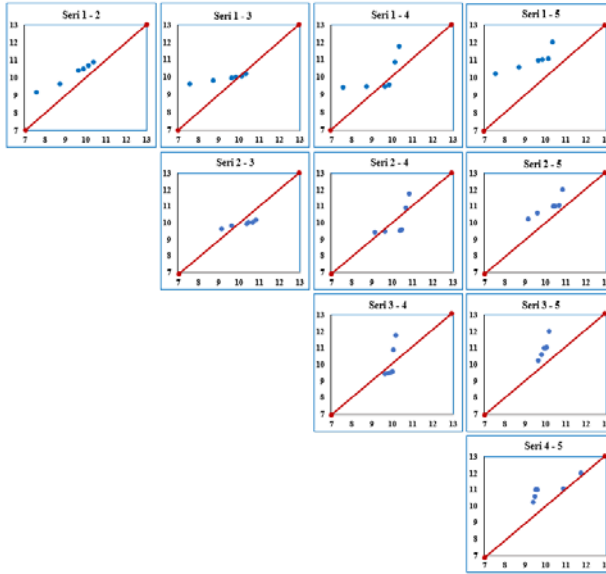


Figure 3. Innovative Triangular Trend Analysis method analysis results of annual average temperature data of each station.

For each station (Bingöl, Erzincan, Erzurum, Kars, Malatya, and Van), 30 years of data (1991-2020) were divided into five six-year subseries. First, the first six-year series was compared with the other six-year series. Then, the second six-year data was compared with the other six-year series, and the third and fourth six-year series were compared with the other six-year series, resulting in a total of 10 separate graphs. The analysis results presented in Figure 3 also show a total of ten separate graphs for each station. The analysis results yielded the following conclusions.

For Bingöl station, Series 1-2, Series 1-4, and Series 1-5 show a monotonous increasing trend, while Series 1-3 show a monotonous decreasing trend. Series 2-3 show a monotonous decreasing trend, while Series 2-4 and Series 2-5 show a

monotonous increasing trend. Series 3-4, Series 3-5, and Series 4-5 show a monotonous increasing trend. Generally speaking, the third six-year series shows a decreasing trend, while all other sub-series show increasing trends. Therefore, an overall increasing trend in temperatures is observed for Bingöl station.

For Erzincan station, Series 1-2, Series 1-4, and Series 1-5 show a monotonous increasing trend, while Series 1-3 shows a non-monotonous decreasing trend. Series 2-3 show a non-monotonous decreasing trend, while Series 2-4 and Series 2-5 show a monotonous increasing trend. Series 3-4, Series 3-5, and Series 4-5 show a monotonous increasing trend. Generally speaking, the third six-year series shows a decreasing trend, while all other sub-series show increasing trends. Therefore, an overall increasing trend in temperatures is observed for Erzincan station.

For Erzurum station, Series 1-2, Series 1-4, and Series 1-5 show a monotonous increasing trend, while Series 1-3 shows a monotonous decreasing trend. Series 2-3 show no trend, while Series 2-4 and Series 2-5 show a monotonous increasing trend. Series 3-4 and Series 3-5 show a monotonous increasing trend. Series 4-5 show a monotonous increasing trend in the 4-6 °C range. Generally speaking, no trend is observed in the third six-year series, while all other sub-series show increasing trends. Therefore, an overall increasing trend in temperatures is observed for Erzurum station.

For Kars station, Series 1-2, Series 1-4, and Series 1-5 show a monotonous increasing trend, while Series 1-3 shows a non-monotonous decreasing trend. Series 2-3 show a monotonous decreasing trend, Series 2-4 a non-monotonous increasing trend, and Series 2-5 a monotonous increasing trend. Series 3-4 is in the 5-7 °C range, and Series 3-5 shows a monotonous increasing trend. Series 4-5 shows a non-monotonous decreasing trend. Generally, a decreasing trend is observed in the third six-year

series, while all other sub-series show increasing trends. Therefore, an overall increasing trend in temperatures is observed for Kars station.

For Malatya station, Series 1-2, Series 1-3, Series 1-4, and Series 1-5 show a monotonous increasing trend. Series 2-3 is in the 13-14 °C range, Series 2-4 and Series 2-5 show a monotonous increasing trend. Series 3-4 is in the 14-15 °C range, and Series 3-5 shows a monotonous increasing trend. Series 4-5 shows a non-monotonous decreasing trend. Generally, all sub-series show an increasing trend. Therefore, a general increasing trend is observed in temperatures for Malatya station.

For Van station, Series 1-2, Series 1-3 show a monotonous increasing trend in the 7-9 °C range, while Series 1-4 and Series 1-5 show a monotonous decreasing trend in the 9-11 °C range. Series 2-5 show a monotonous increasing trend. Series 3-4 show a non-monotonous increasing trend, while Series 3-5 show a monotonous increasing trend. Series 4-5 show a monotonous increasing trend in the 9-10 °C range. Generally, all sub-series show an increasing trend. Therefore, an increasing trend in temperatures is generally observed for Van station.

The results of Innovative Triangular Trend Analysis method indicate a significant long-term increase in temperatures across the region, due to the emergence of monotonous or non-monotonous increasing trends in comparisons between subseries. The detection of increasing trends in the majority of subperiods at all stations in Bingöl, Erzincan, Erzurum, Kars, Malatya, and Van indicates that the region has entered a period of significant temperature change over the last thirty years. These findings are largely consistent with studies examining annual and seasonal temperature trends in the region.

Keskin and Saplıoğlu reported that temperatures exhibited positive trends at nearly all 12 stations in Eastern Anatolia

Region, with only Erzurum exhibiting a negative trend (Keskin and Saplıoğlu, 2023). Similarly, a study by Keskin et al. reported increasing temperatures in most of the 14 provinces in the region (Keskin et al., 2018). The general upward trend even at Erzurum station suggests that warming in the region may have become more pronounced in recent years. Seasonal drought analyses conducted by Çelik et al. have shown that drought tendencies have intensified in provinces such as Malatya, Elazığ, Tunceli, Van, and Kars (Çelik et al., 2018). This situation, when considered together with the continuous temperature increase trends observed at Kars, Van, and Malatya stations, suggests that increasing temperatures may have triggered drought processes in these regions. Şenocak and Emek detected increasing trends in summer precipitation and decreasing trends in winter precipitation in the region; this finding points to the potential for temperature increases to alter seasonal precipitation patterns in the region (Şenocak and Emek, 2019). Increasing temperatures, particularly in winter, reduce snow cover, cause irregularities in stream flows, and increase evaporation, leading to significant changes in the region's hydrological balance.

The results provide important clues about the region's climatic future. Increasing temperature trends have the potential to put pressure on the region's natural and socioeconomic systems through impacts such as shorter snow cover duration, increased evaporation, increased agricultural water demand, exacerbated summer droughts, and increased frequency of extreme temperature events. These trends are consistent with both the temperature increases and drought trends reported in previous literature, demonstrating that the region is strongly affected by climate change. Therefore, such studies are crucial for developing climate change adaptation strategies, sustainable water resource management, and agricultural planning in Eastern Anatolia Region.

4. CONCLUSIONS

In this study, annual average temperature data for the period 1991–2020 from six different meteorological stations in Eastern Anatolia Region (Bingöl, Erzincan, Erzurum, Kars, Malatya, and Van) were evaluated using Innovative Triangular Trend Analysis method. As a result of the analyses, it was determined that general temperature trends were increasing at all stations. Sub-period comparisons showed that temperature increases have become more pronounced, especially over the last 12–18 years. While monotonic or non-monotonic increasing trends were detected in the majority of all sub-periods at Bingöl, Erzincan, Kars, Malatya, and Van stations, although no trend was observed in some limited sub-periods at Erzurum station, the general trend was upward. These results reveal that the long-term temperature increase in Eastern Anatolia Region continues widely, with varying intensities across stations. Based on these results, the following recommendations can be offered:

- In order to monitor the temperature increase in the region in more detail, the meteorological observation network must be strengthened, the number of stations must be increased and data continuity must be ensured.
- To reduce the impacts of temperature increases on water resources, basin-based water management plans should be updated and methods that reduce evaporation losses should be encouraged.
- Since agricultural production is an important economic activity in the region, crop patterns compatible with increasing temperature and changing precipitation regime should be developed.

- Since Innovative Triangular Trend Analysis method is a powerful tool, especially in detecting non-linear trends, it should be applied to other hydro-meteorological parameters such as precipitation, evaporation, flow and soil moisture in the region in the future, thus enabling a multi-faceted evaluation of climatic changes.
- It is recommended that universities, meteorological institutions and local governments establish joint research centers to monitor the effects of climate change in the region.

In conclusion, it appears that temperatures in the Eastern Anatolia Region continue to rise significantly, and this increase will have significant impacts on the regional hydrological balance and socio-economic activities. Expanding future studies to include both innovative methods such as Innovative Triangular Trend Analysis method and different climate parameters is crucial for developing climate change adaptation strategies for the region.

Acknowledgments

We would like to sincerely thank Türkiye State Meteorological Service for providing the meteorological data for this study and hydroelectric power plant officials for providing data on the energy produced by these hydroelectric power plants.

Data availability

Data can be provided upon reasonable request.

Author contribution

A.I.C.; Formal analysis, Methodology, Resources, Software, Writing – original draft, Writing – review & editing

G.C.; Formal analysis, Methodology, Resources, Software, Writing – original draft, Writing – review & editing

Competing Interests

The authors declare no competing interests.

REFERENCES

- Ay, M., Karaca, Ö. F., & Yıldız, A. K. (2018). Comparison of Mann-Kendall and Sen's innovative trend tests on measured monthly flows series of some streams in Euphrates-Tigris Basin. *J Inst Sci Technol*, 34(1), 78-86.
- Bakirci, K., & Kirtiloglu, Y. (2022). Effect of climate change to solar energy potential: a case study in the Eastern Anatolia Region of Turkey. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(2), 2839-2852.
- Belli, O. (1994). Urartian dams and artificial lakes recently discovered in Eastern Anatolia. *Tel Aviv*, 21(1), 77-116.
- Çamur-Elipek, B., Şen, B., Aydın, G. B., Taş-Divrik, M., & Yıldırım, P. (2021). Benthic macroinvertebrates of the Tigris and Euphrates Rivers in Turkey. In *Tigris and Euphrates Rivers: Their Environment from Headwaters to Mouth* (pp. 1539-1560). Cham: Springer International Publishing.
- Çelik, M. A., Kopar, İ., & Bayram, H. (2018). Seasonal Drought Analysis of Eastern Anatolia Region. *Current Perspectives in Social Sciences*, 22(3), 1741-1761.
- Elmastas, N., Adiguzel, F., Ustuner, M., Cetin, M., Alkan, A., & Sahap, A. (2025). Determining climatic risks in the Eastern Anatolia region using the wind chill index, Türkiye. *Air Quality, Atmosphere & Health*, 1-12.
- Erk, N., Ateş, S., & Direkçi, T. (2000). Convergence and growth within GAP region (South Eastern Anatolia Project) and overall Turkey's regions. IV. ODTU International Economics Congress, 13, 16.
- Güçlü, Y. S., Şişman, E., & Dabanlı, İ. (2020). Innovative triangular trend analysis. *Arabian Journal of Geosciences*, 13(1), 27.

- Keskin, M. E., Çakto, İ., Çetin, V., & Bektaş, O. (2018). Trend Analysis of Temperature and Precipitation in Eastern Anatolia Region. *Journal of Engineering Sciences and Design*, 6(2), 294-300.
- Keskin, M. E., & Saplıoğlu, K. (2023). Determination of Temperature Trends in The Eastern Anatolia Region of Turkey Using Innovative Trend Analysis and Mann-Kendall. *Journal of Innovations in Civil Engineering and Technology*, 5(1), 1-16.
- Litt, T., Anselmetti, F. S., Cagatay, M. N., Kipfer, R., Krastel, S., Schmincke, H. U., & Sturm, M. (2011). A 500,000-year-long sediment archive drilled in eastern Anatolia. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 92(51), 477-479.
- Özdemir, Y., Mercan, Ç., Oyan, V., & Özdemir, A. A. (2019). Composition, pressure, and temperature of the mantle source region of quaternary nepheline-basanitic lavas in Bitlis Massif, Eastern Anatolia, Turkey: A consequence of melts from Arabian lithospheric mantle. *Lithos*, 328, 115-129.
- Sarioz, I. O., Ceribasi, G., & Ceyhunlu, A. I. (2024). Investigation of the variability applying classical (MK-SR) and modern (ITTA-TPSC) trend methods to meteorological parameters of Marmara Basin in Turkey. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 135, 103665.
- Senocak, S., & Emek, M. F. (2017). A Case Study: Trend Analysis of Total Annual Rainfalls on Eastern Anatolia Region in Turkey. *Feb-Fresenius Environmental Bulletin*, 5858.
- Şenocak, S., & Emek, M. F. (2019). Evaluation of Monthly Precipitation Amount in Eastern Anatolia Region by

Using Trend Analysis Methods. European Journal of Science and Technology, 17, 80.

Taşkolu, İ., Acar, R., Çırağ, B., & Güngör, M. (2025). Impacts of climate change in Eastern Anatolia region: analysis of temperature and humidity trends in Malatya Province.

Unver, I. O. (1997). South-eastern Anatolia integrated development project (GAP), Turkey: An overview of issues of sustainability. International Journal of Water Resources Development, 13(2), 187-208.7-822.

HBIM USE IN TURKEY RESTORATION: LITERATURE-BASED STUDY

Ahmet GÖKDEMİR¹

Kadir Mohamed IBRAHİM²

Oğuzhan ERKOÇ³

Güray KARAKAYA⁴

1. GİRİŞ

Historical buildings are an important part of the cultural heritage since they retain the memory of a society and reflect sociological, economic, cultural, and political aspects of the geography (Kutlu & Bekar, 2021a; Tellioğlu & Satici, 2023a). Since they incorporate both tangible and intangible values, the structures are at the core of developing social identity. Because of this, the preservation of historical buildings is not only a cultural responsibility but also a requirement for ensuring continuity between the past and the future. Nonetheless, natural catastrophes, poor environmental factors, material decay, and human accretions will inevitably cause destruction or even loss (Kutlu & Bekar, 2021b). That is why it is necessary to preserve these buildings as per the UNESCO and ICOMOS principles to remain connected with culture and history (Aksoy & Asar, N.D.; Tellioğlu & Satici, 2023b; Yunus, 2020). This continuity is only

¹ Assistant Professor, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Fakültesi, mebrure.itir@gmail.com, ORCID: 0009-0005-7131-1775 Gazi University, Faculty of Technology Department of Civil Engineering, ORCID: 0000-0003-2151-6228.

² Gazi University, Institute of Science, ORCID: 0009-0008-5214-9006

³ Gazi University, Institute of Science, ORCID: 0000-0003-4041-1704.

⁴ Gazi University, Institute of Science, ORCID: 0009-0005-4562-9157.

achieved through proper restoration practices that are supported by systematic documentation and trusted archiving procedures. Restoration decisions can only be made based on objective information, which can only be achieved through proper and thorough documentation such that the cultural worth of such structures can be passed on to the future generations (Anaç & Arun, 2023). Despite this need, there are significant restrictions in the contemporary conservation practices. Various institutions tend to store survey, restitution, and restoration documents in printed format that creates a fragmentary and inaccessible information. Illustrations and semantic information that are created in different formats and stored in different archives increase the likelihood of losing data and makes it difficult to work interdisciplinarity (Anaç & Arun, 2023; Dauda et al., 2025). Since the heterogeneous and multi-layered information is already present in historical buildings by virtue of the methods used in their construction and subsequent additions, the absence of a unified and accessible information system is already a significant barrier to effective conservation. The use of traditional 2D drawings adds to this difficulty, as they have a constrained capacity of geometric representation, and fail to provide semantic information, which limits their applicability in analysis and decision-making (Salah et al., 2025). As a reaction to these constraints, Building Information Modelling (BIM), a widely utilized software in new construction, has been looked upon as a solution to cultural heritage. As BIM technologies are adjusted to the requirements of the historical structures, they create the so-called Heritage Building Information Modelling (HBIM) (Anaç & Arun, 2023). HBIM was introduced by Murphy, McGovern and Pavia in 2009 when they conducted a study on an eighteenth century facade. Since that time, HBIM has been used across a broad spectrum of heritage applications into archaeological artefacts, monuments, and historic urban environments (Sarıcaoğlu & Saygı, 2022). HBIM is an effective approach that

allows recording accurate documentation, enhanced information management, and conservation-focused decision-making, achieved through the combination of laser scanning, photogrammetry, and information modelling (Coşgun Et Al., 2021; Lo Brutto Et Al., 2021). Therefore, the transition between BIM and HBIM is a significant change in the sphere of heritage management that provides more accurate and in-depth instruments to comprehend and maintain historical buildings (Salah et al., 2025). In this regard, the current paper is dedicated to the study of the HBIM implementation use in the Turkish restoration practice through an extensive literature review. The present study will assess the current situation of HBIM adoption in Turkey by examining the development of both academic and practical use of this approach, as well as the key limitations indicated in the national literature.

The present study employed a literature-based research approach to analyse how Historic Building Information Modelling (HBIM) is used in restoration practice in Turkey. Because the purpose of the research is to learn what has already been done, what remains subject to investigation, and what is the current level of adoption of HBIM, the search was performed using only the sources of secondary data without referring to fieldwork or empirical measurements. Google Scholar, DergiPark, and ScienceDirect were used as the search engines, and the following keywords were applied in different combinations: HBIM, Historic Building Information Modelling, heritage documentation, BIM in restoration, HBIM Türkiye, and Scan-to-BIM.

2. FINDINGS/DISCUSSION

In this section, the use of HBIM in Turkey are examined. Historic Building Information Modelling (HBIM) has been

actively increasing in international recognition since its initial introduction in 2009, particularly in scholarly research and in the context of restoration work by the public (Kamaruzaman*, 2019; Zhang & Zou, 2022). In line with this observation, Bastem & Cekmis, 2022 found 194 data-driven studies on HBIM published until 2020, with a pronounced rise in research over the years (Bastem & Cekmis, 2022). Their results also indicate that the level of interest in HBIM has increased especially since 2012. This trend can be observed in Figure 1, with HBIM activity still being comparatively small until approximately 2012 and grows significantly after that.

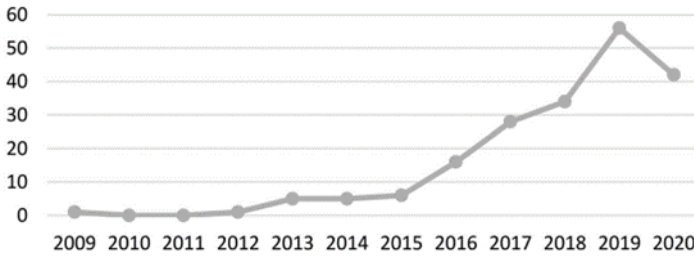


Figure 1. Temporal distribution of the published studies (Bastem & Cekmis, 2022)

Although BIM has gained popularity in the design and management of new buildings (Jiao & Cao, 2023; Mutis & Hartmann, 2019; Ullah et al., 2019), the Fai et al., 2011 report indicates that it has been underutilized in the conservation of the heritage (Fai et al., 2011). One of the factors that have contributed to this gap is the reluctance of institutions and professionals who perceive HBIM as a process having some uncertainties or risks (Kömürçü, 2021). The apprehension of this nature contributes to the reason why HBIM is not proliferated in heritage projects globally. Overall, literature indicates that HBIM did not have real momentum in Turkey until 2017. Prior to that, HBIM activities in Turkey were almost non-existent and most restoration efforts were relying on conventional documentation methods like

manual records, 2D drawings, and piecemeal archival data, which it acts as a significant hindrance to effective conservation decision-making. (Armagan et al., n.d.; ASLAN A, n.d.; Ateş & Akalp, 2025; Karaçor & Dereli, n.d.; Köylü et al., 2023; Yeğin, 2008) . Even though HBIM started to receive real traction in Turkey starting in 2017, especially with the METU Faculty of Architecture conservation project, the first implemented practical use of HBIM (Savaş, 2019), most of the publications that were authored during this time remained largely theoretical (Aksin & Karas, 2021; Ateş & Akalp, 2025; Kömürcü, 2021; Öztürk, 2023). These papers were dedicated to definition of HBIM concepts, to outlining methodological possibilities and to the creation of typologies or semantic categories as opposed to generating full-fledged HBIM models, and their effect was invariably limited to the scholarly setting, and there was very little application to the actual practice of restoration. As an illustration, the study on the role of HBIM in facilitating documentation and conservation by (Özeren & Korumaz, n.d.) can be used to demonstrate the scholarly orientation in the initial years. The same observations were made by Dua GARİP, 2023 who pointed to the scarcity of national literature and the necessity to resort to international studies. The fact that their interviews with four specialized restoration companies showed that practitioners were not familiar with HBIM was a further indication that there was a low awareness of HBIM in the sector (Dua GARİP, 2023). The research conducted by ERŞAN & DEMİRARSLAN, 2020 on the Odunpazari Houses gives a clear illustration of how the restoration projects are undertaken in Turkey in the absence of HBIM. It is nearly all a manual process: buildings are surveyed on-site, survey drawings are created, restitution decisions are made based on old photographs and oral history, and a lot of the work of it requires the hunches of experts. In the Odunpazari case, physical inspection of the structures was carried out by municipal teams, interventions that were inappropriate were eliminated,

original doors and windows were opened, plaster was cleaned and traditional building materials like adobe and wood were restored. Although they are effective in most scenarios, they tend to be time consuming and prone to error due to the use of non-digitized data and scattered documents and human observation. The limitations are even more evident after taking into consideration the bigger picture of the construction industry in Turkey where only a small fraction of the companies have a practical experience with BIM. Lack of knowledge among employers and contractors, the inadequacy of BIM standards, a significant percentage of professionals are unwilling to switch to new digital practices, and insufficient governmental involvement make the industry not quite ready to leave traditional methods (Aladağ et al., 2026; Erşan & Demirarslan, 2020; Tekin & Atabay, 2019). This research effectively demonstrates the constraints of the restorations conducted without HBIM and indicates that the lack of digital archives makes the conservation processes more complicated. All these restrictions did not allow HBIM to be a systematic tool in Turkey. Alongside these theoretical contributions, several studies indicate that HBIM has begun to be applied to specific historic buildings, and it started to be perceived as a promising approach to addressing long-standing issues in heritage conservation gradually moving beyond purely theoretical, scholarly discussions into the realm of practical application. One of the turning points was the HBIM project of METU Faculty of Architecture in Ankara the first complete HBIM in Turkey. As part of the program Keeping, It Modern conducted by Getty Foundation between 2017 and 2019, it started with a pilot version of the F Block and then extended to the entire complex. The project showed how HBIM could integrate structural, material, environmental and archival information on one platform and assist in making informed decisions during the entire conservation process (Savaş, 2019). In more recent studies, the extent to which HBIM is used has grown since 2020. (Benli

Yıldız et al., 2024) developed an HBIM library of a registered house in Akcakoca with the help of old surveys and archival photographs because the original building could not be rescanned. They modelled elements of buildings, including doors, windows, and shutters and soft-landed them into BIM as reusable elements. Their work demonstrates that HBIM libraries can assist in the digitalization of documentation, modelling of restitution, and access to cultural heritage. Another significant gap, which is discussed by (Anaç & Arun, 2023) is the absence of a single digital repository of Turkish historical buildings. They introduce the HBIM-supported archive model of the traditional civil architecture of Gaziantep, which includes uniting the HBIM models, document flow system, building information, and a parametric library. Their four-module system will help minimize data loss, enhance stakeholder coordination and promote long-term conservation planning. Likewise, in their study (Farajalah & Töre, 2023) utilized a Scan-to-BIM method based on photogrammetry in order to construct an HBIM model of the Mimar Sinan Fine Arts University Findikli Campus. They processed over 24,000 drone and handheld images to generate a detailed point cloud and generate custom parametric families of heritage elements. Their research proves that photogrammetry can be an efficient and cheaper alternative to laser scanning, and it can still supply reliable information to conservation and immersive technologies, such as VR/AR. In another study, (Özeren & Korumaz, 2021) used HBIM in combination with terrestrial laser scanning (LiDAR) to record the Ayfer Sonmez House in Ermenek. Their workflow came up with a LOD 350 model which aids documentation, analysis and preservation decisions. They emphasize the fact that LiDAR and HBIM incorporation can bring more accuracy, collaboration, and heritage management in the long run. Based on a SWOT analysis, Komurcu and Yildiz (2021) outline the conclusion that despite the advantages of HBIM, which include the ability to manage data

and enhance coordination, challenges linked to the irregular geometries, lack of object libraries, and the lack of trained specialists remain. According to them, HBIM can be significantly significant in conservation of heritage provided that these obstacles are overcome. there is another study by (Özeren & Korumaz, n.d.) on the application of various Levels of Detail (LOD) in HBIM models. They developed models at LOD 200, 300 and 350 and 400 working with a traditional house in Tire (Izmir). According to their results, lower LODs are accurate to form preliminary urban studies, but more detailed conservation planning needs more details. They lay stress on necessity of the Turkey-specific LOD framework, which should be adjusted to the features of local heritage buildings. In another study, Yörük & Ofluoglu, 2025 documented the Nero Bath using an integrated workflow of photogrammetry, LiDAR, and HBIM, enabling both the current state and reconstruction decisions to be digitally analysed, while highlighting HBIM's advantages in data management and heritage conservation (Yörük & Ofluoglu, 2025). Combined with the other studies, it is evident that the use of HBIM applications in Turkey has become predominant since 2017. The general tendency is that HBIM is a recent addition to the heritage conservation sector of the country, and the transition between the conventional, manual work of restoring the buildings to more digital, comprehensive, and data-driven approaches is a gradual but significant one.

3. CONCLUSION

Digital transformation has also turned out to be a requirement in documentation and conservation of cultural heritage. HBIM is one of the potentially promising approaches that combine the geometric precision, semantic data, and the archival information in the same system. According to the

literature reviewed, Turkey has reached the stage of positive development where the discussion about the topic has shifted into practical applications, although the level of adoption remains low, considering the large number of attributes in the inventory of such heritage, as Turkey possesses. The barriers that include lack of standardized standards, shortage of trained personnel, and traditional method frameworks should be removed to speed up the progress. Future research ought to consider sector wide HBIM training, development of national object libraries, and establishment of digital heritage archive. With such a momentum, HBIM can play an important role in ensuring the sustainability and long-term conservation of historic buildings in Turkey.

REFERENCES

- Aksin, M., & Karas, A. R. (2021). A Review of the distinguishing features of the historical buildings in safranbolu region for the purpose of classification for semantically enhanced 3d building model. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences-ISPRS Archives*, 46(4/W5-2021), 39–42. <https://doi.org/10.5194/isprs-Archives-XLVI-4-W5-2021-39-2021>
- Aksoy, E., & Asar, H. (n.d.). Artium 2018(2) Çankırı İli Tarihi Baro Evi Restorasyon Önerisi.
- Aladağ, H., Demirdöğen, G., Demirbağ, A. T., & Işık, Z. (2026). Structural Equation Model for BIM Adoption in the Turkish Construction Industry Structural Equation Model for BIM Adoption in the Turkish Construction Industry 2. *In Turkish Journal of Civil Engineering*.
- Anaç, M., & Arun, G. (2023). HBIM supported archive model. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 39(1), 443–459. <https://doi.org/10.17341/gazimmfd.1175113>
- Ateş, D., & Akalp, S. (2025). The Future of Heritage: Digital Restoration and Intelligent Modeling Approaches in Historic Buildings. *International Journal of Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies*, 9(2), 210–214. <https://doi.org/10.36287/ijmsit.9.2.4>
- Bastem, S. S., & Cekmis, A. (2022). Development of historic building information modelling: a systematic literature review. *Building Research and Information*, 50(5), 527–558. <https://doi.org/10.1080/09613218.2021.1983754>
- Benli Yıldız, N., Kalpaklı, Z., & Özkaraca, N. (2024). Creation of Historical Building Information Modelling (HBIM)

- Library, A Case Study of Registered House (No:56), Akçakoca. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 12(2), 901–914.
<https://doi.org/10.29130/dubited.1241508>
- Coşgun, N. T., Çüngen, H. F., & Arslan Selçuk, S. (2021). A Bibliometric Analysis on Heritage Building Information Modeling (HBIM) Tools. *ATA Planlama ve Tasarım Dergisi*, 5(2), 61–80.
<https://doi.org/10.54864/ataplanlamavetasarim.1028166>
- Dauda, J. A., Bower, N., Adebisi, W. A., Saad, A., Saka, A. B., Kazemi, H., & Ajayi, S. O. (2025). Exploring the application of heritage building information modelling (HBIM) for heritage conservation: insights from industry practitioners. *Journal of Architectural Conservation*.
<https://doi.org/10.1080/13556207.2025.2518661>
- Dua G., (2023). Türkiye’deki Tarihi Yapıların Restorasyon Ve Koruma Projelerinin Yönetim Sürecinin HIN Teknolojisiyle İlişkilendirilmesi: Bir Vaka Çalışması, *Yüksek Lisans Tezi*.
- Erşan, R. R., & Demirarslan, D. (2020). Tarihi Yapılarda Sürdürülebilirlik İlkesi Bağlamında Eskişehir Odunpazarı Evleri. *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, 21(1), 187–213.
<https://doi.org/10.17494/ogusbd.763605>
- Fai, S., Graham, K., Duckworth, T., Wood, N., & Attar, R. (2011). Building Information Modeling and Heritage Documentation, <http://www.210king.com/>
- Farajalah, R., & Töre, T. (2023). Photogrammetry-Driven HBIM approach for Mimar Sinan Fine Arts University Campus. Proceedings-International Conference on Developments

- in ESystems Engineering, *DeSE*, 94–99.
<https://doi.org/10.1109/DeSE60595.2023.10469283>
- Jiao, Y., & Cao, P. (2023). Research on Optimization of Project Design Management Process Based on BIM. *Buildings*, 13(9). <https://doi.org/10.3390/buildings13092139>
- Kamaruzaman, N. U. S. N. (2019). Historic Building Information Modelling (Hbim): A Review. 587–594.
<https://doi.org/10.15405/epms.2019.12.58>
- Karaçor, F., & Dereli, M. (2024). Conservation and Restoration of Historic Buildings: Application of Contemporary Addition Construction Techniques in the Case of Turkey, *Gazi University Journal of Science Part B: Art Humanities Design and Planning* 12 (3), <http://dergipark.gov.tr/gujbsb>.
- Kömürcü, E. (2021). Historic Building Information Modelling (HBIM). *Proceedings of the International Conference of Contemporary Affairs in Architecture and Urbanism-ICCAUA*, 4(1), 589–597.
<https://doi.org/10.38027/iccaua2021tr0072n25>
- Köylü Yağan, N. B., Tarihi Yapıların Sürdürülebilirlik Bağlamında Yeniden İşlevlendirilmesi: Aydın Cumhuriyet Mektebi. 107. <https://doi.org/10.7816/idil-12-107-10>
- Kutlu, İ., & Bekar, İ. (2021). Tarihi Yapıların Yeniden İşlevlendirilme Sürecinde Cam Kullanımı: Trabzon Kızlar Manastırı Örneği. *Karadeniz Araştırmaları Enstitüsü Dergisi*, 7(13), 199–213.
<https://doi.org/10.7816/idil-12-107-10>
- Lo Brutto, M., Iuculano, E., & Lo Giudice, P. (2021). Integrating topographic, photogrammetric and laser scanning techniques for a scan-to-bim process. *International*

- Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences-*ISPRS Archives*, 43(B2-2021), 883–890. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLIII-B2-2021-883-2021>
- Mutis, Ivan., & Hartmann, T. (2019). Advances in informatics and computing in civil and construction engineering : *proceedings of the 35th CIB W78 2018 Conference: IT in Design, Construction, and Management*. Springer.
- Özeren, Ö., & Korumaz, M. (n.d.). Modeling According To Detail Levels In Heritage Building Information Modeling (HBIM) and Their Usage. <https://www.researchgate.net/publication/357517833>
- Özeren, Ö., & Korumaz, M. (2021). Lidar to HBIM for Analysis of Historical Buildings. *Advanced LiDAR*, 1(1), 27. <http://publish.mersin.edu.tr/index.php/lidar/index>
- Öztürk, B. (2023). Integrating A Scale Transition System Into The Scan-To-HBIM Process Architectural Design Computing Programme.
- Salah, R., Károlyfi, K. A., Szép, J., & Géczy, N. (2025). A structured framework for HBIM standardization: Integrating scan-to-BIM methodologies and heritage conservation standards. In *Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage* (Vol. 37). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.daach.2025.e00420>
- Sarıcaoğlu, T., & Saygı, G. (2022). Data-Driven Conservation Actions Of Heritage Places Curated with HBIM. *Virtual Archaeology Review*, 13(27), 17–32. <https://doi.org/10.4995/var.2022.17370>
- Savaş, A. (2019). Research And Conservation Planning for The Metu Faculty of Architecture Building Complex By Altuğ-Behrüz Çinici, Ankara, Turkey.

- Tekin, H., & Atabay, Ş. (2019). Building information modelling roadmap strategy for Turkish construction sector. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Municipal Engineer*, 172(3), 145–156. <https://doi.org/10.1680/jmuen.17.00001>
- Tellioğlu, S., & Satıcı, B. (2023a). Tarihi Yapılarda Restorasyon Tekniklerine göre Uygulanacak Malzemelerin Belirlenmesi. *İstanbul Ticaret Üniversitesi Teknoloji ve Uygulamalı Bilimler Dergisi*, 6(1), 37–49. <https://doi.org/10.56809/icujtas.1229473>
- Tellioğlu, S., & Satıcı, B. (2023b). Tarihi Yapılarda Restorasyon Tekniklerine Göre Uygulanacak Malzemelerin Belirlenmesi. *İstanbul Ticaret Üniversitesi Teknoloji ve Uygulamalı Bilimler Dergisi*, 6(1), 37–49. <https://doi.org/10.56809/icujtas.1229473>
- Ullah, K., Lill, I., & Witt, E. (2019). An overview of BIM adoption in the construction industry: Benefits and barriers. In *Emerald Reach Proceedings Series* (Vol. 2, pp. 297–303). Emerald Group Holdings Ltd. <https://doi.org/10.1108/S2516-285320190000002052>
- Yeğin, M. (2008). Geleneksel Yapıların Restorasyonunda Malzeme, Teknoloji ve Tekniklerin Araştırılması Geliştirilmesi. <https://www.researchgate.net/publication/339068335>
- Yörük, M. Ş., & Ofluoglu, S. (2025). Tarihi Yapılarda Dijital Teknolojilerin Koruma Amaçlı Kullanımı: Nero Hamamı Örneğinde Fotogrametri, LIDAR ve HBIM Entegrasyonu. <https://www.researchgate.net/publication/396688727>
- Yunus, S. M. (2020). Restoration techniques for the heritage building / kirkuk qishla as a case study. *Journal of*

Architecture and Urbanism, 44(1), 11–19.
<https://doi.org/10.3846/jau.2020.5479>

Zhang, Z., & Zou, Y. (2022). Research hotspots and trends in heritage building information modeling: A review based on CiteSpace analysis. *Humanities and Social Sciences Communications*, 9(1). <https://doi.org/10.1057/s41599-022-01414-y>

STUDY OF SURFACE STRUCTURAL DAMAGE AT ÇAKALOĞLU HAN

Ahmet GÖKDEMİR¹

1. HISTORY OF İZMİR

The ancient city of İzmir (Smyrna) was constructed on a small island in the northeast of the bay, covering an area of approximately 100 acres. Over the course of several centuries, the silt deposited by the floods from the Meles River and Mount Sipylus (Yamanlar Mountain) formed the present-day Bornova plain, with the small island undergoing a transformation into a hill.

On this mound, now designated Tepekule, there is a sample vineyard belonging to the Tekel Directorate's İzmir Wine and Beer Factory. In this area, which has been a dense shantytown since 1955, there is the İzmir Mound, which has been identified as the first settlement site in İzmir. Significant contributions to the initial excavations in this area were made by the Turkish Historical Society and the General Directorate of Antiquities and Museums.

The initial settlements on the western Anatolian coast, which were of Aeolian, Ionian, and Dorian provenance and established in the aftermath of the Trojan Wars, were predominantly constructed on diminutive peninsulas. Settlements such as Çandarlı (Pitanes), Foça (Phokaia), İzmir (Smyrna), Kilizman (Klazomenai), Miletus, and Iasos are included in this

¹ Assistant Professor, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Fakültesi, mebrure.itir@gmail.com, ORCID: 0009-0005-7131-1775 Gazi University, Faculty of Technology Department of Civil Engineering, ORCID: 0000-0003-2151-6228.

category. The rationale behind this phenomenon is that the individuals who established and subsequently inhabited these settlements were predominantly Hellenic and possessed a maritime background. Consequently, the peninsula settlements possessed two ports and were also secure against attacks from the land.

In the event of adverse weather conditions, if one of the designated ports was deemed unsuitable, seafarers were permitted to utilise the alternative port. Bayraklı Höyüğü was located at the northeast corner of the bay, in a comfortable position against attacks from land, with the steep rocky Yamanlar Mountain to its north. Its southern aspect was open to the sea. The ancient settlement of İzmir was located on this peninsula for a period of approximately 3000 years. During the latter half of the 4th century BC, a substantial population increase prompted the relocation of the settlement to the foothills of Kadifekale (Pagos) as it is known today (Ayönü, 2009).



Picture 1. An old official document from the Konak district of İzmir

The Amazons were a group of female warriors who underwent a process of mastectomy to enhance their physical capabilities in combat and facilitate the use of weapons.

In the 15th century BC, the population in question migrated from the area around the city of Miskyra in the Eastern Black Sea region, descending from the foothills of Pagos

(Kadifekale) to the banks of the Meles River and the vineyards of Halkapınar. These long-haired, dark-skinned warrior women were formidable opponents and demonstrated highly proficient combat skills. The Amazons asserted that the local populace had no option but to accept this new tribe.

During this period, a tribe known as the Elektdi inhabited the region that is now recognised as Izmir. The indigenous populace engaged in combat with the invading Amazons, ultimately emerging victorious. The king of the Elektdi married Smyrna, the defeated queen of the Amazons, and named the city after his wife.

This word has been used in similar forms in various languages, undergoing accent variations: The toponymic variety of the name 'Zmirna' is also found written as 'Smirne', 'Simire', 'Semire', 'Lesmire', 'Lesmirr', 'Ksimire', 'Siniros', 'Mirina', 'Samorna', 'Simira', 'Zmirna', 'Zimirra', 'İsmire', and 'Yezmir', amongst others. The ancient Ionian dialect is known to have added the determinative word "i" to the beginning of names, referring to the city as "İzmirni." The contemporary use of the word 'Izmir' is derived from this root (Ersoy & Ersoy, 2012).

2. SOME OBSERVATIONS AND STUDIES ON THE HANLAR OF İZMİR

With the exception of warehouse structures referred to as 'hans', it appears that a total of 103 such structures were constructed in Izmir. Of the aforementioned hands, only 87 have survived to the present day; the locations of the remaining hands are, as yet, unknown. The architectural condition of the remaining 16 hans remains uninformed, with the exception of their nomenclature. A total of 18 of the identified hand locations are still in existence in Izmir in some form or other. Utilising the blueprints of these hans, complemented by the extant illustrations

of 55 hans featured in insurance plans that have eluded preservation, we have ascertained the designs implemented in the hans of Izmir (Ersoy, 2012).

In consideration of the aforementioned findings, it is possible to categorise the subjects in question into two distinct groups, based on their respective plans.

2.1. Courtyard Inns

These caravanserais are single or two-storey structures, with most featuring an asymmetrical layout. The second-storey facades that face the courtyard feature arcades in part or in their entirety. The courtyards of large caravanserais contain a square-plan superstructure with six fountains topped by a mosque, while smaller caravanserais feature fountains with pools. The construction of these buildings incorporated a combination of cut stone, rough-hewn stone, and brick, resulting in a distinctive architectural style. The lower floors feature barrel vaults, while the upper floors exhibit a variety of architectural features, including barrel vaults, mirrored vaults, and domes, contributing to the complexity and aesthetic appeal of the structures (Ersoy, 2012).

2.2. Caravanserais with a Plan Similar to the Arasta

The architectural configuration of such edifices is characterised by a rectangular plan, encompassing a central corridor that is flanked on either side by rooms. It is well established that the structures known as arasta, of which numerous examples can be observed in Turkish architecture, also possess the same plan. However, while in arasta the side rooms open onto the central corridor with arches that are a continuation of the vault, in the type of spaces under examination, the rooms open onto the central corridor with windows and doors. Consequently, it was deemed appropriate to group these structures, which are also referred to in one publication as

"passageway-based inns," under the heading "inns with an arasta-like plan." The construction of these edifices incorporated cradle vaults, pointed cradle vaults, or wooden roofs as their primary covering system. It is customary for there to be one entrance on each side of the short ends of the central corridor (Ersoy, 2012).

Furthermore, an analysis of the distribution of inns in relation to the city's topographical changes reveals a clear correlation. It is well documented that an inner harbour was also present within the Gulf of Izmir. This inner harbour, which continued to exist until the second half of the 18th century and whose entrances and exits were controlled by a castle, had a 1-mile coastline according to Piri Reis in the early 16th century. It appears that the harbour, which had previously been suitable only for small ships, had undergone a substantial reduction in size during this period. Richard Chandler's observations on the harbour's evolution reveal that by 1765, the body of water had assumed the form of "a large pool in the middle of the city, which filled up in rainy weather" (Chandler, 1999). This transformation can be attributed to the narrowing of the harbour during the 18th century. It can be posited that the inns located in this area were constructed from the latter quarter of the 18th century onwards (Ersoy, 2012).

An examination of the natural disasters that have befallen the city thus far reveals that it has been subjected to 13 earthquakes between 1654 and 1845, as well as eight fires between 1763 and 1922. This phenomenon has precipitated the decline of wooden inns, among other architectural forms. In addition to natural disasters, the scientific understanding of urban planning has also played a significant role in this outcome. For instance, the construction of Fevzi Paşa Boulevard, which commenced in 1914 and was completed in 1935, resulted in the demolition of approximately eight inns, either completely or partially.

In the area known as "Kemeraltı," which accounts for 90% of İzmir's trade, the han buildings have become dysfunctional due to neglect as a result of insufficient capacity in the premises. This has led to the gradual demolition of the han buildings, which have been replaced by modern shopping malls and commercial buildings (Ersoy, 2012).



Picture 2. Kızlarağası Inn (Ersoy, 2012)



Picture 3. Çakaloğlu Han (Ersoy, 2012)

3. ÇAKALOĞLU HAN

The present study has revealed that the dates 1805–1806 are inscribed on the fountain and water dispenser located on the east and west sides of the entrance on the north façade of the Historic Çakaloğlu Han. This indicates that the building was constructed during these years, during the reign of Sultan Selim III. The building is located in the streets between 895 and 861 in

the Halimağa Bazaar (Kasap Hızır Neighborhood) in Izmir. The edifice is located in Konak Kemeraltı, in close proximity to the Kızlarağası Han, and was constructed in the 18th century in the Ottoman style. Its construction materials include cut stone, rubble stone, and brick. The plan of the building is rectangular, consisting of a central corridor flanked on either side by nine to eighteen rooms. The structure is rectangular in shape, extending in a north-south direction. Access to the hand is provided by two large doors opening from the north and south facades (Yaygel, 2007).



Picture 4. South entrance gate of Çakaloğlu Han

The fountain, situated on the right side of the inn's entrance, adjacent to the facade, appears to be an independent five-sided structure. However, its history and construction are inextricably linked to the inn. Two of the facades are decorated, two are plastered, and one is attached to the inn wall. The marble facade of the fountain that faces the inn's entrance features an entrance door covered by a three-lobed arch at the bottom. The corners of the arches are adorned with vases from which flowers emerge, along with plant motifs. At the uppermost point of the facade is an inscription, dated 1220/1805-6. The inscription reads as follows: The subject of this discourse is the aesthetic qualities of the water, which is characterised by its new appearance and its inherent beauty. This establishment, notable for its cleanliness and elegance, was founded by Gaffarzade kul. The allocation of pure gold coins from the treasure of the heart was made for the

purpose of expenditure in this place. These altruistic actions were unprecedented among the great mosques. The absence of water in this area meant that the thirst could not be quenched. The river's flow bears resemblance to that of the Nile, with the city of Egypt being a notable point of comparison. It is to be hoped that the recipient will receive the bounty of God, the provider of all sustenance, and that they will utter the words 'min nebiyyu'llah'. The moment has arrived for the disclosure of the date with love. It is recommended that the water be consumed with the invocation of Bismillah and the expression of praise for HACI Ahmed.

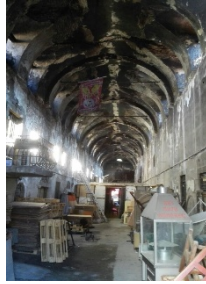
The corridor and the rooms inside are covered with barrel vaults. The rooms on either side of the corridor have been raised up to the beginning of the corridor vault, and windows have been opened in the walls created by this height difference to allow light into the interior. Furthermore, each establishment is equipped with one or two windows. Mezzanines have been incorporated into the cells, with some featuring wheel motifs constructed from bricks. Moreover, a sun motif has been incorporated in the section corresponding to the eaves gap at the western end of the south façade of the inn.

Despite being overlooked in the present day, the market shops have proven to be structurally sound and have been repurposed for use as warehouses. Notably, these structures are under private ownership. Upon opening the substantial iron door and entering the chamber, one is immediately struck by the architectural intricacies and enigmatic texture that characterise the space. The edifice, a historic landmark, is characterised by a play of light that is both inviting and captivating. This phenomenon is further accentuated by the interplay of light that is able to penetrate the high windows, thereby creating an ambience that is both mystical and immersive. The Historic Çakaloğlu Han, which has lain derelict until now, is planned to

be converted into a Carpet and Handicrafts Bazaar (Yaygel, 2007).



Picture 5. Çakaloğlu Han north facade



Picture 6. Çakaloğlu Han corridor



Picture 7. The balcony inside Çakaloğlu Han



Picture 8. Çakaloğlu Han room door

4. CAUSES OF THE DETERIORATION OF THE HISTORICAL STRUCTURE

Prior to the execution of restoration works, a comprehensive investigation and identification of the factors that led to the structures' deterioration is undertaken through meticulous observation and technical examination. The architect and restorer charged with the restoration must undertake a thorough examination of the structure. It is imperative that observations are conducted at various times: under excessive sunlight in summer, during rainfall, and when covered with snow. The observations and recordings should document the effects of these conditions on the structure, including any changes in behaviour. Cracks, efflorescence, moss growth, and other similar deterioration should be identified, and the factors causing these should be investigated.

Interventions made without a comprehensive understanding of the underlying causes of damage and the deterioration process may be ineffective, or the procedure may fail to achieve its intended outcome due to an inaccurate diagnosis. Elimination of the causal factors is imperative to prevent ongoing deterioration and ensure optimal outcomes. Furthermore, the damage may increase due to delay, and other problems may arise. Prior to undertaking a detailed examination

of historical structures prior to restoration, it would be beneficial to review the factors causing the damage (Öcal & Dal, 2012).

4.1. Damage Caused by the Location of the Structure

The location of the structure (slope or riverbed) may result in increased vulnerability to damage from climate-related effects. It is imperative to note that structures located on slopes or within hollows are susceptible to the risk of flooding, provided that no precautionary measures are implemented (Öcal & Dal, 2012).

4.2. Ground Properties

In the event of the substructure upon which a structure is erected exhibiting inadequate strength or heterogeneity, this may result in the structure undergoing movement over time. This movement may manifest as rotation or differential settlement, leading to visible deterioration. In the event of the ground beneath the foundation being inhomogeneous, cracks will appear in the structure. Through meticulous examination of the location and direction of the cracks in the structure, it is possible to obtain a preliminary understanding of whether the damage is attributable to the ground. In the event of the structure being founded on stable terrain at either end whilst the central portion is found to be unstable, fissures will manifest themselves at the corners of the door and window apertures on the façade, extending laterally at a 45-degree angle. In the event that the central portion of the structure's façade is the only component that is firmly anchored to solid ground, the resultant fissures will be characterised by a wedge-shaped morphology, exhibiting a constriction at the base that gradually expands towards the apex. The identification and repair of damage caused by ground falls are the responsibility of ground engineers; they should be consulted for a detailed investigation. The necessity for a solution is contingent on the specific circumstances. In some cases, procedures such as ground reinforcement or the construction of foundations reaching solid

ground may be necessary. These processes are quite difficult and expensive (Öcal & Dal, 2012).

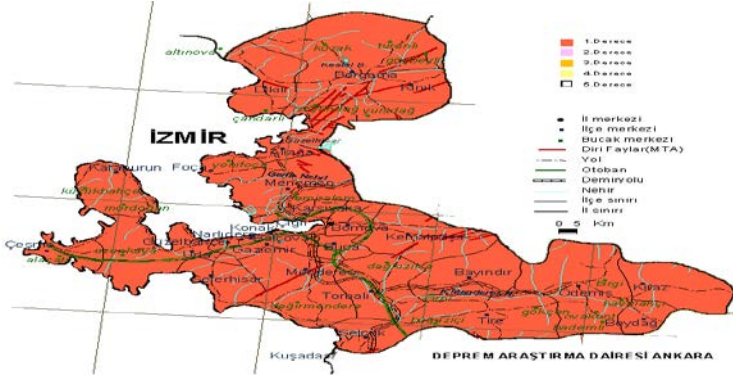


Figure 1. Izmir Province Regional Earthquake Map, Republic of Turkey Prime Ministry Disaster and Emergency Management Presidency Earthquake Directorate (Çavuş, 2011)

The fact that a structure is located on a fault line, or that it is built on rock with cracks, are also factors that increase the risk of deterioration and destruction (Ahunbay, 2023).

4.3. Errors in Structural Design

In the event of sizing errors pertaining to the structural systems of edifices from the preliminary design stage, there is the potential for significant damage to occur. Such errors may be exemplified by the construction of walls, columns and buttresses with sections that are incapable of withstanding the horizontal and vertical loads to which they are subjected. A wall with inadequate cross-section for the load it carries may undergo sagging over time. Insufficient struts may result in the formation of openings in the arch, vault, or dome, with the potential for the system to collapse. Inadequate foundation design can also result in the formation of cracks and vertical separation in upper sections, walls, and load-bearing columns (Öcal & Dal, 2012).

4.4. Use of Defective Materials

From antiquity to the present era, a hallowed tradition in the domain of architecture has been the meticulous selection of materials for pivotal works. Monuments such as temples and theatres found in many archaeological sites in Anatolia have survived to the present day because they were constructed with large, durable stones. The construction of traditional architecture is typically characterised by the utilisation of natural materials, including stone, adobe, brick, and wood. The utilisation of substandard materials has been demonstrated to expedite the degradation of structures. The presence of clay layers and other foreign substances within stones can cause rapid erosion, leading to the separation of the stone from the layer or vein containing the foreign substances. Sedimentary cultures manifest in nature in horizontal layers. It is also important that the stone is placed in the building in accordance with its layering in nature. During the processing stage, particular attention should be paid to the components that will be visible on the facade, ensuring that their shape is tailored to the respective layer, or, in other words, to the grain. In the event of the block being prepared in a manner contrary to the grain of the stone, and moreover being placed without due consideration for its layering, deterioration will occur in the form of layers peeling off from the facade. The inherent fragility of the stone's composition leads to its susceptibility to disintegration and crumbling (Öcal & Dal, 2012).

In brick structures, the proper firing of bricks is an important factor that increases the strength of the structure. The utilisation of substandard bricks in the construction of walls frequently results in deleterious consequences, manifesting in the form of accelerated deterioration, surface erosion (i.e. pitting), and structural disintegration. In masonry structures, the quality of the mortar that binds the primary material is also an important factor affecting the strength of the building. In the case of walls

constructed with mud or weak lime mortar, the deterioration of the mortar leads to the disintegration of the structure.

The utilisation of hardwood in wooden structures serves to extend the lifespan of the building. In Turkey, however, the majority of wooden structures are composed of softwood, which possesses a reduced lifespan, and with the decaying structures, traces of a way of life are also disappearing (Öcal & Dal, 2012).

4.5. Poor Workmanship and Use of Details

The components that constitute the structure must be integrated using a suitable bonding material and technique in order to ensure their strength. In cut stone structures, iron connection elements such as clamps and pins, which are susceptible to corrosion and are used to join blocks together, are not well insulated. Consequently, the ingress of water through the joints precipitates the oxidation of the iron components. The expansion of bolts and pins during the process of rusting has been shown to cause cracking in wall blocks and architectural components, including cornices and column capitals, due to the internal stress that is created. In the absence of intervention and the subsequent progression of deterioration, the architectural element will inevitably disintegrate.

In certain instances, it can prove to be a challenging task to rectify initial design errors. The rectification of such damage is typically addressed through the implementation of ongoing maintenance procedures. In the absence of an aesthetic disadvantage, the utilisation of a more suitable material is permissible. For instance, the replacement of iron bolts and rivets with stainless steel or titanium constitutes an appropriate solution.

In the absence of alternative solutions to preserve the structure, the initial design error is addressed through the implementation of a suitable detail solution. In regions experiencing high precipitation, sloping roofs equipped with a

robust protective coating are essential for safeguarding buildings. Flat roofs necessitate regular maintenance, and in the case of terrace roofs, ensuring effective waterproofing can be challenging, leading to deterioration due to condensation (Öcal & Dal, 2012).

4.6. Long-Term Natural Factors

Structures deteriorate over time due to the combined effects of natural elements and external forces. Without regular maintenance, significant damage can occur. Materials undergo thermal expansion during the summer months and undergo freezing during the winter months. The alternating temperature cycles result in material fatigue and deterioration. The movement of water within the building through the process of capillary action has also been demonstrated to cause damage to building materials. The phenomenon of moisture rising from the ground and saturating the structure has been shown to increase the load on the load-bearing system. Furthermore, the process of evaporation of salts carried within the moisture can lead to the formation of efflorescence on wall surfaces, which can have a detrimental effect on the physical and chemical structure of the wall.

Rainwater that is not rapidly eliminated from the structure, owing to a compromised roof or gutter, fosters an environment favourable for the proliferation of moss and weeds. The accumulation of moss is a common occurrence in areas where the integrity of the structure has been compromised, with the subsequent growth of fungi being a natural consequence. Such deterioration can be the harbinger of more extensive impairment, necessitating the implementation of continuous maintenance measures to avert more profound damage.

Furthermore, the abrasive effect of rainwater flowing over surfaces can also cause significant damage, especially to

monuments made of easily eroded stone. Freezing, a process associated with the presence of water, is also a significant factor contributing to the deterioration of monuments. The process of water entering cracks and freezing can be likened to the application of a wedge, thereby causing the cracks to widen and large pieces to break off.

The combination of frost with factors such as neglect, carelessness and poor detailing can result in damage that is difficult to repair and often costly to rectify. For instance, in the context of Ottoman architecture, the absence of lead in the railings that adorn the bottom of window frames during the winter months results in the expansion of water due to the freezing process. This expansion creates a fracture in the frame, specifically in the portion that is not affixed to the window iron (Öcal & Dal, 2012).

The dispersal of seeds by wind and their subsequent deposition on various surfaces, including roofs, wall cavities, and empty joints, has been observed to result in the germination of seeds, thereby facilitating the growth of trees such as figs and oleanders. These trees have been documented taking root and growing on the facades and roofs of numerous neglected buildings. The combination of wind, sea salt and sand has been identified as a primary factor in the accelerated and severe surface erosion observed in this region. Furthermore, the incessant impact of waves on coastal structures, piers, and ports leads to the phenomenon of erosion and wear. Another damage caused by waves is the weakening of the foundations of adjacent structures by eroding the ground under the docks, causing them to slide towards the sea. This phenomenon is further exacerbated by the lateral impact of tankers, steamships and other similar marine vessels, leading to intensified erosion of the ground and increased damage as the water recedes (Öcal & Dal, 2012).

The presence of groundwater and rivers has been demonstrated to have deleterious effects on the stability of foundations, as the soil is dragged away from beneath them, resulting in their unsupported state. In the event of sudden cracks and vertical separations being observed in buildings, measures are taken to attempt to save the structures.

It has been demonstrated that a variety of animals, including but not limited to birds, insects and mice, partake in activities that result in the destruction of monuments. It has been demonstrated that seagulls are capable of consuming their prey on the roofs of buildings, a process which involves the piercing of the lead covering. This has been shown to result in the occurrence of leakage in the structure of the building. The practice of pigeons breaching the windows of mosques to gain entry has been observed, with the subsequent construction of nests within the minaret cavities. This has led to the accumulation of significant quantities of manure and debris within the structures. Meanwhile, the presence of woodworms has been observed to result in the weakening of the structure due to their gnawing activity, which is gradually eroding the integrity of the wood from within. The process of deterioration of stonework is accelerated by the accumulation of lichens and microorganisms on the surface (Öcal & Dal, 2012).

4.7. Natural Disasters

It is an established fact that sudden and violent natural disasters, such as earthquakes, landslides, floods and typhoons, have the capacity to cause significant damage to historical environments and monuments. In this country, situated within a seismic zone, monuments have been damaged, destroyed, and rebuilt throughout history due to seismic activity (Öcal & Dal, 2012).

4.8. Damage Caused by Humans

The destruction of historical structures can be attributed to a number of factors, including neglect, abandonment, and deliberate destruction. The abandonment of a historical settlement and the neglect of its urban fabric and important monuments are frequently associated with social and economic problems. In many regions of Anatolia, it has been observed that ancient Greek villages, which were depopulated during the Population Exchange in the 1920s, have fallen into a state of dilapidation and disrepair. In Istanbul, the mansions in the Zeyrek and Süleymaniye neighborhoods have been left derelict due to the migration of their original owners to new areas of the city. These mansions have subsequently been converted into slums and rented out as temporary housing. Historical buildings that have been abandoned by their owners due to their discontent with the Ministry of Culture's decision to preserve them in their original state and their desire for them to be "demolished and rebuilt" are gradually falling into ruin on an annual basis (Öcal & Dal, 2012).

4.9. Misuse and Repairs

Uninformed alterations to historic structures have the potential to result in excessive loading or discontinuities in the structural system.

As articulated in Article 9 of the Venice Charter, restoration is a task that necessitates expertise. It is imperative to recognise that repairs executed by individuals lacking the necessary expertise in architecture and restoration, utilising substandard materials and techniques, are likely to fall short of the desired standard. Errors committed by conservation committees in determining the degree of protection for monuments, which define the historical and aesthetic values of monuments and the limits of intervention, also cause damage to monuments (Öcal & Dal, 2012).

4.10. Air Pollution

The presence of industrial waste, which pollutes the atmosphere, heating systems, coal-fired ships, and harmful gases emitted by motor vehicles, results in the formation of a dirty layer on buildings and also leads to acid rain that dissolves stones. The dissolution of stones is facilitated by acids that are formed when carbon dioxide, sulfur dioxide, and sulfur trioxide gases present in the atmosphere dissolve in rainwater. It has been demonstrated that decorations on wet surfaces are subject to a loss of detail, which can be attributed to the corrosive effect of the acid. In instances where facades become wet on occasion, a black, impermeable layer begins to form. The soot that accumulates on the facades obscures the architectural details, and the stones beneath this layer of dirt lose their properties and dissolve. With the passage of time, the affected crusts exhibit indications of sulfation, manifesting as swelling and flaking. The process of desquamation of calcium sulfate-rich stones is dependent on the depth of deterioration. The desquamation process may occur in layers, extending from the surface to the edge of the affected area (Öcal & Dal, 2012).

REFERENCES

- Ahunbay, Z. (2023), Tarihi Çevre Koruma ve Restorasyon. YEM Yayın, İstanbul.
- Ayönü, Y. (2009). İzmir’de Türk hâkimiyetinin başlaması. *Türk Dünyası İncelemeleri Dergisi*, 9(1), 1-8.
- Çavuş, M. (2011). *Tarihi Yapılarda Üst Örtülerin Çelik Malzeme İle Sağlamlaştırılmasının Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Modellenmesi* (Yayınlanmış doktora tezi). Gazi Üniversitesi, Ankara.
- Ersoy, A., & Ersoy, G. Ç. (2012). Smyrna/İzmir Kazıları Kemik Buluntuları. *Tüba-Ar Türkiye Bilimler Akademisi Arkeoloji Dergisi*, (15), 95-113.
- Ersoy, B. (1988). İzmir Hanları Üzerine Bazı Tespit Ve İncelemeler. *Ankara Üniversitesi Dil Ve Tarih-Coğrafya Fakültesi Dergisi*, 32(1-2).
- Öcal, A.D., & Dal, M. (2012). Doğal Taşlardaki Bozunmalar. Mimarlık Vakfı İktisadi İşletmesi, İstanbul.
- Yaygel, A. D. (2007). *Müdahale gerektiren tarihi kentsel çevrelere yönelik kullanıcı odaklı sağlıklaştırma yöntemlerinin irdelenmesi: İzmir-Basmahane bölgesi örneği* (Yayınlanmış yüksek lisans tezi). Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir.

USE OF WASTE AND ALTERNATIVE MATERIALS FOR THE PRODUCTION OF SUSTAINABLE ULTRA-HIGH-PERFORMANCE CONCRETE

Şirin KURBETCİ¹

Mahmut Cenk SAYIL²

1. INTRODUCTION

Ultra-high-performance concrete (UHPC) is a special type of concrete that offers ultra-high mechanical strength, high toughness and highly improved durability (Akhnoukh & Buckhalter, 2021; Niu et al., 2025). In Pierre Richard & Cheyrezy (1995), reactive powder concrete (RCP) was developed, marking an important milestone in the development of UPHC (Niu et al., 2025).

UHPC is an advanced cementitious composite, typically consisting of Portland cement, fine aggregate, steel fibers, silica fume (SF) and high-range water-reducing admixtures (HRWR) (Li et al., 2020; Richard & Cheyrezy, 1994; Richard & Cheyrezy, 1995). UHPC formulations utilize an optimized combination of fine aggregate and silica fume and a low water-to-cement ratio along with superplasticizers to achieve exceptional strength (Bajaber & Hakeem, 2021). According to ASTM C1856/C1856M (2017), UPHC is a cementitious composite having at least 120

¹ Associate Professor, Karadeniz Technical University, Faculty of Engineering, Department of Civil Engineering, ORCID: 0000-0002-2000-571X.

² Research Assistant, Karadeniz Technical University, Faculty of Engineering, Department of Civil Engineering, Corresponding Author, ORCID: 0009-0008-9588-3622.

MPa compressive strength, in addition to meeting specific durability, toughness and ductility requirements (Li et al., 2020a). When compared to conventional concrete, UHPC has greatly improved mechanical properties, making it suitable for prefabricated elements since it enables designers to reduce dead loads and element dimensions (Odler & Rößler, 1985; Rößler & Odler, 1985), superior durability, making it suitable for the use of infrastructure elements exposed to harsh environments, and self-healing capacity, due to high amount of unhydrated cement particles (Li et al., 2020a). Since UHPC has exceptional impact strength they are preferred in military structures and in other strategic structures where special protection against earthquakes are required, as well as for the reinforcement of reinforced concrete structures. They are also used to produce prefabricated elements (Özalp, 2006). Bridges, high-rise buildings, structural elements where cross-sectional dimensions are required to be reduced, nuclear installations (Bahmani & Mostofinejad, 2022; Noshiravani & Brühwiler, 2013), airports and stadiums (Fehling, are examples of most common applications of UHPC.

Whilst UPHC offers these advantages, it has major disadvantages such as high costs and environmental impacts owing to its high cement and fine quartz sand contents (Ferdosian & Camões, 2017; Guo et al., 2023; Wang et al., 2012; Yazici et al., 2008). Production of ordinary Portland cement (OPC) is thought to be the source of 8% of the total anthropogenic CO₂ emissions, contributing to greenhouse gas emissions significantly (Altuntas et al., 2025; Andrew, 2018). Thus, researchers have been seeking ways to promote sustainability in UHPC production by means of finding supplementary cementitious materials to replace OPC, and alternative, more sustainable sources of aggregates to replace quartz sand (Guo et al., 2023). In this regard, waste valorization is also of utmost importance. In addition to the use of construction and demolition waste,

especially recycling concrete waste, to promote sustainability in concrete production (Song, Peng, & Zhao, 2025), waste generated through the processes of different industries can also be integrated into mixture designs to preserve natural sources, reduce CO₂ emissions and contribute to the waste management policies. In this chapter, it is aimed to provide an insight into the use of alternative and waste materials for the production of more sustainable UHPC by reviewing the relevant literature and drawing conclusions. It is also expected that the results presented here will be beneficial for the decision makers for the development of new standards, instructing the practitioners to use alternative materials to produce UHPC, thus contributing to the literature by filling the gap caused by the lack of standards concerning the use of such materials for UHPC production.

2. COMPONENTS OF TYPICAL UHPC

A typical UHPC mixture design consists of high dosages of cement, silica fume, fine aggregate, superplasticizers and steel fibers. Water-to-cement ratio is kept as low as possible, such as 0.14-0.24 range (Shi et al., 2024). This low ratio ensures reduced porosity and high strength that is at least three times higher than that of conventional concrete (Aylas-Paredes et al., 2025; Odler & Rößler, 1985; Rößler & Odler, 1985; Shi et al., 2015). Coarse aggregates are typically excluded from UHPC. Dense microstructure of UHPC stems from the optimized use of cement particles with fine fillers and supplementary cementitious materials (Aylas-Paredes et al., 2025; Chan & Chu, 2004; Pierre Richard & Cheyrezy, 1995), to improve particle packing density. In addition, use of steel fibers increases toughness significantly by means of energy absorption, crack size and propagation control (Amran et al., 2022; Aylas-Paredes et al., 2025; Zollo,

1997). Table 1 summarizes typical components and dosages of UHPC.

Alternative and waste materials can be used for the production of UHPC either as a replacement to binders or aggregates. The followings sections will provide information on the use of alternative materials for binders and for aggregates, respectively, also highlighting their effects on the fresh, hardened and durability properties of UHPC as well as environmental performance. Also, the use of some new generation sustainable binders to produce UHPC will be briefly discussed.

3. REPLACEMENT OF CEMENT

Main CO₂ emission contributor of Portland cement production is the energy consumed to calcine and grind the clinker. Hence, although Portland cement has great performance, its environmental impact is high (Atasever & Erdoğan, 2024; Hasanbeigi, Price et al., 2010). One of the most straightforward approaches employed in order to reduce the environmental impacts of cement and concrete industry is using pozzolanic materials to partially replace cement. In this way, it is aimed to reduce the amount of clinker to be used, thus decreasing the greenhouse gas emissions arising from the calcination and grinding processes of the clinker. Most common pozzolans include fly ash (FA), silica fume and ground granulated blast furnace slag (GGBFS). (Hu et al., 2024; Lothenbach et al., 2011). However, the availability of these common pozzolans has become limited in the last years, causing the need to find other alternative materials (Hu et al., 2024; Lothenbach et al., 2011). The idea of contributing to waste valorization strategies while doing so is appealing. For this, the applicability of using other industries' waste for the production of UHPC has emerged as an intriguing idea. Thus, it is important to draw conclusions from existing

studies where these common pozzolans and recently explored other alternative and waste materials are used separately or together to produce UHPC. One such alternative mineral additive is limestone, being locally available in most regions. First reported as reactive by Soroka & Setter (1977) through nucleation effect and cement hydration acceleration properties, its effects on fresh and hardened properties were studied by many researchers (Jiang et al., 2024). Li et al. (2020b) utilized a combination of silica fume and limestone and the resulting UHPC reached 153 MPa compressive strength at the end of 28 days of curing, whilst enabling a significant 47% reduction in CO₂ emissions. It is reported that the degree of secondary pozzolanic hydration caused by silica fume is more intensive than alite/belite hydration, enabling the late-age strength development. Benefits of limestone powder were presented as two major contributions: Firstly, limestone powder reduced inter-particles fraction, caused an electrostatic repulsion between particles due to hydroxyl groups' localization Ca²⁺ surfaces, lowered the absorption and consumption of polycarboxylate ether particles of the superplasticizer, consequently ensuring the optimization of water content and superplasticizer dosage. Secondly, an optimum amount of limestone powder used led to a densified microstructure, most likely by filling effect, improved strength and reasonable total free shrinkage.

Another abundant material that may show pozzolanic behavior is clay. Clay, especially the ones containing a certain amount of kaolin, can be used as mineral additives when they are calcined. Calcined kaolinite clay is called as “metakaolin”. Metakaolin is a dehydroxylated aluminate-silicate (Aiswarya et al., 2013). When kaolinite clays are calcined at temperatures ranging in 600°C-900°C (Geu, Zhuge, Ma, & Pham, 2025; W. Li et al., 2022; Skibsted & Snellings, 2019), they gain an amorphous, reactive structure. Metakaolin is also very fine, making it a

competitive pozzolan candidate. In fact, it has good synergy with limestone, and a newly proposed binder called as Limestone Calcined Clay Cement (LC³), whose use to produce UHPC will be discussed, enables a higher clinker replacement ratio up to 50%. In one study utilizing this synergistic effect, Dong, Liu, & Hu (2023) reported that an overall 60% replacement of clinker with a calcined clay/limestone ratio of 2:1, 28-days compressive strength was higher than that of the reference sample.

Another waste material that is thought to replace cement clinker in UHPC production instead of typical pozzolanic materials is waste marble powder. In recent years, increased demand for marble has led to increased amount of marble waste that is generated during the cutting and polishing of marble. Depending on the type of marble and the production methods, amount of generated waste changes between 30%-50% of the total processed marble by volume (Rana et al., 2016; Rashad et al., 2025). When these wastes are not disposed of appropriately, they might pollute water and rivers (Piccini et al., 2019), soil (Danish et al., 2023; Rashad et al., 2025), air, and when these are not managed properly, they might lead to fully occupied landfill sites and the depletion of natural marble resources (Abbas & Muntean, 2025). Marble powder is fine and has a similar composition to that of limestone, thus it can be used as a mineral additive in cement and concrete production when its oxides could play roles in hydration reactions, or where it could be used as a filler only. There are studies in literature where marble powder is incorporated into UHPC mixture designs (Hardjasaputra et al., 2017; Metwally et al., 2025), confirming the applicability of waste marble powder use to produce cost effective and sustainable UHPC. In a comprehensive review, Metwally et al. (2025a) discussed the usability of fly ash, silica fume, ground granulated blast furnace slag, marble waste powder, basalt waste powder, glass waste powder and granite waste powder as

aggregate or cementitious material replacement to develop metakaolin-based ultra-high-performance geopolymer concrete (UHPCG). Results reported in the literature showed that these waste materials could help develop a cost-effective and more environmentally friendly UHPCG. Bahmani & Mostofinejad (2022) studied the use of slag, limestone, metakaolin, nano-silica, rice husk ash, zeolite, lithium slag, glass powder, cathode ray tube glass sand and incinerator bottom ash comparatively. Produced UHPC samples were studied through characterization methods such as scanning electron microscopy (SEM), x-ray diffraction (XRD), mercury intrusion porosimeter (MIP), thermogravimetric analysis (TGA) and energy dissipative x-ray spectroscopy (EDS). Results revealed that the use of marble powder up to a certain optimum level reduced porosity and improved strength and durability, the use of rice husk ash instead of silica fume reduced CH content and increased porosity, use of slag could reduce porosity, cathode ray tube glass sand increased C_2S/C_3S peak intensity but decreased C-S-H and weakened the bond between cement paste and fine aggregate. In an attempt to produce cementless UHPC, Peng et al. (2025) used calcium carbide residue (CCR) as an activator, incorporating SF and GGBFS. CCR is a byproduct of polyvinyl chloride production (Gong et al., 2022; Peng et al., 2025). Accumulation of this waste poses threats to the environment. The fact that CCR contains high amount of $Ca(OH)_2$ (Peng et al., 2025; Pourabbas Bilondi, Toufigh, & Toufigh, 2018) has paved the way for the investigation of the use of CCR as an activator. In this regard, produced specimens were characterized using XRD, SEM, TGA and MIP methods. Three different curing regimes were adopted, namely standard curing, high temperature curing and combined curing. XRD analyses revealed that calcite and portlandite were observed, coming from CCR, in samples cured under standard curing conditions. In addition, hydration of GGBFS provided additional portlandite. Adoption of high temperature curing promoted pozzolanic

reactions. Consequently, use of CCR, GGBFS and SF was found to be beneficial for cost-effective and sustainable UHPC production.

4. REPLACEMENT OF AGGREGATE

Since UHPC production requires a significantly higher amount of ultra-fine aggregate usage when compared to conventional concrete, related costs and CO₂ emissions are also elevated. In addition, natural river sand resources are being depleted. All these have led researchers to seek alternative aggregate sources (Bajaber & Hakeem, 2021; Hamada et al., 2023; zhang et al., 2025). Recycled aggregates that are typically obtained through crushing construction and demolition waste are important candidates, bearing in mind that they typically have poor mechanical properties and therefore must be improved. Guo et al. (2023) concluded that using 15% LC³ and 20% recycled aggregate could help producing sustainable UHPC with comparable mechanical properties, highlighting that the combined use of LC³ and recycled aggregates improved interfacial transition zones (ITZs). Yu, Feng, Leng, Wu, & Li (2025) reported that recycled fine aggregates improved by carbonation are suitable for producing sustainable UHPC with acceptable mechanical properties. Similarly, Ma et al. (2025) observed that using recycled fine aggregate with hybrid steel and polyethylene fibers led to improved mechanical performance and environmental performance.

5. USE OF SUSTAINABLE BINDERS

The development of clinker-based, magnesium-based and alkali-activated sustainable binders has become the focus of research on construction materials, due to the aforementioned

environmental issues related to the production of Portland cement. The use of these as binders to produce UHPC has gained attention due to increased CO₂ emissions related to the high cement content of UHPC (Li et al., 2021; Peng et al., 2025; Yang & Peng, 2015). Among these binders, LC³ stands out with its capability of reducing clinker by 50% by utilizing the synergy between calcined kaolinite clay and limestone. Dong et al. (2023) observed that when cement was replaced by LC³ at a replacement level of 60% and when calcined clay/limestone ratio was 2:1, 28d compressive strength was higher than that of the reference sample. Guo et al. (2023) combined LC³ with recycled fine aggregate to produce more sustainable UHPC with acceptable mechanical properties and the outcomes were promising as 30% LC³ combined with 30% recycled fine aggregate allowed for reduced CO₂ emissions whilst maintaining acceptable mechanical performance. Pozzolan reaction and nucleation effect of calcined clay accelerated the hydration. All LC³ participated in the hydration reactions. MIP results revealed improvements in pore size distribution after LC³ addition. Also, 30% LC³ incorporation reduced porosity. Huang et al. (2024) produced UHPC with LC³, seawater and sea sand incorporation and employed different curing regimes. LC³ incorporated samples showed highest compressive and flexural strengths across all curing ages and regimes. Limestone powder decreased chloride diffusion coefficient by 4.3%, whilst addition of calcined clay further decreased it, as it was reduced by 35%-40.4% when 20% calcined clay was used. This was attributed to the pozzolanic reaction of calcined clay and pore structure refinement caused by carboaluminates. Thus, it was demonstrated that LC³ incorporation improved mechanical performance and chloride resistance of seawater and sea sand incorporated UHPC. Use of another clinker based sustainable binder, calcium sulfoaluminate (CSA) cement is also the focus point of research conducted on sustainable UHPC. J. Y. Wang, Chen, & Wu (2019) reported that

CSA-UHPC hardened quickly, reaching 62 MPa compressive strength and 4.4 MPa tensile strength at the end of the first four hours. Cui et al. (2022) reported significant improvements in sulfate resistance of UHPC when CSA cement is incorporated. Meng et al. (2024) observed reductions in CO₂ emissions and energy consumption by 25%-40% and 25%-35%, respectively, when CSA cement was incorporated in UHPC (Meng, Gao, Yang, & Fang, 2025). Magnesium-based binders are also utilized in UHPC. Qin et al. (2022) observed lower shrinkage, higher early strength and on par 28d strength when magnesium phosphate cement (MPC) was used in UHPC. These were attributed to denser microstructure, refined pore structure and strengthened matrix-aggregate interface, when MPC was used with ultra-fine fly ash.

6. CONCLUSIONS

UHPC is a superior cementitious material produced by using cement, silica fume, fine aggregate, fibers and superplasticizers, and possesses significantly improved mechanical performance, durability and toughness when compared to conventional concrete. However, high cement and fine aggregate dosages required to formulate a proper UHPC increases greenhouse gas emissions dramatically. To overcome this, numerous studies have been conducted by employing alternative and/or waste materials to replace cement or aggregate in UHPC designs. In addition, new generation sustainable binders such as LC³, CSA cement or MPC are also incorporated in UHPC designs to replace cement. Studies in which waste materials such as silica fume, fly ash, ground granulated blast furnace slag, marble powder, basalt powder, zeolite, glass powder and recycled aggregate are used together or combined with binders such as LC³, CSA cement or MPC show promising results in terms of

reducing the costs and greenhouse gas emissions associated with the distinctive mixture designs of UHPC, whilst maintaining acceptable mechanical and durability performances. In addition, the use of waste materials is shown to be valuable as it contributes to waste management strategies and preservation of natural resources.

REFERENCES

- Abbas, M. M., & Muntean, R. (2025). Marble Powder as a Sustainable Cement Replacement: A Review of Mechanical Properties. *Sustainability*, 17(2), 736. doi: 10.3390/su17020736
- Aiswarya, S., Arulraj, P., & Dilip, C. (2013). A review on use of metakaolin in concrete. *Engineering Science and Technology: An International Journal (ESTIJ)*, 3(3).
- Akhnoukh, A. K., & Buckhalter, C. (2021). Ultra-high-performance concrete: Constituents, mechanical properties, applications and current challenges. *Case Studies in Construction Materials*, 15. doi: 10.1016/j.cscm.2021.e00559
- Altuntas, I. O., Ozturk, O., & Yildirim, G. (2025). Exploring the viability of low-grade Turkish clays in the development of limestone calcined clay cement (LC3) and mortars. *Construction and Building Materials*, 463, 140077. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2025.140077
- Amran, M., Huang, S. S., Onaizi, A. M., Makul, N., Abdelgader, H. S., & Ozbakkaloglu, T. (2022). Recent trends in ultra-high performance concrete (UHPC): Current status, challenges, and future prospects. *Construction and Building Materials*, Vol. 352. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2022.129029
- Andrew R.M. (2018). Global CO₂ emissions from cement production. *Earth System Science Data*, 10(4).
- ASTM C1856/C1856M. (2017). Standard practice for fabricating and testing specimens of ultra-high performance concrete. *ASTM International*, i.
- Atasever, M., & Erdoğan, S. T. (2024). Characterization of Limestone Calcined Clay Cement Made with Calcium

- Sulfoaluminate Clinker. *International Journal of Civil Engineering*, 22(12), 2407–2419. doi: 10.1007/s40999-024-01009-5
- Aylas-Paredes, B. K., Han, T., Neithalath, A., Huang, J., Goel, A., Kumar, A., & Neithalath, N. (2025). Data driven design of ultra high performance concrete prospects and application. *Scientific Reports*, 15(1), 9248. doi: 10.1038/s41598-025-94484-2
- Bahmani, H., & Mostofinejad, D. (2022). Microstructure of ultra-high-performance concrete (UHPC) – A review study. *Journal of Building Engineering*, Vol. 50. doi: 10.1016/j.jobbe.2022.104118
- Bajaber, M. A., & Hakeem, I. Y. (2021). UHPC evolution, development, and utilization in construction: A review. *Journal of Materials Research and Technology*, Vol. 10. doi: 10.1016/j.jmrt.2020.12.051
- Chan, Y. W., & Chu, S. H. (2004). Effect of silica fume on steel fiber bond characteristics in reactive powder concrete. *Cement and Concrete Research*, 34(7). doi: 10.1016/j.cemconres.2003.12.023
- Cui, K., Liang, K., Chang, J., & Lau, D. (2022). Investigation of the macro performance, mechanism, and durability of multiscale steel fiber reinforced low-carbon ecological UHPC. *Construction and Building Materials*, 327. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2022.126921
- Danish, A., Öz, A., Bayrak, B., Kaplan, G., Aydın, A. C., & Ozbakkaloglu, T. (2023). Performance evaluation and cost analysis of prepacked geopolymers containing waste marble powder under different curing temperatures for sustainable built environment. *Resources, Conservation*

and Recycling, 192. doi:
10.1016/j.resconrec.2023.106910

- Dong, Y., Liu, Y., & Hu, C. (2023). Towards greener ultra-high performance concrete based on highly-efficient utilization of calcined clay and limestone powder. *Journal of Building Engineering*, 66. doi: 10.1016/j.jobbe.2023.105836
- Fehling, E., Schmidt, M., Walraven, J., Leutbecher, T., & Fröhlich, S. (Eds.). (2014). *Ultra-High Performance Concrete UHPC*. Wiley. doi: 10.1002/9783433604076
- Ferdosian, I., & Camões, A. (2017). Eco-efficient ultra-high performance concrete development by means of response surface methodology. *Cement and Concrete Composites*, 84. doi: 10.1016/j.cemconcomp.2017.08.019
- Geu, M. J., Zhuge, Y., Ma, X., & Pham, T. M. (2025). Optimising calcination temperature for high reactivity metakaolin: Influence on amorphous content, mineralogy and microstructure. *Construction and Building Materials*, 489, 142431. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2025.142431
- Gong, X., Zhang, T., Zhang, J., Wang, Z., Liu, J., Cao, J., & Wang, C. (2022). Recycling and utilization of calcium carbide slag - current status and new opportunities. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 159. doi: 10.1016/j.rser.2022.112133
- Guo, D., Guo, M., Xing, F., Zhou, Y., Huang, Z., & Cao, W. (2023). Using limestone calcined clay cement and recycled fine aggregate to make ultra-high-performance concrete: Properties and environmental impact. *Construction and Building Materials*, 394. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2023.132026

- Hamada, H. M., Shi, J., Abed, F., Al Jawahery, M. S., Majdi, A., & Yousif, S. T. (2023). Recycling solid waste to produce eco-friendly ultra-high performance concrete: A review of durability, microstructure and environment characteristics. *Science of the Total Environment*, Vol. 876. doi: 10.1016/j.scitotenv.2023.162804
- Hardjasaputra, H., Widjajakusuma, J., Hoo, D., & Dewobroto, W. (2017). The Strength of Mini Shell Structure Made from Ultra High Performance Polypropylene Fiber Reinforced Concrete. *Procedia Engineering*, 171. doi: 10.1016/j.proeng.2017.01.434
- Hasanbeigi, A., Price, L., Lu, H., & Lan, W. (2010). Analysis of energy-efficiency opportunities for the cement industry in Shandong Province, China: A case study of 16 cement plants. *Energy*, 35(8). doi: 10.1016/j.energy.2010.04.046
- Hu, Y., Xiong, L., Yan, Y., & Geng, G. (2024). Performance of limestone calcined clay cement (LC3) incorporating low-grade marine clay. *Case Studies in Construction Materials*, 20, e03283. doi: 10.1016/j.cscm.2024.e03283
- Huang, Y., Wang, J., Jing, Y., Yang, G., Song, J., You, W., & Liu, X. (2024). Mechanical properties and chloride resistance of ultra-high-performance seawater sea-sand concrete with limestone and calcined clay cement (UHPSSC-LC3) under various curing conditions. *Journal of Building Engineering*, 97, 110767. doi: 10.1016/j.jobe.2024.110767
- Jiang, Z., Yang, Q., Wang, B., Li, C., Zhang, J., & Ren, Q. (2024). Limestone filler as a mineral additive on the compressive strength and durability of self-compacting concrete with limestone manufactured sand. *Journal of Building Engineering*, 94, 109965. doi: 10.1016/j.jobe.2024.109965

- Li, Jinhui, Wang, X., Chen, D., Wu, D., Han, Z., Hou, D., ... Yin, B. (2021). Design and application of UHPC with high abrasion resistance. *Construction and Building Materials*, 309. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.125141
- Li, Junquan, Wu, Z., Shi, C., Yuan, Q., & Zhang, Z. (2020a). Durability of ultra-high performance concrete – A review. *Construction and Building Materials*, 255, 119296. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.119296
- Li, P. P., Brouwers, H. J. H., Chen, W., & Yu, Q. (2020b). Optimization and characterization of high-volume limestone powder in sustainable ultra-high performance concrete. *Construction and Building Materials*, 242. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.118112
- Li, W., Hua, L., Shi, Y., Wang, P., Liu, Z., Cui, D., & Sun, X. (2022). Influence of metakaolin on the hydration and microstructure evolution of cement paste during the early stage. *Applied Clay Science*, 229. doi: 10.1016/j.clay.2022.106674
- Lothenbach, B., Scrivener, K., & Hooton, R. D. (2011). Supplementary cementitious materials. *Cement and Concrete Research*, 41(12), 1244–1256. doi: 10.1016/j.cemconres.2010.12.001
- Ma, R.-Y., Zhang, Z.-L., Wei, J.-H., Zhuo, F.-Y., Zhang, H., Jiang, F., ... Zhu, J.-X. (2025). Hybrid-fiber-reinforced strain-hardening ultra-high-performance concrete (SH-UHPC) with recycled fine aggregates. *Case Studies in Construction Materials*, 22, e04869. doi: 10.1016/j.cscm.2025.e04869
- Meng, Y., Gao, D., Yang, L., & Fang, J. (2025). A green ultra-high performance calcium sulfoaluminate cement concrete containing recycled fine aggregate: Mechanical

- properties, microstructure and environmental impact. *Construction and Building Materials*, 489, 140641. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2025.140641
- Meng, Y., Gao, D., Yang, L., Fang, J., Li, Y., & Zhang, T. (2024). Effect of ultra-fine supplementary cementitious materials on the properties of calcium sulfoaluminate cement-based ultra-high performance concrete. *Case Studies in Construction Materials*, 21, e03547. doi: 10.1016/j.cscm.2024.e03547
- Metwally, G. A. M., Elemam, W. E., Mahdy, M., & Ghannam, M. (2025a). A comprehensive review of metakaolin-based ultra-high-performance geopolymer concrete enhanced with waste material additives. *Journal of Building Engineering*, 103, 112019. doi: 10.1016/j.jobbe.2025.112019
- Metwally, G. A. M., Elemam, W. E., Mahdy, M., & Ghannam, M. (2025b). Metakaolin-based ultra-high-performance geopolymer concrete, role of basalt, glass, granite, and marble waste powders. *Innovative Infrastructure Solutions*, 10(11), 527. doi: 10.1007/s41062-025-02281-7
- Niu, F., Liu, Y., Xue, F., Sun, H., Liu, T., He, H., ... Liao, H. (2025). Ultra-high performance concrete: A review of its material properties and usage in shield tunnel segment. *Case Studies in Construction Materials*, 22, e04194. doi: 10.1016/j.cscm.2024.e04194
- Noshiravani, T., & Brühwiler, E. (2013). Experimental investigation on reinforced ultra-high-performance fiber-reinforced concrete composite beams subjected to combined bending and shear. *ACI Structural Journal*, 110(2). doi: 10.14359/51684405

- Odler, I., & Rößler, M. (1985). Investigations on the relationship between porosity, structure and strength of hydrated Portland cement pastes. II. Effect of pore structure and of degree of hydration. *Cement and Concrete Research*, 15(3). doi: 10.1016/0008-8846(85)90113-9
- Özalp, F. (2006). *Ultra Yüksek Performanslı Betonların Mekanik Davranışı*. İstanbul Technical University, İstanbul.
- Peng, G.-F., Wang, P.-J., Peng, Y.-C., Zhang, G., Huang, Y.-Z., Niu, X.-J., & Ding, H. (2025). Novel cementless ultra-high performance concrete using calcium carbide residue as activator by the aid of combined curing. *Materials and Structures*, 58(1), 38. doi: 10.1617/s11527-024-02564-y
- Piccini, L., Di Lorenzo, T., Costagliola, P., & Galassi, D. M. P. (2019). Marble Slurry's impact on groundwater: The case study of the Apuan Alps Karst aquifers. *Water (Switzerland)*, 11(12). doi: 10.3390/w11122462
- Pourabbas Bilondi, M., Toufigh, M. M., & Toufigh, V. (2018). Using calcium carbide residue as an alkaline activator for glass powder-clay geopolymer. *Construction and Building Materials*, 183. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.06.190
- Qin, J., Dai, F., Ma, H., Dai, X., Li, Z., Jia, X., & Qian, J. (2022). Development and characterization of magnesium phosphate cement based ultra-high performance concrete. *Composites Part B: Engineering*, 234. doi: 10.1016/j.compositesb.2022.109694
- Rana, A., Kalla, P., Verma, H. K., & Mohnot, J. K. (2016). Recycling of dimensional stone waste in concrete: A review. *Journal of Cleaner Production*, Vol. 135. doi: 10.1016/j.jclepro.2016.06.126

- Rashad, A. M., Mokhtar, M. M., El-Nashar, M. H., & Abu-Elwafa Mohamed, R. (2025). Waste marble powder emerges as a promising material choice to enhance the properties of alkali-activated slag cement. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, 43, 101864. doi: 10.1016/j.scp.2024.101864
- Richard, P., & Cheyrezy, M. H. (1994). Reactive powder concretes with high ductility and 200-800 mpa compressive strength. *American Concrete Institute, ACI Special Publication, SP-144*. doi: 10.14359/4536
- Richard, Pierre, & Cheyrezy, M. (1995). Composition of reactive powder concretes. *Cement and Concrete Research*, 25(7). doi: 10.1016/0008-8846(95)00144-2
- Rößler, M., & Odler, I. (1985). Investigations on the relationship between porosity, structure and strength of hydrated portland cement pastes I. Effect of porosity. *Cement and Concrete Research*, 15(2). doi: 10.1016/0008-8846(85)90044-4
- Shi, C., Wu, Z., & Banthia, N. (2024). *Ultra-High Performance Concrete*. London: CRC Press. doi: 10.1201/9781003203605
- Shi, C., Wu, Z., Xiao, J., Wang, D., Huang, Z., & Fang, Z. (2015). A review on ultra high performance concrete: Part I. Raw materials and mixture design. *Construction and Building Materials*, Vol. 101. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.10.088
- Skibsted, J., & Snellings, R. (2019). Reactivity of supplementary cementitious materials (SCMs) in cement blends. *Cement and Concrete Research*, Vol. 124. doi: 10.1016/j.cemconres.2019.105799
- Song, J., Peng, L., & Zhao, Y. (2025). Synergetic valorization of recycled aggregates and waste glass powder in

- sustainable concrete: Microstructure, mechanical strength, and bonding performance. *Construction and Building Materials*, 458, 139609. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2024.139609
- Soroka, I., & Setter, N. (1977). The effect of fillers on strength of cement mortars. *Cement and Concrete Research*, 7(4). doi: 10.1016/0008-8846(77)90073-4
- Wang, C., Yang, C., Liu, F., Wan, C., & Pu, X. (2012). Preparation of Ultra-High Performance Concrete with common technology and materials. *Cement and Concrete Composites*, 34(4). doi: 10.1016/j.cemconcomp.2011.11.005
- Wang, J. Y., Chen, Z. Z., & Wu, K. (2019). Properties of calcium sulfoaluminate cement made ultra-high performance concrete: Tensile performance, acoustic emission monitoring of damage evolution and microstructure. *Construction and Building Materials*, 208. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.03.057
- Yang, J., & Peng, G. F. (2015). Mechanical properties of reactive power concrete and ultra-high strength concrete with coarse aggregate. *Key Engineering Materials*, 629–630. doi: 10.4028/www.scientific.net/KEM.629-630.112
- Yazici, H., Yiğiter, H., Karabulut, A. Ş., & Baradan, B. (2008). Utilization of fly ash and ground granulated blast furnace slag as an alternative silica source in reactive powder concrete. *Fuel*, 87(12). doi: 10.1016/j.fuel.2008.03.005
- Yu, R., Feng, Y., Leng, Y., Wu, Z., & Li, S. (2025). Development of a green ultra-high performance concrete (UHPC) based on carbonated recycled aggregate with different strengths. *Journal of Sustainable Cement-Based*

Materials, 14(9), 1809–1824. doi:
10.1080/21650373.2025.2477314

zhang, J., Deng, S.-W., Li, Y.-F., Ma, H.-Y., Liu, H.-B., & Bai, Q. (2025). Utilizing molybdenum tailings to prepare eco-friendly ultra-high performance concrete (UHPC): Workability, mechanical properties and life-cycle assessment. *Case Studies in Construction Materials*, 22, e04501. doi: 10.1016/j.cscm.2025.e04501

Zollo, R. F. (1997). Fiber-reinforced concrete: An overview after 30 years of development. *Cement and Concrete Composites*, Vol. 19. doi: 10.1016/s0958-9465(96)00046-7

MODELLING RAILWAY PASSENGER DEMAND: APPROACHES AND CURRENT TRENDS

Mebrure İtir GEVREK¹

Mustafa Kürşat ÇUBUK²

1. INTRODUCTION

Accurate and reliable modeling of railway passenger demand is critical for both infrastructure investment planning and operational strategy development. Especially with the proliferation of high-speed train systems, diversification of data sources, and increasing complexity of passenger behavior, demand forecasting has evolved from a mere technical computational problem to a multidisciplinary field of research. This section first examines the historical evolution and current trends of railway passenger transport, then discusses traditional approaches such as regression, time series, and the four-stage model. It then examines OD matrix models, data sources, and forecasting methods under uncertainty, and evaluates the opportunities offered by contemporary machine learning and deep learning-based models. Finally, a holistic framework for railway passenger demand forecasting is presented, addressing explainable artificial intelligence, gaps in the literature, and future research areas.

¹ İnşaat Yüksek Mühendisi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Fakültesi, mebrure.itir@gmail.com, ORCID: 0009-0005-7131-1775

² Doç. Dr., Gazi Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü, ORCID: 0000-0001-8155-7123.

2. EVOLUTION AND CURRENT TRENDS OF RAILWAY PASSENGER TRANSPORTATION

Rail passenger transport has been a fundamental component of modern mobility since the industrial revolution. It is not just a mode of transportation; it also has a decisive influence on economic growth, urbanization, and social mobility. With the acceleration of industrialization from the early 19th century onward, railways became a strategic infrastructure connecting production centers; the Liverpool-Manchester line, which opened in 1830, is considered the beginning of modern rail transport. The speed and capacity offered by railways transformed spatial organization by making long-distance travel more accessible.(Campos & de Rus, 2009).

With the development of high-speed train (HST) systems in countries such as Japan, France, Germany and China since the second half of the 20th century, railway systems have become competitive with road and air transport thanks to both time savings and travel comfort (Givoni, 2006). While the time savings and environmental benefits offered by HST systems are frequently emphasized in the literature, it is also stated that they can lead to financial sustainability problems in low-density areas (Zhang et al., 2023; Albalade & Bel, 2012; Chen & Haynes, 2017).

Rail transport in Türkiye was seen as a key development tool in the early years of the Republic; however, it was relegated to the background due to road-oriented policies after 1950. With the YHT projects in the 2000s, rail once again became a central focus of national transportation policies, and passenger demand on the Ankara-Eskişehir, Ankara-Konya, and Ankara-Istanbul lines increased significantly. While users prioritize comfort, safety, and time savings, issues such as accessibility and line density are still cited as areas requiring improvement. (TCDD, 2022; Celikkol-Koçak et al., 2017).

The historical development of rail passenger transport is a multilayered process shaped by technological innovations and social transformations. Therefore, demand forecasting requires a holistic approach that takes into account economic, spatial, and behavioral dynamics.

3. TRADITIONAL APPROACHES TO PASSENGER DEMAND FORECASTING

Traditional methods used in transportation demand forecasting have formed the fundamental frameworks that have guided both academic and applied research for many years. The common denominator of these models is that they explain transportation demand based on specific mathematical assumptions. While these methods were effective in times of limited data resources, the increasing complexity of today's transportation systems has necessitated a reevaluation of their strengths and weaknesses. In this context, regression models, time series approaches, and the four-stage model are the most widely used traditional methods in the literature (Banerjee et al., 2020).

3.1. Regression and Linear Models

Regression models are fundamental methods for explaining the relationships between socioeconomic and spatial variables such as population, income, car ownership, and land use, and passenger demand. The interpretability of coefficients provides a powerful advantage for policymakers. However, due to their reliance on linear assumptions, they cannot always accurately represent real-world nonlinear, interactive, and dynamic behavior. This can limit model performance, particularly in environments experiencing sudden demand shocks (Yang et al., 2017; Montero-Lamas & Fernández-Casal, 2024). Despite this, regression models remain an important starting point in transportation research due to their high interpretability.

3.2. Time Series Approaches: ARIMA, ETS, and Hybrid Models

Time series methods are powerful tools for analyzing trends, seasonality, and random variations in passenger numbers measured at regular intervals. ARIMA models generate forecasts based on past values, while ETS models generate forecasts based on trend, seasonality, and error components. They are quite successful in short-term forecasts on routes with regular demand patterns. However, the difficulty of directly incorporating exogenous variables into the models creates limitations in factors such as sudden policy changes or special event effects. Therefore, hybrid approaches such as ARIMAX and ETS-ANN are gaining increasing attention in the literature (Borucka & Mazurkiewicz, 2021; Hyndman & Rostami-Tabar, 2025).

3.3. Four-Stage Transportation Model

The four-stage model is a classic planning tool consisting of four basic components: trip generation, trip distribution, mode selection and line assignment (Zhou, Chen, & Wong, 2009). It has been used as a reference model for many years in large-scale transportation projects. However, its assumption of independent relationships between stages and its limited reflection of individual behavioral differences are significant criticisms. Despite this, the systematic structure it offers in scenario analysis still places the method in a prominent position in strategic planning.

Generally, traditional methods form the basis of the transportation demand forecasting literature; however, the complex and data-intensive nature of modern transportation systems often dictates that these methods are inadequate. Therefore, in current research, the traditional approach is often considered a complementary framework and remains valuable, particularly in studies where interpretability is paramount.

4. OD MATRIX MODELS, DATA SOURCES AND UNCERTAINTY APPROACHES

Origin–Destination (OD) matrices are fundamental structures that represent the origin and destination of trips and are central to transportation planning. These matrices allow for the analysis of spatial relationships as well as changes in trip behavior over time. The increasing complexity of transportation systems has transformed OD modeling into a more comprehensive field of research, both theoretically and practically.

4.1. Static and Dynamic OD Models: Conceptual Structure and Applications

Static OD models represent average travel flows for a specific period. Due to their low data requirements and ease of calculation, they have been used as a primary method for many years, making them particularly effective in strategic and long-term planning (Żochowska, 2012). However, its inability to reflect intraday variability, event-induced demand increases, and congestion dynamics is a significant limitation (Carvalho, 2014).

Dynamic OD models, on the other hand, represent hourly or minute-by-minute flow changes, capturing the temporal variation of demand more realistically. The development of intelligent transportation systems and the increase in high-resolution data sources have strengthened the applicability of these models (Zúñiga et al., 2021). However, high data synchronization and computational costs pose significant challenges in implementation (Zargari et al., 2021).

In general, static models are prominent in macro-scale planning, while dynamic models are prominent in operational and short-term decision processes.

4.2. OD Estimation Based on Data Sources: From Classical Approaches to the Digitalization Age

The accuracy of OD matrices is directly related to the quality of the data sources used. While household travel surveys have traditionally been the primary data source, they have limitations such as cost, time-consuming, and low timeliness (Cui, 2006).

Although sensor data (cameras, detectors) reliably measure traffic flow, these data do not directly produce OD information; additional modeling and derivation processes are required to obtain OD matrices (Torres et al., 2021). With digitalization, GPS/mobile device data has become a powerful alternative due to its high spatial and temporal resolution; however, privacy and data processing costs are important factors to consider (Alsger et al., 2016).

Public transport ticket and card pass data is one of the most reliable data sources for OD estimation, thanks to the direct recording of start and end stations. Continuity, broad coverage, and low error rates have made this data type even more important in recent years.

4.3. OD Estimation Under Uncertainty: Modern Approaches and Theoretical Foundations

Uncertainty is a fundamental component of estimation processes because real-world OD data can be incomplete, irregular, or noisy. Bayesian approaches represent OD elements with probability distributions, supplementing missing data with prior knowledge. MCMC methods allow for in-depth analysis of uncertainty by sampling the matrix's possible distributions (Perrakis et al., 2012).

Gaussian processes show high performance especially on small data sets thanks to their nonparametric structure (Huo et al.,

2023). Maximum entropy methods, on the other hand, focus on producing the most unbiased matrix structure with limited data. Fuzzy logic approaches are also used in some contexts to represent qualitative aspects of uncertainty (Carvalho, 2014).

In this context, OD estimation is not merely a mathematical problem; it is a multifaceted research area related to data quality, method flexibility, and decision support systems. Current trends suggest that dynamic OD estimation, big data analytics, and multi-data source integration will play a more central role in the future.

5. THE AGE OF MACHINE LEARNING: NEW METHODS AND TRANSFORMATION IN TRANSPORTATION PLANNING

The proliferation of machine learning (ML) and deep learning (DL) methods in the transportation field is one of the most obvious indicators of the paradigm shift in demand forecasting. In contrast to the linear and limited representational power of traditional models, ML/DL approaches offer the capacity to directly learn complex patterns in data, represent multidimensional relationships, and process spatial and temporal dependencies within the same structure. These features have led to an increasing reliance on these methods in modern railway demand forecasting. This section comprehensively examines the fundamental principles of ML/DL methods, their transportation applications, and examples in the context of railway demand.

5.1. Artificial Neural Networks: Modeling Nonlinear Relationships

Artificial neural networks (ANNs) distinguish themselves from traditional statistical methods by capturing nonlinear relationships thanks to their multilayered structure. ANN models

offer a powerful alternative, particularly in datasets where demand is shaped by multiple variables simultaneously and where seasonality and irregular fluctuations coexist (Vlahogianni, E. I., Karlaftis, M. G., & Golias, J. C. ,2005).

ANNs have a wide range of applications in the transportation literature. Effective results have been obtained in many areas, including travel time estimation, traffic volume projections, passenger demand modeling, and mode choice analysis. Specifically, in the context of railway passenger demand, ANNs demonstrate particularly strong performance in understanding complex patterns observed in ticket sales data, peak holiday behavior, and differences among passenger segments (Lv, Y., Duan, Y., Kang, W., Li, Z., & Wang, F.-Y. 2015).

The most significant advantage of ANNs is that they learn the relationships between variables from the content of the data, not from a predefined form. However, these models are vulnerable to overfitting, necessitating meticulous data preprocessing. Nevertheless, ANNs remain a valuable tool in complex transportation systems, both in terms of accuracy and flexibility (Polson, N. G., & Sokolov, V. O. ,2017).

5.2. Time-Dependent Deep Learning Models: LSTM and GRU

While recurrent neural networks (RNNs) initially offered a valuable solution for datasets containing temporal dependencies, difficulties in capturing long-term relationships necessitated the need for advanced models such as LSTM and GRU. LSTM's ability to maintain long-term memory, thanks to its gating mechanisms, allows it to effectively learn trends and seasonality patterns in demand series. Similarly, GRU's lighter and more computationally efficient structure offers a significant

advantage in big data applications (Hochreiter, S., & Schmidhuber, J., 1997).

Demand forecasting literature demonstrates that LSTM and GRU models provide significantly higher accuracy than traditional time series methods such as ARIMA and ETS, particularly during periods of irregular demand spikes and with high-frequency passenger data. In the railway context, these models can more realistically represent the impact of variable factors such as holiday periods, special events, and weather conditions (Zhang, Y., & Zheng, Y., 2022).

5.3. CNN, Transformer and Hybrid Architectural Approaches

One of the key contributions of deep learning architectures to the transportation field is their ability to learn spatial relationships. Because OD matrices and inter-station travel relationships involve spatial dependencies, CNN models can effectively learn these structures by treating them as an image processing problem. These models are widely used in metro and rail networks to uncover station interactions, density distributions, and regional demand clusters.

In recent years, Transformer architectures have gained prominence in time series forecasting; thanks to their attention mechanism, they have demonstrated stronger performance compared to sequential models like LSTM by directly learning long-term dependencies. Transformer models are particularly effective in multivariate series and in situations where sudden demand changes occur.

With these developments, hybrid architectures have gained importance. Models like CNN–LSTM combine spatial and temporal information, while structures like LSTM–XGBoost or Transformer–MLP are effective in reducing errors. Literature demonstrates that hybrid approaches offer higher accuracy than

single models, particularly when multiple OD pairs are modeled together.

5.4. Evaluating Model Performance: Accuracy, Generalization, and Computational Requirements

Merely assessing accuracy metrics is not sufficient when evaluating machine learning models. For demand forecasting to be effective, models' generalization capacity, computational requirements, and compatibility with data preparation processes must also be considered. Common metrics such as MAE, RMSE, MAPE, and R^2 measure model accuracy, while techniques such as cross-validation, dropout, and early stopping are crucial for preventing overfitting.

It's clear that deep learning models require high computational power. Therefore, factors such as GPU capabilities, model complexity, and training time are critical in applied research. Similarly, data cleaning, handling missing values, and harmonizing multi-source information are among the factors that directly determine model performance.

This section examines in detail the potential offered by machine learning and deep learning approaches in the context of railway passenger demand. Modern models offer significant advantages over traditional methods, including their ability to learn nonlinear relationships, process multi-source data, and simultaneously model spatial and temporal patterns. However, the model architecture requirements, the importance of data preparation, and computational costs necessitate careful application of these methods. Overall, it appears that ML/DL approaches are assuming an increasingly critical role in railway planning, and future demand forecasting research will focus on these areas.

6. EXPLAINABLE ARTIFICIAL INTELLIGENCE: TRANSPARENCY, ACCOUNTABILITY, AND MODEL INTERPRETATION

The proliferation of machine learning and deep learning methods in the transportation field has introduced new requirements beyond simply providing high accuracy. In a public service area like rail passenger demand, it's not enough for models to simply produce accurate results; the rationale behind these results must also be understandable. Explainable Artificial Intelligence (XAI) provides a transparent and reliable interpretation framework for both users and policymakers by making the decision-making processes of complex models visible. XAI allows us to understand which features a model prioritizes and how it behaves in different scenarios; this is crucial for fairness, resource allocation, and decision accuracy in transportation planning.

6.1. SHAP and LIME: Model-Agnostic Explanation Frameworks

SHAP (Shapley Additive Explanations) is an explanation method that calculates the contribution of each feature to the model using Shapley values based on game theory. It provides a consistent analysis framework at both the global level (which variable has the greatest impact on the overall model?) and the local level (why did a single prediction occur in this way?) (Adadi, A., & Bouhoute, A. 2023).

In the context of rail demand forecasting, SHAP provides particularly powerful insights in the following areas:

- Identifying the most critical factors determining demand in specific OD pairs,
- Explaining how ticket price elasticity varies across station pairs,
- Examining which inputs the model gives more weight to during holiday and special event period.

Thanks to these features, SHAP is an effective tool for both assessing model validity and producing interpretable outputs for policy makers.

Local Interpretable Model-Agnostic Explanations (LIME) creates a local linear representation around the model to explain individual forecasts. This method is particularly suitable for examining in detail the characteristics that give rise to a particular forecast. In transportation research, LIME is often used to explain sudden demand spikes or to understand the causes of unexpected forecast deviations(Li, Z. 2023).

6.2. Model-Specific Explanation Techniques: Understanding the Internal Structure of Deep Models

Deep learning models are often considered "black boxes" due to their multilayered structure. However, various methods developed in recent years aim to make the internal behavior of these models more understandable.

Integrated Gradients (IG). IG analyzes how model output relates to input features using a gradient-based method. In time series models like LSTM, the predictive effects of data points in specific time periods can be more clearly seen.

Layer-wise Relevance Propagation (LRP). LRP monitors the distribution of activation across the layers of a neural network, revealing the internal processes that led to a decision. This method is a powerful tool for improving explainability, especially in multilayer neural networks(Sundararajan, M., Taly, A., & Yan, Q. ,2017).

Surrogate Models and Partial Dependence Plots (PDP). Surrogate models are simpler structures that mimic a complex model, making its overall trends more understandable. A PDP, on the other hand, graphically displays the impact of a single feature

on the model output, providing valuable visual insight, particularly in policy analysis(Montavon, G., Lapuschkin, S., Binder, A., Samek, W., & Müller, K.-R., 2017).

6.3. The Growing Importance of XAI in Transportation Literature

XAI methods are increasingly being used in transportation demand forecasting studies. One of the main reasons for this trend is that explainability has become not only a technical but also a social and political necessity. Understanding the rationale behind model results is critical, particularly in the following areas: - Demonstrating the factors underlying user behavior in mode choice analyses, - Transparently revealing the demand patterns of different groups in passenger segmentation studies, - Explaining which variables determine price or time sensitivity in demand elasticity analyses, - Understanding the spatial relationships the model considers when identifying critical OD pairs.

Therefore, XAI is considered not only as a model explanation tool but also as a methodological framework that ensures fair, transparent and accountable management of transportation systems.

7. GAPS IN THE LITERATURE AND FUTURE RESEARCH AREAS

While the literature on rail passenger demand forecasting has undergone significant transformation in recent years, it still harbors many theoretical, data-driven, and methodological challenges. The increasingly dynamic, multi-layered, and data-intensive nature of transportation systems highlights the limitations of existing approaches. This section addresses key gaps in the literature within a holistic and fluid framework, and discusses potential directions for future research.

7.1. Limitations of Traditional Models and the Increasing Need for Hybrid Approaches

While classical methods—regression, ARIMA, ETS, and four-stage transportation models—have significantly contributed to the development of transportation literature, they cannot fully represent the complexity and time-sensitive nature of today's data ecosystem (McNally, 2007). These models are often based on linear assumptions and are limited in capturing interactions between variables, sudden demand shocks, or spatial dependencies. Therefore, future studies need to develop hybrid model structures that combine traditional methods with machine learning or deep learning techniques. This will ensure both interpretability and high accuracy.

7.2. The “Black Box” Structure of Machine Learning Models and Their Lack of Explainability

While ML/DL models offer strong performance, the internal logic of their decision-making processes is often not sufficiently visible. Understanding how a model makes decisions is crucial in areas where public resources are used, such as railway demand forecasting. Therefore, future research is expected to consider explainable AI methods such as SHAP, LIME, IG, and LRP as integral components of the modeling process, not simply as an added layer. This allows models to achieve high accuracy and become reliable decision-support tools for policymakers.

7.3. Data Quality, Missing Observations, and Multiple Data Source Integration

Transportation systems rely on data from a wide variety of sources: ticket data, sensor readings, GPS/mobile device information, surveys, weather records, and socioeconomic indicators. These data sources vary in time resolution, accuracy, and comprehensiveness. Missing observations, inaccurate records, and synchronization issues directly impact model

performance. Future work is expected to focus on data fusion methods, missing data completion techniques, and integration frameworks that can leverage different sources.

7.4. Heterogeneity of OD Pairs, Segmentation Problem and Determination of Critical Lines

One of the major shortcomings in the literature is that OD pairs are often assumed to be homogeneous. However, rail passenger behavior can vary significantly depending on the station pair, region characteristics, day/week period, and user segment. Uniform models applied without OD segmentation offer both low accuracy and limited policy guidance. Therefore, approaches that consider heterogeneity among OD pairs, analyze demand factors at a segment level, and identify critical paths are important future research areas.

7.5. Ethics, Access Fairness, and Algorithmic Accountability

The widespread use of data-driven models in transportation planning has sparked discussions about ethics and social responsibility. Inadequate data, particularly in low-income areas, can lead to higher forecast errors. This has the potential to create inequities in transportation access. Future research should consider the XAI approach not only as a technical tool but also as a framework for pursuing social justice.

8. CONCLUSION AND GENERAL EVALUATION

This section examines the literature on rail passenger demand forecasting, from a broad perspective spanning historical development to modern machine learning techniques. The review demonstrates that demand forecasting has a multilayered structure, evolving from traditional methods such as regression

and time series to dynamic OD modeling, deep learning, and explainable artificial intelligence (XAI).

With the proliferation of high-speed train systems, rail has become central to transportation policies in many countries, demonstrating the criticality of accurate demand forecasting processes for both operational efficiency and infrastructure planning. However, the data diversity, spatial complexity, and time sensitivity of today's transportation systems highlight the limitations of traditional methods.

Machine learning and deep learning models mark the beginning of a new era in the literature, offering higher accuracy, particularly in cases where temporal and spatial patterns must be analyzed together. However, the lack of interpretability of these models is a significant problem in public-focused areas such as transportation, making XAI approaches indispensable. Methods like SHAP, LIME, and others provide a more reliable framework for policymakers by making the decision logic of the models visible.

Future research is expected to focus on topics such as data integration, OD segmentation, uncertainty modeling, and algorithmic fairness. This demonstrates that demand forecasting is not merely a technical problem but also a multidisciplinary field with ethical and societal dimensions.

In conclusion, this chapter has presented the methodological and conceptual approaches to railway passenger demand forecasting in a holistic framework and has formed a basis that can be expanded with case studies and practical examples in the following stages.

REFERENCES

- Adadi, A., & Bouhoute, A. (Eds.). (2023). *Explainable artificial intelligence for intelligent transportation systems: Are we there yet?* CRC Press / Taylor & Francis.
- Albalade, D., & Bel, G. (2012). High-speed rail: Lessons for policy makers from experiences abroad. *Public Administration Review*, 72(3), 336–349. <https://doi.org/10.1111/j.1540-6210.2011.02492.x>
- Alsger, A. A. M., Tavassoli, A., Mesbah, M., Ferreira, L., & Hickman, M. (2016). Comparison of transit origin–destination estimates with automatic fare collection data. In *Proceedings of the Australasian Transport Research Forum 2016 (ATRF)*, Melbourne, Australia.
- Banerjee, N., Morton, A., & Akartunalı, K. (2020). Passenger demand forecasting in scheduled transportation. *European Journal of Operational Research*, 286(3), 797–810. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2019.10.043>
- Borucka, A., & Guzanek, P. (2022). Predicting the seasonality of passengers in railway transport based on time series. *Transport Problems*, 17(1), 51–61. <https://doi.org/10.21307/tp-2022-005>
- Campos, J., & de Rus, G. (2009). Some stylized facts about high-speed rail: A review of HSR experiences around the world. *Transport Policy*, 16(1), 19–28. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2009.02.008> .
- Carvalho, L. (2014). A Bayesian statistical approach for inference on static origin–destination matrices in transportation studies. *Technometrics*, 56(2), 225–237. <https://doi.org/10.1080/00401706.2013.826144> .
- Chen, Z., & Haynes, K. E. (2017). Impact of high-speed rail on regional economic disparity in China. *Journal of*

- Transport Geography*, 65, 80–91.
<https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2017.08.003> .
- Cui, A. (2006). *Bus passenger origin–destination matrix estimation using automated data collection systems* (Master’s thesis). Massachusetts Institute of Technology.
- Çelikkol-Koçak, T., Dalkıç, G., & Tüydeş-Yaman, H. (2017). *High-Speed Rail (HSR) users and travel characteristics in Türkiye*. Middle East Technical University.
<https://open.metu.edu.tr/handle/11511/30184>.
- Givoni, M. (2006). Development and impact of the modern high-speed train: A review. *Transport Reviews*, 26(5), 593–611. <https://doi.org/10.1080/01441640600589319>
- Hochreiter, S., & Schmidhuber, J. (1997). Long short-term memory. *Neural Computation*, 9(8), 1735–1780.
<https://doi.org/10.1162/neco.1997.9.8.1735> .
- Hyndman, R. J., & Rostami-Tabar, B. (2025). Forecasting interrupted time series. *Journal of the Operational Research Society*, 76(4), 790-803.
<https://doi.org/10.1080/01605682.2024.2395315> .
- Li, Z. (2023). *Leveraging explainable artificial intelligence and big trip data to understand factors influencing willingness to ridesharing*. *Travel Behaviour and Society*, 31, 284–294. <https://doi.org/10.1016/j.tbs.2022.12.006> .
- Lv, Y., Duan, Y., Kang, W., Li, Z., & Wang, F.-Y. (2015). Traffic flow prediction with big data: A deep learning approach. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 16(2), 865–873.
<https://doi.org/10.1109/TITS.2014.2344601> .
- Montero-Lamas, Y., & Fernández-Casal, R. (2024). A spatial statistical approach to estimate bus stop demand using GIS-processed data. *Journal of Transport Geography*,

- 118, 103906.
<https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2024.103906>
- Montavon, G., Lapuschkin, S., Binder, A., Samek, W., & Müller, K.-R. (2017). Explaining nonlinear classification decisions with deep Taylor decomposition. *Pattern Recognition*, 65, 211–222.
<https://doi.org/10.1016/j.patcog.2016.11.008>
- Polson, N. G., & Sokolov, V. O. (2017). Deep learning for short-term traffic flow prediction. *Transportation Research Part C*, 79, 1–17.
<https://doi.org/10.1016/j.trc.2017.02.024>
- Sundararajan, M., Taly, A., & Yan, Q. (2017). Axiomatic attribution for deep networks. In *Proceedings of the 34th International Conference on Machine Learning (ICML)* (pp. 3319–3328).
- TCDD. (2022). *TCDD Taşımacılık A.Ş. Faaliyet Raporu 2022*. T.C. Devlet Demiryolları Taşımacılık A.Ş.
- Torres, J., Barceló, J., Montero, L., Bullejos, M., & Linares, M. (2021). Accurate estimation of dynamic OD matrices for freeways using traffic sensor data. *Sensors*, 21(21), 7080.
<https://doi.org/10.3390/s21217080>
- Vlahogianni, E. I., Karlaftis, M. G., & Golias, J. C. (2005). Optimized and meta-optimized neural networks for short-term traffic flow prediction: A genetic approach. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 13(3), 211–234. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2005.04.007>
- Yang, Z., Jia, P., Liu, W., & Yin, H. (2017). Car ownership and urban development in Chinese cities: A panel data analysis. *Journal of Transport Geography*, 58, 127–134.
<https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2016.11.015>

- Zargari, S. A., Memarnejad, A., & Mirzahosseini, H. (2021). Hourly origin–destination matrix estimation using intelligent transportation systems data and deep learning. *Sensors*, 21(21), 7080. <https://doi.org/10.3390/s21217080>
- Zhang, J., Zheng, Y., & Qi, D. (2017). Deep spatio-temporal residual networks for citywide crowd flows prediction. In *Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence* (Vol. 31, No. 1). <https://ojs.aaai.org/index.php/AAAI/article/view/10735>
- Zhou, Z., Chen, A., & Wong, S. C. (2009). Alternative formulations of a combined trip generation, trip distribution, modal split, and trip assignment model. *European Journal of Operational Research*, 198(1), 129–138. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2008.08.023>
- Zúñiga, F., Muñoz, J. C., & Giesen, R. (2021). Estimation and prediction of dynamic matrix travel on a public transport corridor using historical data and real-time information. *Public Transport*, 13(1), 59–80. <https://doi.org/10.1007/s12469-020-00255-9>
- Żochowska, R. (2012). Dynamic approach to the origin–destination matrix estimation in dense street networks. *Archives of Transport*, 24(3), 389–413.

BETONARME KİRİŞLERDE LİF TABANLI ALTERNATİF DONATILARIN EĞİLME PERFORMANSI

Ahmet Hamdi SERDAR^{1*}

Gökhan DOK²

1. GİRİŞ

Betonarme, betonun yüksek basınç dayanımı ile çelik donatının yüksek çekme dayanımını bir araya getirerek modern yapı sistemlerinde geniş kullanım alanı bulan kompozit bir malzemedir. Tarihsel olarak betonun kullanımı Roma dönemine kadar uzanmakta olup, Opus Caementicium olarak bilinen erken beton türleri ile kalıcı yapılar inşa edilmiştir (Setyowati, 2019; Giavarini vd, 2006; Keçeci, 2024). Günümüzde betonarme sistemler, yüksek dayanım, şekillendirilebilirlik ve maliyet etkinliği nedeniyle en yaygın kullanılan taşıyıcı sistemler arasında yer almaktadır. Bununla birlikte, çelik donatının üretiminde yüksek enerji tüketimi, korozyon eğilimi ve çevresel etkileri, araştırmacıları daha sürdürülebilir alternatif donatı malzemelerine yönlendirmiştir (Setyowati, 2019; Boedijono, 1993).

Doğal lifler (kenevir, keten, jüt vb.) ve sentetik polimer lifler (poliamid, polipropilen, polyester) sürdürülebilirlik, düşük maliyet ve hafiflik gibi avantajları nedeniyle son yıllarda

¹ Assist. Prof. Dr., Sakarya University of Applied Sciences, Faculty of Technology, Department of Civil Engineering, ORCID: 0000-0002-6144-7805.

² Assist. Prof. Dr., Sakarya University of Applied Sciences, Faculty of Technology, Department of Civil Engineering, ORCID: 0000-0003-3253-3875.

* (Corresponding Author)

betonarme yapılarda alternatif donatı elemanı olarak araştırılmaktadır (Duffo, 2004; Duran, 2021; Siregar, 2024). Doğal liflerin düşük karbon ayak izi ve biyobozunur yapıları çevre dostu alternatifler olarak ilgi çekmektedir. Kenevir lifi, yüksek çekme dayanımı, lif yüzey pürüzlülüğü ve biyokompozit sektöründe yaygın kullanımı nedeniyle dikkati çeken bir malzemedir (Tian, 2023; Fu, 1997). Sentetik polimer esaslı poliamid lifler ise yüksek deformasyon kapasitesi ve süneklik özellikleriyle öne çıkmaktadır (Tayyar ve Alan, 2007; Göre ve Kurt, 2020).

Mevcut çalışma, betonarme kirişlerde geleneksel çelik donatıya alternatif olarak kenevir lif halatı ve poliamid esaslı sentetik lif halatlarının eğilme davranışına etkisini incelemektedir. Çalışmada tüm numunelerde aynı beton karışımı kullanılmış olup, tek değişken çekme donatısı türüdür. Böylece donatı türünün eğilme dayanımı, çatlak gelişimi ve taşıma kapasitesi üzerindeki etkileri doğrudan değerlendirilmiştir. Literatürde doğal ve sentetik liflerin beton içinde katkı malzemesi olarak kullanımına ilişkin çok sayıda çalışma bulunmasına karşın, bu liflerin makro ölçekte kiriş donatısı olarak kullanılması üzerine sınırlı sayıda deneysel araştırma mevcuttur. Bu çalışma, söz konusu boşluğu doldurmayı amaçlamaktadır.

2. YÖNTEM

2.1. Malzemeler

Çalışmada kullanılan beton TS EN 206+A2 standardına uygun olarak üretilmiş olup C35/45 dayanım sınıfındadır. Karışımda CEM II 42.5 R Portland çimentosu, doğal kum, 4–16 mm ve 16–22 mm fraksiyonlarında iri agrega ile polikarboksilat esaslı süper akışkanlaştırıcı katkı kullanılmıştır. Tüm numunelerde beton karışımı sabit tutulmuştur. Beton üretiminde kullanılan malzemeler şekil 1’de temsili olarak gösterilmektedir.



Şekil 1. Beton üretiminde kullanılan malzemeler

Üç farklı çekme donatısı türü kullanılmıştır:

1. Ø8 mm S420 sınıfı nervürlü çelik donatı (referans numune)
2. Doğal kenevir liflerinden üretilmiş bükümlü lif halatı
3. Poliamid esaslı sentetik lif halatı (polyamide synthetic rope)

Çekme donatısı olarak kullanılan malzemelere ait görsel şekil 2’de verilmiştir.

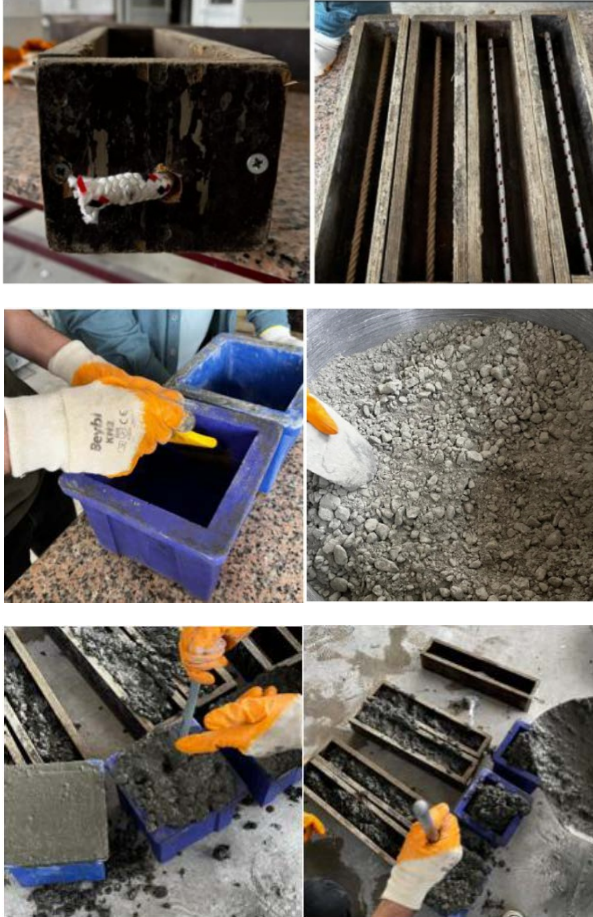


Şekil 2. Çekme donatı malzemelerine ait görsel

Kenevir halat ve poliamid halat numuneleri, boy/çap oranları çelik donatının kesit alanına benzer olacak şekilde hazırlanmıştır.

2.2. Numune Hazırlığı

Toplamda 75×75×500 mm boyutlarında kiriş numuneleri hazırlanmıştır. Her donatı türü için en az iki adet numune üretilmiştir. Beton dökümü öncesi kalıplara kalıp ayırıcı uygulanmış, donatılar alt bölgede çekme bölgesine yerleştirilmiştir (Şekil 3). Beton dökümünden sonra numuneler 7 gün kalıpta, düzenli sulama ile kür edilmiş; ardından 21 gün su altında bekletilmiştir (toplam 28 gün kür).



Şekil 3. Numune üretim süreçleri

2.3. Basınç Deneyi

Beton dayanımını belirlemek amacıyla $150 \times 150 \times 150$ mm boyutlarında üç adet küp numune hazırlanmış ve TS EN 12390-3'e uygun olarak basınç testine tabi tutulmuştur (Şekil 4). Test sonuçları betonun C35/45 sınıfını doğrulamıştır.



Şekil 4. Beton basınç numuneleri ve deneyin yapılışı

2.4. Eğilme Deneyi

Kiriş numuneleri TS EN 12390-5 standardına uygun şekilde dört noktalı eğilme deneyi ile test edilmiştir. Yük, iki yükleme noktası arasında sabit moment bölgesi oluşturacak şekilde uygulanmıştır (Şekil 5). Yük–deplasman verileri kayıt altına alınmış, maksimum yük ve çatlama davranışı değerlendirilmiştir.



Şekil 5. Beton eğilme numuneleri ve deneyin yapılışı

Elde edilen nihai dayanımlar şu şekildedir:

- Çelik donatılı kiriş: 17.97 MPa
- Kenevir donatılı kiriş: 10.56 MPa
- Poliamid donatılı kiriş: 8.95 MPa

4. SONUÇLAR

4.1. Eğilme Dayanımı Karşılaştırması

Dört noktalı eğilme deneyleri sonucunda kiriş numunelerinin nihai eğilme dayanımları şu şekilde ölçülmüştür:

- Çelik donatılı kiriş: 17.97 MPa
- Kenevir lif halatı donatılı kiriş: 10.56 MPa
- Poliamid lif halatı donatılı kiriş: 8.95 MPa

Bu sonuçlar, referans niteliğindeki çelik donatının en yüksek taşıma kapasitesini sağladığını açık biçimde ortaya koymaktadır. Kenevir lif halatının beton içinde makro donatı olarak beklenenden daha yüksek bir eğilme kapasitesi sunduğu belirlenmiş, ancak çeliğin performansına yakın bir değer elde etmesine rağmen süneklik açısından belirgin sınırlılıklar gözlemlenmiştir. Poliamid esaslı sentetik halatların ise nispeten sünek davranış göstermekle birlikte düşük aderans nedeniyle taşıma kapasitesinde kayıplar yaşadığı görülmüştür.

4.2. Çatlak Gelişimi ve Kırılma Modları

Deney boyunca kırışlarda gözlenen çatlak oluşumu ve ilerleme karakteristikleri donatı türüne göre belirgin farklılıklar göstermiştir:

- Çelik donatılı numunelerde, ilk çatlak yükü diğer donatılara göre daha yüksek olup çatlakların düzenli, kontrollü ve sünek davranış gösterdiği tespit edilmiştir.

Nihai kırılma eğilme bölgesinde plastik mafsall oluşumu sonrası meydana gelmiştir.

- Kenevir donatılı numunelerde, ilk çatlak yükü çelikten daha düşük, poliamidden ise daha yüksek gerçekleşmiş; çatlakların hızlı yayıldığı, kırılmanın gevrek karakterli olduğu gözlemlenmiştir. Lif halatının su alma eğilimi ve zayıf aderansı kırılma modunu olumsuz etkilemiştir.
- Poliamid donatılı numunelerde, çatlaklar nispeten erken oluşmuş, ancak çelik ve kenevir numunelerine kıyasla daha geniş deformasyonlara izin veren bir yük–deplasman eğrisi elde edilmiştir. Bu durum poliamid liflerin form değişimine olan yüksek toleransı ile ilişkilidir.

4.3. Yük–Deplasman Davranışı

Yük–deplasman eğrilerinin karşılaştırılması sonucunda:

- Çelik donatılı kirişlerin yük altındaki rijitliklerinin en yüksek,
- Kenevir donatılı kirişlerin orta düzeyde,
- Poliamid donatılı kirişlerin ise en düşük rijitliğe sahip olduğu belirlenmiştir.

Poliamid numuneler yüksek deformasyon kapasitesine sahip olsa da taşıma kapasitesi açısından en düşük performansı göstermiştir.

4.4. Beton Basınç Dayanımı

Küp numunelerden elde edilen basınç dayanımı değerleri beton sınıfının C35/45 olduğunu doğrulamış, böylece eğilme deney sonuçları donatı türüne bağlı değişimi sağlıklı biçimde ortaya koymuştur.

5. DEĞERLENDİRME VE ÖNERİLER

Deneyssel bulgular, donatı türünün betonarme kirişlerin eğilme davranışını belirleyen temel parametrelerden biri olduğunu doğrulamaktadır. Çelik donatı performansı literatürde yer alan klasik sonuçlarla tutarlıdır; yüksek çekme dayanımı, iyi aderans ve süneklik kombinasyonu nedeniyle yapı mühendisliği açısından en güvenilir donatı türü olmayı sürdürmektedir (Gönen, 2009; Çiçek,2016; Yapıcı vd, 2022).

5.1. Doğal Kenevir Lif Halatının Performans Değerlendirmesi

Kenevir lif halatı kullanılan kirişlerde gözlenen 10.56 MPa eğilme dayanımı, doğal lifli malzemeler için kayda değer bir performans olarak değerlendirilebilir. Kenevirin lif yapısı, lif yüzey pürüzlülüğü ve lif dayanımı beton içinde gerilme aktarımını desteklemektedir. Ancak:

- Liflerin su absorpsiyonu,
- Biyolojik bozunma eğilimi,
- Beton–donatı arayüzündeki zayıf bağ,
- Liflerin heterojen yapısı

kırılma modunun gevrek karakterde olmasına yol açmıştır.

Bu durum literatürde doğal lifli kompozitlerde sıkça rapor edilen bir davranıştır (Tombak,2019). Kenevir lifinin kaplama, reçine emprenye, alkali dayanım artırıcı işlemler gibi arayüz iyileştirme teknikleri ile performansının daha da artırılabilceği değerlendirilmektedir.

5.2. Poliamid Sentetik Lif Halatının Performans Değerlendirmesi

Poliamid lif halatı donatılı kirişlerin 8.95 MPa eğilme dayanımı sunması, malzemenin yüksek deformasyon

kapasitesine rağmen aderans yetersizliği nedeniyle yük aktarımında kayıplar yaşandığını göstermektedir. Polimer lifler beton içinde genellikle çatlak kontrolü amaçlı mikro katkıları olarak kullanılmakta olup, makro ölçekte donatı olarak görev almaları için:

- Yüzey pürüzlendirme,
- Mekanik çentikleme,
- Epoksi veya poliüretan kaplama,
- Termal işlem ile yüzey enerjisini artırma

gibi arayüz mühendisliği geliştirmelerine ihtiyaç vardır (Anıl, 2011).

5.3. Çelik Donatı ile Karşılaştırmalı Değerlendirme

Çelik donatı, hem yüksek dayanımı hem de güçlü aderansı sayesinde sünek ve kontrollü kırılma davranışı sergilemiş; bu da onu dayanım, güvenlik ve tasarım kolaylığı açısından üstün kılmıştır. Alternatif malzemeler:

- Sürdürülebilirlik, hafiflik, düşük maliyet,

gibi avantajlara sahip olsalar da yük taşıyan taşıyıcı donatı olarak çeliğin yerini alabilecek düzeyde değildir.

Ancak hibrit donatı sistemlerinde (çelik + doğal lif + sentetik lif) çatlak kontrolü, enerji yutma ve darbe dayanımı gibi özelliklerin iyileştirilebileceği literatürde belirtilmektedir (Hossain vd, 2012).

5.4. Çalışmanın Katkıları

Bu çalışma literatüre şu açılardan katkı sağlamaktadır:

- Doğal ve sentetik lif halatlarının makro donatı olarak kullanımını inceleyen az sayıdaki araştırmadan biridir.

- Aynı beton sınıfı ve aynı geometri ile donatı türünün tek değişken olarak incelendiği kontrollü deneysel tasarım sunmaktadır.
- Kenevir lif halatının makro donatı potansiyelini göstermekte ve polimer donatıların arayüz problemlerini ortaya koymaktadır.

5.5. Gelecek Çalışmalar İçin Öneriler

Gelecek araştırmalarda:

- Kenevir ve poliamid liflerin yüzey modifikasyonu,
- Hibrit donatı kombinasyonları,
- Alkali dayanım iyileştirme işlemleri,
- Farklı eğilme açıklığı ve kesitlerde davranış analizi,
- Sayısal modelleme (FEM) ile doğrulama

gibi konuların çalışılması, alternatif donatıların yapısal mühendislikte kullanılabilirliğine önemli katkılar sağlayacaktır.

REFERENCES

- Ay, M., Karaca, Ö. F., & Yıldız, A. K. (2018). Comparison of Mann-Kendall and Sen's innovative trend tests on measured monthly flows series of some streams in Euphrates-Tigris Basin. *J Inst Sci Technol*, 34(1), 78-86.
- Anıl, A. S. (2011). Eksenel Yüklü Tel Halat Demetlerinin Bilgisayar Ortamında Yorulma Ömürlerinin İncelenmesi. (Yüksek lisans tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Boedijono. (1993). Teknologi perbaikan struktur beton. *Majalah Sivitas Akademika Gema Teknologi Fakultas Non Gelar Teknologi Universitas Diponegoro*, 1.
- Duffó, G. S., Morris, W., Ianelli, C., & Raspanti, M. (2004). A study of steel rebars embedded in concrete during 65 years. *Corrosion Science*, 46(9), 2143–2157.
- Duran, A. E. (2021). Statik programlar. Retrieved from <https://www.statikprogramlar.com/en-iyi-6-statik-hesap-ve-tasarim-programi/>
- Fu, D. C., & Xie, X. (1997). Effect of corrosion on the bond between concrete and steel rebar. *Cement and Concrete Research*, 27(12), 1811–1815.
- Giavarini, C., & Santarelli, M. L. (2006). Mechanical characteristics of Roman opus caementicium. *In Mechanical Behaviour and Properties* (pp. 107–120).
- Gönen, S. (2009). *Cannabis sativa L.* bitkisinin morfolojisi ve anatomisi üzerine bir araştırma (Yüksek lisans tezi). Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- Göre, M., & Kurt, O. (2020). Bitkisel üretimde yeni bir trend: Kenevir. *International Journal of Life Sciences and Biotechnology*, 4(1), 138-157.

- Hossain, M. A., Rahman, M. M., Morshed, A. Z., & Haque, S. M. (2012). Investigation of the effect of nylon fiber in concrete rehabilitation. In Proceedings of the 1st International Conference on Civil Engineering for Sustainable Development, Khulna, Bangladesh (pp. 2-3).
- Keçeci, K. (2024). Secrets and history of the Colosseum. <https://dokmimarlik.com/en/secrets-and-history-of-the-colosseum/>
- Özlem, S. Ç. (2016). Modelling and analysis corrosion fatigue behaviour of steel (PhD thesis). Istanbul Technical University, Graduate School of Science, Engineering and Technology, Department of Mechanical Engineering.
- Setyowati, M. (2019). The development of reinforced concrete used in Indonesia during the colonial period (1901–1942). *Berkala Arkeologi*, **39**(2), 202–205.
- Siregar, M. (2024). Analisis kinerja struktural pada bangunan beton bertulang. *Fakultas Teknik Sipil, Universitas Medan Area*, **1**(2), 1–7.
- Tayyar, A. E., & Alan, G. (2007). Sentetik Liflerden Üretilen Halat Yapıları Ve Kullanım Performansları. *Tekstil ve Mühendis*, **14**(68), 1-12.
- Tian, Y., Zhang, Z., Huang, Y., Qin, Z., Tang, T., Xu, J., Niu, J., Zhang, C., & Wang, J. (2023). Corrosion of steel rebar in concrete induced by chloride ions under natural environments. *Construction and Building Materials*, **369**.
- Tombak, A. (2019). Eksenel yüklü tel halat demetlerinin modellenmesi ve analizi (Yüksek lisans tezi). Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Yapıcı, İ., İzol, E., & Yılmaz, M. A. (2022). Kenevirin Çeşitli Sektörlerdeki Kullanımı.

KÖPÜK BETONUN ÖZELLİKLERİ VE ÜRETİM YÖNTEMLERİ

İbrahim PINARCI¹

1. GİRİŞ

Köpük beton, çimento esaslı hafif beton türleri arasında yer almakta olup, mekanik veya kimyasal yöntemlerle üretilen stabil köpüğün çimento hamuruna homojen şekilde dağıtılmasıyla elde edilir. Düşük yoğunluğu, yüksek porozitesi ve ısı yalıtım özellikleri sayesinde son yıllarda yapı mühendisliği uygulamalarında önemli bir alternatif malzeme hâline gelmiştir (Neville, 2011).

Köpük betonlar; sürfaktan, çimento, su ve ihtiyaca göre ince agrega veya kum ilave edilerek, ısıtıl işlem olmaksızın hazırlanan bir hafif beton türüdür. Sertleşme işlemi tamamlanmasının akabinde, düşük yoğunluklu ancak tazeyken akıcılığı yüksektir. Geleneksel harç ile köpük betonu harcının farklı olmasının temel sebebi akış özelliklerinden kaynaklanmaktadır. Köpük betonda akma dayanımının düşüklüğünden dolayı ciddi akma özelliği gösterir. Bu haliyle çimento tipi, köpüğün, taze harç yoğunluğu, ajanın tipi, su / bağlayıcı oranı, dolgu malzeme miktarı ve özelliği, agrega oranı gibi faktörler etkili olmaktadır. Tüm faktörler göz önüne alınarak harcın homojenliği, pompalanarak üretim yerine iletimi ve işlenebilirliği hakkında bir karara varılır (Yılmaz, 2021).

¹ Dr. Öğr. Üyesi., Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Pazaryeri Meslek Yüksekokulu, Endüstri Ürünleri Tasarımı Programı, ORCID: 0000-0002-9318-4325.

2. KÖPÜK BETONUN BİLEŞİMİ VE ÜRETİM YÖNTEMLERİ

Köpük beton temel olarak çimento, su ve köpük ajanından oluşur. Köpük ajanları protein bazlı veya sentetik kökenli olabilir. Üretimde ön köpüklenme yöntemi yaygın olarak tercih edilmektedir. Bu yöntemde köpük ayrı bir jeneratörde üretilir ve çimento hamuruna eklenir.

Köpük beton kullanılacak olan köpük öncelikle jeneratörde üretilir. İki çeşit sistem mevcuttur. Bunlardan ilki hava basınçlı bir karıştırıcı hattından köpük çözeltisi geçirilir ve köpük elde edilmiş olur. Bu çözelti 40 kat genişleyerek yoğunluğu düşürülmüş köpük elde edilmiş olur. İkincisi ise çözelti bir tüp içindeki tel örgü tüpün çıkış tarafından emilerek püskürtülmesi sağlanır. Oluşturulan bu katkılar koyu kıvamdadır su ile seyreltilerek kullanılır (Atabey V. 2018 & Demir 2014).



Şekil 2.1. Köpük Üretme Jeneratörü (https://tr.made-in-china.com/co_led0518/product_Foam-Concrete-Generator-Cement-Foam-Making-Machine_ehougegsy.html)

Köpük betonların zaman içindeki gelişimi incelendiğinde ilk patentin yalıtım malzemesi düşüncesi ile 1923 yılında alındığı görülür (Atabey V. 2018 & Valore 1954). Sonrasında 1954 yılında Valore tarafından ilk detaylı inceleme gerçekleştirilmiştir. Rudnai ve Kinniburgh tarafından 1963 yılında kapsamlı çalışmalar yapılmış ve hücre yapısı gelişiminden bağımsız betonun hücresel bileşimi ve kullanımı incelenmiştir (Rudnai 1963, Short and Kinniburgh 1963).

Başlangıçta dolgu ve izolasyon malzemesi gibi yan ürünler olarak düşünülen köpük beton sonradan uçucu kül ve silis dumanı gibi atık olan bertaraf malzemelerinde kullanılabildiği özellikleri itibari ile hafif ve tasarruflu yapısıyla gündeme gelmiştir (Ramamurthy *et al.* 2009).

Zaman içerisinde üretim ekipmanlarında ve köpük katkı maddelerindeki gelişmeler bu beton şeklinin kullanımını arttırmıştır. Bu üründe yüksek akışkanlık, bağlayıcı malzeme tasarrufu önemli bir faktör olmasının yanı sıra üretim sırasında boşluk, gözenek ve dağılım gibi fiziksel faktörlerde kararlılıkta gerekir. Dolayısı ile üretim, nakliye ve yerleştirme işlemlerinde homojenlik önemli bir kıstastır (Ramamurthy *et al.* 2009).

Köpük betonda kararlılık oldukça önemlidir. Üretilmiş olan ürünün yapısındaki köpük ve köpüklü betonun taze durumdayken koşulları değerlendirilir. Köpük hacmi standart baz karışıma göre %50 ‘nin üzerinde olduğu durumlarda köpüğün kararlılığı köpük beton üzerinde daha güçlü bir etkiye sahip olacağı beklentisini artmaktadır (Aldridge 2005). Sentetik yüzey aktif maddelerle üretilen köpüklerin gözenek boyutları daha geniş ve açık olup protein kökenli köpük kimyasallarına kıyasla az kararlı olduğu değerlendirilmektedir (McCarthy 2004). 2006 yılında Jones and McCarthy tarafından yapılan çalışma da uçucu kül kullanılmış, kül çökmeye sebep olarak kararlılığı düşürmüştür. Buna karşılık Nambiar Ramamurthy’ın

2007 de yapmış olduğu çalışmada ortam şartlarındaki yoğunluğu ve tasarım yoğunluğu hemen hemen aynı değerlerdedir. Büyük sorunlardan bir tanesi de köpüğün çökmesi ve ayrılmasıdır. Bunu bir miktar dengelemenin yolu ise su/ bağlayıcı oranını olabildiğince yükseltmektir (Atabey V. 2018 & Jones and McCarthy 2006).

Köpük betonlar tasarlanırken istenen kıvamın sağlanabilmesi ve kalıp içerisinde yeterince sıkıştırılabilmesi için kullanılan su içeriği ve köpük oranı ayarlama işlemleri kendiliğinden yerleşen betona benzer tarzda yapılır. İstenen oranın elde edilmesi de ancak deneme yanılma yöntemiyle sağlanabilmektedir (Nehdi 2001).

Katılaşmaya başlamış olan bir betonda hava kabarcıkları patlayabilir, aşırı akışkan olunca da yapıdaki hava kabarcıklarını tutma becerisini kaybederek ayrışma meydana gelebilir. Bu durum yoğunluklarının yakın olması ile ortadan kaldırılabilir (Ramamurthy *et al.* 2009).



Şekil 3.1. Köpük beton örneği
(<https://www.sanalsantiye.com/kopuk-beton-nedir/>)

3. FİZİKSEL VE MEKANİK ÖZELLİKLER

Köpük betonlarda malzeme yoğunluğu, gözenek miktarı ve boyutu kılcal su emme oranı malzeme kalitesini etkilemektedir.

3.1. Birim Hacim Ağırlık

Köpük betonlarda taze ve kuru birim hacim ağırlığı arasındaki farkın $100-120 \text{ kg/m}^3$ miktarlarını geçmemesinin daha uygun olacağını ifade eden Amran ve arkadaşları (2015) çalışmalarında kuru birim hacim ağırlığının teorik ve gerçek birim hacim ağırlıkları farkı $\pm 50 \text{ kg/m}^3$ olması gerektiği belirtilmektedir. Köpük betonda birim hacim ağırlığının düşmesi sertlik miktarının ve dayanım değerlerinin azalmasına yol açmaktadır (Bodur, Bayraktar & Kaplan, 2021 ve Yılmaz 2021).

3.2. Gözeneklilik Ve Kılcal Su Emme

Köpük betonda gözeneklerin yapısını değerlendirirken gözenek miktarı, büyüklüğü dağılımı ve aralarındaki bağlar fiziksel mekanik ve fonksiyonel özellikleri etkiler. Dolayısıyla malzeme davranışı hakkında fikir vererek uygulamaya yön vermeye yardımcı olur. Üç çeşit gözenek vardır. Bunlar jel gözenekleri, kılcal gözenekler ve makro gözeneklerdir. Bir köpük betonun gözenek yapısı, karışımı oluşturan bileşenlerin cinsleri, özellikleri ve oranlarının etkisi altında şekillense bile burada esas belirleyici olan köpük ajanının sahip olduğu gözenek yapısı olduğu da gözden kaçırılmamalıdır (Bodur, Bayraktar & Kaplan, 2021 ve Yılmaz 2021).

3.3. Basınç Dayanımı

Köpük betonda köpük cinsi ve miktarı, çimento, kum ve başka bileşenlerin miktarı, su/bağlayıcı oranı, yoğunluk ve kür sistemi basınç mukavemetini etkileyen önemli faktörler arasında yer almaktadır. Köpük hacmi %50 civarındayken basınç mukavemetinde gözle görülür bir azalma olduğu görülmüştür.

Bu durum %30 oranında iken, basınç dayanımında değişime ihtiyaç olmamakta ve stabil oran olarak belirlenmiştir. Su oranının da karışımın kararlılığı üzerinde etkili bir rolü olduğu ve genellikle tasarım karışımlarında kullanılan kumun inceliğinin ve diğer malzemelerin betonun dayanımını üzerinde etkili olduğu görülmüştür (Bodur, Bayraktar & Kaplan, 2021 ve Yılmaz 2021).

3.4. Yüksek Sıcaklık Direnci

Konvensiyonel betonla kıyaslandığında köpük betonlar karışım bileşenlerine ve miktarlarına göre çok daha yüksek sıcaklık direnci göstermiştir. Ultra hafif köpük beton yoğunluğunun artması ile yüksek sıcaklık direncinin artması, 400 kg/m³ yoğunluk için 150 kg/m³ yoğunluğa göre 3 kat daha fazla olması ve yeterli yüksek sıcaklık direnci için 250 kg/m³ ‘ten daha yüksek bir yoğunlukta tasarımların yapılması gerektiği şeklinde anlatılmaktadır (Bodur, Bayraktar & Kaplan, 2021 ve Yılmaz 2021).

4. KULLANIM ALANLARI VE AVANTAJLARI

Köpük betonlar yapıların dış ve iç duvarlarında zemin ve çatılarında mimari elemanların yerini tutabilecek özelliklere sahip sürdürülebilir bir yapı ve izolasyon malzemesidir. Işık, ısı ve ses izolasyonu sağlar (Ekinci, 2013). Bu beton türü taze durumdayken akış becerisi yüksektir, ısı iletimi düşüktür, görev yaptığı yapı elemanında düşük yoğunluğuna rağmen yeterli dayanıma sahiptir. Ancak malzeme seçilirken hazırlama yöntemi kullanılacak ajanın seçimi, hava boşluğunun homojen dağılımı, karışım oranı gibi birçok faktöre dikkat edilmesi gerekir (Davraz & Kılınçarslan, 2015).

Hafif beton çeşitleri genel olarak zemin düzenleme işleri, çatı, duvar ve diğer tamamlayıcı yapı elemanlarının tasarımında

kullanılmaktadır. Ayrıca yapı elemanlarında kullanılan çeliğin çevresel şartlardan korunabilmesi için kaplama malzemesi olarak kullanımı da bulunmaktadır. Bunun yanında çatı ve duvarların izolasyonlarında tercih edilen malzemelerdendir. Bu betonun alt yapıda da kullanım alanları vardır. Örneklendirecek olunursa yakıt depoları, kanalizasyon boru hatları ve menfezler gibi alanlar sayılabilir. Hafif betonlar birim hacim ağırlığı düşürdüğü için avantajlı malzemelerdir. Çok ağır yükleri olmayan, hızlı montaj gerektiren, kalıp tüketimini azaltılmasının gerektiği yerlerde tercih sebebidir. Ayrıca ekonomiktir ve daha az işçilik gerektirir (Bodur, Bayraktar & Kaplan, 2021 ve ve Yılmaz 2021).

5. SONUÇ

Köpüklü beton kendine has fiziksel ve mekanik özellikleri ile inşaat teknolojisinde giderek önemini arttırmaktadır. Bunlara ilaveten öne çıkan özellikler ise ısı, ses yalıtımı üstün dolgu özellikleri sayılabilir. Ülkemiz alt yapısı köpük betonu ve gerekli katkı ürünlerini üretmeye yetkindir ve desteklenmektedir. Köpük betonlar üretim maliyeti açısından konvansiyonel betonlara kıyasla daha ekonomiktir, ayrıca ulaşılabilir ve hızlı üretilebilirlik gibi artıları bulunmaktadır. Ses ve ısı yalıtım özellikleri, aynı zamanda düşük basınçlara karşı göstermiş olduğu direnç önemini arttırmaktadır. Aynı zamanda kullanılan malzemeler ve çalışmalarda bahsedilen atık maddelerin bertaraf edilmesine aracılık etmesi ile çevre dostu bir hafif beton türüdür. Tüm bu özellikleri değerlendirildiğinde köpük betonlar sürdürülebilir yapı eldesi ve daha az karbon ayak izine destek verebilecek nitelikte bir nihai üründür. Tercih edilmesi ve kullanımının arttırılmasının ülkemize pozitif katkılar sağlayacağı düşünülmektedir.

KAYNAKÇA

- Aldridge, D. (2005). Introduction to foamed concrete, UK, 1-14.
- Amran, Y. H. M., Farzadnia, N., & Ali, A. A. A. (2015). Properties and applications of foamed concrete; A review. In Construction and Building Materials (Vol. 101, pp. 990–1005).
- Atabey V.,(2018), “ Mermer Atıklarından Köpük Beton Blok Üretimi ” Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği ABD., Afyon.
- Bodur, B., Bayraktar, Ö. Ü. O. Y., & Kaplan, Ö. Ü. G., 2021. Kalsiyum Alüminat Çimentolarının Köpük Beton Üretiminde Kullanımının İncelenmesi.
- Davraz, M., Kılınçarslan, Ş., & Kuru, M. (2015). Farklı Yoğunluktaki Köpük Betonların Dayanım ve Isıl İletkenlik Özellikleri. Ulusal beton kongresi, Antalya, 93-102.
- Demir, İ. (2014). Köpük Betonda Rötire Çatlaklarının Engellenmesi Hakkında Teknik Rapor.
- https://tr.made-in-china.com/co_led0518/product_Foam-Concrete-Generator-Cement-Foam-Making-Machine_ehougegsy.html, Erişim Tarihi :17.12.2025
- <https://www.sanalsantiye.com/kopuk-beton-nedir/>
- Jones, M.R. and McCarthy, A. (2006). Heat of hydration in foamed concrete: Effect of mix constituents and plastic density. Cement and Concrete Research, 6: 1032-1041.
- McCarthy, A. (2004). Thermally insulating foundations and ground slabs for sustainable housing using foamed concrete, PhD Thesis, University of Dundee, Scotland.

- Nehdi, M., Djebbar, Y. and Khan, A. (2001). Neural network model for preformed foam cellular concrete, 98: 402–9.
- Neville, A. M. (2011). Properties of Concrete. Pearson Education.
- Ramamurthy, E.K. and Nambiar, G. (2009). A classification of studies on properties of foam concrete Indu Siva Ranjani Cement & Concrete Composites, 31: 388–396.
- Ramamurthy, K., Nambiar, E. and Ranjani, G. (2009). A classification of studies on properties of foam concrete, 6: 388.
- Rudnai, G. (1963). Lightweight concretes, Budapest 3:16.
- Short, A, Kinniburgh, W. (1963). Lightweight concrete, Asia Publishing House.
- Valore, RC. (1954). Cellular concrete part 1 composition and methods of production, 50: 773.
- Yılmaz M. Vd.,(2021) ” Köpük Beton Hakkında İnceleme”, Sürdürülebilir Mühendislik Uygulamaları ve Teknolojik Gelişmeler Dergisi, 4(1), 16-21.

YÜZEY DRENAJ SİSTEMLERİNDE AKIŞ KAPASİTESİ

Ramazan MERAL¹

1. GİRİŞ

Su kaynakları yönetimi; su, toprak ve beraberinde ilgili ekosistem unsurlarının korunması ve geliştirilmesini hedeflemektedir. Özelde suyun etkin kullanımı yanında; taşkın kontrolü, erozyon kontrolü, tuzluluk kontrolü, su göllenme (waterlogging) kontrolü, çevre ve kentsel altyapı koruma, kırsal kalkınma, halk sağlığı ve gıda güvenliği gibi önemli konuları içermektedir. Drenaj bu süreçte hayati bir öneme sahiptir. Geleneksel anlamda drenajın en önemli ve gerekli rolü “toprakta fazla su kontrolü” olsa da su kaynakları yönetiminin bahsedilen tüm bileşenlerine katkı sunmaktadır (Vlotman vd. 2020).

Türkiye’de 2.775.115 ha alanda drenaj sorunu vardır. Bu alanın 1.689.358 hektarı yetersiz drenajlı, 776.312 hektarı fena drenajlı, 283.381 hektarı bozuk drenajlı, 26.064 hektarı ise aşırı drenajlıdır (Anonim 2021). Sulanan alanlarda sulama suyu ile toprağa eklenen tuzun drenaj ile uzaklaştırılabilmesi için yıkama gereksiniminin ve topraktaki tuz dengesinin dikkate alınması gerekmektedir. İklim değişikliği etkileri ile birlikte artan ani ve şiddetli yağışlar, yüzey akış, taşkın olayları drenaj çalışmalarına ayrıca bir önem kazandırmaktadır.

Maksimum yüzey akış debisi, hacmi ve zamansal dağılımının bilinmesi drenaj çalışmalarında planlama, tasarım ve inşasında temel datayı oluşturmaktadır. Hatalı hidrolojik hesaplamalar; planlanan ve inşa edilen yapıların bazen yetersiz, bazen de gereğinden fazla büyük veya hidrolik dengeyi bozacak şekilde yanlış boyutlandırılmasına neden olabilmektedir. Yüzey akış miktarının yerinde doğrudan

¹ Prof. Dr., Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Ziraat ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Biyosistem Mühendisliği Bölümü, ORCID: 0009-0000-8076-979X.

ölçülmesi en geçerli yol olmakla birlikte pekçok kısıtları ve zorlukları bulunmaktadır. Bu amaçla alanda yüzeysel akış parseli tesis edilerek havzadan oluşan akış değeri ortalama olarak belirlenebilir. Ancak yöntem hem kurulumu zor ve pahalı hem de etkinliği, havzayı ve değişken koşullarını temsil etmesi güçtür. Yüzey akışın toplandığı kanal ve ırmaklarda debi takibi ve yüzey akış hidrograflarının elde edilmesi bu amaçla kullanılan en yaygın yöntemdir (Okman, 2012; Gemalmaz 1993).

Açık drenaj kanal kapasitelerinin belirlenmesinde sulama alanına düşen yağış ile alan dışından, yan derelerden sulama alanına gelen sular önemli bir yer tutmaktadır. Diğer yandan sulama sistemlerinde işletme ve kanal kayıplarının neden olduğu su kayıpları arazide oluşan fazla suyun kaynaklarıdır. Ancak tarım alanlarında genellikle yağış ile akışa geçen sular ile sulama kayıp suları aynı zamanda gerçekleşmediği düşünüldüğünde; yağışa bağlı olarak kanal kapasitelerinin belirlenmesi yeterli olmaktadır (Güngör vd. 2016).

Bu çalışmada yüzey akış miktarına etki eden pek çok faktör dikkate alınarak, özellikle akış ölçümlerinin yapılamadığı durumlar için kullanılmak üzere, geliştirilmiş olan Rasyonel ve SCS Eğri yöntemleri; günümüz uygulamaları dikkate alınarak, daha etkin bir kullanım için detaylı olarak değerlendirilmiştir.

2. RASYONEL YÖNTEM

Yöntemin temel esası; en yüksek şiddette yağışın, konsantrasyon süresi (T_c) içinde oluşturacağı yüzey akışın belirlenmesidir. Yöntemin yeterli akım rasatı olmayan yan derelerin ve yüzey drenaj kanallarının kapasite belirlenmesinde, genellikle 2500 ha dan küçük alanlarda etkili olduğu bilinmektedir (Carey vd. 2015; Okman, 2012). Daha büyük havzalarda, T_c 'nin daha uzun sürmesi söz konusu olacağından, yağış ve taşkın şiddetinin üniformluğu kabulü güçleşmektedir (Vlotman 2020; SCS, 1972). Eşitlik;

$$Q=0,00278.C.I.A$$

$$Q= \text{En yüksek yüzey akış debisi (m}^3\text{/s)}$$

I: Yağış şiddeti, mm/h

A: Drenaj alanı (ha)

C: Akış katsayısı

Katsayı (0,00278): Bir hektar alanda 1 mm/h şiddetinde yağışın tamamının yüzey akışa geçmesi durumunda oluşturacağı akış miktarını (m^3/s) ifade etmektedir.

Konsantrasyon süresi: Eğimli bir havzada yüzey akışın havza genelinde aynı anda gerçekleştiği varsayıldığında, havzanın çeşitli noktalarından gelen suların ölçüm yapılan çıkış noktasına varış süreleri farklı olacaktır. En uzun süre, hidrolik olarak en uzak noktadan gelen su için geçerlidir. Bu süreye konsantrasyon süresi (T_c) denir ve yağış süresi olarak kabul edilmektedir. Havzanın önemli bir hidrolojik özelliğidir (Linsley 1988; Usul 2005). Yerde yapılacak ölçümlerle konsantrasyon zamanının belirlenmesi en geçerli yöntemdir. Bu mümkün değil ise havza uzunluğu ve akış hızına bağlı olarak tahmini bir süre belirlenebilmektedir. Ayrıca T_c 'yi havza alanı, havza şekli, eğim, toprak koşulları gibi ilgili havza özellikleriyle ilişkilendiren çeşitli formüller de geliştirilmiştir (Azizian 2019). Bunlar arasında özellikle küçük ($<0,5 \text{ km}^2$) arımsal havzalar için yaygın kabul gören Kirpich (1940) eşitliğidir:

$$T_c = \frac{L^{1.15}}{3080.H^{0.48}}$$

L: Su toplama havzasının uzunluğu, m

H: L mesafedeki kot farkı, m

Yağış şiddeti(I): Yağışlardan akışa geçecek en yüksek akış debisini belirlemek için; seçilen tekerrür aralığında konsantrasyon zamanına eşit sürede oluşacağı tahmin edilen maksimum yağış şiddeti kullanılmaktadır. Yağışların çeşitli büyüklükleri ve frekansları arasındaki ilişkiyi veren yağış tekerrür değerleri, diziye en iyi uyan olasılık dağılım fonksiyonlarının belirlenmesiyle gerçekleşmektedir. Yağış-şiddet-tekerrür eğrilerinin elde edilmesiyle ilgili ülkemizde yerel ya da bölgesel ölçeklerde pek çok çalışma yapılmıştır. Bununla birlikte

küresel ısınmanın yol açtığı iklim değişikliği etkisinde, özellikle ekstrem olayların yapısının değiştiği dikkate alınarak, bu çalışmaların güvenilir yöntemlerle daha sık güncellenmesi gerekmektedir.

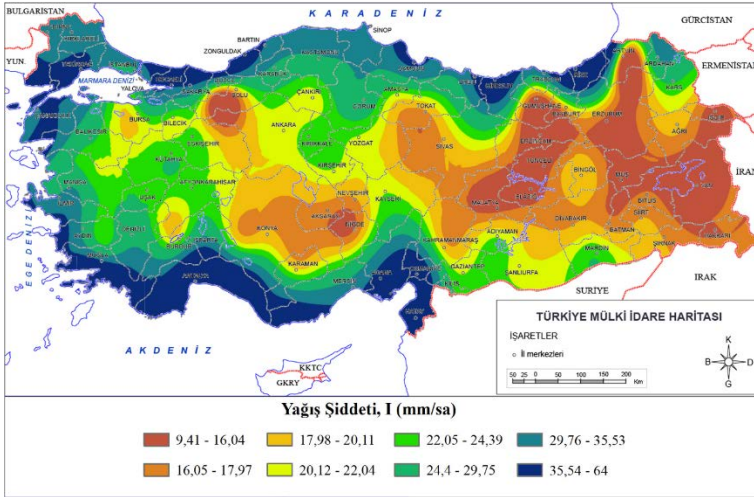
Temel (2025) tarafından, belirli tekerür aralıklı olası maksimum yağış şiddetleri, Genelleştirilmiş Ekstrem Değer olasılık dağılımını kullanarak ülkemizdeki tüm iller için belirlenmiştir. Burada drenaj kanal kapasite belirleme amaçlı en çok kullanılan tekerrür aralığı ve yağış süresi için elde edilen bulgular Çizelge 1’de verilmiştir. Yine bu veriler kullanılarak hazırlanmış yağış şiddet haritası Şekil 1’de verilmiştir.

Ülkemizde genellikle tersiyer drenaj kanalları 2 yıllık, sekonder drenaj kanalları 5 yıllık, ana drenaj kanalları 10 yıllık tekerrür aralıklı yağışlar dikkate alınarak kapasitelendirilmektedir (Gemalmaz 1993; Güngör vd. 2016)

Çizelge 1. Türkiye illeri için 5 yıl tekerrür aralıklı yağış şiddeti tahminleri (Temel (2025))

İLLER	Süre (saat)				İLLER	Süre (saat)			
	0,5	1	2	3		0,5	1	2	3
	Yağış şiddeti (mm/h)					Yağış şiddeti (mm/h)			
Adana	59,1	38,8	22,8	16,6	K.Maraş	33,9	20,2	12,0	9,3
Adıyaman	38,7	22,1	12,9	9,6	Karabük	34,5	20,4	19,2	14,6
A.Karahisar	36,6	21,9	12,3	8,7	Karaman	34,3	19,7	11,3	8,2
Ağrı	31,3	18,7	10,1	7,1	Kars	43,9	24,6	13,6	9,5
Aksaray	27,3	16,5	9,9	7,4	Kastamonu	49,2	28,2	15,9	11,2
Amasya	38,3	21,6	12,1	8,7	Kayseri	35,5	21,4	12,0	8,3
Ankara	35,3	21,1	11,9	8,5	Kırıkkale	40,3	22,6	12,4	8,6
Antalya	83,5	58,2	39,9	32,2	Kırklareli	52,8	32,4	18,5	12,8
Ardahan	48,6	29,4	16,2	11,1	Kirşehir	36,5	21,3	12,3	8,5
Artvin	28,8	18,7	11,2	8,6	Kilis	41,2	25,2	13,7	9,8
Aydın	43,5	27,6	15,9	11,7	Kocaeli	53,7	33,0	18,8	13,8
Balıkesir	41,5	25,0	15,2	11,0	Konya	30,3	18,0	10,2	7,4
Bartın	53,1	35,3	22,2	16,6	Kütahya	42,6	24,2	13,2	9,4
Batman	29,4	17,4	10,4	7,6	Malatya	25,9	14,6	8,9	6,8
Bayburt	33,2	18,8	10,5	7,5	Manisa	48,7	29,9	17,0	12,5
Bilecik	39,1	22,5	12,2	8,5	Mardin	38,9	24,3	15,0	11,5
Bingöl	31,2	20,4	12,2	8,9	Mersin	53,1	33,4	21,0	15,9
Bitlis	26,5	15,9	10,7	8,8	Muğla	55,2	37,5	24,4	18,2
Bolu	33,7	19,7	11,1	7,9	Muş	23,6	14,6	9,5	7,4
Burdur	36,9	21,5	12,9	9,2	Nevşehir	28,6	18,4	10,5	7,5
Bursa	36,9	21,9	12,9	9,9	Niğde	26,5	15,6	9,3	6,7
Çanakkale	52,2	35,4	20,9	15,2	Ordu	56,1	36,9	22,2	16,4
Çankırı	37,6	21,4	12,0	8,3	Osmaniye	67,6	44,0	30,4	23,0

Çorum	49,6	28,2	15,3	10,7	Rize	76,5	54,8	35,0	26,1
Denizli	46,4	27,6	15,2	10,8	Sakarya	58,5	35,9	20,9	14,9
Diyarbakır	31,5	18,0	10,7	8,0	Samsun	55,9	38,3	23,1	17,1
Düzce	43,9	25,7	15,4	11,3	Siirt	30,2	18,3	11,4	8,3
Edirne	50,6	31,2	18,0	12,9	Sinop	48,3	31,8	18,8	13,5
Elazığ	25,5	15,0	9,2	7,0	Sivas	30,6	17,6	10,0	7,1
Erzincan	20,1	12,4	7,6	5,8	Şanlıurfa	32,5	20,9	13,2	9,7
Erzurum	27,8	15,5	8,7	6,3	Şırnak	40,3	24,0	13,7	10,2
Eskişehir	40,4	23,1	12,4	8,7	Tekirdağ	62,4	36,8	20,2	14,9
Gaziantep	36,3	21,8	13,3	9,8	Tokat	31,8	18,0	9,8	6,8
Giresun	71,0	48,0	30,4	22,4	Trabzon	58,8	40,9	26,4	19,5
Gümüşhane	26,1	14,7	8,5	6,3	Tunceli	23,8	14,0	8,6	6,5
Hakkari	23,0	14,1	9,1	7,0	Uşak	39,0	24,0	13,2	9,4
Hatay	66,9	46,3	28,5	21,0	Van	22,3	13,5	8,7	6,5
Iğdır	25,7	14,7	8,0	5,6	Yalova	53,4	33,0	19,9	15,0
Isparta	41,0	25,6	14,7	10,2	Yozgat	37,7	22,0	12,5	9,0
İstanbul	49,5	30,7	18,2	13,5	Zonguldak	66,6	44,4	26,9	19,9
İzmir	45,7	30,0	18,7	14,1					



Şekil 1. Yağış şiddeti haritası (5 yıl tekerrür aralıklı, 60 dakika süreli)

Çizelge1’de verilen 5 yıllık değerler Çizelge’2 de verilen eşitlik veya katsayılar dikkate alınarak gerekli istenilen tekerrür aralığına dönüştürülebilmektedir. Çizelgede verilen dönüşüm eşitlikleri Temel (2025) de verilen Türkiye verileri dikkate alınarak elde edilmiştir. Dönüşüm katsayıları ise Carey vd. (2015) tarafından verilmiştir.

Çizelge 2. Farklı süreli yağışların dönüşüm eşitliği ve katsayıları

Tekerrür yılları	Eşitlik	Dönüşüm katsayısı
5 yıllık – 2 yıllık	$I_2=0,725I_5-0,434$ $R^2=0,993$	0,75
5 yıllık – 10 yıllık	$I_{10}=1,182I_5-0,641$ $R^2=0,997$	1,25

Yüzey Akış katsayısı; beklenen en yüksek yüzey akışın havzadan deşarj olan oranını ve pik debiye katkı yapan kısmını ifade etmektedir. Havza toprağının infiltrasyon hızına, eğim durumuna ve bitki örtüsüne bağlı olarak değişmekte olup Çizelge 3’te verilmiştir. Ayrıca yağış şiddeti ve süresiyle de bu katsayıyı etkilemektedir. Havza farklı yüzey akış katsayılarına sahip alt bölümlerden oluşması durumunda alan ağırlıklı ortalama alınarak havzayı temsil edebilecek bir akış katsayısı kullanılabilir (SCS, 1972)

Çizelge 3. Yüzey akış katsayıları (SCS, 1972)

Arazi	Eğim	İnfiltrasyon hızı		
		Yüksek	Orta	Düşük
Ekili arazi	<5%	0.30	0.50	0.60
	5–10%	0.40	0.60	0.70
	10–30%	0.50	0.70	0.80
Mera	<5%	0.10	0.30	0.40
	5–10%	0.15	0.35	0.55
	10–30%	0.20	0.40	0.60
Ağaçlık	<5%	0.10	0.30	0.40
	5–10%	0.25	0.35	0.50
	10–30%	0.30	0.50	0.60

3. SCS EĞRİ YÖNTEMİ

SCS eğri yöntemi A.B.D. Toprak Koruma Servisi tarafından özellikle akım ölçümü bulunmayan havzalarda dolaysız akış hesabı için geliştirilmiş olup daha geniş alanlarda kullanım olanağına sahip bir yöntemdir. Basitliği ve detaylı havza özelliklerini dikkate alması sayesinde kısa sürede dünya genelinde akademi ve uygulama alanında kullanılan yaygın bir yöntem haline gelmiştir. Yöntemin esası yağış ile infiltrasyon miktarının farkına dayanmaktadır (SCS, 1972; Beyazıt 2011) ;

$$Q = \frac{P^2}{P+S}$$

Q: Yüzey akış,mm

P: Yağış, mm

S : Su tutma potansiyeli,mm

Yağışın bir kısmının yüzeyde tutulduğu veya çukurlarda biriken kısmın buharlaşma ile kaybolduğu bilinmektedir. Yüzeyde tutulan su olarak tanımlanan bu su toprakta su tutma potansiyelinin %20'si olarak ($\lambda=0,2$) kabul edilmiştir. Bu durumda eşitlik;

$$Q = \frac{(P-0.2S)^2}{(P+0.8S)}$$

şeklinde ifade edilmektedir. Ancak bu yaklaşımın SCS tarafından ortalama %5 eğimli araziler için yapılmış olması yöntemin bir kısıtıdır. Daha yüksek eğimli havzalarda bu katsayının daha düşük değerler alması beklenen bir durumdur (Wenhai and Wang (2020). Yapılan çalışmalarda $\lambda = 0.2$ kabulünün havza yüzey akışı tahminlerindeki kimi durumlarda tutarsız sonuçlar verdiği, bunun yerine $\lambda = 0.05$ 'in çok daha temsil edici olduğu belirtilmiştir. Bazı çalışmalar ise bu değer 0,01-0,05 arasında olması gerektiğini belirtmişlerdir (Hawkins vd. 2009).

Yağış öncesi havzanın ağırlık ortalamalı S değerinin ölçülmüş olması veya bilinmesi durumunda yüzey akış miktarı eşitlikle belirlenmektedir. Bu her zaman mümkün olmadığı için öncelikle havza; toprak bünyesi, infiltrasyon hızı, nem içeriği ve yüzey örtüsü dikkate alınarak sınıflandırılmış ve bir eğri numarası (CN) ile isimlendirilmiştir. Bu eğri numarasından yararlanılarak S değeri tahmin edilmektedir;

$$S = \frac{100}{CN} - 10$$

Bu yöntemin öne çıkan diğer özelliği yüzey akışın oluşumunu etkileyen birçok faktörü tek bir parametre (CN) içinde toplamasıdır. Eğrinin seçilmesi sonucun güvenilirliğini doğrudan etkilemektedir Bu

amaçla aşağıda verilen Çizelge 4 kullanılmaktadır (Soulis, 2021; SCS, 1972).

Çizelge 4. Farklı koşullar için CN değerleri

Arazi Kullanımı veya Örtüsü	İşlem veya Uygulama	Hidrolojik Durum	Hidrolojik Toprak Grubu			
			A	B	C	D
Nadas	Çıplak Yüzey	Kötü	77	86	91	94
	Bitki atığı ile örtülü (CR)	Kötü	76	85	90	93
		İyi	74	83	88	90
Sıra Bitkileri	Düz sıra	Kötü	72	81	88	91
		İyi	67	78	85	89
	Düz sıra + CR	Kötü	71	80	87	90
		İyi	64	75	82	85
	Konturlu	Kötü	70	79	81	88
		İyi	65	75	82	86
	Konturlu + CR	Kötü	69	78	83	87
		İyi	64	74	81	85
	Konturlu Teraslı	Kötü	66	74	80	82
		İyi	62	71	78	81
	Konturlu Teraslı + CR	Kötü	65	73	79	81
		İyi	61	70	77	80
Küçük Taneli Tahlı	Düz sıra	Kötü	65	76	84	88
		İyi	63	75	83	87
	Düz sıra + CR	Kötü	64	75	83	86
		İyi	60	72	80	84
	Konturlu	Kötü	63	74	82	85
		İyi	61	73	81	84
	Konturlu + CR	Poor	62	73	81	84
		Good	60	72	80	83
	Konturlu Teraslı	Kötü	61	72	79	82
		İyi	59	70	78	81
	Konturlu Teraslı + CR	Poor	60	71	78	81
		Good	58	69	77	80

Çizelge 4. (devam) Farklı koşullar için CN değerleri (Devam)

Arazi Kullanımı veya Örtüsü	İşlem veya Uygulama	Hidrolojik Durum	Hidrolojik Toprak Grubu			
			A	B	C	D
Sık Ekilmiş Baklagiller veya Münavebeli Çayır	Düz sıra	Kötü	66	77	85	89
		İyi	58	72	81	85
	Konturlu	Kötü	64	75	83	85
		İyi	55	69	78	83
	Konturlu Teraslı	Kötü	63	73	80	83
		İyi	51	67	76	80
Mera Alanı		Kötü	68	79	86	89
		Orta	49	69	79	84
		İyi	39	61	74	80
	Konturlu	Kötü	47	67	81	88
		Orta	25	59	75	83
		İyi	6	35	70	79
Çayır (Daimi)		İyi	30	58	71	78
Ormanlık Alanlar		Kötü	45	66	77	83
		Orta	36	60	73	79
		İyi	25	55	70	77
Yollar, Toprak			72	82	87	89
Yollar, Sert Zeminli			74	84	90	92

Çizelgedeki terimler;

*CR : Yıl boyunca toprak yüzeyinin en az % 5'inin bitki atıklarıyla kaplı olduğu durumdur.

**Hidrolojik durum; infiltrasyon ve yüzeysel akışı etkileyen faktörlerin durumunu ifade etmektedir. İyi: Yüzeyin %20'den fazlası kalıntı ile kaplı olup, yüzeysel akışı azaltma eğilimindedir. Orta İnfiltrasyonu ortalama düzeyde teşvik eder ve yüzeysel akışı nispeten azaltma eğilimindedir. Kötü: İnfiltrasyonu engeller ve yüzeysel akışı artırma eğilimindedir.

***Hidrolojik Toprak Grubu (USDA, 2009; Seetpal vd., 2020);

Grup A: Bu gruptaki topraklar, doygun koşullarda düşük yüzeysel akış ve yüksek infiltrasyon potansiyeline sahiptir. Kil içeriği düşük, kum içeriği yüksek topraklardır. Genel olarak katmanların ortalama doymuş hidrolik iletkenliği 144mm/h'e eşit ve daha fazladır.

Grup B: Doygun koşullarda orta derecede düşük yüzeysel akış ve orta derecede yüksek infiltrasyon potansiyeline sahiptir. Tipik olarak %10 - 20 arasında kil ve %50-90 arasında kum içerir; tınlı kum veya

kumlu tın bünyesine sahiptir. Genel olarak katmanların ortalama doymuş hidrolik iletkenliği 36 -144 mm/h aralığındadır.

Grup C: Doygun koşullarda orta derecede yüksek yüzeysel akış potansiyeline sahiptir. İnfiltrasyon kapasitesi profil boyunca bir miktar kısıtlanmıştır. Tipik olarak %20 - 40 arasında kil ve %50'den az kum içerir; tın, siltli tın, kumlu killi tın, killi tın ve siltli killi tın bünyelerine sahiptir. Genel olarak katmanların ortalama doymuş hidrolik iletkenliği 3,6 - 36 mm/h aralığındadır.

Grup D: Bu gruptaki topraklar, doymun koşullarda iken yüksek yüzeysel akış potansiyeline sahiptir. Toprak boyunca su hareketi önemli düzeyde kısıtlanmıştır. ipik olarak %40'tan fazla kil, %50'den az kum içerir ve killi bünyeye sahiptir. Genel olarak katmanların ortalama doymuş hidrolik iletkenliği 3,6 mm/h e eşit ve daha düşüktür.

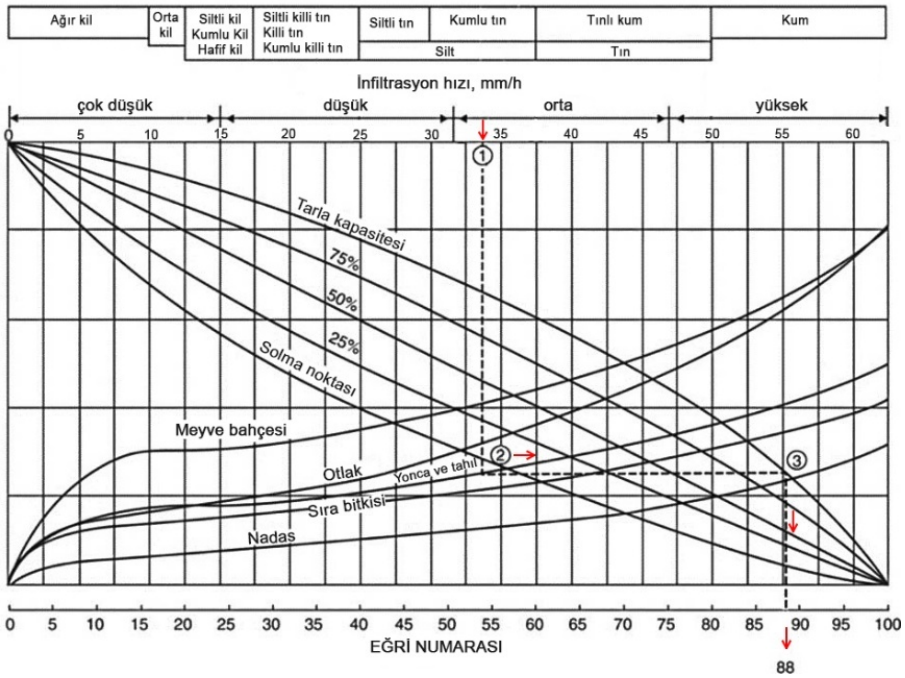
Beren ve Hoşgörmez (2024) Toprak Koruma Servisi Eğri Numarası (SCS-CN) yöntemi ile yüzey akış değerini hesaplamış ve akım gözlem istasyonunda kaydedilen gözlem verileri ile karşılaştırmışlardır. Çalışmadan elde edilen bulgular, ölçüm yapılmayan havzalarda yüzey akışın belirlenmesinde SCS-CN yönteminin etkinliğini ve doğruluğunu ortaya koymuştur. Çalışmada yağış verileri, hidrolik toprak grup sınıflamaları ve arazi kullanım örtüsü bilgilerinin Eğri Numarası (CN) değerlerinin belirlenmesinde önemli olup, yüzey akış hesaplamalarını doğrudan etkilediği vurgulanmış; CN değerlerinin yerel koşulları daha doğru yansıtacak şekilde uyarlanması, modelin performansını önemli ölçüde artırabileceği vurgulanmıştır.

Yöntemin yerel koşullarda uyum sağlaması için arazi eğim faktörünün, yağış süresinin ve başlangıçtaki nem içeriğinin dikkate alınması oldukça önemlidir. (Ajmal, et al., 2016; Ajmal, at al., 2020). yaptıkları çalışmada farklı eğimlerde (%7.50 - 53.53) 39 havzada 1779 farklı yağış-yüzey akış ölçümlerini değerlendirmişler ve sonuç olarak eğim(α ,yüzde) ile CN arasında aşağıdaki eşitliği elde etmişlerdir.

$$CN_{\alpha} = CN \left[\frac{1.927\alpha + 2.133}{\alpha + 2.179} \right]$$

CN_{α} yüzde bağılı düzeltilmiş CN değeri

Toprağın yağış öncesi nemi (ilk 30cm katmandaki) dikkate alınması için ise toprağın bünyesi, infiltrasyon hızı, yağış öncesi nem içeriği ve yüzey bitki örtüsü bilgileri kullanılarak ile havzanın eğri numarası elde edilebilmektedir (USBR, 1984). Pratik kullanım amaçlı hazırlanmış abak Şekil 2 de verilmiştir (Vlotman vd., 2020).



Şekil 2. Farklı havza özelliklerine bağlı eğri numarası değerleri

Wenhai and Wang (2020) yaptığı karşılaştırmalı değerlendirmelerinde yağış öncesi nem içeriğinin CN üzerindeki etkisini en iyi aşağıdaki eşitlikle ifade edilebileceğini belirtmiştir.

$$CN_{\theta} = CN \left[\frac{\theta}{0.15 + 0.24\theta} \right]$$

CN_{θ} yağış öncesi toprak nemine bağlı düzeltilmiş CN değeri, θ : toprak nemi cm^3/cm^3

Diğer bir yaklaşım olarak; Babagiray vd. (2025) tarafından Türkiye geneli için için hem Hidrolojik Toprak Grubu hem de 100 m çözünürlüklü CN değerleri, saha ölçümlerine dayalı ayrıntılı toprak haritaları ile CORINE (Çevresel Bilgi Koordinasyonu) arazi kullanım/örtüsü haritası kullanılarak üretilmiştir. Dijital formatta erişilebilen bu haritalar ülke genelinde kullanım olanağı sunmaktadır.

4. SONUÇ

Toprak ve su kaynaklarının yönetimi kapsamında drenaj sistemleri önemli bir yer tutmakta olup; etkili hidrolojik faktörlerin çeşitliliği ve değişkenliği nedeniyle, planlaması ve işletilmesi süreçlerinde pek çok zorluklar içermektedir.

Yüzey drenaj yöntemlerinde amaç toprak yüzeyinde biriken yüzey akışların araziden uzaklaştırılmasıdır. Bu bağlamda maksimum yüzey akış debisi, hacmi ve zamansal dağılımının bilinmesi drenaj çalışmalarında planlama, tasarım ve inşasında temel datayı oluşturmaktadır. Hatalı hidrolojik hesaplamalar; planlanan ve inşa edilen yapıların bazen yetersiz , bazen de gereğinden fazla büyük boyutlandırılmasına neden olabilmektedir. Yüzey akış miktarının yerinde doğrudan ölçülmesi en geçerli yol olmakla birlikte pekçok kısıtları ve zorlukları bulunmaktadır. Bu çalışmada yüzey akış miktarına etki eden pek çok faktör dikkate alınarak geliştirilmiş olan Rasyonel ve SCS Eğri yöntemleri ile yüzey akış tahmini ve dolayısıyla açık drenaj kanal kapasitelerinin belirlenmesi üzerinde durulmuştur. Yöntemlerin kullanımları detaylı olarak verilirken, kullanılan parametrelerin özellikle yerel koşullara uyumlu ve saha ölçümlerine dayalı olarak elde edilmesine yardımcı olacak bilgiler verilmiştir. Unutulmaması gerekir ki; bu yöntemler uygulamada kolaylık sağlayan birer tahmin yaklaşımlarıdır. En azından içerdiği parametrelerin ölçülmüş değerler olması önem taşımaktadır. Tahmin eşitliği parametrelerinin de tahmin ediliyor olması sonuçları soyut hale getirmektedir. Bu konuda geliştirilmiş pek çok hidrolojik model; bu kısıttan dolayı güvenilirliği tartışmalıdır. Gelişen teknolojiler saha verilerinin yetersiz olduğu alanlarda, öncelikle ölçülmüş data

yeterliliğini sağlama yönünde hizmet etmelidir. Bu aşama atlanıldığında gelişmiş yazılımlar, model ve yapay zeka uygulamaları bize sanal sonuçlar vermeye devam edecektir.

KAYNAKLAR

- Ajmal, M., Waseem, M., Ahn, J.-H., & Kim, T.-W. (2016). Runoff estimation using the NRCS slope-adjusted curve number in mountainous watersheds. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 142(4), 04016002.
- Ajmal, M., Waseem, M., Kim, D., & Kim, T.-W. (2020). A pragmatic slope-adjusted curve number model to reduce uncertainty in predicting flood runoff from steep watersheds. *Water*, 12(5), 1469. <https://doi.org/10.3390/w12051469>
- Anonim. (2021). 1. Su Şurası. Tarım ve Orman Bakanlığı.
- Azizian, A. (2019). Comparison of salt experiments and empirical time of concentration equations. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Water Management*, 172(3), 109–122.
- Babagiray, S., Babagiray, G., Cevahir, F., & Seyrek, K. (2025). TRCN100: High-resolution gridded curve numbers of Türkiye to use in hydrological models. *Journal of Computing in Civil Engineering*. <https://doi.org/10.1061/JCCEE5/CPENG-6701>
- Beren, M., & Hoşgörmez, H. (2024). Determination of the direct runoff using the soil conservation service curve number method and its applicability to Lüleburgaz Sub-Basin (Thrace Region). *Soil Studies*, 13(2), 64–73.
- Beyazıt, M. (2011). Hidroloji. Birsen Yayınları.
- Carey, B. W., Stone, B., Norman, P. L., & Shilton, P. (2015). The empirical version of the rational method. In *Soil conservation guidelines for Queensland (Chapter 4)*. Department of Science, Information Technology and Innovation.
- Gemalmaz, E. (1993). Drenaj mühendisliği (Cilt 1). Atatürk Üniversitesi Yayınları No: 746.
- Güngör, Y., Erözel, Z., & Öztürk, A. (2016). Drenaj sistemlerinin tasarımı. Ankara Üniversitesi Yayınları No: 1590.

- Hawkins, R. H., Ward, T. J., Woodward, D. E., & Van Mullem, J. A. (2009). ASCE EWRI task committee report on state of the practice in curve number hydrology (Vol. 106). American Society of Civil Engineers.
- Kirpich, Z. P. (1940). Time of concentration of small agricultural watersheds. *Civil Engineering*, 10(6), 362
- Linsley, R. K., Kohler, M. A., Paulhus, J. L. H., & Wallace, J. S. (1988). *Hydrology for engineers* (3rd ed.). McGraw-Hill.
- SCS (1972). *National engineering handbook* (Section 4). U.S. Department of Agriculture.
- Okman, C. (2012). Hidroloji. Ankara Üniversitesi Yayınları No: 1597.
- Seetpal, M. K., et al. (2020). Planning and design of surface drainage system of an agricultural farmland using HCS curve number method with most economical section. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 9(5), 1210–1222.
- Soulis, K. X. (2021). Soil conservation service curve number (SCS-CN) method: Current applications, remaining challenges, and future perspectives. *Water*, 13(2), 192. <https://doi.org/10.3390/w13020192>
- Temel, İ., (2025). Türkiye maksimum yağışlarının şiddet-süre-tekrür eğrilerinin değerlendirilmesi (Doktora tezi). Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- USBR. (1984). *Drainage manual*. U.S. Department of the Interior.
- USDA (2009). *National engineering handbook: Part 630 – Hydrology* (Subpart C: Hydrologic soil groups, amended June 2025).
- Uslu, N. (2005). *Engineering hydrology*. METU Press.
- Vlotman, W., Smedema, L., & Rycroft, D. (2020). *Modern land drainage* (2nd ed.). Taylor & Francis.
- Wenhai, Shi., & Wang, N. (2020). An improved SCS-CN method incorporating slope, soil moisture, and storm duration factors for runoff prediction. *Water*, 12(5), 1335.

KIYI KENTSEL ORTAMLARDA YAYA ÜST GEÇİTLERİNİN YAPISAL, KULLANICI ODAKLI VE SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK AÇISINDAN ÇOK BOYUTLU DEĞERLENDİRİLMESİ

Sina ATABEY¹

Abdullah BOSTANCI²

1. GİRİŞ

Bu çalışma, kıyı kentlerinde yer alan yaya üst geçitlerinin malzeme seçimi, yapısal sistem tercihleri ve bakım stratejilerinin hangi faktörler tarafından belirlendiğini ortaya koymayı amaçlamaktadır. Bu bağlamda, yaya üst geçitleri, kentsel hareketlilik sistemlerinde güvenlik ve sürekliliği sağlayan kritik altyapı elemanlarıdır. Özellikle kıyı kentlerinde yoğun trafik, yüksek nem ve tuzlu atmosfer gibi çevresel koşullar, bu yapıların tasarım ve işletimini çok boyutlu bir problem alanına dönüştürmektedir. Bu çalışma, aynı veri setini kullanmakla birlikte önceki çalışmalardan farklı olarak, uzman görüşlerini politika, yaşam döngüsü ve erişilebilirlik perspektifleriyle yeniden yorumlamaktadır. Kentsel altyapı yatırımlarında artan maliyet baskısı ve iklim değişikliği, karar vericileri daha dayanıklı ve sürdürülebilir çözümlere yöneltmektedir. Bu bağlamda yaya üst geçitleri, yalnızca teknik performanslarıyla

¹ Dr. Öğr. Üyesi, Avrasya Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, İnşaat Mühendisliği, ORCID: 0009-0000-2514-8499.

² Öğr. Gör, Avrasya Üniversitesi, Meslek Yüksekokulları, İnşaat Teknolojisi Programı, ORCID: 0000-0002-5306-9765.

değil, sosyal kapsayıcılık ve estetik katkılarıyla da değerlendirilmelidir.

Yaya üst geçitleri, kentsel ulaşım sistemlerinde yaya güvenliğini artırmak ve taşıt trafiğinin sürekliliğini sağlamak amacıyla kullanılan temel altyapı elemanları arasında yer almaktadır. Özellikle çok şeritli yollar, yüksek hız limitine sahip arterler ve yoğun yaya hareketliliğinin bulunduğu bölgelerde, yaya-araç etkileşimini azaltan en etkili çözümlerden biri olarak kabul edilmektedir (Hasan vd., 2020; Truong ve Somenahalli, 2019). Literatürde, yaya üst geçitlerinin yalnızca fiziksel bir geçiş aracı değil, aynı zamanda kentsel güvenlik politikalarının mekânsal bir bileşeni olduğu vurgulanmaktadır (Kawther ve Mohammad, 2024).

Yaya üst geçitlerinin yapısal sistemleri incelendiğinde, betonarme, çelik ve kompozit sistemlerin en yaygın kullanılan çözümler olduğu görülmektedir. Betonarme sistemler, yüksek basınç dayanımı ve nispeten düşük ilk yatırım maliyetleri nedeniyle özellikle gelişmekte olan ülkelerde tercih edilmektedir (Pan, 1992; Aydın, 2024). Ancak bu sistemlerin ağır olması, uzun inşaat süresi gerektirmesi ve ilerleyen yıllarda çatlak oluşumu gibi bakım sorunları doğurması literatürde sıklıkla dile getirilmektedir (Eremeev vd., 2021).

Çelik yaya üst geçitleri ise hafif yapıları, hızlı montaj imkânı ve estetik tasarıma olanak tanınması nedeniyle son yıllarda öne çıkmaktadır (Jiang ve Yang, 2012). Buna karşın, özellikle kıyı kentlerinde çelik yapı elemanlarının korozyona karşı hassasiyeti önemli bir dezavantaj olarak değerlendirilmektedir. Deniz tuzu, yüksek nem ve rüzgâr etkisi, çelik elemanlarda malzeme bozulmasını hızlandırmakta ve bakım maliyetlerini artırmaktadır (Heldak vd., 2021; Ribeiro da Silva ve Santos da Silva, 2018). Bu durum, çelik sistemlerin yaşam döngüsü

maliyetlerinin betonarme sistemlere kıyasla daha dikkatli analiz edilmesini gerekli kılmaktadır.

Kompozit yapı sistemleri, betonarme ve çeliğin avantajlarını bir araya getirmeyi amaçlayan çözümler olarak literatürde yer bulmaktadır. Bu sistemler, dinamik yükler altında daha iyi performans gösterebilmekte ve açıklık geçme kapasitesi açısından avantaj sağlamaktadır (Eremeev vd., 2021). Ancak, kompozit sistemlerin tasarımı, detaylandırılması ve bakım süreçleri daha karmaşık olup, uzmanlık gerektirmektedir. Bu nedenle uygulama alanları hâlen sınırlıdır (Ivorra vd., 2015).

Kıyı kentlerinde yer alan yaya üst geçitleri için çevresel etkiler literatürde ayrı bir inceleme alanı oluşturmaktadır. Denizel iklim koşulları; rüzgâr yükleri, tuz püskürtmesi ve nem oranı gibi faktörler aracılığıyla yapısal performansı doğrudan etkilemektedir (Pan, 1992; Heldak vd., 2021). Bu nedenle, kıyı bölgelerinde tasarlanan yaya üst geçitlerinde malzeme seçimi kadar koruyucu kaplamalar, drenaj detayları ve bakım stratejileri de kritik öneme sahiptir.

Yaya üst geçitlerinin başarısını belirleyen bir diğer önemli unsur kullanıcı davranışlarıdır. Yapılan çalışmalar, yaya üst geçitlerinin fiziksel olarak mevcut olmasının tek başına yeterli olmadığını, kullanıcıların bu yapıları tercih etmelerinde erişilebilirlik, konfor ve algılanan güvenliğin belirleyici olduğunu ortaya koymaktadır (Patra vd., 2020). Özellikle engelli bireyler, yaşlılar ve çocuklu aileler için rampalar, asansörler ve kapalı geçişlerin bulunmaması, üst geçitlerin kullanılmamasına yol açabilmektedir (Ghafoor ve Khan, 2021).

Türkiye özelinde yapılan çalışmalar, birçok yaya üst geçidinde erişilebilirlik kriterlerinin yeterince sağlanmadığını ve tasarım sürecinde kullanıcı odaklı yaklaşımların sınırlı kaldığını göstermektedir (Aksoy, 2024; Akyüz, 2023). Bu durum, yaya üst geçitlerinin kentsel entegrasyonunu ve toplumsal kabulünü

olumsuz yönde etkilemektedir. Literatürde, kullanıcı geri bildirimlerinin tasarım ve bakım süreçlerine entegre edilmesi gerektiği sıklıkla vurgulanmaktadır (Kawther ve Mohammad, 2024).

Dolayısıyla literatür, yaya üst geçitlerinin yalnızca mühendislik hesaplarıyla değerlendirilemeyecek kadar çok boyutlu yapılar olduğunu ortaya koymaktadır. Yapısal performans, çevresel dayanıklılık, sürdürülebilirlik, erişilebilirlik ve kullanıcı davranışları; bu yapıların başarısını birlikte belirleyen temel unsurlardır. Bu çalışma, mevcut literatürdeki bu çok boyutlu yaklaşımdan hareketle, uzman görüşlerine dayalı verileri farklı bir analitik çerçevede ele almayı amaçlamaktadır. Araştırma, Trabzon ili Ortahisar ilçesinde bulunan yaya üst geçitlerine ilişkin olarak farklı disiplinlerden uzmanlara yöneltilen 30 açık uçlu soruya verilen yanıtların grafiksel analizine dayanmaktadır. Çalışmada nicel yapısal ölçümler yerine, uzman algısı, mesleki deneyim ve karar süreçleri ön plana çıkarılmıştır. Bulgular, özellikle kıyı ikliminin çelik yapılarda korozyon riskini artırdığını, betonarme sistemlerin ise bakım kolaylığı açısından avantaj sağladığını göstermektedir. Bununla birlikte erişilebilirlik, sürdürülebilirlik ve yaşam döngüsü maliyetlerinin tasarım kararlarında yeterince belirleyici olmadığı tespit edilmiştir. Çalışma, yaya üst geçitlerinin yalnızca mühendislik yapıları değil, aynı zamanda kentsel yaşam kalitesini etkileyen kamusal altyapı bileşenleri olarak ele alınması gerektiğini vurgulamaktadır.

2. VERİ SETİ VE ANALİTİK YAKLAŞIM

Bu çalışmanın veri seti, yaya üst geçitlerinin tasarımı, yapımı, işletilmesi ve sürdürülebilirliği konularında deneyime sahip uzmanlara yöneltilen 30 açık uçlu soruya verilen yanıtların grafiksel gösterimlerinden ve sahada çekilen yaya üst geçidi

fotoğraflarından oluşmaktadır. Veri seti, nicel ölçümlere dayanmamakta; uzman deneyimi ve gözlemsel bilgiye dayalı nitel veriler içermektedir.

Uzman görüşleri; inşaat mühendisliği, ulaştırma mühendisliği, mimarlık ve şehir planlama disiplinlerinden gelen profesyonellerin değerlendirmelerini yansıtmaktadır. Sorular; malzeme seçimi, yapısal sistem tercihleri, bakım-onarım sorunları, çevresel etkiler, erişilebilirlik, sürdürülebilirlik ve kullanıcı memnuniyeti gibi tematik başlıklar altında toplanmıştır (Tablo 1). Her bir soruya verilen yanıtlar grafikler aracılığıyla özetlenmiş ve uzman eğilimleri görsel olarak ortaya konmuştur.

Tablo 1. Açık uçlu sorular

NO	Sorular
1	Yaya üst geçit projelerinde en sık hangi tip yapısal sistemle (betonarme veya çelik) karşılaştınız? Sizce bu yaygınlığın nedeni nedir?
2	Betonarme ve çelik yaya üst geçitleri arasında uygulama, bakım ve onarım süreçleri açısından temel farklar nelerdir?
3	İklim koşulları, trafik yoğunluğu ve topografya yaya üst geçitlerinin tasarım, planlama ve yapım süreçlerini nasıl etkiler?
4	Betonarme veya çelik yaya üst geçitlerinin tasarımı ve inşası sırasında karşılaştığınız en büyük teknik zorluklar nelerdir?
5	Bakım ve onarım süreçlerinde en sık hangi sorunlarla karşılaşıyorsunuz? Bunları gidermek için hangi çözümleri uyguluyorsunuz?
6	İnşaat sahasında veya proje teslimatı sırasında hangi lojistik sorunları yaşıyorsunuz? Bu zorlukların üstesinden nasıl geliyorsunuz?
7	Malzeme seçiminde (betonarme mi çelik mi) karar vericileri etkileyen temel faktörler (maliyet, dayanım, estetik, bakım süresi vb.) nelerdir?
8	Maliyet etkinliği ile dayanıklılık arasında bir denge kurmanız gerektiğinde hangi kriterleri göz önünde bulunduruyorsunuz?
9	Kullanıcı memnuniyetine ilişkin geri bildirimleri nasıl ve hangi kanallardan alıyorsunuz? Bu geri bildirimler tasarım veya uygulama süreçlerini etkiliyor mu?
10	Beton ve çeliği birleştiren kompozit yapı sistemlerinin avantajları ve sınırlamaları nelerdir? Bu sistemler hangi mühendislik koşulları altında daha verimli kullanılabilir?
11	Bölgede yaya üst geçitlerinin trafik güvenliği ve yaya konforuna etkisine ilişkin gözlemlerinizi nelerdir?
12	Yaya üst geçitlerinin bakım ve onarım maliyetleri zamanla nasıl değişti? Bu süreçleri optimize etmek için hangi önlemler alınabilir?
13	Betonarme ve çeliği birleştiren kompozit sistemler hakkında ne düşünüyorsunuz? Hangi koşullar altında pratikte avantajlar sağlayabilirler?
14	İklim değişikliğinin artan hızı, üst geçitlerin uzun vadeli dayanıklılığını ve maliyet etkinliğini nasıl etkileyecek? Hangi stratejiler benimsenmeli?

- 15 Bakım ve onarım süreçleri göz önüne alındığında maliyetler zaman içinde nasıl değişiyor?
- 16 Geri dönüştürülmüş malzeme kullanımıyla projelerde maliyet avantajı sağlanabilir mi?
- 17 Çelik ve betonarme üst geçitlerin dayanıklılığı hangi kriterlere göre değerlendirilir?
- 18 Doğal afetlere (deprem, sel, rüzgar yükleri vb.) karşı hangi malzeme daha dayanıklıdır?
- 19 Kullanılan yapı malzemelerinin kalite kontrol süreçleri nasıl yürütülüyor?
- 20 Hava koşulları, trafik yoğunluğu ve çevresel faktörler yaya üst geçitlerinin dayanıklılığını nasıl etkiler?
- 21 Yaya üst geçitlerinde daha dayanıklı ve uzun ömürlü malzemeler kullanılarak yapısal performans nasıl iyileştirilebilir? Bu bağlamda hangi yeni malzemeler veya teknolojiler öne çıkıyor?
- 22 Bakım gerektiren en yaygın yapısal sorunlar nelerdir?
- 23 Betonarme yaya üst geçitlerinin onarım sürecinde en sık karşılaşılan sorunlar nelerdir?
- 24 Çelik yaya üst geçitlerinin korozyon koruma yöntemleri ne sıklıkla yenilenmelidir?
- 25 Farklı tipteki yaya üst geçitleri için rutin bakım sıklığı nasıl belirleniyor ve bu sürecin maliyeti nedir?
- 26 geri bildirimleri bakım süreçlerine ne ölçüde entegre ediliyor? Bu geri bildirimler hangi kriterlere göre değerlendiriliyor?
- 27 Yaya üst geçitlerinin yapımında kullanılan malzemelerin geri dönüştürülebilir olması karar alma sürecinde ne kadar önemlidir?
- 28 Mevcut projelerde geri dönüştürülmüş betonarme ve çelik malzemelerin kullanımı ne kadar yaygındır?
- 29 Yaya üst geçitlerinde sürdürülebilir malzemelerin kullanımı çevresel etkiyi nasıl azaltabilir?
- 30 Kullanım dışı kalan yaya üst geçitlerinin sökülme ve geri dönüşüm süreçleri nasıl yönetiliyor?

Analitik yaklaşım, klasik istatistiksel analizlerden farklı olarak **yorumlayıcı tematik analiz** esasına dayanmaktadır. Grafikler, frekans dağılımlarından ziyade uzmanların hangi konular üzerinde yoğunlaştığını ve hangi sorunları öncelikli gördüğünü ortaya koymak amacıyla değerlendirilmiştir. Bu yaklaşım, sayısal karşılaştırmalardan çok, karar verme süreçlerini şekillendiren düşünsel kalıpları anlamaya yöneliktir.

Saha fotoğrafları ise analitik sürecin tamamlayıcı bir bileşeni olarak kullanılmıştır. Köprü fotoğrafları, üst geçitlerin yapısal tipolojisini, kapalı veya açık olma durumlarını, erişilebilirlik çözümlerini ve çevresel bağlamla olan ilişkilerini görsel olarak ortaya koymaktadır. Tablo 2’de sunulan örnek yaya

üst geçidi görüntüsü, kıyı hattına yakın konumlanan çelik portal çerçeveli bir yapının çevresel koşullarla etkileşimini açık biçimde göstermektedir. Bu tür görseller, uzman görüşleriyle elde edilen bulguların sahadaki karşılıklarını değerlendirmeye olanak sağlamaktadır.

Tablo 2. Trabzon Ortahisar Yaya Üst Geçidi Görüntü ve Yapısal Özellikleri

no	İsim	Fotoğraf	Açıklık sayısı	Yapısal Özellikler
1	Beşirli Sahil Camii Önündeki Yaya Üst Geçidi		2	Çelik Portal çerçeve, Diyagonal gergi çubukları, Engelli erişimi, Kapalı
2	Beşirli Akyazı Stadyumu Önü Yaya Üst Geçidi		2	Çelik Portal çerçeve, Diyagonal gergi çubukları, Engelli erişimi, Kapalı
3	Beşirli Önünde Yaya Üst Geçidi Ekopark		3	Çelik Portal çerçeve, Diyagonal gergi çubukları, Engelli erişimi, Kapalı
4	Ali Yasin Erosmanoğlu Yaya Üst Geçidi		2	Çelik Portal çerçeve, Diyagonal gergi çubukları, Engelli erişimi, Kapalı
5	Moloz Meydanı Önündeki Yaya Üst Geçidi		1	Çelik bağlı kemerli yapı, Dikey askılar, Engelli erişimi yok , Açık
6	Özel Hastane Önündeki Yaya Üst Geçidi		3	Çelik Portal çerçeve, Diyagonal gergi çubukları, Engelli erişimi, Kapalı
7	KTÜ C Kapısı Önündeki Yaya Üst Geçidi		2	Prefabrik betonarme karkas, Engelli erişimi yok , Kapalı
8	Havaalanı Çıkışı I Önündeki Yaya Üst Geçidi		1	Çelik kafes sistemi, Engelli erişimi, Kapalı
9	Havaalanı II Önündeki Yaya Üst Geçidi		1	Çelik Portal çerçeve, Çapraz gergi çubukları, Engelli erişimi yok , Kapalı
10	Ceyhun Mumcu Yaya Üst Geçidi		1	Çelik bağlı kemerli yapı, Dikey askılar, Engelli erişimi yok , Kapalı
11	Hayri Gür Spor Salonu Önündeki Yaya Üst Geçidi		1	Çelik Portal çerçeve, Çapraz gergi çubukları, Engelli erişimi yok , Kapalı
12	Çimenli Yaya Üst Geçidi		1	Çelik Portal çerçeve, Çapraz gergi çubukları, Engelli erişimi yok , Açık
13	Yalıncak Önündeki Yaya Üst Geçidi		2	Çelik Portal çerçeve, Engelli erişimi yok , Açık

14	Yalınca I Avrasya Üniversitesi Önü Yaya Üst Geçidi		1	Çelik Portal çerçeve, Çapraz gergi çubukları, Engelli erişimi yok , Kapalı
15	Yalınca II Yaya Üst Geçidi DSİ II		2	Prefabrik betonarme karkas, Engelli erişimi yok , Açık
16	Yalınca III Yaya Üst Geçidi		1	Çelik Portal çerçeve, Çapraz gergi çubukları, Engelli erişimi yok , Açık

Bu yöntemsel yaklaşım, aynı veri setinin daha önceki çalışmalardan farklı bir analitik çerçevede ele alınmasını sağlamaktadır. Böylece çalışma, özgünlüğünü veri toplama aşamasından değil, verinin **yorumlanma biçiminden** ve **kuramsal konumlandırmasından** almaktadır. Sonuç olarak, uzman görüşleri ve köprü fotoğraflarına dayalı bu bütüncül analiz, kıyı kentsel ortamlarda yaya üst geçitlerinin gelecekteki tasarım ve yönetim süreçlerine yönelik önemli çıkarımlar sunmaktadır.

3. UZMAN GÖRÜŞLERİNE DAYALI BULGULAR

Uzman görüşlerine ait grafiklerin analizi, yaya üst geçitlerinin tasarım, yapım ve işletme süreçleri çok boyutlu bir bakış açısıyla ele alınmaktadır. Betonarme, çelik ve kompozit yapısal sistemlerin seçiminde etkili olan mühendislik kriterleri; maliyet, dayanıklılık, bakım gereksinimleri ve estetik açıdan değerlendirilmektedir. İklim koşulları, trafik yoğunluğu ve topoğrafik özelliklerin üst geçitlerin planlama ve uygulama süreçlerine etkileri incelenirken, sahada karşılaşılan teknik ve lojistik sorunlara da değinilmektedir. Ayrıca, bakım ve onarım süreçleri ile yapıların yaşam döngüsü boyunca karşılaşılan yapısal problemlerin yönetimi ele alınmaktadır. Bölümün son kısmında ise sürdürülebilirlik, geri dönüştürülebilir malzeme kullanımı ve iklim değişikliğinin yaya üst geçitlerinin uzun vadeli performansı ve maliyet etkinliği üzerindeki etkileri tartışılmaktadır.

3.1. Yapısal Sistem Seçimi ve Tasarım Yaklaşımları

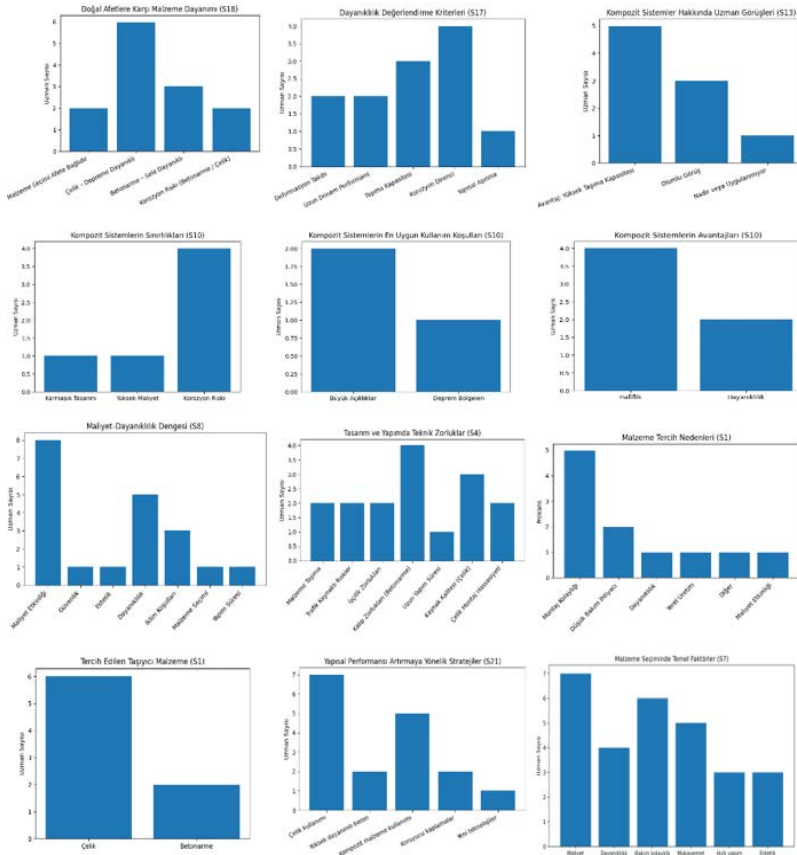
Şekil 1(S1-1) ve Şekil 1(S1-2)'de sunulan uzman değerlendirmeleri, yaya üst geçitlerinde taşıyıcı sistem tercihlerinin büyük ölçüde çelik yönünde şekillendiğini ortaya koymaktadır. Çeliğin baskın tercih olmasında montaj kolaylığı başta olmak üzere düşük bakım gereksinimi ve uygulama sürecine ilişkin pratik avantajların belirleyici olduğu görülmektedir. Buna karşılık betonarme sistemler daha sınırlı düzeyde tercih edilmekte olup, dayanıklılık ve maliyet etkinliği gibi faktörler ikincil gerekçeler olarak değerlendirilmektedir.

Şekil 1(S4), Şekil 1(S7) ve Şekil 1(S8)'de yer alan bulgular, malzeme seçimi ve yapım sürecinde karşılaşılan teknik ve ekonomik kısıtların uzman algısında önemli bir yer tuttuğunu göstermektedir. Betonarme sistemlerde kalıp uygulamaları, çelik sistemlerde ise kaynak kalitesi öne çıkan teknik sorunlar olarak değerlendirilirken; maliyet, bakım kolaylığı ve mukavemet malzeme seçiminde belirleyici kriterler olarak öne çıkmaktadır. Maliyet–dayanıklılık dengesinde ise maliyet etkinliğinin temel belirleyici unsur olduğu anlaşılmaktadır.

Kompozit sistemlere ilişkin değerlendirmeler Şekil 1(S10-1), Şekil 1(S10-2), Şekil 1(S10-3) ve Şekil 1(S13) kapsamında ele alındığında, bu sistemlerin özellikle hafiflik ve büyük açıklık geçme kapasitesi açısından olumlu algılandığı görülmektedir. Bununla birlikte korozyon riski, yüksek maliyet ve tasarım karmaşıklığı gibi sınırlılıkların uygulama yaygınlığını kısıtladığı; yüksek taşıma kapasitesine rağmen kompozit sistemlerin pratikte sınırlı ölçüde tercih edildiği anlaşılmaktadır.

Dayanıklılık ve güvenlik boyutu Şekil 1(S17), Şekil 1(S18) ve Şekil 1(S21) çerçevesinde değerlendirildiğinde, korozyon direncinin temel dayanıklılık kriteri olarak öne çıktığı görülmektedir. Afet türüne bağlı olarak malzeme performansının farklılaştığı; çelik sistemlerin deprem etkilerine, betonarme

sistemlerin ise sel koşullarına karşı daha avantajlı algılandığı ortaya konulmaktadır. Yapısal performansın artırılmasına yönelik stratejilerde ise çelik ve kompozit malzeme kullanımının önceliklendirildiği, yenilikçi teknolojilerin ise henüz sınırlı düzeyde benimsendiği anlaşılmaktadır.



Şekil 1. Yapısal Sistem Seçimi ve Tasarım Yaklaşımları

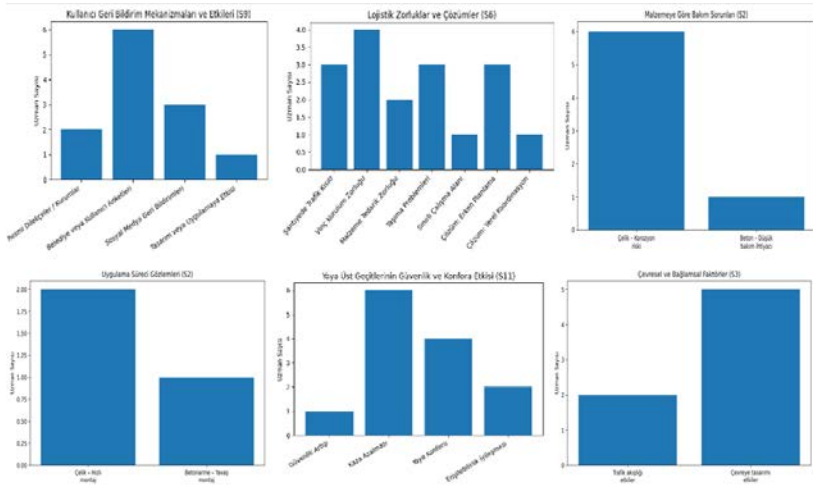
3.2. Planlama, Uygulama ve İnşaat Süreçleri

Şekil 2(S2-1) ve Şekil 2(S2-2) kapsamında elde edilen bulgular, yaya üst geçitlerinde malzeme seçiminin bakım gereksinimi ve uygulama süresiyle doğrudan ilişkili olduğunu ortaya koymaktadır. Özellikle metal esaslı taşıyıcı sistemlerde

korozyon riski bakım süreçlerinin en kritik sorun alanı olarak değerlendirilirken, düşük bakım gereksinimine ilişkin algının oldukça sınırlı kaldığı görülmektedir. Buna karşın çelik sistemlerin daha hızlı montaj imkânı sunması, zaman faktörünün malzeme tercihinde önemli bir belirleyici olduğunu göstermektedir.

Şekil 2(S3) ve Şekil 2(S6)'da sunulan uzman görüşleri, tasarım ve yapım süreçlerinde çevresel uyum, estetik ve lojistik koşulların karar mekanizmalarında belirleyici rol oynadığını ortaya koymaktadır. Kentsel bağlam ve görsel uyum öncelikli tasarım kriterleri arasında yer alırken, vinç kurulumu, trafik kısıtları ve taşıma problemleri yapım sürecinde öne çıkan lojistik zorluklar olarak değerlendirilmektedir. Bu durum, erken planlama ve organizasyonun proje başarısı açısından kritik olduğunu göstermektedir.

Kullanıcı ve toplumsal etkilere ilişkin bulgular Şekil 2(S9) ve Şekil 2(S11) çerçevesinde değerlendirildiğinde, kullanıcı geri bildirimlerinin çoğunlukla dolaylı kanallar aracılığıyla toplandığı ve tasarım ile uygulama süreçlerine sınırlı ölçüde yansıdığı anlaşılmaktadır. Buna karşın uzman değerlendirmeleri, yaya üst geçitlerinin trafik kazalarını azaltma ve yaya konforunu artırma yönündeki katkılarının belirgin olduğunu; erişilebilirlik ve genel güvenlik etkilerinin ise ikincil düzeyde ele alındığını ortaya koymaktadır.



Şekil 2. Planlama, Uygulama ve İnşaat Süreçleri

3.3. Bakım, Onarım ve Yaşam Döngüsü Yönetimi

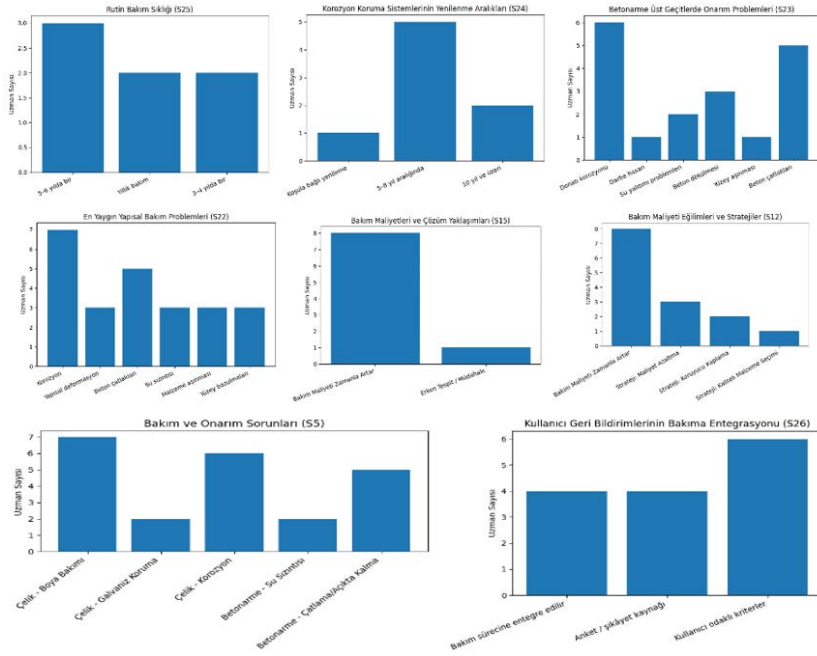
Şekil 3(S5) kapsamında elde edilen bulgular, yaya üst geçitlerinde bakım ve onarım sorunlarının kullanılan taşıyıcı sisteme bağlı olarak farklılaştığını ortaya koymaktadır. Uzman değerlendirmelerine göre çelik taşıyıcı sistemlerde boya yenileme gereksinimi ve korozyon ön plana çıkarken, betonarme üst geçitlerde çatlama ve taşıyıcı elemanların açıkta kalması temel sorun alanlarını oluşturmaktadır. Galvaniz koruma ihtiyacı ve su sızıntısı gibi problemler ise ikincil bakım gereksinimleri olarak değerlendirilmekte olup, bu durum bakım önceliklerinin büyük ölçüde malzeme özellikleri tarafından belirlendiğini göstermektedir.

Bakım maliyetlerine ilişkin bulgular (Şekil 3(S12) ve Şekil 3(S15)), zaman içerisinde artış eğilimine yönelik güçlü bir uzman algısına işaret etmektedir. Buna karşın, maliyetleri dengelemeye veya azaltmaya yönelik stratejik yaklaşımların sınırlı düzeyde ele alındığı; koruyucu kaplamalar ve nitelikli malzeme seçimi gibi önleyici uygulamaların ikincil önlemler olarak görüldüğü anlaşılmaktadır. Bu durum, bakım maliyet artışının büyük ölçüde kaçınılmaz bir süreç olarak algılandığını

ve proaktif bakım anlayışının henüz yeterince yaygınlaşmadığını ortaya koymaktadır.

Yapısal bakım ve onarım problemlerine ilişkin değerlendirmeler (Şekil 3(S22) ve Şekil 3(S23)), sorunların ağırlıklı olarak korozyon ve beton çatlakları etrafında yoğunlaştığını göstermektedir. Özellikle betonarme üst geçitlerde donatı korozyonu ve uzun vadeli malzeme bozulmaları onarım ihtiyacının temel nedenleri arasında yer almakta; beton dökülmesi, su yalıtımı sorunları ve mekanik etkiler daha sınırlı düzeyde ifade edilmektedir. Bu bulgular, bakım ve onarım gereksinimlerinin çevresel etkiler ve zamanla gelişen malzeme bozulmalarıyla yakından ilişkili olduğunu ortaya koymaktadır.

Bakım uygulamalarının organizasyonuna ilişkin sonuçlar (Şekil 3(S24) ve Şekil 3(S25)), periyodik bakım anlayışının baskın olduğunu göstermektedir. Korozyon koruma sistemlerinin belirli aralıklarla yenilenmesi ve rutin bakım faaliyetlerinin orta ve uzun vadeli periyotlar üzerinden planlanması, düzenli ancak esnekliği sınırlı bir bakım yaklaşımının benimsendiğine işaret etmektedir. Kullanıcı geri bildirimlerine ilişkin bulgular (Şekil 3(S26)) ise kullanıcı deneyiminin bakım planlamasında önemli bir referans olarak kabul edildiğini; ancak bu geri bildirimlerin sistematik, ölçülebilir ve doğrudan uygulamaya aktarılma düzeyinin halen sınırlı kaldığını göstermektedir.

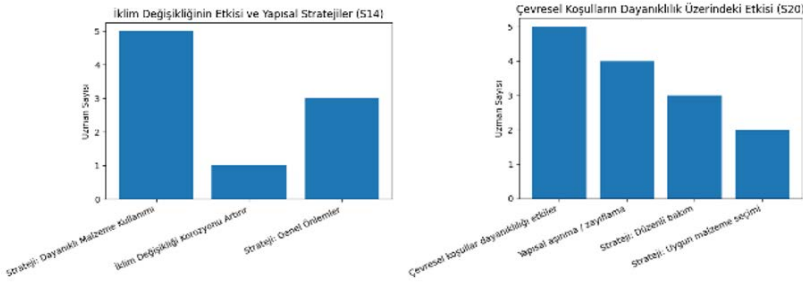


Şekil 3. Bakım, Onarım ve Yaşam Döngüsü Yönetimi

3.4. Dayanıklılık, İklim Etkileri ve Doğal Afetler

Şekil 4(S14), iklim değişikliğine karşı yaya üst geçitlerinde en yaygın yaklaşımın dayanıklı malzeme kullanımına yönelim olduğunu göstermektedir. Uzman değerlendirmeleri, doğrudan ve uygulanabilir malzeme temelli çözümlerin önceliklendirildiğini; korozyon riski gibi spesifik teknik etkilerin ise sınırlı düzeyde ele alındığını ortaya koymaktadır.

Şekil 4(S20), çevresel koşulların yaya üst geçitlerinin dayanıklılığı üzerinde belirleyici bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir. Uzman görüşleri, yapısal aşınma ve malzeme zayıflamasının önemli sorun alanları olduğunu; bu etkilerin düzenli bakım ve uygun malzeme seçimiyle sınırlandırılabileceğini ortaya koymaktadır.



Şekil 4. Dayanıklılık, İklim Etkileri ve Doğal Afetler

3.5. Sürdürülebilirlik, Geri Dönüşüm ve Malzeme Yönetimi

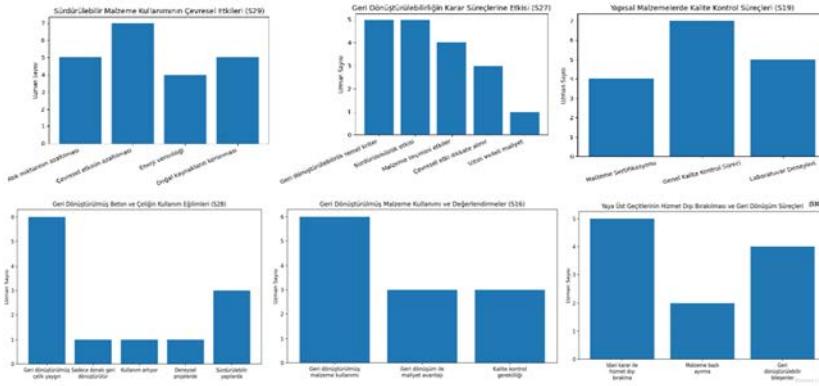
Şekil 5(S16) kapsamında elde edilen bulgular, yaya üst geçitlerinde geri dönüştürülmüş malzeme kullanımının uzmanlar tarafından genel olarak olumlu değerlendirildiğini ortaya koymaktadır. Sürdürülebilirlik yaklaşımı güçlü biçimde benimsenmekle birlikte, maliyet avantajı ve özellikle kalite kontrol gerekliliği daha sınırlı düzeyde vurgulanmıştır. Bu durum, çevresel faydaların kabul gördüğünü ancak uygulama aşamasında kalite güvencesinin kritik bir eşik olarak değerlendirildiğini göstermektedir.

Kalite güvence süreçlerine ilişkin değerlendirmeler (Şekil 5(S19)), yapısal malzemelerde genel kalite kontrol uygulamaları ve laboratuvar deneylerinin öncelikli araçlar olarak benimsendiğini ortaya koymaktadır. Sertifikasyon ise bu süreci tamamlayıcı bir unsur olarak değerlendirilmekte olup, bütüncül bir kalite kontrol anlayışının uzman algısında yerleştiği anlaşılmaktadır.

Sürdürülebilirliğin karar alma süreçlerindeki rolü incelendiğinde (Şekil 5(S27)), geri dönüştürülebilirlik ve çevresel etkinin temel kriterler hâline geldiği görülmektedir. Uzun vadeli maliyet faktörünün görece ikincil düzeyde ele alınması, çevresel önceliklerin ekonomik kaygıların önüne geçtiğini göstermektedir. Bu bağlamda, geri dönüştürülmüş malzemeler arasında çeliğin

uygulamada daha yaygın ve kabul görmüş olduğu; geri dönüştürülmüş betonun ise daha sınırlı ve seçici kullanımlarla ilişkilendirildiği belirlenmiştir (Şekil 5(S28)).

Sürdürülebilir malzeme kullanımının etkilerine ilişkin bulgular (Şekil 5(S29)), çevresel etkilerin azaltılması, atık miktarının düşürülmesi ve doğal kaynakların korunması açısından önemli kazanımlar sağlandığını ortaya koymaktadır. Enerji verimliliği ise bu kazanımları destekleyen tamamlayıcı bir unsur olarak değerlendirilmektedir. Öte yandan, yapıların hizmet dışı bırakılma sürecine ilişkin sonuçlar (Şekil 5(S30)), bu kararların ağırlıklı olarak idari süreçler üzerinden şekillendiğini; geri dönüşüm uygulamalarının ise çoğunlukla bileşen bazında ve sistematik malzeme ayrıştırma yaklaşımlarından uzak biçimde ele alındığını göstermektedir.



Şekil 5. Sürdürülebilirlik, Geri Dönüşüm ve Malzeme Yönetimi

4. SONUÇ

Bu çalışma kapsamında elde edilen bulgular, yaya üst geçitlerinin tasarım, yapım ve işletme süreçlerinde malzeme seçiminin hem yapısal performans hem de uzun dönemli sürdürülebilirlik açısından belirleyici olduğunu ortaya koymaktadır. Uzman görüşleri, çelik taşıyıcı sistemlerin montaj

kolaylığı, hızlı uygulama süreci ve deprem performansı gibi avantajları nedeniyle yaya üst geçitlerinde baskın biçimde tercih edildiğini göstermektedir. Betonarme sistemler ise belirli koşullarda ve özellikle çevresel etkilere bağlı olarak sınırlı bir kullanım alanına sahip olarak değerlendirilmektedir. Malzeme tercihinde maliyet etkinliği, bakım gereksinimi ve mukavemet gibi ekonomik ve işletme odaklı kriterlerin ön planda tutulduğu, estetik ve kentsel uyum gibi faktörlerin ise tamamlayıcı ölçütler olarak ele alındığı anlaşılmaktadır.

Bulgular, bakım ve onarım süreçlerinde korozyonun en kritik sorun alanı olduğunu ve bakım maliyetlerinin zaman içerisinde arttığı yönündeki algının oldukça güçlü olduğunu ortaya koymaktadır. Buna karşılık, erken tespit, önleyici bakım ve yenilikçi teknolojilere dayalı yaklaşımların henüz sınırlı düzeyde benimsendiği görülmektedir. Çevresel koşullar, iklim değişikliği ve doğal afetler bağlamında dayanıklı ve uygun malzeme seçiminin önemi vurgulanırken, özellikle korozyon direnci ve uzun dönem performans kriterleri öne çıkmaktadır.

Sürdürülebilirlik ve geri dönüştürülebilirlik kavramlarının karar alma süreçlerinde giderek daha fazla dikkate alındığı; geri dönüştürülmüş çeliğin uygulamada daha yaygın kabul gördüğü, geri dönüştürülmüş betonun ise daha seçici ve sınırlı projelerle ilişkilendirildiği belirlenmiştir. Ancak hizmet dışı bırakma ve geri dönüşüm süreçlerinde sistematik malzeme ayrıştırma ve bütüncül planlama yaklaşımlarının henüz yaygınlaşmadığı görülmektedir. Bu bağlamda, yaya üst geçitlerinin uzun vadeli performansını artırmak için malzeme temelli çözümleri, bakım stratejilerini ve sürdürülebilirlik ilkelerini bütüncül bir çerçevede ele alan yaklaşımların geliştirilmesi gerekmektedir.

KAYNAKÇA

- Akyüz, B. (2023). *Yoğun kentsel bölgelerde yaya üst geçit verimliliğinin mikro simülasyon tabanlı değerlendirilmesi* [Yayınlanmamış el yazması].
- Aksoy, S. (2024). *Kentsel bağlamlarda yaya geçidi davranışı ve yapısal kullanım kalıpları* [Araştırma raporu].
- Aydın, M. (2024). *Kıyı kentlerindeki üst geçit altyapısının coğrafi sınıflandırması: Trabzon örneği* [Teknik rapor].
- Eremeev, A., Ivanov, D., & Petrova, N. (2021). Dynamic behavior of composite pedestrian bridges under environmental load. *International Journal of Bridge Engineering*, 9(2), 15–27.
- Ghafoor, A., & Khan, N. (2021). Gender- and age-based analysis of pedestrian overpass usage: A case study from Pakistan. *Journal of Urban Transportation and Safety*, 6(1), 23–34.
- Hasan, M., Rahman, M. T., & Haque, M. (2020). Safety evaluation of pedestrian crossing facilities in urban environments. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 7(5), 561–572. doi:10.1016/j.jtte.2020.03.005
- Heldak, M., Kowalski, M., & Nowak, A. (2021). Environmental impacts on pedestrian bridge design in marine climates. *Civil Engineering and Architecture*, 19(3), 102–114.
- Ivorra, S., Baeza, F. J., & Baeza, L. (2015). Recycled steel and composite solutions in pedestrian infrastructure. *Sustainable Structures and Materials*, 2(1), 33–42.
- Jiang, W., & Yang, J. (2012). Corrosion behavior of steel in marine environments and its effect on service life. *Journal of Structural Integrity*, 4(1), 12–21.

- Kawther, A., & Mohammad, M. (2024). Urban mobility and the socio-technical role of pedestrian overpasses. *Review of Transportation and Urban Systems*, 11(4), 44–58.
- Pan, J. (1992). *Durability of bridge structures in coastal climates*. Beijing, China: China Highway & Transportation Publishing House.
- Patra, D., Singh, S., & Verma, A. (2020). Modeling pedestrian preference behavior using the RP-SP framework. *Transportation Research Procedia*, 48, 126–133.
- Ribeiro da Silva, T., & Santos da Silva, R. (2018). Structural evaluation of recycled materials in bridge applications. *Journal of Sustainable Infrastructure*, 5(2), 98–110.
- Sartori, I., & Hestnes, A. G. (2007). Energy use in the life cycle of conventional and low-energy buildings: A review article. *Energy and Buildings*, 39(3), 249–257. doi:10.1016/j.enbuild.2006.07.001
- Truong, L. T., & Somenahalli, S. V. C. (2019). Role of pedestrian overpasses in crash prevention: An empirical analysis. *Journal of Transportation Safety & Security*, 11(2), 154–171. doi:10.1080/19439962.2018.1428660

UÇUCU KÜL KULLANILARAK ÜRETİLEN HARÇLARIN ISI VE SES YALITIM ÖZELLİKLERİ ÜZERİNE BİR ÇALIŞMA

Elif Tuğçe KOCABEYOĞLU¹

Barış ERKOÇ²

Can ARTAN³

1. GİRİŞ

Kömüre dayalı termik santrallerde elektrik enerjisi üretimi sırasında ortaya çıkan en önemli yan ürünlerden biri uçucu küldür. Toz kömürün yanması sonucu oluşan ve baca gazlarıyla taşınan ince partiküller, modern santrallerde elektrofiltre ve siklon sistemleri yardımıyla tutulmakta ve atmosfere salınımları büyük ölçüde engellenmektedir. Bu sistemlerle elde edilen ince taneli kül, literatürde uçucu kül olarak tanımlanmaktadır (Malhotra ve Mehta, 2002).

Uçucu küllerin çevreye kontrolsüz biçimde bırakılması; hava kirliliği, toprak ve su kaynaklarının kirlenmesi, tarımsal verimin düşmesi ve ekosistem üzerinde olumsuz etkiler gibi ciddi çevresel problemlere yol açmaktadır. Özellikle rüzgâr etkisiyle meydana gelen tozlanma, geniş alanlara yayılarak insan sağlığı ve çevre açısından önemli riskler oluşturmaktadır. Bu nedenle uçucu külün yalnızca depolanması yerine, farklı

¹ Dr. Öğr. Üyesi, Yozgat Bozok Üniversitesi, Yozgat Meslek Yüksekokulu, İnşaat, ORCID: 0000-0003-4077-9779.

² Yozgat Bozok Üniversitesi, Yozgat Meslek Yüksekokulu, İnşaat, ORCID: 0009-0005-5388-8407.

³ Yozgat Bozok Üniversitesi, Yozgat Meslek Yüksekokulu, İnşaat, ORCID: 0009-0008-5787-0652.

sektörlerde değerlendirilmesi sürdürülebilir çevre politikalarının önemli bir parçası hâline gelmiştir (Amran et al., 2021).

Uçucu külün geri kazanımında en yaygın ve etkin kullanım alanı inşaat sektörüdür. Literatürde, uçucu külün çimento ve beton üretiminde mineral katkı olarak, tuğla ve blok eleman imalatında hammadde olarak ve zemin iyileştirme uygulamalarında dolgu malzemesi olarak kullanıldığı çok sayıda çalışma bulunmaktadır (Baykal ve Döven, 2000).

Beton teknolojisi açısından uçucu kül kullanımı; hidratasyon ısısının düşürülmesi, uzun vadeli dayanımın artırılması ve geçirimsizliğin iyileştirilmesi gibi önemli avantajlar sunmaktadır. Yüksek hacimli uçucu kül içeren betonların, özellikle kütle beton uygulamalarında çatlak oluşumunu azalttığı ve dayanıklılığı artırdığı rapor edilmiştir (Malhotra ve Mehta, 2002).

2. LİTERATÜR ÇALIŞMASI

Literatürde uçucu kül esaslı hafif agregaların üretiminde temel olarak iki yöntem öne çıkmaktadır: sinterleme (ısıl işlem) ve soğuk bağlama (cold bonding). Sinterleme yöntemi, uçucu külün peletlenerek genellikle 1000–1200 °C sıcaklık aralığında pişirilmesine dayanmaktadır. Bijan (1986), bu sıcaklıklarda uçucu kül içerisindeki gaz fazının genleşmesi sonucu “bloating” mekanizmasının oluştuğunu ve bunun agregaya gözenekli bir iç yapı kazandırdığını ifade edilmiştir. Bu süreç sonunda elde edilen agregalar, düşük birim ağırlık ve nispeten düşük su emme özellikleri göstermektedir.

Kockal ve Ozturan (2011), sinterlenmiş uçucu kül agregalarının soğuk bağlanmış agregalara kıyasla daha yüksek basınç dayanımı ve daha düşük su emme değerlerine sahip olduğunu ortaya koymuştur. Bu durum, yüksek sıcaklıkta oluşan

ve agregayı çevreleyen seramikleşmiş dış kabuk yapısı ile ilişkilendirilmektedir.

Soğuk bağlama yöntemi ise, uçucu külün çimento, kireç veya benzeri bağlayıcılar kullanılarak oda sıcaklığında peletlenmesi ve kürlenmesi esasına dayanmaktadır. Baykal ve Döven (2000), bu yöntemin sinterlemeye kıyasla enerji tüketimini önemli ölçüde azalttığını; ancak elde edilen agregaların genellikle daha yüksek birim ağırlık ve su emme değerlerine sahip olduğunu belirtmiştir.

Son yıllarda yapılan çalışmalarda, soğuk bağlama yönteminde çimento miktarını azaltmaya yönelik alternatif bağlayıcı sistemler araştırılmaktadır. Gomathi ve Sivakumar (2015), alkali aktivasyon (geopolimer) esaslı bağlayıcıların, soğuk bağlı uçucu kül agregalarında erken yaş mekanik performansı artırabildiğini göstermiştir. Bu yaklaşımın, çimento kullanımını azaltarak çevresel açıdan da avantaj sağlayabileceği ifade edilmektedir.

Uçucu kül tanecikleri genellikle küresel morfolojiye sahip olup tane boyutları yaklaşık 1–200 µm arasında değişmektedir. Bu küresel yapı, özellikle taze beton ve harç sistemlerinde işlenebilirliğin artmasına katkı sağlamaktadır. Uçucu küllerin fiziksel özellikleri; kullanılan kömür türüne, yanma sıcaklığına ve kül toplama sistemine bağlı olarak farklılık göstermektedir (Malhotra ve Mehta, 2002).

Kimyasal bileşim açısından uçucu küllerin ana bileşenlerini silisyum dioksit (SiO_2), alüminyum oksit (Al_2O_3), demir oksit (Fe_2O_3) ve kalsiyum oksit (CaO) oluşturmaktadır. Bu oksitlerin toplam oranı genellikle %70–90 aralığında olup, uçucu külün puzolanik veya bağlayıcı özellik göstermesinde belirleyici rol oynamaktadır. Düşük kireçli uçucu küller puzolanik özellik sergilerken, yüksek kireçli uçucu küller belirli

koşullarda kendiliğinden bağlayıcı davranış gösterebilmektedir (Amran et al., 2021).

2.1. Uçucu Külün Agregası Olarak Değerlendirilmesi

Uçucu külün agregası olarak değerlendirilmesi, son yıllarda literatürde yoğun ilgi gören bir konudur. Özellikle sinterleme veya soğuk bağlama yöntemleriyle üretilen uçucu kül esaslı hafif agregalar, geleneksel doğal agregalara alternatif olarak öne çıkmaktadır. Baykal ve Döven (2000), uçucu küllerin peletlenerek hafif agregası üretiminde kullanılabileceğini ve bu agregaların mühendislik özelliklerinin yapı uygulamaları için yeterli olduğunu ortaya koymuştur.

Uçucu kül agregalarının gevşek yığın yoğunluğu genellikle 700 - 1000 kg/m³ aralığında değişmektedir. Bu değerler, doğal agregalı betonlara kıyasla yapının ölü yükünde % 20 - 30 oranında azalma sağlamaktadır (Ganesh Babu ve Surya Prakash, 1995).

Literatürdeki en önemli teknik zorluk, uçucu kül agregalarının yüksek su emme kapasitesidir (% 15 - % 30). Zhang vd. (2015), yüksek su emme oranının taze betonun işlenebilirliğini (slump) düşürdüğünü, bu sorunu aşmak için agregaların beton karışımına girmeden önce suya doymuş hale getirilmesi veya yüzeylerinin silan bazlı malzemelerle kaplanması gerektiğini önermiştir.

Yapısal hafif beton (LWC) üretiminde, sinterlenmiş agregalarla 40 - 60 MPa basınç dayanımlarına ulaşılabilirken, soğuk bağlama yöntemi ile üretilen agregalarla üretilen betonların dayanımı genellikle daha düşüktür (Kockal ve Ozturan, 2011).

Uçucu külün hafif agregası olarak kullanımının teknik olarak mümkün ve çevresel açıdan faydalı olduğu yapılan çalışmalardan görülmektedir. Ancak, Terzi ve Karasahin (2003)

gibi araştırmacıların da belirttiği gibi, üretim yönteminin maliyeti ile elde edilen betonun performansı arasındaki optimizasyonun sağlanması, bu malzemenin endüstriyel ölçekte yaygınlaşması için en kritik faktördür.

Chang ve Shieh (1996), uçucu kül esaslı hafif agregalarla üretilen betonların kırılma davranışını incelemiş ve bu betonların düşük yoğunluklarına rağmen yeterli mekanik performans sergilediğini belirtmiştir. Benzer şekilde Gesoğlu vd. (2004), soğuk bağlama yöntemiyle üretilen uçucu kül agregalarının hafif betonlarda kullanılmasıyla taşıyıcı elemanlar için uygun dayanım değerlerine ulaşılabildiğini göstermiştir.

Uçucu kül katkılı betonların mekanik özellikleri üzerine yapılan çalışmalar, bu betonların uzun vadede basınç dayanımı açısından geleneksel betonlara eşdeğer veya daha üstün performans sergileyebildiğini ortaya koymaktadır. Uçucu külün geç reaksiyona girmesi, erken yaş dayanımlarını sınırlı düzeyde düşürse de, ilerleyen yaşlarda oluşan ikincil C-S-H jel yapıları betonun mikro yapısını yoğunlaştırmaktadır (Malhotra ve Mehta, 2002).

Gesoğlu vd. (2004), uçucu kül esaslı hafif agregalarla üretilen betonlarda rötre çatlaklarının azaldığını ve dayanıklılık performansının iyileştiğini bildirmiştir. Bu durum, uçucu külün hem agrega hem de bağlayıcı sistemler içerisinde çok yönlü fayda sağladığını göstermektedir.

2.2. Uçucu Külün Isı ve Ses Yalıtımı Açısından Değerlendirilmesi

Uçucu kül içeren beton ve harç sistemlerinin gözenekli mikro yapısı, bu malzemelerin ısı ve ses yalıtımı açısından avantajlı özellikler kazanmasına olanak tanımaktadır. Literatürde, hafif agregalı ve uçucu kül katkılı betonların düşük yoğunlukları sayesinde ısıl iletkenlik katsayılarının azaldığı ve

yapıların enerji verimliliğine katkı sağladığı belirtilmektedir (Amran et al., 2021).

Aynı zamanda gözenekli yapı, ses dalgalarının malzeme içerisinde sönümlenmesini kolaylaştırmakta ve akustik performansı artırmaktadır. Bu özellikler, uçucu kül esaslı harç ve betonların yalnızca taşıyıcı değil, aynı zamanda yalıtım amaçlı yapı malzemeleri olarak da kullanılabileceğini ortaya koymaktadır (Chang ve Shieh, 1996).

Literatür incelendiğinde, uçucu kül katkılı malzemelerin çoğunlukla ya ısı performans ya da mekanik özellikler açısından ele alındığı, ses yalıtımı ile birlikte değerlendiren çalışmaların sınırlı olduğu görülmektedir (Aruntaş, 2006; Arenas et al., 2021). Ayrıca Türkiye’de yerel kaynaklı uçucu küllerin harçlarda ısı ve ses yalıtımı performansının birlikte incelendiği çalışmalar oldukça az olduğu görülmüştür.

Bu çalışma kapsamında, Yozgat Şeker Fabrikası’nda toz kömür yakılan buharlı kazanlardan elde edilen uçucu küller kullanılarak üretilen harçların ısı ve ses yalıtımı özellikleri deneysel olarak araştırılmıştır. Böylece hem çevresel sorunların azaltılması hem de düşük maliyetli ve sürdürülebilir yalıtım malzemeleri geliştirilmesine katkı sağlanması hedeflenmiştir.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Numunelerin Üretimi

Çalışmada harç üretiminde yoğunluğu 3.15 g/cm^3 olan CEM II tipi 42.5 R çimento, karışım suyu olarak TS EN 1008 standardına uygun olarak Yozgat ili şehir şebeke suyu ve 2 farklı agrega tipi kullanılmıştır. Referans harcı üretmek için 0-1 mm boyutunda özgül ağırlığı 2.68 g/cm^3 olan kırma kum agregası ve Yozgat Şeker Fabrikasından atık olarak alınan 0-1 mm boyutunda uçucu kül kullanılmıştır.

Standart çimento kalıbı kullanılmak suretiyle, kırma kum ve uçucu kül agregası kullanılarak numuneler; birim ağırlık, su emme, porozite, ultrases geçiş hızı (UGH) deneylerinde kullanılmak üzere 40x40x160 mm boyutlarında prizmatik, ısı iletkenlik deneyinde kullanılmak üzere 300x300x30mm boyutlarında plak, akustik deneylerde kullanılmak üzere yüksek frekans için 29 mm ve düşük frekans için 100 mm çapında dairesel en kesitli numuneler üretilmiştir. Fiziksel deneylerde kullanılmak üzere referans numuneler ile birlikte toplam 2 seri harç üretimi yapılmıştır. Her bir seri için 6 adet olmak üzere toplamda 12 adet 40x40x160 mm boyutlarında prizmatik ısı iletkenlik deneyinde kullanılmak üzere her bir seri için üç adet olmak üzere toplamda 6 adet 3×30×30 cm boyutlarında plak numuneler üretilmiştir. Üretilen numuneler, bir gün sonra kalıptan çıkarılarak ve 28 gün boyunca 20 ± 3 sıcaklıkta su içerisinde kür edilmiştir. Standart kür sonrası numuneler üzerinde fiziksel deneyler yapılmıştır.

Karışımlarda işlenebilirlik sabit tutulmuştur. Karışımların kodlanması agrega türüne bağlı olarak belirlenmiştir. HK karışım kodu kırma kum (K), HU karışım kodu uçucu kül agregası (U) ile üretilen harcı (H) ifade etmektedir. Harç karışımında kullanılan malzeme miktarları Tablo 1’de verilmiştir.

3.2. Deneysel Çalışma

Çalışmada hazırlanan taze harçlar üzerinde TS EN 1015-3 (2000) ’de belirtilen şartlara uygun olarak yayılma tablası ölçümleri, TS EN 12350-6 (2019)’ da belirtilen şartlara uygun olarak birim ağırlık deneyi, sertleşmiş harçlar üzerinde TS EN 12504-4 (2021) standartlarına uygun olarak ultrases geçiş hızının tayini deneyi, ASTM D7984- 16 (2021) standardına uygun olarak ısı iletkenlik katsayıları deneyi, ISO 10534-2 (2003) standardına uygun olarak ses yutum katsayısı deneyi

yapılmıştır. Elde edilen veriler bilgisayar ortamında işlenerek değerlendirilmiştir.

Isıl iletkenlik ölçüm cihazı (Thermtest HFM), kalınlığı 40 mm ve üzeri olan malzemelerde ısı parametreleri ölçmek için kullanılır ve yüzey sıcaklığını kontrol etmek için elektrikli soğutma ve ısıtma sistemi ile donatılmıştır. Cihaz, bilgisayar tarafından kontrol edilen numune kalınlığının otomatik ölçümü için bir sistem ve ölçüm kayıtları ve analizlerin oluşturulmasına olanak sağlayan özel bir program ile donatılmıştır.

Tablo 1. Harç karışımında kullanılan malzeme miktarları (1m³ için).

Agrega Türü	Karışım Kodu	Çimento, kg	Agrega, kg	Su, kg
Kırma Kum	HK	43.12	156.95	25.53
Uçucu Kül	HU	40.31	67.15	48.38

4. BULGULAR

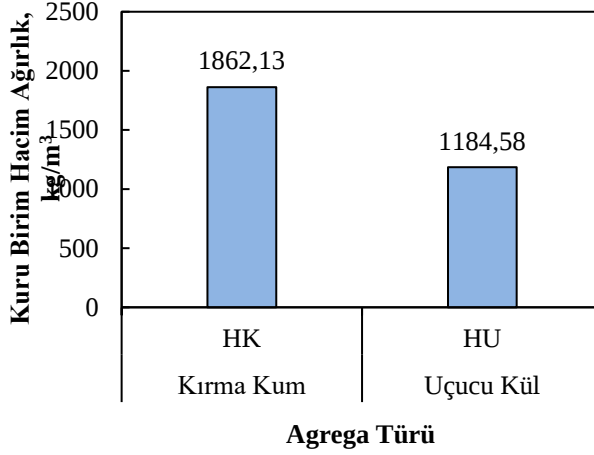
Bu bölümde fiziksel deneylerden elde edilen sonuçlara yer verilmiştir. Kuru birim hacim ağırlık (KBHA), su emme, porozite, ultrases geçiş hızı (UGH) ve ısı iletkenlik katsayısı deney sonuçları Tablo 2’de gösterilmiştir.

Tablo 2. Fiziksel Deneylerden Elde Edilen Sonuçlar

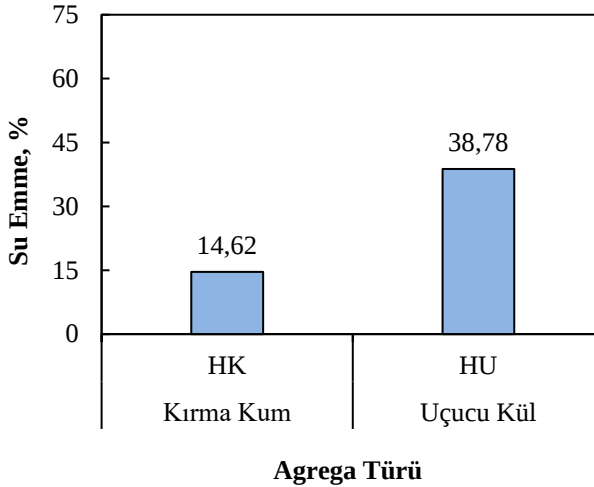
Karışım Kodu	KBHA kg/m ³	Porozite %	Su Emme %	UGH km/sa	Isıl İletkenlik Katsayısı, W/mK
HK	1862.13	27.21	14.62	2.84	0.3478
HU	1184.58	45.88	38.78	2.56	0.2287

Kırma kum ve uçucu kül kullanılarak üretilen harçların kuru birim hacim ağırlık değerleri sırası ile 1832.10 ve 1184.58 kg/m³ olarak elde edilmiştir. Uçucu kül agregalı numunelerin kuru birim hacim ağırlık değerinin kırma kum agregalı numunelerden daha düşük olduğu gözlemlenmiştir (Şekil 1).

Kırma kum ve uçucu kül kullanılarak üretilen harçların su emme değerleri sırası ile % 16.20 ve % 38.78 olarak elde edilmiştir. Uçucu kül agregalı numunelerin su emme değerinin kırma kum agregalı numunelere kıyasla daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir (Şekil 2).

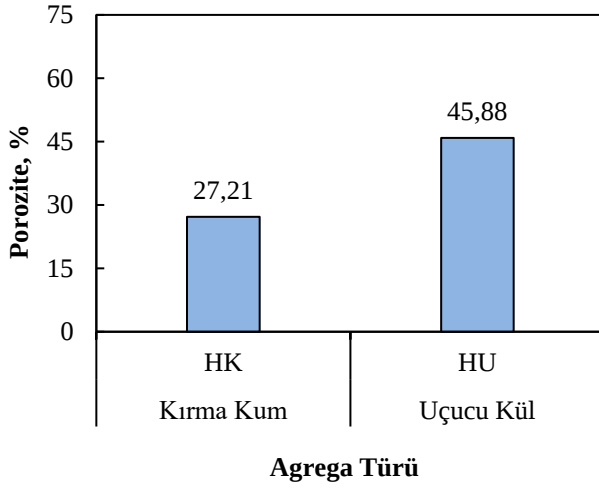


Şekil 1. Agregat türüne göre kuru birim hacim ağırlık.

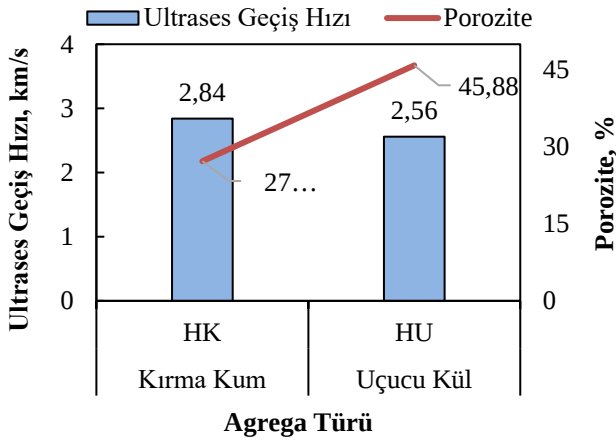


Şekil 2. Agregat türüne göre su emme.

Kırma kum ve uçucu kül kullanılarak üretilen harçların porozite değerleri sırası ile % 29.66 ve % 45.88 olarak elde edilmiştir. Uçucu kül agregalı numunelerin porozite değerinin kırma kum agregalı numunelere kıyasla daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir (Şekil 3).



Şekil 3. Agregat türüne göre porozite.



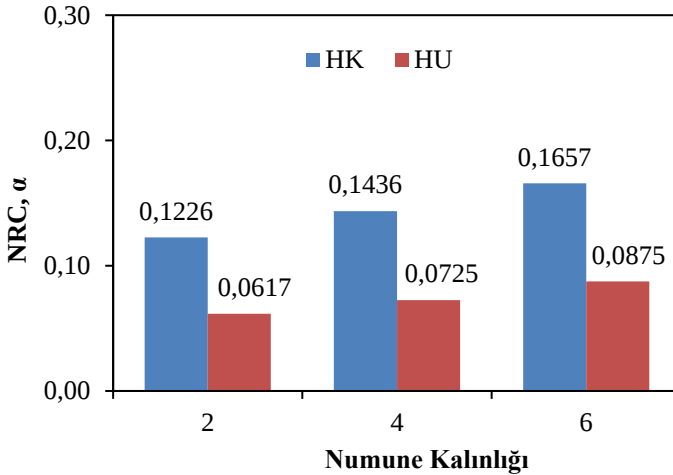
Şekil 4. UGS- porozite ilişkisi.

Kırma kum ve uçucu kül kullanılarak üretilen harçların ultrases geçiş hızları sırası ile 2.79 km/sa ve 2.56 km/sa olarak elde edilmiştir. Porozite değeri yüksek olan uçucu kül agregalı numunelerin kırma kum agregalı numunelere kıyasla daha yüksek gözenekliliğe sahip olmasına bağlı olarak ultrases geçiş hızının daha düşük olduğu saptanmıştır (Şekil 4).

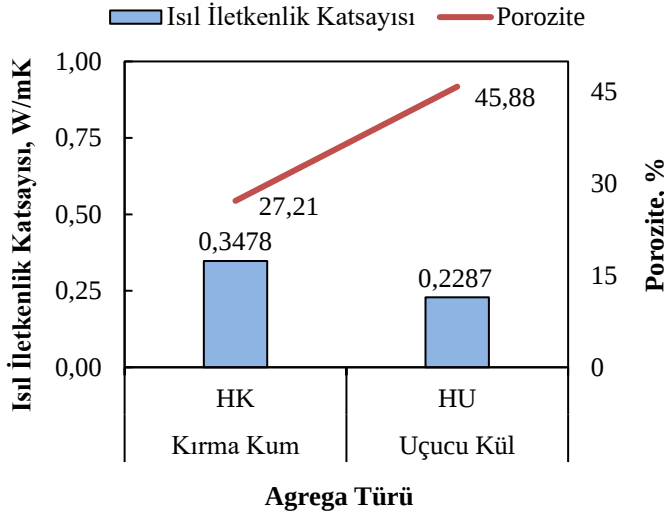
Tablo 3. Ses Deneyinden Elde Edilen Sonuçlar

Karışım	Kalınlık	Ses Yutum Katsayısı, α				NRC
		Frekans, Hz				
		250	500	1000	2000	
HK	2 cm	0.04	0.23	0.07	0.14	0.12
	4 cm	0.08	0.15	0.15	0.20	0.14
	6 cm	0.10	0.22	0.18	0.17	0.17
HU	2 cm	0.02	0.06	0.05	0.11	0.06
	4 cm	0.04	0.08	0.06	0.11	0.07
	6 cm	0.05	0.08	0.07	0.15	0.09

Numunelerin kalınlıkları arttıkça NRC (gürültü azaltım katsayısı) değerleri artmıştır. Uçucu kül agregalı numunelerin kırma kum agregalı numunelere kıyasla daha düşük poroziteye sahip olmasına bağlı olarak ses yutum katsayısının daha düşük olduğu saptanmıştır (Şekil 5).



Şekil 5. NRC (gürültü azaltım katsayısı) - numune kalınlığı ilişkisi.



Şekil 6. Isıl iletkenlik katsayısı - porozite ilişkisi.

Kırma kum ve uçucu kül kullanılarak üretilen harçların ısı iletkenlik katsayı değ erleri sırası ile 0.3346 W/mK ve 0.2287 W/mK olarak elde edilmiştir. Porozite değ eri yüksek olan uçucu kül agregalı numunelerin kırma kum agregalı numunelere kıyasla daha yüksek gözenekliliğ e sahip olmasına bağı lı olarak ısı iletkenlik katsayısının daha düşük oldu ğ u saptanmıştır (Ş ekil 6).

5. TARTIŞMA

Bu çalışmada uçucu kül agregası kullanılarak üretilen harçların fiziksel, ısı l ve akustik özellikleri incelenmiş ; elde edilen sonuçlar, uçucu kül ve hafif agregalı yapı malzemeleri üzerine daha önce rapor edilen deneysel veriler ış ığında değ erlendirilmiştir. Deney sonuçları, agreg a türünün harcın mikro yapısını doğ rudan etkilediğ ini ve buna bağı lı olarak yoğunluk, porozite, ısı l ve akustik performans üzerinde belirleyici bir rol oynadı ğ ını ortaya koymaktadır.

Uçucu kül agregalı harçların (HU), kırma kum agregalı harçlara (HK) kıyasla daha düşük kuru birim hacim ağırlığına sahip olduğu belirlenmiştir. Bu durum, uçucu kül agregalarının doğal agregalara göre daha hafif ve yüksek gözenekliliğe sahip iç yapısından kaynaklanmaktadır. Literatürde, uçucu kül esaslı hafif agregaların kullanıldığı betonlarda, geleneksel betonlara kıyasla belirgin yoğunluk azalması meydana geldiği ve bu azalmanın %30–40 mertebelerine ulaşabildiği rapor edilmiştir (Gesoglu, Özturan & Güneyisi, 2004). Bu çalışmada HU numuneleri için elde edilen yaklaşık 1185 kg/m^3 kuru birim hacim ağırlığı, hafif agregalı harç ve beton sistemleri için literatürde bildirilen düşük yoğunluklu yapı malzemesi karakteristiği ile uyumlu olup, yapı elemanlarının ölü yüklerinin azaltılması açısından önemli bir avantaj sunmaktadır.

Porozite ve su emme sonuçları değerlendirildiğinde, uçucu kül agregalı harçların belirgin biçimde daha yüksek değerlere sahip olduğu görülmüştür. Bu durum, uçucu kül partiküllerinin içsel boşluklar içeren düzensiz morfolojisiyle ilişkilendirilmektedir. Baykal ve Döven (2000), uçucu kül agregalarının yüksek iç poroziteye sahip olduğunu ve bu nedenle su emme oranlarının %30'un üzerine çıkabildiğini rapor etmiştir. Bu çalışmada HU numuneleri için belirlenen %45.88 porozite ve %38.78 su emme değerleri, literatürde bildirilen yüksek boşluk oranlı uçucu kül esaslı sistemlerle örtüşmektedir. Çelik (2004) de porozite artışının mekanik dayanımı sınırlandırabildiğini; buna karşın ısı ve ses yalıtımı gibi fonksiyonel özellikleri ön plana çıkardığını vurgulamıştır.

Ultrases geçiş hızı (UGH) sonuçları, uçucu kül agregalı harçlarda daha düşük değerler elde edildiğini göstermiştir. Bu durum, artan poroziteye bağlı olarak malzeme içindeki sürekliliğin azalması ve ultrases dalgalarının yayılımının zorlaşmasıyla açıklanabilir. Literatürde, hafif agregalı betonlarda ultrases dalga hızlarının gözenekliliğe bağlı olarak

azaldığı; düşük yoğunluklu hafif betonlarda yaklaşık 2.0–3.2 km/s, daha yoğun hafif betonlarda ise 3.2–5.0 km/s aralığında değiştiği bildirilmektedir (Fatahi et al., 2023; Majhi et al., 2018). Bu çalışmada HU numuneleri için ölçülen yaklaşık 2.56 km/s değeri, söz konusu aralık içerisinde yer almakta olup, malzemenin hafif ve gözenekli iç yapısını doğrulamaktadır.

Isıl iletkenlik katsayıları incelendiğinde, uçucu kül agregalı harçların kırma kumlu harçlara kıyasla belirgin biçimde daha düşük değerlere sahip olduğu görülmüştür. Bu sonuç, gözenekli yapı içerisinde hapsolan havanın düşük ısı iletkenliğine sahip olmasıyla ilişkilendirilmektedir. Aruntaş (2006), uçucu kül içeren hafif betonlarda ısı iletkenlik katsayısının 0.20–0.30 W/mK aralığında değiştiğini bildirmiştir. Bu çalışmada HU numuneleri için belirlenen 0.2287 W/mK değeri, literatürde rapor edilen bu aralıkla uyumlu olup, uçucu kül agregalı harçların ısı yalıtımı açısından önemli bir potansiyele sahip olduğunu göstermektedir. Baykal ve Döven (2000) de artan gözenek hacmiyle birlikte ısının daha çok düşük iletkenliğe sahip hava fazı üzerinden iletildiğini belirtmiştir.

Akustik performans değerlendirmelerinde, ses yutum katsayısı ve gürültü azaltım katsayısı (NRC) değerlerinin numune kalınlığının artmasıyla birlikte yükseldiği belirlenmiştir. Empedans tüpü deneyleri, özellikle 500–2000 Hz frekans aralığında bu artışın daha belirgin olduğunu göstermiştir. Bu durum, ses dalgalarının daha kalın ve gözenekli bir ortamda daha uzun bir yol kat ederek viskoz sürtünme ve ısı kayıpları yoluyla enerjilerini yitirmesiyle açıklanabilir (Barron, 2003). NRC hesaplamaları ASTM C423 standardında önerilen yaklaşıma göre gerçekleştirilmiştir (ASTM, 2017).

Bununla birlikte, uçucu kül agregalı harçların NRC değerlerinin kırma kum agregalı harçlara kıyasla daha düşük olduğu tespit edilmiştir. Bu durum, toplam porozitenin yüksek

olmasına rağmen gözeneklerin önemli bir bölümünün kapalı veya düzensiz yapıda olmasından kaynaklanmaktadır. Literatürde, etkili ses yutumunun yalnızca porozite miktarına değil, aynı zamanda gözeneklerin açık, bağlantılı ve yüzeye erişebilir olmasına bağlı olduğu vurgulanmaktadır (Mehta, Johnson ve Rocafort, 1999; London, 2006). Kapalı gözenekli yapıların ısı yalıtımı açısından avantaj sağladığı, ancak ses enerjisinin sönümlenmesinde sınırlı performans gösterdiği bildirilmektedir.

Genel olarak değerlendirildiğinde, uçucu kül agregalı harçlar düşük yoğunluk ($\approx 1185 \text{ kg/m}^3$), yüksek porozite (%45.88) ve düşük ısıl iletkenlik (0.2287 W/mK) değerleriyle, literatürde hafif ve yalıtım amaçlı yapı malzemeleri için rapor edilen karakteristik davranışlarla benzer olduğu görülmüştür. Akustik performansın ise, toplam porozite yerine gözenek yapısının açık ve bağlantılı hale getirilmesiyle iyileştirilebileceği anlaşılmaktadır. Bu bağlamda elde edilen bulgular, uçucu kül agregalı harçların özellikle ısı yalıtımı odaklı uygulamalarda güçlü bir potansiyele sahip olduğunu, akustik performans açısından ise literatürde de olduğu gibi mikro yapının önemi ve optimize edilmesinin gerekli olduğu görülmüştür (Barron, 2003; London, 2006).

6. SONUÇ

Çalışmadan elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir:

Uçucu kül agregası kullanımı, harçların kuru birim hacim ağırlığını önemli ölçüde azaltarak daha hafif yapı malzemelerinin elde edilmesini sağlamıştır. Bu durum, uçucu kül agregalarının doğal agregalara kıyasla daha düşük yoğunluklu ve gözenekli yapısından kaynaklanmaktadır. Artan porozite ve su emme oranları, harçların mikro yapısının daha boşluklu hale geldiğini göstermekte; bu yapı ultrases geçiş hızı

ve ısı iletkenlik katsayısında azalmaya neden olmaktadır. Özellikle ısı iletkenlikte gözlenen düşüş, uçucu kül agregalı harçların ısı yalıtımı açısından avantajlı olduğunu ortaya koymaktadır.

Akustik deneyler, numune kalınlığının artmasıyla birlikte gürültü azaltım katsayısının yükseldiğini göstermiştir. Bununla birlikte, uçucu kül agregalı harçların ses yutum performansının, gözeneklerin büyük ölçüde kapalı ve düzensiz yapıda olması nedeniyle sınırlı kaldığı düşünülmüştür. Genel olarak elde edilen sonuçlar, literatürde uçucu kül esaslı yapı malzemeleri için bildirilen eğilimlerle uyumlu olup, bu tür harçların özellikle taşıyıcı olmayan ve ısı yalıtımı öncelikli hafif yapı uygulamaları için uygun bir alternatif sunduğunu göstermektedir. Çalışma, bu yönüyle hem atık yönetimine katkı sağlamakta hem de sürdürülebilir yapı malzemelerinin geliştirilmesine yönelik önemli bir temel oluşturmaktadır. Akustik performansın artırılabilmesi için ise gözenek yapısının optimize edilmesine yönelik ileri çalışmalar önerilmektedir.

TEŞEKKÜR

2209-A- Üniversite Öğrencileri Araştırma Projeleri Destekleme Programı kapsamında 1919B012329923 numaralı projemize maddi destek sağlayan Türkiye Bilimsel Ve Teknolojik Araştırma Kurumu'na (TÜBİTAK) teşekkürlerimizi sunarız.

KAYNAKÇA

- Aruntaş, H. Y. (2006). Uçucu küllerin inşaat sektöründe kullanım potansiyeli. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 21(1), 193–203.
- ASTM International. (2017). *ASTM C423-17: Standard test method for sound absorption and sound absorption coefficients by the reverberation room method*. West Conshohocken, PA: ASTM International.
- ASTM International. (2021). *ASTM D7984-16: Standard test method for measurement of thermal effusivity of fabrics using a modified transient plane source (MTPS) instrument*. West Conshohocken, PA: ASTM International.
- Barron, M. (2003). *Auditorium acoustics and architectural design*. London, UK: Spon Press.
- Baykal, G., & Döven, A. G. (2000). Utilization of fly ash by pelletization process: Theory, application areas and research results. *Resources, Conservation and Recycling*, 30(1), 59–77.
- Bijan, J. (1986). Manufacturing processes of artificial lightweight aggregates from fly ash. *International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete*, 8(3), 191–199.
- Chang, T. P., & Shieh, M. M. (1996). *Fracture properties of lightweight concrete*. *Cement and Concrete Research*, 26(2), 181–188.
- Cheeseman, C. R., Makinde, A., & Bethanis, S. (2005). Properties of lightweight aggregate produced by rapid sintering of incinerator bottom ash. *Resources, Conservation and Recycling*, 43(3), 247–262.

- Çelik, Ö. (2004). *Endüstriyel atıkların inşaat sektöründe değerlendirilmesi* (Doktora tezi). Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Demiröz, A. (1996). *Uçucu küllerin zemin iyileştirmesinde kullanımı* (Yüksek lisans semineri). Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.
- Erdoğan, Y. T. (1993). Atık malzemelerin inşaat endüstrisinde kullanımı: Uçucu kül ve yüksek fırın cürufu. *Endüstriyel Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanılması Sempozyumu Bildiriler Kitabı* (ss. 1–8). Ankara.
- Ganesh Babu, K., & Surya Prakash, D. S. (1995). Efficiency of lightweight aggregate in concrete with regard to strength and density. *Cement and Concrete Research*, 25, 60–75.
- Gesoğlu, M., Özturan, T., & Güneyisi, E. (2004). Shrinkage cracking of lightweight concrete made with cold-bonded fly ash aggregates. *Cement and Concrete Research*, 34(7), 1121–1130.
- Gomathi, P., & Sivakumar, A. (2015). Accelerated curing effects on the mechanical performance of cold bonded fly ash aggregate concrete. *Journal of Cleaner Production*, 87, 849–856.
- Gurer, C., Akbulut, H., & Kurklu, G. (2004). İnşaat endüstrisinde geri dönüşüm ve bir hammadde kaynağı olarak farklı yapı malzemelerinin yeniden değerlendirilmesi. *Endüstriyel Hammaddeler Sempozyumu* (13–14 Mayıs), İzmir.
- Kockal, N. U., & Ozturan, T. (2011). Durability of lightweight concretes with lightweight fly ash aggregates. *Construction and Building Materials*, 25(3), 1430–1438.
- London, A. (2006). *Sound and structural vibration*. Boca Raton, FL: CRC Press.

- Majhi, R. K., Nayak, A. N., & Mukharjee, B. B. (2018). Evaluation of ultrasonic pulse velocity and mechanical properties of lightweight aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, 172, 827–838.
- Malhotra, V. M. (1996). *Role of supplementary cementing materials in reducing greenhouse gas emissions*. Ottawa, Canada: CANMET.
- Mehta, M., Johnson, J., & Rocafort, J. (1999). *Architectural acoustics: Principles and design*. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall.
- Ramamurthy, K., & Harikrishnan, K. I. (2006). Influence of binders on properties of sintered fly ash aggregate. *Cement and Concrete Composites*, 28(1), 33–38.
- Terzi, S., & Karasahin, M. (2003). Performance-based evaluation of lightweight aggregate concretes. *Construction and Building Materials*, 17(3), 183–191.
- Türk Standartları Enstitüsü. (2000). *TS EN 1015-3: Kâgir harcı – Deney metotları – Bölüm 3: Taze harç kıvamının tayini (yayılma tablası ile)*. Ankara: TSE.
- Türk Standartları Enstitüsü. (2002). *TS EN 196-1: Çimento deney metodları – Bölüm 1: Dayanım tayini*. Ankara: TSE.
- Türk Standartları Enstitüsü. (2019). *TS EN 12350-6: Beton – Taze beton deneyleri – Bölüm 6: Birim hacim kütlesi*. Ankara: TSE.
- Türk Standartları Enstitüsü. (2021). *TS EN 12504-4: Yapılarda beton deneyleri – Bölüm 4: Ultrasonik atımlı dalga hızının tayini*. Ankara: TSE.
- Zhang, Z., Provis, J. L., Reid, A., & Wang, H. (2015). Geopolymer foam concrete: An emerging material for

sustainable construction. *Construction and Building Materials*, 56, 113–127.

**TÜRKİYE VE DÜNYADA
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ**

yaz
yayınları

YAZ Yayınları
M.İhtisas OSB Mah. 4A Cad. No:3/3
İscehisar / AFYONKARAHİSAR
Tel : (0 531) 880 92 99
yazyayinlari@gmail.com • www.yazyayinlari.com