
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ

Editör: Doç.Dr. Emre TOPÇU

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ

Editör

Doç. Dr. Emre TOPÇU

yaz
yayınları

2024

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ

Editör: Doç. Dr. Emre TOPÇU

© 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 978-625-6104-64-8

Ekim 2024 – 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

info@yazyayinlari.com

İÇİNDEKİLER

Multi-Criteria Decision-Making Approach for Analysis of the Impact Of Land Use Change on Sediment Transport: A Case Study of Göksu Himmetli, Seyhan River Basin.....1

Şerife Pınar GÜVEL, Emre TOPÇU, Mehmet Ali AKGÜL

Sıvı Viskoz Sönümleyicilerin Yapısal Kontroldeki Rolü: Güncel Perspektifler26

Yavuz Selim HATİPOĞLU

Yüzeysel Akış Tahmininde Yapay Sinir Ağı Uygulamaları ve Örnek Bir Tahmin Modeli Geliştirilmesi.....52

Hasan Törehan BABACAN

Gözeneklilik Dağılım Modellerinin Fonksiyonel Derecelendirilmiş Kirişlerin Mekanik Performansına Etkileri.....72

Uğur KAFKAS

Mekanikte Varyasyonel Yaklaşım Yöntemleri.....93

Şule TAŞ, Gökhan GÜÇLÜ

Ferrocement ve Ferrocementin Uygulama Alanları.....114

Hüseyin Hakan İNCE, Gülhan İNCE,

Melda ALKAN ÇAKIROĞLU

Zeminlerin Stabilizasyonunda Sürdürülebilir Biyopolimer Bağlayıcıların Kullanımı Üzerine Bir Derleme Çalışması133

Mehmet Fatih YAZICI, Tayfun ŞENGÜL

"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."

**MULTI-CRITERIA DECISION-MAKING
APPROACH FOR ANALYSIS OF THE IMPACT
OF LAND USE CHANGE ON SEDIMENT
TRANSPORT: A CASE STUDY OF GÖKSU
HİMMETLİ, SEYHAN RIVER BASIN¹**

Şerife Pınar GÜVEL¹

Emre TOPÇU²

Mehmet Ali AKGÜL³

1. INTRODUCTION

Tracing land use/land cover changes employing remote sensing techniques provides technical support to managers and decision makers working in this sector, saving labor, time and cost. In the context of water and soil resource development and management, it is vital to examine upper basin projects and take the required actions to avoid undesirable outcomes caused by erosion and sedimentation. Hence, it is critical to trace environmental conditions and land use changes. It is also essential to be prepared for disasters caused by natural phenomena or

¹ Civil Engineer (PhD), General Directorate of State Hydraulic Works, 6th Regional Directorate, Department of Information Technologies, spinar.guvel@dsi.gov.tr, ORCID: 0000-0002-3175-5938.

² Assoc. Prof. Dr., Kafkas University, Faculty of Engineering and Architecture, Civil Engineering Department, emretopcu01@gmail.com, ORCID: 0000-0003-0728-7035.

³ Survey Engineer (PhD), General Directorate of State Hydraulic Works, 6th Regional Directorate, Department of Information Technologies, mali.akgul@dsi.gov.tr, ORCID: 0000-0002-5517-9576.

human activity, along with the challenges that may develop as a result of all of these variables.

Land supports a variety of terrestrial ecosystems, and land use is a major method by which humans alter natural ecosystems. Land use transformation is a major component and a major driver in global ecological system (Xie et al. 2020). In 1995, the 'International Geosphere-Biosphere Program' (IGBP) and the 'International Human Dimensions Program on Global Environmental Change' (IHDP) collaborated to formulate the 'Land Use and Land Cover Changing' (LUCC) scientific research program, which has become the core project of global environmental change (Assaf et al. 2021; Yan et al. 2017). In global change study, land use and land cover change (LUCC) has gradually become an important direction. Recently, relevant scholars have paid more attention to LUCC (Lambin et al. 2001; Geist and Lambin, 2001; Munroe and Müller, 2007; Deng et al. 2014; Yang et al. 2016). LUCCs are complex natural, social, and economic systems whose structures and functions demonstrate different spatial patterns and combinations and temporal evolutionary processes (Lin et al. 2011; Qian et al. 1990). The land use system is a dissipative structure system, and the degree of order can be delineated by the entropic procedure, such as data transmission and knowledge theory (Fan et al. 2017). Between 2000 and 2014 (UN Economic and Social Council 2019), urban areas expanded 1.28 times higher than the global inhabitants. Urban development has led to the conversion of green areas (for instance forest cover and agricultural land). The problem is that irregular urban enlargement (in a spatial context) has the potency to be an accelerator of climate change. This leads to massive deforestation due to inefficient land use. Urban spatial growth is an indicator of the sustainability of urban development, which involves changes in the physical structure and in human activities. The issue of the 21st century is the unprecedented population

growth in developing countries. At present, 54 percent of the global population, about 3.9 billion people, live in cities, and this figure is anticipated to soar to 6.3 billion by 2050. Consequently, 90% of the urban population will grow in the near future in developing nations, particularly in the developing world (United Nations 2015). Comprehensively assessing and scientifically quantifying land use change impacts on regional environmental quality can assist optimize land use structure and draw regional environmental preservation and economic improvement plans (Zhang et al. 2022). There are various efforts in simulating urban expansion and studying urban spatial patterns utilizing different methods such as artificial neural networks (Pijanowski et al. 2005; Maithani 2009), geographic weighting regression (Mondal et al. 2015), cellular automata (Li et al. 2014; Ke et al. 2016; Mondal et al. 2017), and Markov chains (Mondal et al. 2017). Characterization of urban sprawl requires convenient quantification and statistical recapitulation, including Shannon entropy, patchiness, landscape metric, and regression analysis (Rabbani et al. 2018.) Using Shannon's entropy, which fulfills as an index of spatial concision or allocation, it is possible to study any geographic measure. This measure has been used in the scientific quantification of patterns of sprawl (Cegielska et al. 2019).

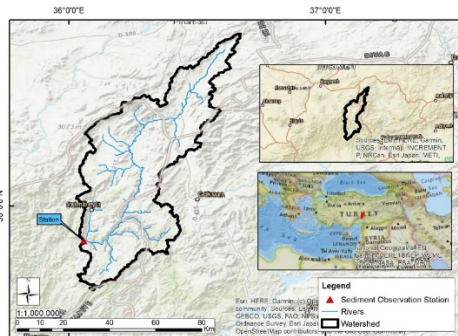
In this paper, the status of land use/land cover changes in the drainage area of Göksu Himmetli sediment observation station located in the Seyhan River Basin in Türkiye was examined as part of an investigation into the impact of human activities on the hydrological cycle. The criterion weights of land use/land cover were designated using the entropy method with a multi-criteria decision-making approach. A number of studies have been conducted by different disciplines regarding the Seyhan River basin. These include studies on precipitation (Akgül and Aksu 2021; Koycegiz and Buyukyildiz, 2022), flood

events and flood control studies (Güvel et al. 2023), drought (Topçu and Seçkin 2016; Onuşluel Gül and Kuzucu 2017; Çavuş and Aksoy 2019; Bayer Altın et al. 2020; Alkan and Tombul 2022, Topçu et al. 2022), climate change (Fujihara et al. 2008a; Fujihara et al. 2008b), reservoir operation (Ozkaya and Zerberg 2021), sediment transport (Akgül and Yurtal 2023), reservoir sedimentation (Güvel and Yurtal 2020; Akgül et al. 2024), hydrological models (Akgül 2015; Akgül et al. 2015), evapotranspiration (Çetin et al. 2023; Alsenjar et al. 2023), geological conditions, and water resources.

2. STUDY AREA

The drainage area of Göksu Himmetli sediment observation station in the Seyhan River Basin in Türkiye is selected as the study area. The study area is located in the southern part of Türkiye (Figure 1). Seyhan River Basin is one of the 25 hydrological basins in Türkiye. The drainage of the basin is carried out by a number of river tributaries, including the Göksu, Zamantı, Körkün, Eğlence and Çakıt rivers, as well as the Seyhan River, which acts as the main tributary. In the past years, significant research has been conducted on the planning and development of the Seyhan Basin's water and land resources (IECO 1966; DSİ 2014).

Figure 1. The Location of The Study Area in Türkiye



The Göksu Himmetli sediment observation station is situated in the village of Himmetli, at the 21st kilometer of the Saimbeyli-Kozan highway in Adana Province, and on the Göksu river. Sediment observations at this station commenced in 1966 (DSİ 2013). The location of Göksu Himmetli sediment observation station and its watershed boundary are shown in Figure 1. The Yamanlı 2 hydroelectric power plant and the Yamanlı 3 Gökkaya Dam and hydroelectric power plant were constructed on Göksu River and is operational within the watershed boundaries, which represent the study area. Doğanbeyli, Çatalçam, Doğanlı, Akpınar, Bozgüney, Evcı, and Çörekdere small dams were built and operational in the study area. Additionally, there are small dams where construction and planning activities are currently underway.

3. MATERIAL AND METHOD

3.1. Material

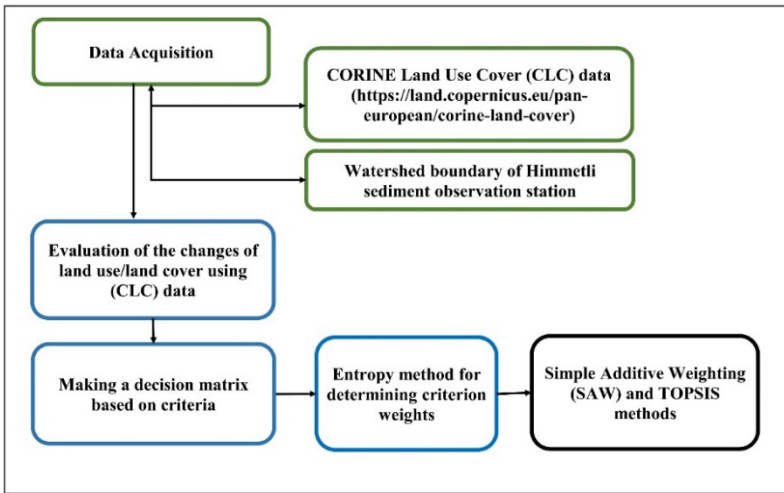
The CORINE land use cover (CLC) study commenced in 1985, with the initial map produced in 1990 and subsequently updated in 2000, 2006, 2012, and 2018. The CLC data were obtained from <https://land.copernicus.eu/pan-european/corineland-cover>. The CLC classes are defined in three-level, in which, Level 1 was grouped into artificial surfaces, agricultural areas, forest and semi-natural areas, wetlands and water bodies (Büttner et al. 2021). The CLC classes are grouped into 15 classes at Level 2, and 44 classes at Level 3 (Büttner et al. 2021). A multitude of studies have been conducted in numerous countries with the objective of analysing changes in land use through utilisation of CORINE Land cover data (Falcucci et al. 2007; Ruiz Benito et al. 2010; Cabral et al. 2016; La Mela Veca et al. 2016; Aune-Lundberg and Strand 2021; Kuleli and Bayazıt 2022; Cole et al. 2022; Güvel 2024).

3.2. Method

The process of decision-making encompasses a number of key elements, including the criteria and weighting of these criteria, the identification of alternatives, and the assessment steps involved. The context of the study is to rank the land use status of the years in terms of the effect of land use on reducing sediment transport. There are a number of techniques that can be employed in order to determine the importance of criteria in the context of multi-criteria decision making (MCDM). Chen (2020) pointed out that the decision-making process usually necessitates the simultaneous consideration of multiple criteria.

The flow chart of the study is given in Figure 2.

Figure 2. The Flow Chart of The Study



A considerable number of studies have been conducted on the subject of criteria selection methods, criteria weight determination methods, and the methods used in multi-criteria decision making analyses (Wang et al. 2009; Balioti et al. 2018; Chen 2020; Wu et al. 2022). Chen (2020) stated that the type of criterion weight can be distinguished in relation to different decision-making methodologies. The weights of the criteria are

determined in order to demonstrate the relative importance of the criteria in a multi-criteria decision analysis (Wang et al. 2009). The entropy, which is a thermodynamic concept, was proposed by the German physicist R. Clausius in 1865, and Shannon introduced the concept of entropy into the field of information theory in 1948 (Chen 2020). In this study, entropy weight method is employed to ascertain the relative importance of the criteria, following the construction of the decision matrix to address the problem. The following procedure outlines the methodology for determining the weight of each index using the entropy weight method:

1. The proportion “ p_{ij} ” of the index value of project i under index j is calculated in accordance with the following Equation 1.

$$p_{ij} = \frac{r_{ij}}{\sum_{i=1}^m r_{ij}} \quad (1)$$

2. The entropy of index j , denoted by “ e_j ” is calculated as Equation 2.

$$e_j = -k \sum_{i=1}^m [p_{ij} \ln p_{ij}] \quad (2)$$

The value of the “ k ” in Equation 2 can be determined by means of Equation 3,

$$k = 1/\ln m \quad (3)$$

3. The entropy weight, denoted by “ w_j ” of index j : “ w_j ” is calculated according to Equation 4.

$$w_j = \frac{(1-e_j)}{\sum_{j=1}^n (1-e_j)}, \quad \sum_{j=1}^n W_j = 1 \quad (4)$$

The Simple Additive Weighting (SAW) method is used to solve multi-attribute decision problems in various research fields (Chrisnanto et al., 2021; Migo-Sumagang et al., 2024). The SAW method is employed to assign relative weights to the criteria in question, thereby enabling the generation of a ranking for each alternative based on the specified weights. Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS) method involves the identification of alternatives with criteria that should be considered. This is followed by the creation of a decision matrix, which is the initial step in the process. TOPSIS has been widely used in many fields of science in the last decades (Kaliszewski and Podkopaev, 2016; Balioti et al. 2018; Saluja et al. 2021; Topçu 2022; Mitra et al. 2023).

4. RESULTS AND DISCUSSION

CORINE land use cover (CLC) data at 1990, 2000, 2006, 2012, and 2018 and the watershed boundary of the study area were overlapped in GIS environment in order to determine the area values according to Level 1. The CORINE land use and cover (CLC) maps, which were created using GIS tools, are presented in Figure 3, which also depicts the spatial change of each land use over time. The area values for land use/land cover (CLC data) between the years 1990 and 2018 are presented in Figure 4. Despite minimal alterations in agricultural and forest areas between 1990 and 2018, Figure 4 illustrates a discernible expansion in the extent of artificial and water bodies. The study area witnessed a notable increase in the extent of artificial surfaces from 567 to 1239 square kilometres, between the year 1990 and 2018. A comparison of the agricultural areas in the study area over the specified period revealed a reduction from a total area of 78840 square kilometres to 73813 square kilometres. The change in forest and seminatural areas was evidenced by an

increase from 176056 square kilometres to 180168 square kilometres. In the specified area, the area of water bodies underwent a significant change between the years, increasing from 119 to 362 square kilometres (Figure 3-4).

Figure 3. CLC Data Between 1990 and 2018 in the Drainage Area of Göksu Himmetli Sediment Observation Station.

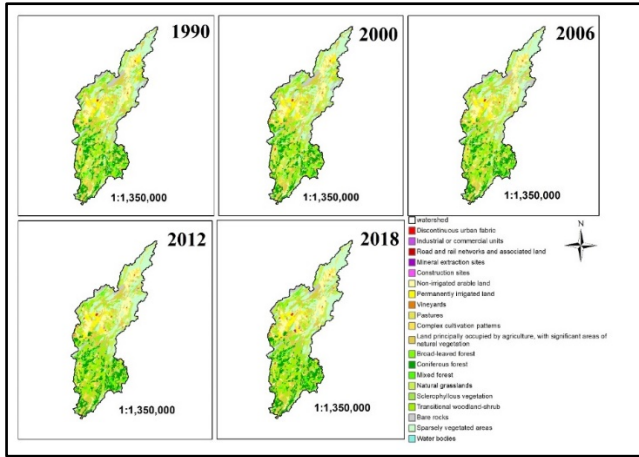
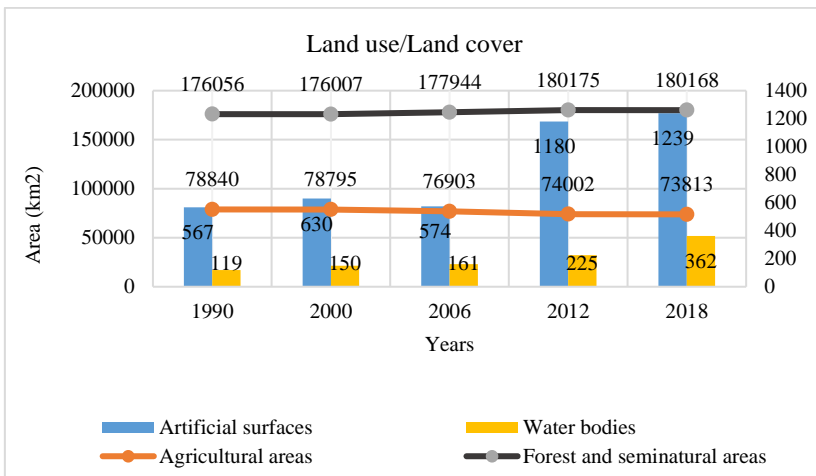


Figure 4. Land Use/Land Cover (CLC Data) Area Between 1990 And 2018 in the Drainage Area of Göksu Himmetli Sediment Observation Station



The criteria were selected based on Level 1 according to the standard European CLC nomenclature (Büttner et al. 2021). The research area does not contain any wetlands, and therefore these are not included in the criteria. Four criteria were selected for data set. The decision matrix created based on the data is given in Table 1. In the decision-making process, the impact of land use and land cover in the selected study area on sediment transport was evaluated on the scale of whether it reduces this phenomenon or not. In the initial part of the study, the weights of the criteria were quantified using the entropy method.

Table 1. Decision Matrix

Area (km²) /Years	Artificial surfaces (km²)	Agricultural areas (km²)	Forest and seminatural areas (km²)	Water bodies (km²)
1990	567	78840	176056	119
2000	630	78795	176007	150
2006	574	76903	177944	161
2012	1180	74002	180175	224
2018	1239	73813	180168	362

The normalized performance values, as determined by the Equation 1 as a step of the entropy method, are presented in Table 2.

Table 2. The Normalized Performance Values

Area (km²) /Years	Artificial surfaces	Agricultural areas	Forest and seminatural areas	Water bodies
1990	0.135	0.206	0.198	0.117
2000	0.150	0.206	0.198	0.147
2006	0.137	0.201	0.200	0.158
2012	0.282	0.194	0.202	0.221
2018	0.296	0.193	0.202	0.356

The calculation of entropy as determined by the Equation 2, are presented in Table 3.

Table 3. The Entropy Values for Criteria

Area (km ²) /Years	Artificial surfaces	Agricultural areas	Forest and seminatural areas	Water bodies
1990	-0.2707	-0.3256	-0.3205	-0.2510
2000	-0.2849	-0.3255	-0.3205	-0.2823
2006	-0.2723	-0.3226	-0.3218	-0.2918
2012	-0.3569	-0.3178	-0.3233	-0.3337
2018	-0.3603	-0.3175	-0.3233	-0.3677

Table 4. The Calculation of Entropy Weight of The Criterion

Area (km ²) /Years	Artificial surfaces	Agricultural areas	Forest and seminatural areas	Water bodies
e _j	0.95997	0.99974	0.99997	0.94851
d _j	0.04003	0.00026	0.00003	0.05149
w _j	0.4360	0.0028	0.0004	0.5608

The algorithms shown above were used to establish the significance levels of the criterion. According to the findings of the study, the criteria weights for artificial surfaces, agricultural regions, forest and seminatural areas, and aquatic bodies are 0.4360, 0.0028, 0.0004, and 0.5608 (Table 4).

4.1. Results of Simple Additive Weighting (SAW) Method

Artificial surfaces are evaluated in terms of their cost-effectiveness, whereas the others are evaluated in terms of their benefit. The following section outlines the methodology employed in this study (Table 5-6).

Table 5. The Calculation Steps of SAW Method

Area (km ²) /Years	Artificial surfaces (km ²)	Agricultural areas (km ²)	Forest and seminatural areas (km ²)	Water bodies (km ²)
1990	567	78840	176056	119
2000	630	78795	176007	150
2006	574	76903	177944	161
2012	1180	74002	180175	224
2018	1239	73813	180168	362
BEST	567	78840	180175	362
w_j	0.4360	0.0028	0.0004	0.5608

Table 6. Ranking Results of SAW Method

	Artificial surfaces	Agricultural areas	Forest and seminatural areas	Water bodies	Global score	Rank
1990	1.000	1.000	0.977	0.329	0.624	4
2000	0.900	0.999	0.977	0.414	0.628	3
2006	0.988	0.975	0.988	0.445	0.683	2
2012	0.481	0.939	1.000	0.622	0.561	5
2018	0.458	0.936	1.000	1.000	0.763	1

4.2. Results of TOPSIS Method

The Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS) is a preference ranking technique based on the concept of similarity to the ideal solution. The following steps are required: Calculation of normalized scores, calculation of weighted normalized scores, determination of positive and negative ideal solutions, calculation of distances, calculation of similarities to the positive ideal solution, making a preference order. Artificial surfaces are evaluated in terms of their cost-effectiveness, whereas the others are evaluated in terms of their benefit. The subsequent paragraphs will set out the steps that were taken in conducting the aforementioned study (Table 7-11).

Table 7. The Calculation Steps of TOPSIS Method

Area (km ²) /Years	Artificial surfaces (km ²)	Agricultural areas (km ²)	Forest and seminatural areas (km ²)	Water bodies (km ²)
1990	567	78840	176056	119
2000	630	78795	176007	150
2006	574	76903	177944	161
2012	1180	74002	180175	224
2018	1239	73813	180168	362
w _j	0.4360	0.0028	0.0004	0.5608

Table 8. The Calculation of Normalized Ratings

	Artificial surfaces	Agricultural areas	Forest and seminatural areas	Water bodies
1990	0.284	0.461	0.442	0.241
2000	0.316	0.461	0.442	0.304
2006	0.288	0.450	0.447	0.326
2012	0.592	0.433	0.452	0.455
2018	0.621	0.431	0.452	0.732

Table 9. The Calculation of Weighted Normalized Ratings

	Artificial surfaces	Agricultural areas	Forest and seminatural areas	Water bodies
1990	0.124	0.001	0.000	0.135
2000	0.138	0.001	0.000	0.170
2006	0.126	0.001	0.000	0.183
2012	0.258	0.001	0.000	0.255
2018	0.271	0.001	0.000	0.411

Table 10. Identify Positive-Ideal (PIS) and Negative-Ideal (NIS) Solutions

PIS	0.123977796	0.001301371	0.000165695	0.410803578
NIS	0.270914443	0.001218393	0.000161862	0.135043165

Table 11. Calculate Separation Measures

	S*	S-	C*	rank
1990	0.2758	0.1469	0.3476	5
2000	0.2410	0.1377	0.3637	4
2006	0.2281	0.1530	0.4015	2
2012	0.2053	0.1210	0.3708	3
2018	0.1469	0.2758	0.6524	1

In this study, the impact of land use land cover changes on sediment transport in the research area was evaluated using SAW and TOPSIS methods. Consequently, an assessment was conducted to ascertain whether there were any concerns regarding sediment yield in the drainage area of the Himmetli sediment observation station. A ranking was created with the intention of evaluating the impact of land use in reducing sediment transport, with applications made with both SAW and TOPSIS methods. The results of this ranking are given below. The results of both SAW and TOPSIS methods indicated that the land use status in 2018 ranked first (Table 12).

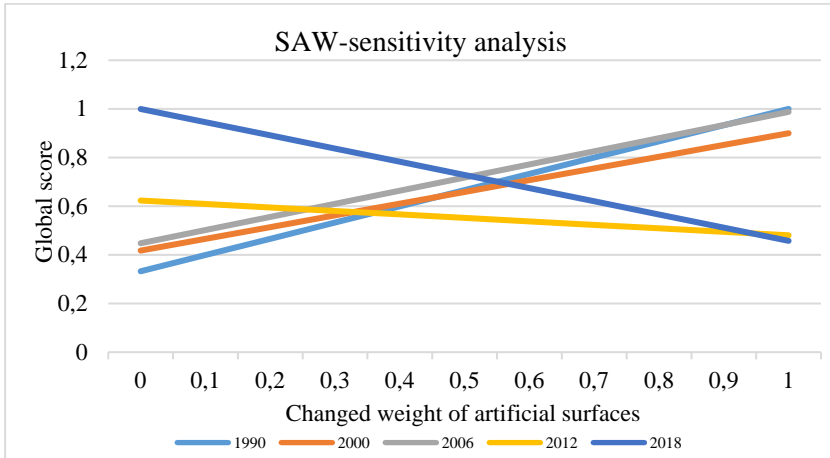
Table 12. The Ranking Results of Simple Additive Weighting (SAW) and TOPSIS Methods

	SAW method	TOPSIS method
1990	4	5
2000	3	4
2006	2	2
2012	5	3
2018	1	1

Despite the expansion of artificial surfaces in 2018, it was determined that this change in land use did not pose a significant risk in terms of its impact on sediment transport, due to the increase in water bodies. A sensitivity analysis was conducted by incrementally increasing the weights of the artificial surfaces by 0.10 between 0 and 1. Analyses indicated that an increase in the weight of artificial surfaces above 50% may lead to subsequent

changes in sediment transport patterns between artificial surfaces and water bodies. SAW-Sensitivity analysis according to changes weight of artificial surfaces is given in Figure 5.

Figure 5. SAW-Sensitivity Analysis According to Changes Weight of Artificial Surfaces



5. CONCLUSION

Research was conducted to determine the criterion weights regarding the effects of land use/land cover on sediment transport in the drainage area of the Göksu Himmetli sediment observation station located in the Seyhan River Basin in Türkiye. The land use/land cover criterion weights were calculated using the entropy technique and a multi-criteria decision-making methodology. This study is predicted to be useful in future land-use studies. The criterion weights were found to be 0,4360, 0,0028, 0,0004, and 0,5608 for artificial surfaces, agricultural areas, forest and seminatural areas, and water bodies, respectively. The results of the analyses conducted using both the SAW and TOPSIS methods indicate that the land use status of 2018 has the greatest impact on sediment reduction. This phenomenon was considered to be due to the expansion of water

bodies with sediment retention properties, despite the significant increase in artificial surfaces that could potentially increase sediment transport. As a result, the negative effects of sediment transport were effectively eliminated. As a result, increasing forest areas may not be effective in reducing sediment transport in this study area, but it may be possible to reduce sediment transport if human activities and construction decrease.

REFERENCES

- Akgül MA, Berberoglu S, Cetin M, Ibrikci H, Nagano, T, Kubota J, Fink M (2015) Modelling The Water And Nitrate Budget Using Swat. The 9th World Congress Of The European Water Resources Association (EWRA2015), Istanbul, Turkey, Book Of Abstracts, pp. 93-94, June 10-13, 2015.
- Akgül MA (2015) Akgul, M.A. Modelling Water and Nitrate Budget in Left Bank Irrigation of Lower Seyhan Plain. Master's Thesis, Department of Remote Sensing and Geographical Information Systems, Institute of Natural and Applied Sciences, Cukurova University, Adana, Turkey, 2015.
- Akgül MA, Aksu H (2021) Areal Precipitation Estimation Using Satellite Derived Rainfall Data over an Irrigation Area, Turkish Journal of Agriculture - Food Science and Technology, 9(2): 386-394.
- Akgül MA, Güvel ŞP, Aksu H (2024) Sedimentation Analysis on Seyhan Dam Reservoir Using Long Term Bathymetry Data, Journal of Engineering Sciences and Design, 12(1), 16-33, 2024, DOI: 10.21923/jesd.1353462.
- Akgül MA, Yurtal R (2023) Determination of Spatial Distribution and Temporal Variation of Suspended Sediment in Seyhan Dam Lake by Remote Sensing, Journal of Geological Engineering, 47 (2023) 103-118, DOI 10.24232/jmd.1311124.
- Alkan A, Tombul M (2022) Temporal Drought Assessment Using Various Indices of the Seyhan and Ceyhan Basins, Turkey, Applied Ecology and Environmental Research, 20(1):555-569.

- Alsenjar O, Çetin M, Aksu H, Akgül MA, Gölpınar MS (2023) Cropping Pattern Classification Using Artificial Neural Networks and Evapotranspiration Estimation in the Eastern Mediterranean Region of Turkey. *Journal of Agricultural Sciences*, 29(2):677-689. DOI: 10.15832/ankutbd.1174645.
- Altın TB, Sarış F, Altın BN (2020) Determination of drought intensity in Seyhan and Ceyhan River Basins, Turkey, by hydrological drought analysis, *Theoretical and Applied Climatology* (2020) 139:95–107.
- Assaf C, Adams C, Ferreira FF et al (2021) Land use and cover modeling as a tool for analyzing nature conservation policies – a case study of Juréia-Itatins. *Land Use Policy* 100:104895. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2020.104895>
- Aune-Lundberg L, Strand GH (2021) The content and accuracy of the CORINE Land Cover dataset for Norway, *International Journal of Applied Earth Observations and Geoinformation* 96 (2021) 102266.
- Balioti V, Tzimopoulos C, Evangelides C (2018) Multi-Criteria Decision Making Using TOPSIS Method Under Fuzzy Environment. Application in Spillway Selection, *Proceedings* 2018, 2, 637; doi:10.3390/proceedings2110637.
- Büttner G, Kosztra B, Maucha G, Pataki R, Kleeschulte S, Hazeu G, Vittek M, Schröder C, Littkopf A (2021) Copernicus Land Monitoring Service CORINE Land Cover User Manual (Version 1.0), European Environment Agency (EEA), Copenhagen, Denmark, 2021.
- Cabral P, Feger C, Levrel H, Chambolle M, Basque D (2016) Assessing the impact of land-cover changes on ecosystem

- services: A first step toward integrative planning in Bordeaux, France, *Ecosystem Services*, 22, 318-327.
- Cegielska K, Kukulska-Kozieł A, Salata T, Piotrowski P (2019) Szylar, M.: Shannon entropy as a peri-urban landscape metric: concentration of anthropogenic land cover element, *Journal of Spatial Science*, 64, 469-489, 10.1080/14498596.2018.1482803, 2019.
- Chen CH (2020) A Novel Multi-Criteria Decision-Making Model for Building Material Supplier Selection Based on Entropy-AHP Weighted TOPSIS, *Entropy* 2020, 22, 259; doi:10.3390/e22020259.
- Cole B, Smith G de la Barreda-Bautista B, Hamer A, Payne M, Codd T, Johnson SCM, Chan LY, Balzter H (2022) Dynamic landscapes in the UK driven by pressures from energy production and forestry – results of the CORINE land cover map 2018. *Land* 11, 192. <https://doi.org/10.3390/land11020192>.
- Çavuş Y, Aksoy H (2019) Spatial Drought Characterization for Seyhan River Basin in the Mediterranean Region of Turkey, *Water* 2019, 11, 1331; doi:10.3390/w11071331.
- Çetin M, Alsenjar O, Aksu H, Golpınar MS, Akgül MA. (2023) Estimation of crop water stress index and leaf area index based on remote sensing data, *Water Supply*, 23 (3): 1390-1404.
- Chrisnanto YH, Renaldi F, Afsyari NZ, Hadiana AI (2021) GIS-based ranking and categorization of potential impact on drought as disaster mitigation effort in Bandung Barat Regency (KBB) using Simple Additive Weighting (SAW), *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 1098 032043.
- Deng XZ, Zhao CH, Lin YC, Zhang T, Qu Y, Zhang F, Wang Z, Wu F (2014) Downscaling the impacts of Large-Scale

- LUCC on surface temperature along with IPCC RCPs: A global perspective. *Energies* 2014, 7, 2720–2739.
- DSİ (2013) Suspended Sediment Data for Surface Waters in Turkey (2006-2012), May 2013, Ankara, 542p. (in Turkish)
- DSİ (2014) State Hydraulic Works (DSİ), Seyhan River Basin Master Plan Report, prepared by Temelsu International Engineering Services Inc., Turkey (in Turkish)
- Falcucci A, Maiorano L, Boitani L (2007) Changes in land-use/land-cover patterns in Italy and their implications for biodiversity conservation, *Landscape Ecol*, 22:617–631.
- Fan Y, Yu G, He Z, Yu H, Bai R, Yang L, Wu D (2017) Entropies of the Chinese Land Use/Cover Change from 1990 to 2010 at a County Level. *Entropy*, 19(2):51. <https://doi.org/10.3390/e19020051>
- Fujihara Y, Simonovic SP, Topaloğlu F, Tanaka, Watanabe T (2008b) An inverse-modelling approach to assess the impacts of climate change in the Seyhan River basin, Turkey, *Hydrological Sciences Journal*, 53:6, 1121-1136, DOI: 10.1623/hysj.53.6.1121.
- Fujihara Y, Tanaka K, Watanabe T, Nagano T, Kojiri T (2008a) Assessing the impacts of climate change on the water resources of the Seyhan River Basin in Turkey: Use of dynamically downscaled data for hydrologic simulations, *Journal of Hydrology* (2008) 353, 33– 48.
- Geist HJ, Lambin EF (2001) What Drives Tropical Deforestation? A Meta-Analysis of Proximate and Underlying Causes of Deforestation Based on Subnational Case Study Evidence; LUCC International Project Office: Louvain-la-Neuve, Belgium.

- Gül OG, Kuzucu A (2017) Analysis of drought severity in Seyhan river basin, *European Water*, sa.60, p.211-217.
- Güvel ŞP (2024) Assessment of the impact of land cover changes on sediment yield: a case study, *Water Supply Vol 24 No 3*, 931 doi: 10.2166/ws.2024.036.
- Güvel ŞP, Akgül MA, Yurtal R. (2023) Reassessment of 1980 Lower Seyhan Plain flood event by using historical satellite data, *NOHU J. Eng. Sci.* 2023; 12(1), 207-215.
- Güvel ŞP, Yurtal R (2020) Investigation of sedimentation effects on Seyhan Dam Reservoir, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University* 35:2 (2020) 1015-1025.
- <https://land.copernicus.eu/pan-european/corineland-cover>
(Retrieved on 01.06.2024)
- IECO (International Engineering Company Inc.) (1966) Water resources development Ceyhan Basin Projects, Seyhan Basin Projects, Berdan Project, Develi Project, Amik Project, Master Plan Report. (in Turkish)
- Kaliszewski I, Podkopaev D (2016) Simple additive weighting-A metamodel for multiple criteria decision analysis methods, *Expert Systems With Applications* 54 (2016) 155–161.
- Ke X, Qi L, Zeng C (2016) A partitioned and asynchronous cellular automata model for urban growth simulation, *International Journal of Geographical Information Science*, 30, 637-659, 10.1080/13658816.2015.1084510.
- Koycegiz C, Buyukyildiz M (2022) Investigation of precipitation and extreme indices spatiotemporal variability in Seyhan Basin, Turkey, *Water Supply Vol 22 No 12*, 8603 doi: 10.2166/ws.2022.391.

- Kuleli T, Bayazıt S. (2022) Land cover change detection in the Turkish coastal zone based on 28-year (1990-2018) Corine data, *Environ Monit Assess*, 194:846.
- La Mela Veca DS, Cullotta S, Sferlazza S, Maetzke FG (2016) Anthropogenic Influences in Land Use/Land Cover Changes in Mediterranean Forest Landscapes in Sicily, *Land* 2016, 5, 3; doi:10.3390/land5010003.
- Lambin EF, Turner BL, Geist HJ, Agbola SB, Angelsen A, Bruce JW, Coomes OT, Dirzo E, Fischer G, Folke C et al. The causes of land-use and land-cover change: Moving beyond the myths. *Glob. Environ. Chang.* 2001, 11, 261–269.
- Li X, Liu X, Yu L (2014) A systematic sensitivity analysis of constrained cellular automata model for urban growth simulation based on different transition rules, *International Journal of Geographical Information Science*, 28, 1317-1335, 10.1080/13658816.2014.883079.
- Lin ZM, Xia B, Dong WJ (2011) Analysis on temporal-spatial changes of land-use structure in Guangdong province based on information entropy. *Trop. Geogr.*, 31, 266–270.
- Maithani S (2009) A neural network based urban growth model of an Indian city, *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 37, 363-376, 10.1007/s12524-009-0041-7, 2009.
- Migo-Sumagang MV, Aviso KB, Tan RR (2024) Best–Worst Method and Simple Additive Weighting for Selection Problems in Process Systems Engineering, *Process Integration and Optimization for Sustainability*, <https://doi.org/10.1007/s41660-024-00414-6>.

- Mitra R, Das J, Kamruzzaman M (2023) Application of TOPSIS method for flood susceptibility mapping using Excel and GIS, *MethodsX* 11 (2023) 102263.
- Mondal B, Das DN, Bhatta B (2017) Integrating cellular automata and Markov techniques to generate urban development potential surface: a study on Kolkata agglomeration, *Geocarto International*, 32, 401-419, 10.1080/10106049.2016.1155656.
- Mondal B, Das DN, Dolui G (2015) Modeling spatial variation of explanatory factors of urban expansion of Kolkata: a geographically weighted regression approach, *Modeling Earth Systems and Environment*, 1, 29, 10.1007/s40808-015-0026-1.
- Munroe DK, Müller D (2007) Issues in spatially explicit statistical land-use/cover change (LUCC) models: Examples from western Honduras and the central highlands of Vietnam. *Land Use Policy* 2007, 24, 521–530.
- Ozkaya A, Zerberg Y (2021) Water storage change assessment in the Seyhan Reservoir (Turkey) using HEC-ResSim model, *Arabian Journal of Geosciences* (2021) 14: 504.
- Pijanowski BC, Pithadia S, Shellito BA, Alexandridis K (2005) Calibrating a neural network-based urban change model for two metropolitan areas of the Upper Midwest of the United States, *International Journal of Geographical Information Science*, 19, 197-215, 10.1080/13658810410001713416.
- Qian XS, Yu JY, Dai RW (1990) A new field of science: Open complex giant system and its methodology. *Nat. Mag.*, 13, 2–10

- Rabbani G, Shafaqi S, Rahnama MR (2018) Urban sprawl modeling using statistical approach in Mashhad, northeastern Iran, *Modeling Earth Systems and Environment*, 4, 141-149, 10.1007/s40808-017-0404-y.
- Ruiz BP, Cuevas JA, Bravo de la Parra R, Prieto F, García del Barrio JM, Zavala MA (2010) Land use change in a Mediterranean metropolitan region and its periphery: assessment of conservation policies through CORINE Land Cover data and Markov models, *Forest Systems* 2010 19(3), 315-328.
- Saluja S, Gaur A, Abbas S (2021) Assessment of Pavement Surface Quality using TOPSIS Method, *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 796 012015.
- Topçu E, Seçkin N (2016) Drought Analysis of the Seyhan Basin by Using Standardized Precipitation Index SPI and L-moments. *Journal of Agricultural Sciences*, 22(2), 196-215. https://doi.org/10.1501/Tarimbil_0000001381
- Topçu E, Seçkin N, Haktanır NA (2022) Drought analyses of Eastern Mediterranean, Seyhan, Ceyhan, and Asi Basins by using aggregate drought index (ADI). *Theoretical and Applied Climatology*, 147(3), 909-924. <https://doi.org/10.1007/s00704-021-03873-w>
- Topçu E (2022) Drought Analysis Using the Entropy Weight-based TOPSIS Method: A Case Study of Kars, Turkey, *Russian Meteorology and Hydrology*, 2022, Vol. 47, No. 3, pp. 224–231. Allerton Press, Inc., 2022.
- UN Economic and Social Council. (2019) Special edition: progress towards the Sustainable Development Goals. <https://undocs.org/E/2019/68>. United Nations, 2015. “World Population Prospects.”

- Wang JJ, Jing YY, Zhang CF Zhao, JH (2009) Review on multi-criteria decision analysis aid in sustainable energy decision-making, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 13 (2009) 2263–2278.
- Wu J, Chen X, Lu J (2022) Assessment of long and short-term flood risk using the multi-criteria analysis model with the AHP-Entropy method in Poyang Lake basin, *International Journal of Disaster Risk Reduction* 75 (2022) 102968.
- Xie H, He Y, Choi Y et al (2020) Warning of negative effects of land-use changes on ecological security based on GIS. *Sci Total Environ* 704:135427. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135427>
- Yang Y, Xiao P, Feng X et al (2017) Accuracy assessment of seven global land cover datasets over China. *ISPRS J Photogramm Remote Sens* 125:156–173. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2017.01.016>
- Yang J, Su J, Chen F, Xie P, Ge Q (2016) A local land use competition cellular automata model and its application. *ISPRS Int. J. Geo-Inf.*, 5, 106.
- Zhang L, Zhang H, Xu E (2022) Information entropy and elasticity analysis of the land use structure change influencing eco-environmental quality in Qinghai-Tibet Plateau from 1990 to 2015. *Environ Sci Pollut Res* **29**, 18348–18364. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-17978-2>

SIVI VİSKOZ SÖNÜMLEYİCİLERİN YAPISAL KONTROLDEKİ ROLÜ: GÜNCEL PERSPEKTİFLER

Yavuz Selim HATİPOĞLU¹

1. GİRİŞ

Depremler, dünya genelinde ve ülkemizde ciddi yıkımlara neden olan, büyük mal ve can kayıplarına yol açan doğal afetlerin başında yer almaktadır. Bu durum, yapısal mühendisliğin sürekli olarak yapıların deprem dayanıklılığının artmasına yönelik olarak gelişen bir alan haline gelmesine yol açmıştır. Yapısal mühendisliğin tarihine baktığımızda ise karşımıza büyük depremlerin acı sonuçlarından sonra harekete geçmiş ancak bilim ve teknolojinin gelişimine de bir o kadar hızlı ayak uyduran bir süreç çıkmaktadır.

Yapı tasarımının tarihsel gelişim süreçlerini aşağıda belirtildiği şekilde sıralamak yanlış olmayacaktır;

a) Erken dönem: Antik Dönem (M.Ö. 3000 - M.S. 500), Orta Çağ (M.S. 500 - M.S. 1500) gibi dönemleri kapsayan erken dönem medeniyetleri deprem ve sel gibi büyük doğal afet tehlikelerinin varlığına karşı dirençli mühendislik yapılarının inşa edilmesinin gerekliliğinin önemini kavramışlardır. Ancak o dönemin koşullarında yapılara etkiyen yüklerin bilimsel bir temele dayandırılması oldukça güçtü. Dolayısıyla bu dönemde yapıların yalnızca deprem etkilerine karşı yapının yeterli rijitlikte olması amaçlanmış ve sadece

¹ Dr. Öğr. Üyesi, Bayburt Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü, yhatipoglu@bayburt.edu.tr, ORCID: 0000-0003-2094-1695.

statik yükler göz önüne alınarak tasarımlar gerçekleştirilmiştir. O dönemin yapılarında büyük ölçüde kullanılan temel yapı elemanları arasında sütunlar, kemerler ve düz çatılar bulunmakta idi. Bu dönemde kullanılan yapı malzemelerinin ise taş, tuğla ve ahşap olduğu ayakta kalan tarihi eserler incelendiğinde görülmektedir.

b) Rönesans Dönemi (14. ve 17. Yüzyıl arası): Bu dönemde mühendisler matematiksel prensipleri geliştirerek oranlar ve orantıları yapıların tasarımında kullanmaya başlamışlardır.

c) Sanayi Devrimi ve Aydınlanma Çağı (17. ve 18. Yüzyıl): Sanayi Devrimi ve Aydınlanma Çağı'nda oldukça ilerleyen teknolojik gelişme ve bilim ile paralel olarak yapı malzemeleri de oldukça çeşitlenmiş ve geliştirilmiştir. Sanayi devrimi ile yapılarda demir ve çeliğin yaygın olarak kullanılması hız kazanmış ve daha dayanıklı ve büyük yapıların inşası mümkün hale gelmiştir. Yapı tasarımında esneklik kavramı oluşmaya başlamıştır.

d) Deprem Mühendisliğinin Doğuşu (20. Yüzyıl Başları): ABD'de 1868 yılında meydana gelen Hayward Depremi deprem mühendisliğinin oluşumu için atılan ilk adımların başlangıcı olarak değerlendirilebilir (1,2). 20. yüzyılın başlarında ise deprem mühendisliği disiplini çok daha belirgin bir şekilde ortaya çıkmaya başlamıştır. San Francisco'da 1906 yılında 7,8 Mw büyüklüğünde meydana gelen San Francisco depremi ve diğer büyük depremler depreme dayanıklı yapı tasarımı anlayışı ve yapı analizleri konusundaki teknik gelişmelerin hızlanmasına neden olmuştur. Ayrıca araştırmacılar tarafından yapıya etki eden dinamik yüklerinde dikkate alınmaya başlanmasının konuşulmasına başlanmıştır. Bu dönemde, yapısal analiz, deprem yükleri ve zemin etkileri konularında ilk temel

teoriler oluşturulmaya başlanmıştır. Ayrıca bu dönemde betonarme ve çelik yapılar daha yaygın hale gelmiştir.

e) Deprem standartlarının oluşması (20. Yüzyıl Ortaları): 1906 yılında ABD’de meydana gelen San Francisco depreminden sonra ilk deprem yönetmeliğinin oluşturulması için karar verilmiş ve çalışmalar başlatılmıştır. 1927 yılında ABD’de hazırlanan Uniform Building Code (Tıp Bina Yönetmeliği, UBC) yönetmeliği ilk deprem yönetmeliğidir. Sonrasında ise 1933 yılında meydana gelen Long Beach ve 1971 yılında meydana gelen San Fernando depremlerinden elde edilen deneyimler dikkate alınarak UBC yönetmeliği geliştirilmiştir. Günümüzde uluslararası geçerliliği olan yönetmelikler ve ülkelerin geliştirmiş olduğu birçok deprem yönetmeliği mevcuttur.

f) Bilgisayar Tabanlı Analiz ve Tasarım (1960'lar): Bilim ve teknolojinin gelişmesine paralel olarak bilgisayar teknolojisinin gelişimi de oldukça ilerlemiş yapısal analiz ve tasarım yöntemlerinde devrim niteliğinde bir değişikliğe yol açmıştır (Stavridis and Shing, 2010). 1960’lı yıllarda mühendisler gelişen bu teknoloji sayesinde bilgisayar tabanlı yazılımlar oluşturarak analizlerinde kullanmaya başlamışlardır. Bu dönemde bilgisayar destekli tasarımların ve 1970’li yıllarda sonlu elemanlar analizi gibi tekniklerin gerçekleştirilebilmesi ile de yapıya etki eden statik ve dinamik yüklerin hesabı oldukça kolaylaşmış, daha doğru ve güvenilir yapısal tasarımlar elde edilmeye başlanmıştır.

g) Yapısal Kontrol Teknikleri (1980'ler): Büyük depremlere karşı çok daha dayanıklı yapı tasarımlarının gerçekleştirilebilmesi için yapı tasarımında sınırların zorlandığı dönemde yapısal tasarıma başka bir boyut kazandırarak çok daha güvenli yapıların inşa edilmesine imkân tanıyan izolasyon ve sönümleme teknikleri

geliştirilmiştir. Geliştirilen bu teknikler yardımıyla deprem ve rüzgâr etkilerinden kaynaklanan titreşimler rahat bir şekilde sönümlenebilir olmuştur. Yapının temeline yerleştirilen izolatörler vasıtasıyla da binaya etki eden deprem kuvveti önemli ölçüde azaltılabilmektedir. Ayrıca bu teknikler sayesinde yapıya etki eden deprem enerjisi sadece yapısal elemanlar ile sönümlenmediğinden yapı elemanlarının boyutları, malzeme kalitesi ve yapı mimarisinin sınırları çok zorlanmadan modern tarzda büyük yapı tasarımları daha rahat modellenebilir olmuştur.

h) Performans Tabanlı Tasarım (2000'ler ve sonrası): 2000'li yılların başlarında tasarım anlayışında farklı yollara gidilmiştir. Yapı tasarımının ilk aşamasında amaca uygun olarak performans hedefleri belirlenerek o hedeflere ulaşımı mümkün kılacak şekilde tasarımın yapılması anlayışı gelişmiştir. Böylelikle yapının inşa edileceği bölgenin özelliklerine göre yapının hedeflenen deprem performansı düzeyine ulaşması ve ekonomikliğinin sağlanması gerçekleştirilmiş olur. Bu tasarım anlayışında yapının ilk tasarım aşamasında belirlenen deprem büyüklüğünde gerçekleşebilecek olan olası depremlerde yapının göçmesi engellenir.

i) Akıllı Yapı Teknolojileri ve İnternet Bağlantılı Sistemler (2010'lar): Son yıllarda, yapay zekâ teknolojisinin, giydirilebilir teknolojilerin, sensör teknolojilerinin gelişimi yapıların akıllı yapı olarak tasarlanmasını ve internet bağlantılı cihazlar ile ilgili yapıların gerçek zamanlı olarak sürekli izlenmesini mümkün kılmaktadır. Böylelikle yapının deprem anındaki davranışının kontrol edilmesi, deprem sonrası durumlarının değerlendirmesinin sağlanması, varsa hasar durumu hakkında bilgilerin alınmasını sağlayan sistemler yapılara entegre edilmeye başlanmıştır. Ayrıca bu gelişmiş sensörler ve internet bağlantılı sistemlerden deprem

sonrası alınan ilgili verilerin anlık olarak paylaşılmasını ve bu verilere dayalı olarak algoritmalar aracılığıyla gelişmiş öngörülerin elde edilmesini sağlayacaktır. Bu durum aktif yapı kontrol sistemlerinin ve ilerleyen süreçlerde yapıların performansını daha ileriye götürebilmek için değerli bilgilerin elde edilmesine önemli katkılar sunacaktır.

Depreme karşı dayanıklı yapı tasarımının tarihsel gelişimi, sürekli olarak yaşanan tecrübeler, deneyimler, teknolojik ilerlemeler ve yeni araştırmalar ile şekillenmiştir. Görüldüğü üzere yapı tasarım aşamaları, sadece statik yükü dikkate alıp deneyim ve gözleme dayanan anlayıştan, bilgisayara yazılımlarıyla dinamik yükleri de dikkatte alan, sonrasında çeşitli izolasyonlar ve sönümleyiciler yardımıyla yapısal elemanlara etki eden deprem enerjisini azaltan ve akıllı yapı sistemleri ile deprem anında yapıya yön veren tasarım anlayışı sürecine evrilmiştir.

İleri yapısal tasarımının günümüzde geldiği son nokta yapısal kontrol sistemlerini yapıya entegre etmektir. Bunun için çeşitli amaçlara hizmet eden birçok yapısal kontrol sistemleri geliştirilmiştir. Yapısal kontrol sistemleri sayesinde deprem enerjisi sadece yapısal elemanlar tarafından değil yapıya entegre edilen sistem tarafından da yutulmaktadır. Böylelikle yapısal elemanların üzerindeki yük oldukça azalmakta ve yapı büyük deprem felaketlerinden hasarsız bir şekilde çıkabilmektedir. Bu avantajlı durumu deprem sonrası oluşacak acil müdahalelerde hizmet etmeye devam etmesi gerekli olan veya tarihi kültürü mirası gelecek nesillere aktarmada önem arz eden hastane gibi sağlık sektörüne hizmet eden yapılar, gerekli iletişimin sağlanabilmesi için telekomünikasyon yapıları, her türlü enerji santralleri, ulaşımın kesilmemesi için köprüler, tarihi mirasların geleceğe aktarılması için müzeler ve tarihi yapılarda uygulamak önem arz etmektedir.

Yapısal kontrol sistemleri pasif, yarı aktif, aktif ve hibrid olmak üzere dört ana başlık altında incelenebilir (Germen, 2006). Bu sistemler kendi aralarında avantaj ve dezavantajlara sahiptir (Şekil 1). Ek güç gerektirmemesi, ekonomik ve kararlı çalışma yapısından dolayı pasif sistemler ileri yapısal tasarıma gerek duymayan devasa gökdelenlerin haricinde tercih edilen ve kullanılan sistemlerdir. Bir diğer yandan aktif veya yarı aktif sistemler ile pasif sistemler birlikte kullanılarak hibrid (karma) kontrol sistemlerini oluşturur.

Şekil 1. Yapısal Kontrol Sistemlerinin Özellikleri



Kaynak: (Hatipoğlu, 2021).

Pasif kontrol sistemleri içerisinde birçok cihaz ve eleman mevcuttur. Bu nedenle pasif kontrol sisteminde çok büyük öneme sahip ve sıkça tercih edilen cihazlardan biri olan sıvı viskoz sönümleyiciler burada ele alınacaktır. Viskoz sönümleyicilerin yapısal performans üzerindeki etkileri incelenerek güncel yaklaşımları ele alınacaktır.

2. YAPISAL KONTROL SİSTEMLERİ

İnsanlık tarihi boyunca depremler çok büyük can ve mal kaybına neden olmuş ve neden olmaya da devam etmektedir. Ne yazık ki bu tehlike, insanların ekonomik ve sosyoekonomik

nedenlerden dolayı büyük şehirlere göçmesine, oralarda nüfus yoğunluğunun artması, kısıtlı arazi imkanlarından dolayı elverişsiz zeminlere yakın ve yüksek katlı yapıların yapılmasına neden olduğundan giderek artmaktadır. Özellikle aktif fay hatlarında bulunan ve ülkenin büyük nüfuslu kentlerinin fay hattı üzerinde bulunması bu tehlikenin daha da büyümesine ve bir an önce önlemlerin alınmasına neden olmaktadır. Bu tedbirlerin başında ise depreme dayanıklı yapıların oluşturulması gelmektedir.

Geleneksel yapı tasarımında büyük depremler sırasında yapıları etkileyen enerjinin sönmelenmesi görevi yapısal elemanlara verilmekte ve o elemanların göçmeden plastik davranışlar sergileyerek kalıcı hasara uğramasına izin verilmektedir. Bu durum geleneksel yapı tasarımında yapının ekonomik sınırlar içerisinde kalıp can kaybının en aza indirilebilmesi için gerekli ve etkili bir yoldur. Ancak bu geleneksel yapı tasarımı dünyanın birçok ülkesinde, büyük depremlerde pek çok canı kurtarmış olsa da ardında kullanılamaz ve ağır hasarlı durumda on binlerce yapının oluşmasının önüne geçememiş ve ülkelerin ekonomik ve sosyal hayatına çok ciddi yükler getirmiştir (Kelly, 2001). Fakat araştırmacılar, çok büyük depremlerde dahi yapı elemanlarının plastik davranış sergilemeden deprem enerjisini yutabilmenin, yapıların hizmet süresini uzatabilmenin gerekli yolunu harici enerji sönmeme sistemleriyle çözmeyi başarmışlardır. Bu tasarım yapısal kontrol sistemi benzeri isimler ile kendine literatürde yer bulmuştur. Depreme dayanıklı yapı tasarım anlayışında büyük değişimlere yol açan ve yapıların deprem performansının artmasında çok etkili olan bu sistem, mühendislerin son yıllarda yoğun ilgi duyduğu ve geliştirmek için üzerinde çalışmalar yaptığı bir tasarım sürecidir.

Çok daha ağır sonuçlara yol açtığından dolayı yapısal kontrol sistemlerinin avantajlarından bahsederken sürekli olarak

deprem etkisinden bahsedilmiştir. Ancak yapısal kontrol sistemleri özellikle gökdelen tarzı ve diğer çok katlı yapılardaki rüzgâr ve dinamik yüklerin etkilerini de sönümleyerek tasarıma önemli katkılarda bulunmaktadır.

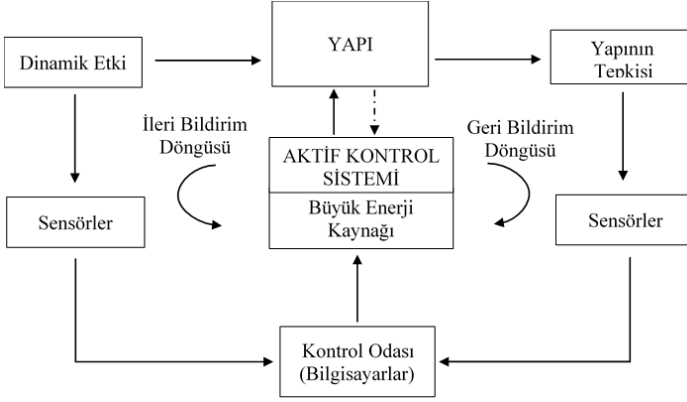
Yapısal kontrol sistemlerini dört ana başlık altında inceleyebiliriz (Germen, 2006). Başlıklar şu şekilde sıralanabilir;

1. Aktif kontrol sistemleri
2. Yarı aktif kontrol sistemleri
3. Pasif kontrol sistemleri
4. Hibrid kontrol sistemleri

2.1. Aktif Kontrol Sistemleri

Aktif koruma sistemi ilk kez 1972 yılında Yao tarafından önerilmiştir. Bu kontrol stratejisinde, yapıya etki eden dinamik yükün enerjisine gerektiği ölçüde karşı koymak için yapıya kuvvet sağlama, yapının sahip olduğu farklı titreşim modlarını sistemli bir şekilde kontrol etme ve olası farklı yükleme durumlarına göre yükü karşılama prensibi vardır (Housner et al. 1997). Aktif sönümleme cihazları, yapıya gelen dinamik yükleri sensörler yardımıyla belirleyip analiz ederek yapının karakteristiğine göre en uygun tepki seperasyonu belirler ve aktif kontrol sistemini en etkili olacak biçimde yönlendirir. Tepki sonrası dış dinamik etkiler ve yapının titreşim hareketi sensörlerden gelen veriler yardımıyla tekrar sistem tarafından tekrar değerlendirilip yeni tepki senaryoları geliştirilir. Bu döngü yapı stabil hale gelinceye kadar tekrarlanır. Aktif kontrol sisteminin çalışma prensibi Şekil 2’de verilmiştir.

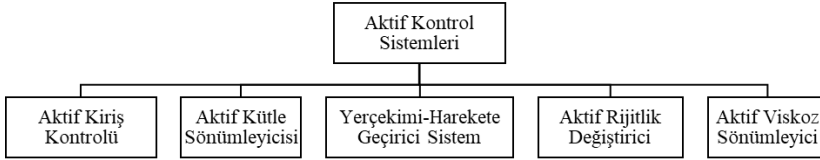
Şekil 2. Aktif Kontrol Sistemlerinin Çalışma Prensipleri



Kaynak: (Hatipoğlu, 2021).

Aktif kontrol sistemleri pek çok sivil yapı için önerilmiş ve uygulanmıştır (Spencer ve Sain 1997). Farklı amaçlar için birçok farklı aktif kontrol sistemleri geliştirilmiş ve günümüzde de geliştirilmeye devam etmektedir. En yaygın olarak kullanılan aktif koruma sistemlerini Şekil 3'te belirtildiği üzere gruplara ayrılabilir.

Şekil 3. Aktif Kontrol Sistemi Cihazları



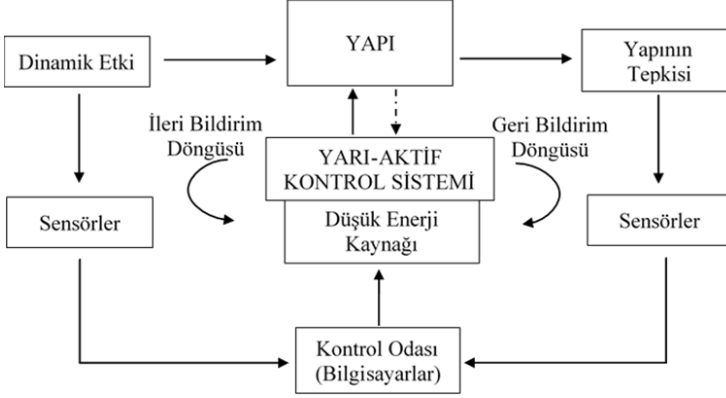
Kaynak: (Hatipoğlu, 2021).

2.2.Yarı Aktif Kontrol Sistemleri

Yarı aktif kontrol sistemleri tıpkı aktif kontrol sistemleri gibi sensörlerden gelen verilerin sistem kontrol odasında işlenmesi ve yapının dinamik karakteristiğine en uygun olacak tepki senaryolarının belirlenmesi ve uygulanması yoluyla çalışan akıllı sistemlerdir. Aktif kontrol sistemleri dış komutlar vasıtasıyla yönlendirilebilen kontrollü sistemlerdir. Pasif kontrol

sistemleri ise dış komutlar doğrultusunda hareket etmeyen sistemlerdir. Yarı aktif sistemler ise aktif ve pasif kontrol sistemlerinin birleşimi gibidir. Bu sistemdeki cihazlar kontrol edilebilir özellikteki pasif cihazlar olarak tanımlanabilir. Dolayısıyla bu sistem aktif ve pasif kontrol sistemlerinin avantajlarına sahip olduğundan tercih edilen bir kontrol sistemidir. Yarı aktif kontrol sistemlerinin çalışma prensibi Şekil 4'te gösterilmiştir.

Şekil 4. Yarı Aktif Sistemlerin Çalışma Prensibi



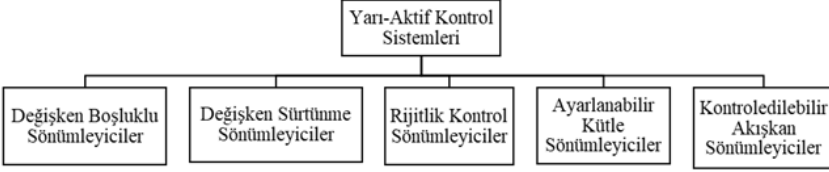
Kaynak: (Hatipoğlu, 2021).

Yarı aktif sistemlerin aktif sistemlerden önemli iki avantajı vardır. Bunlardan ilki sistemin çalışması için aktif kontrol sistemlerindeki gibi çok büyük güçlere ihtiyaç duymamasıdır. Yarı aktif sönümlenme cihazları piller yardımıyla çalışabilir ve sismik etki sırasında olası bir enerji kaynağının kesilmesi sistemin çalışmasını olumsuz etkilemez. İkinci önemli avantaj ise yapıya kuvvet uygulamazlar. Tıpkı pasif kontrol sistemlerinde olduğu gibi sadece yapıya etki eden enerjiyi ısı enerjisine dönüştürerek sönümlerler ve yansıtırlar.

Yarı aktif kontrol sistemleri aktif kontrol sistemine göre olan avantajlarından dolayı birçok araştırmacı tarafından oldukça ilgi görmüştür. Araştırmacılar, pasif sönümlenme cihazlarının içerisinde manyetik alan veya elektrik (MR veya ER) enerjisi

etkisiyle yarı katı hale dönüşebilen özel sıvılar koyarak yarı aktif sönümleme cihazlarını üretmişlerdir. Cihazların içerisindeki özel sıvının bir pil veya çok az enerji uygulanmasıyla katı hale geçebilmesi ile çok daha etkili sistemin kurulabilmesi sağlanmıştır. Yarı aktif kontrol sistemlerinin başlıca çeşitleri Şekil 5’te verilmiştir.

Şekil 5. Yarı Aktif Kontrol Sistemi Cihazları



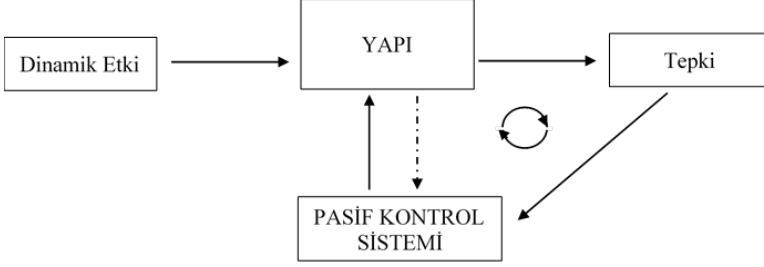
Kaynak: (Hatipoğlu, 2021).

2.3.Pasif Kontrol Sistemleri

Pasif kontrol cihazları yapının tabanından gelip yapıyı etkileyen kinetik enerjiiyi ısı enerjisine dönüştürerek yapıya ek sönümleme sağlar. Böylelikle titreşim genliği küçülerek yapı elemanları üzerinde oluşan kesit zorlanmaları ve yer değiştirme miktarları azalır. Bu da yapının plastik davranışa geçmeden en az hasar ile yapının büyük dinamik kuvvetlerden kurtulmasına sebep olur. Diğer yandan bu sistem büyük deprem ve rüzgâr enerjisini iyi sönümleyebildiği gibi yapının var olan dayanımını ve rijitliğini de arttırılabilirler (ATC 1994).

Pasif kontrol sistemindeki cihazların sönümleme yapabilmesi için yapının salınım hareketine başlaması gerekir. Cihazların sönümleme süreci yapının salınım hareketinin sonlanıp stabil hale gelmesine kadar geçen süre zarfında bir döngüde devam eder. Pasif kontrol sistemlerinin enerji sönümleme sürecindeki çalışma prensibi Şekil 6’da verilmiştir.

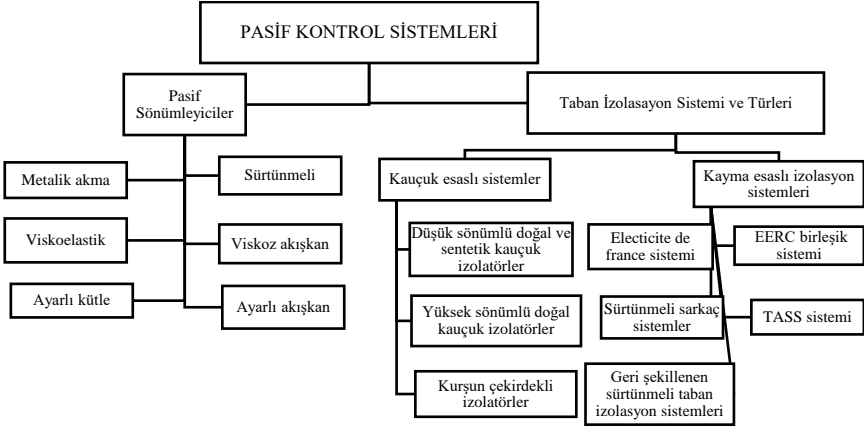
Şekil 6. Pasif Kontrol Sistemlerinin Çalışma Prensipleri



Kaynak: (Hatipoğlu, 2021).

Pasif kontrol sistemleri aşağıda Şekil 7’de verildiği gibi gruplara ayrılabilirler.

Şekil 7. Pasif Kontrol Sistemlerinin Sınıflandırılması



Pasif kontrol sisteminde, yapıyı belirli dinamik bir yüklemekten korumak için, sistemi oluşturan sönümlenme cihazları tasarlanırken sönümlenme katsayısı gibi sabit olan parametreleri en uygun olacak şekilde belirlenir. Pasif kontrol sistemlerinde yapıya gelebilecek muhtemel en büyük rüzgâr ve deprem kuvveti tahmin edilerek cihazların özellikleri belirlenir. Bu nedenle sistemdeki sönümlenme cihazlarının performansı belirlenenden

farklı oluşabilecek yükleme senaryoları ve konfigürasyonlarında yetersiz kalabilir.

Pasif kontrol sistemleri diğer kontrol sistemlerine göre bazı avantaj ve dezavantajlara sahiptir. Bu sistemler kontrol edilemediği için aktif kontrol sistemleri gibi bölgede beklenmeyen tarzdaki sismik harekete veya diğer dinamik yüklere karşı farklı tepki senaryoları oluşturup cevap veremezler. Ancak kontrol sistemin çalışması için de herhangi bir büyük dış enerji kaynağına ihtiyaç duymazlar. Harici bir enerji kaynağına ihtiyaç duymamalarından dolayı deprem sırasında olası bir güç kesintisinden etkilenmezler, yapıya dışarıdan herhangi bir kuvvet uygulamadıkları için de stabilite sorununa neden olmazlar. Ayrıca pasif enerji sönümleyen cihazların üretim ve kurulum maliyeti diğer kontrol sistemlerine kıyasla oldukça azdır, sistemin projelendirilmesi çok daha kolay ve ucuzdur, kontrol cihazlarının bakım ihtiyacı çok azdır ve kullanım ömürleri boyunca kararlı bir şekilde performans gösterirler.

2.4.Hibrid Kontrol Sistemleri

Hibrid (Karma) kontrol sistemleri genellikle aktif ve pasif kontrol sistemlerin birlikte projelendirilmesi ile oluşturulan sistemlerdir. Son zamanlarda ise yarı aktif-pasif sistemlerinin bir arada kullanıldığı çalışmalarda yapılmıştır. Örneğin Shrimali *et al.* (2015) çalışmalarında iki komşu binadan birine taban izolatörü yerleştirmiş ve binaları birbirine yarı aktif cihazlar yardımıyla bağlamışlardır. Hibrid sistemlerinde iki farklı kontrol sisteminin bir arada kullanılması, bu sistemlerin tek olarak kullanılması durumunda meydana gelen bazı olumsuzlukları yok etmiştir.

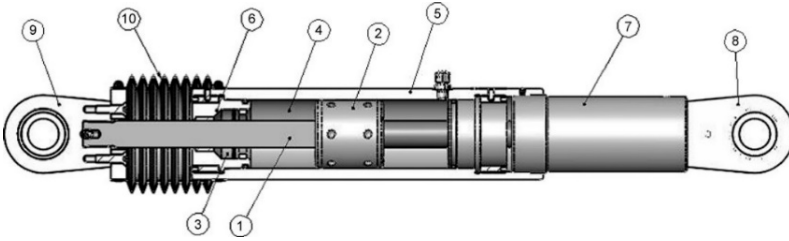
3. SIVI VİSKOZ SÖNÜMLEYİCİLERİN ROLÜ

Yapısal kontrol sisteminde pasif kontrol sistemlerinin performans, kararlılık ve ekonomiklik gibi pek çok nedenden

dolayı tercih edildiğinden daha önce bahsedilmiş idi. Benzer şekilde pasif kontrol sistemleri içerisinde en çok tercih edilen ise viskoz sönümleyici cihazlardır. Sıvı viskoz sönümleyiciler, özellikle deprem performansının artırılmasında, rüzgârdan kaynaklı yapısal titreşimlerin azaltılmasında oldukça etkili bir rol oynayan güçlü ve yenilikçi bir teknolojidir.

Sıvı viskoz sönümleyiciler yaygın olarak bronz başlıklı paslanmaz bir çelik piston ve onun içerisinde de sıkıştırılamaz silikon yağ dolu bir silindirden meydana gelir (Şekil 8). Sıvı viskoz sönümleyiciler araçlardaki darbe emici amortisörlere oldukça benzer (Warnotte et al., 2007). Viskoz sönümleyicilerde bulunan piston kolu ileri geri hareket ettikçe silindirin içindeki delikli piston başı viskoz silikon yağın içerisinde hareket etmeye ve silikon yağın piston başında bulunan deliklerinden geçmeye zorlanacaktır. Cihazın bu hareketi yapının salınımı süresince devam eder ve dış yükler neticesinde yapıya etki eden dinamik yüklerden kaynaklanan kinetik enerjiyi ısı enerjisine çevirir. Silindir içerisinde bulunan mekanik yapı, silikon yağın sahip olduğu viskozite özelliği, piston başındaki deliklerin şekli, boyutu, sayısı gibi nitelikler değiştirilerek sıvı viskoz sönümleme cihazlarının parametreleri istenilen şekilde tasarlanabilir.

Şekil 8. Sıvı Viskoz Sönümleyici Cihaz



Kaynak: (Miyamoto et al. 2010).

1. Çelik piston kolu
2. Sönümleme için çelik veya bronzdan üretilmiş delikli piston başlığı.
3. Sızdırmaz conta/conta yatakları.
4. Silikon sıvısı
5. Alaşım paslanmaz çelikten üretilmiş silindir.
6. Alaşım paslanmaz çelikten üretilmiş dış kapak.
7. Karbon çeliğinden üretilmiş genişletici
8. Alaşım çelikten üretilmiş bağlantı başlığı.
9. Alaşım çelikten dövülmüş küresel rulman.
10. Naylon takviyeli neopren lastik körük

Sıvı viskoz sönümleyiciler yalnızca pasif kontrol sistemlerinin önemli bir parçası değil, aktif ve hibrid sistemlerinin de önemli bir parçasıdır. Yapısal kontrol sistemlerinin büyük bölümünde önemli rol oynamaktadır. Ekonomik oluşu, kararlı çalışma yapısı, ısıya karşı dayanıklılık, bakım gereksinimlerinin az olması, küçük boyutlarda üretilebilmeleri, uygulanma kolaylığı, yenisiyle değişiminin kolay olması, çalışma için harici güce ihtiyaç duymaması, istenilen parametrelerde tasarlanabilir olması vb. gibi pek çok avantajlara sahip viskoz sönümleyicilerin daha da etkili olması için günümüzde birçok çalışma yapılmaktadır. Javadinasab ve Zahrai 2019 yılında yaptıkları bir çalışmada aktif kontrol sistemlerindeki sensörlerden gelen verilerin işlenmesi ve tepki için gerekli senaryonun işlenmesi için geçen zamana vurgu yaparak bunun ortadan kalması için yeni bir Ayarlanabilir Viskoz Damper (AVD) adını verdikleri bir sönümleme cihazı geliştirmişlerdir. Bu viskoz sönümleyici cihaz farklı yüklemeler karşısında içerisindeki delikli pistonun sahip olduğu değişken geçiş alanı sayesinde gerektiği ölçüde sönümleme kuvveti uygulayabilmektedir. Cihazın etkisinin incelendiği çalışmalarının sonucunda ise, önerilen AVD'nin tipik bir viskoz cihazla karşılaştırıldığında, ortalama yer değiştirme, ivme ve taban kesme değerlerini %52,5, %62,9 ve %44,4'e kadar azaltabildiğini ve ekstrem durumlarda ise enerji dağılımını %94,3'e kadar artırabildiğini göstermiştir.

Sıvı viskoz sönümleyicilerle donatılmış çerçeve yapılarının tasarımı için “doğrudan beş adımlı prosedür” bazı araştırmacılar tarafından önerilmiştir (Palermo et al., 2018). Marra et al. (2023) sıvı viskoz sönümleyicilerin kullanılarak binaların depreme karşı güçlendirilmesi için bu prosedürü güncelleyerek geliştirmişlerdir. Bu güncel prosedür yapısal tasarımcıya beklenen sismik performansın tanımlanmasından, binaya eklenen sıvı viskoz sönümleyicilerin boyutlandırılmasına

ve binanın sismik performansın nihai doğrulanmasına kadar uzanan 5 ardışık adım ile rehberlik eder.

Son yıllarda meydana gelen depremler sırasında köprü üst yapılarının çarpması ve yerinden çıkması gibi durumlar sıklıkla yaşanmaktadır. Araştırmacılar bu yapısal titreşimi etkili bir şekilde kontrol edebilmek için çeşitli pasif enerji sönmleme cihazları ve tasarım stratejileri önermişlerdir (Xiannng et al. 2019; Wang et al., 2021; Xu et al., 2021; Yang et al., 2021; Shi et al. 2022, Lu et al., 2022; Akehashi and Takewaki, 2022). Bunların arasında ise viskoz sönmleyiciler, önemli miktarda enerji dağıtımı yoluyla sismik performansı artırma yeteneği, ana yapının rijitliğine etki etmemesi ve faya yakın yer hareketlerini sönmlemede etkili olma gibi nedenlerden dolayı son yıllarda köprü mühendisliğinde giderek daha fazla kullanılmaya başlanmıştır. Ancak, deprem sırasında oluşan gerçek yer değiştirme değeri viskoz sönmleyicinin sahip olduğu strok değerini aştığında, viskoz sönmleyicinin arızalanmasına yol açabilecek darbe kuvvetleri oluşacaktır. Bu durum Şekil 9’da görüldüğü üzere sıvı viskoz sönmleyicilerin hasar almasına neden olabilmektedir. Bundan dolayı Ding et al. (2023) deprem sırasında strok sınırının aşılması adına çalışmalar yapmış ve etkili sonuçlar almışlardır.

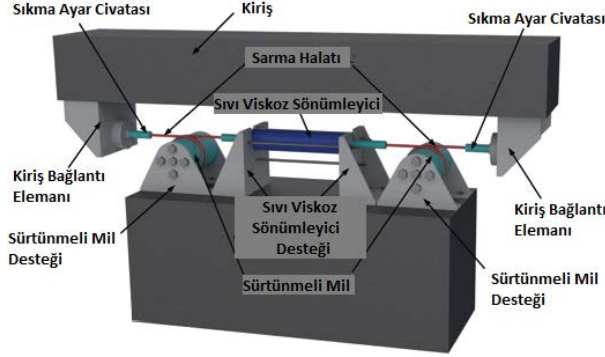
Şekil 9. Doğu Japonya Depreminde Hasar Gören Sıvı Viskoz Sönmleyici; (a) Sağlam Sönmleyici; (b) Hasarlı Sönmleyici



Kaynak: (Cao et al. 2012; Xie et al. 2015).

Viskoz sönümleyici cihazların etkinliği artırmak için Zhang ve diğ. (2023) Şekil 10'da görülen sarma halatlı akışkan viskoz sönümleyicisini (WRFVD) geliştirmişlerdir. Bu yeni tasarlanan sönümleyici ile sıvı viskoz sönümleyicilerin ve sürtünmeli sönümleyicilerin avantajları birleştirilmiş oldu. WRFVD sistemi yalnızca sıvı viskoz sönümleyicilerin mekanik özelliklerini korumakla kalmadı, aynı zamanda üretim maliyetlerini önemli ölçüde düşürmüştür. İki bölümden oluşan bu sistemde birinci bölüm sarma halatının bağlı olduğu mil sürtünmeli sönümleme gibi çalışırken ikinci bölüm halatın bağlı olduğu sönümleme sistemi ise sıvı viskoz sönümleyicisinin kendisidir. Deneysel sonuçlar, WRFVD'nin de tıpkı sıvı viskoz sönümleyiciler gibi hıza bağlı bir sönümleyici türü olduğunu ve istikrarlı operasyonel performansa sahip olduğunu göstermiştir. Aynı zamanda yer değiştirmede etkili azalmaların görüldüğü ve sistemin yorulma yüklerine karşı oldukça dirençli olduğu çalışmada vurgulanmıştır.

Şekil 10. WRFVD'nin Üç Boyutlu Şematik Diyagramı

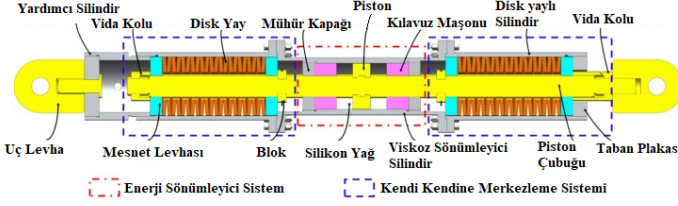


Kaynak: (Zhang et al.,2023)

Geleneksel çelik yapı tasarımında momentlere dayanıklı, eşmerkezli veya dışmerkezli çaprazlı çerçeveler oluşturularak yapıların depreme karşı performansının artırılması ve daha az can ve mal kaybının oluşması hedeflenir. Süneklik temelli tasarımı benimseyen bu geleneksel tasarımda büyük depremler yapının

plastik deformasyon yoluyla enerji dağıtmasına izin verir. Ancak bu durumda büyük kalıcı deformasyon ve ciddi yapısal hasarların oluşması kaçınılmazdır (Gupta and Krawinkler, 2000; Iwata and Murai, 2006). Sünek çelik yapı sistemlerinde görelî kat ötelemelerinin kontrol altına alınmasının önemi her meydana gelen depremde ortaya çıkmaktadır. Bu ve benzeri etkilerin çözümü için bir çok araştırmacı geleneksel çelik çerçevelerin sismik direncini arttırmak için çeşitli tipte kendinden merkezlenen çelik çerçeveler önermiş ve araştırmıştır (Christopoulos et al., 2002; Rojas et al., 2005; Christopoulos et al., 2008; Issa and Alam, 2019; Zhu et al., 2020; Wang et al., 2020). Bunlar arasında, kendinden merkezlenen eşmerkezli çaprazlı çerçeveler uygulama kolaylığı ve sahip olduğu yüksek rijitlik nedeniyle çok daha fazla ilgi görmekte olup, çok sayıda kendinden merkezlenen çaprazlar/sönümleyiciler analitik ve deneysel çalışmalarla geliştirilmiş ve geliştirilmeye de devam etmektedir. Sıvı viskoz sönümleyiciler kendinden merkezlenen çerçeve sistemlerinde kendine önemli bir yer bulmuş ve etkili sonuçlar da alınmıştır. Yan et al. (2023) yapmış çalışmalarında viskoz sönümleyicileri kullanarak daha fazla deforme olabilen ve hıza bağlı enerji dağılımı özelliklerine sahip yeni bir tür kendi kendini merkezleyen destek sistemi geliştirilmiştir. SCVD adı verdikleri bu sistemin olumlu etkilerinden çalışmalarında bahsetmektedirler. Araştırmacıların geliştirmiş oldukları iki sistemden oluşan (viskoz enerji dağıtım sistemi ve disk yaylı otomatik merkezleme sistemi) SCVD sistemi Şekil 11’de verilmiştir. Hu et al. (2023) ise yine sıvı viskoz sönümleyicileri kullanarak kendinden merkezlenen çaprazlı çerçeveler (SCBF) geliştirmiş ve katlar arası görelî ötelenmeleri azaltarak, hatta ortadan kaldırarak bina yapılarının deprem performansını ve deprem sonrası yapıların onarılabilirliğini arttırmayı başarmışlardır.

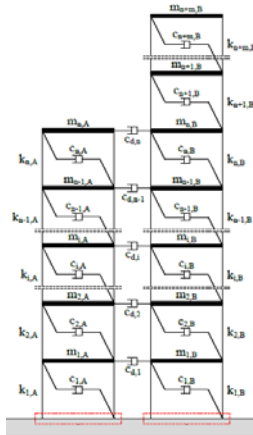
Şekil 11. SCVD Sisteminin Tasarımı



Kaynak: (Yan et al., 2023).

Yapısal kontrol sistemlerinin istenilen seviyede yaygınlaşmamasının nedenlerinden birisi getirdiği ekonomik yüküdür. Aslında deprem sonrası oluşabilecek kalıcı yapısal hasarlar veya can kayıpları düşünüldüğünde bunun bir yük olmadığı anlaşılmaktadır. Araştırmacılar tek bir binanın yapısal kontrol sistemiyle güçlendirilmesi yerine komşu veya bitişik iki bina arasında yerleştirdikleri sönümleyiciler ile iki binanın deprem performansını artırmayı başarmışlardır. Birçok araştırmacı iki komşu bina arasında sıvı viskoz sönümleyicileri yerleştirerek çeşitli araştırmalar yapmıştır (Patel and Jangid 2014; Pérez et al. 2015; Düzgün et al. 2023; Düzgün and Hatipoğlu, 2023).

Şekil 12. Sıvı Viskoz Sönümleyicilerin İki Bina Arasına Bağlanması



Kaynak: (Hatipoğlu and Düzgün, 2023).

İki bina arasına bağlanan sıvı viskoz sönümleyicilerin sayısı ve cihaz parametreleri doğru ayarlandığında yapıların yer değiştirme, ivme ve taban kesme kuvvetlerinde %50'lere varan azalmalar meydana gelebilmektedir (Düzgün et al. 2023; Hatipoğlu and Düzgün, 2023).

Sıvı viskoz sönümleyici cihazları gibi diğer sönümleme ve izolasyon sistemlerinin hızlı bir şekilde gelişmesi, yapısal kontrol sistemlerinin etkinliğini artırmakta birlikte mal ve can kaybını minimuma indirmektedir. Ancak yapısal kontrol sistemlerinin daha da yaygın hale gelmesi ve toplum tarafından daha çok benimsenmesi için Türkiye gibi birçok ülkelerin yapısal kontrol sistemini bina yapım yönetmeliklerine daha etkin bir şekilde entegre etmeleri gerekmektedir.

4. SONUÇ

Nüfusu yoğun olan şehirlerin aktif fay hatları üzerinde bulunması, arazi kısıtlılığı nedeniyle taşıma gücü zayıf zeminler üzerine yüksek katlı ve bitişik nizamlı binaların yapılması ve bu şehirlere olan göçün hızla devam etmesi gibi nedenler büyük bir deprem sonucunda istenmeyen olayların yaşanma ihtimalini artırmakta ve büyük endişelere yol açmaktadır. Bu ve benzeri durumlar binaların, köprülerin ve diğer yapıların dinamik performansını artırmak ve deprem gibi dış etkenlere karşı dayanıklılığı ve güvenliğini artırma konusunda çok daha ciddi ve hızlı adımların atılmasını gerektirmektedir. Yapısal mühendislik bu zorluklara karşı çözümleri üretme amacıyla her geçen gün kendini geliştirmekte ve yeni çözümler üretmektedir. Bu çözümlerin arasında yapısal kontrol sistemleri en etkili olanıdır. Yapısal kontrol sistemleri içerisinde ise kendine geniş kullanım alanı bulan sıvı viskoz sönümleyici cihazlar yapısal mühendislikte geleceğin yenilikçi ve etkili yöntemlerinden biri olarak öne çıkmaktadır. Sıvı viskoz sönümle cihazları kararlılığı,

maliyeti, çeşitli yapı tiplerine kolayca entegre edilebilirliği, harici enerji kaynağına ihtiyaç duymaması, uzun ömrü, bakım kolaylığı, etkili performansı, aktif ve hibrid yapısal sistemlerinde kullanılabilirliği önemli avantajlarından. Bu sönümleyicilerin performansı ve avantajları geliştirilen teknolojiler ile daha da artırılabilir ve deprem riski taşıyan bölgelerdeki yapıların güvenliği istenilen düzeyde sağlanabilir.

Viskoz sönümleyiciler çeşitli yapı tiplerine kolayca entegre edilebildiğinden güçlendirilmek istenen mevcut yapılara da kolayca uygulanabilir. Tipik olarak, viskoz sönümleyiciler bina kolonlarına, çerçevelerine veya diğer strüktürel elemanlara monte edilebilir. Bu durum şehirlerdeki yapı stoğunun depreme ve diğer dinamik yüklere karşı yapıların performansının iyileştirilmesi, sönümleme kapasitesinin artırılması ve güçlendirilmesi için hızlı, güvenli ve etkili çözümler sunabilir. Ayrıca, viskoz sönümleyicilerin kullanımı, geleneksel deprem izolasyon yöntemlerine alternatif olarak düşünülebilir ve bu sayede daha uygun maliyetli etkin çözümler sunabilir.

Görüldüğü üzere sıvı viskoz sönümleyiciler yapısal kontrol sistemlerinde etkin ve önemli bir rol almaktadır. Yapısal kontrol sistemlerinin birçoğunda dolaylı veya direkt olarak kullanılabilir. Viskoz sönümleyicilerin avantajları bu cihazların güncelliğinin korunmasını ve üzerinde kapsamlı çalışmaların yapılarak daha da geliştirilmesine yol açmaktadır. Sonuç olarak, yapılan araştırmalar göstermektedir ki, viskoz sönümleyiciler, yapısal mühendislikte çığır açan bir teknoloji olarak karşımıza çıkmakta ve depremlerin yıkıcı etkilerine karşı cam ve malımızı etkili şekilde korumaktadır. Gelecekteki gelişmelerle birlikte, viskoz sönümleyicilerin daha geniş çaplı uygulanabilirliği ve deprem etkilerine karşı daha etkili bir koruma sağlaması beklenmektedir.

KAYNAKÇA

- Akehashi, H., & Takewaki, I. (2022). Bounding of earthquake response via critical double impulse for efficient optimal design of viscous dampers for elastic-plastic moment frames. *Japan Architectural Review*, 5(2), 131-149.
- Cao, M., Tang, H., Funaki, N., & Xue, S. (2012, September). Study on a real 8F steel building with oil damper damaged during the 2011 Great East Japan Earthquake. In *15th World Conference on Earthquake Engineering*.
- Christopoulos, C., Filiatrault, A., Uang, C. M., & Folz, B. (2002). Posttensioned energy dissipating connections for moment-resisting steel frames. *Journal of Structural Engineering*, 128(9), 1111-1120.
- Christopoulos, C., Tremblay, R., Kim, H. J., & Lacerte, M. (2008). Self-centering energy dissipative bracing system for the seismic resistance of structures: development and validation. *Journal of structural engineering*, 134(1), 96-107.
- Ding, Y., Zhang, Y., & Xu, G. (2023). Pounding Mitigation Design and Real-Time Hybrid Simulation for a Novel Viscous Damper Applied in Bridges. *Structural Control and Health Monitoring*, 2023.
- Düzgün, O. A., & Hatipoğlu, Y. S. (2023). Effective damping coefficient of fluid viscous dampers for dynamic response mitigation of coupled frames. *Journal of Vibration Engineering & Technologies*, 11(4), 1821-1835.
- Düzgün, O. A., Hatipoğlu, Y. S., & Bayrak, O. Ü. (2023). Optimum parameters for adjacent structures coupled by fluid viscous dampers considering soil-structure interaction. *CHALLENGE*, 9(1), 12-23.

- Germen, Z. 2006. Yapısal kontrol sistemleri (Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü). s. 77
- Gupta, A., & Krawinkler, H. (2000). Behavior of ductile SMRFs at various seismic hazard levels. *Journal of Structural Engineering*, 126(1), 98-107.
- Hatipoğlu, Y. S., & Düzgün, O. A. (2023). Seismic response of adjacent buildings interconnected by viscous dampers considering soil-structure interaction. *Earthquakes and Structures*, 24(3), 165.
- Hatipoğlu, Y. S., (2021). Viskoz Sönümleyiciler ile Bağlanmış Komşu Yapı-Zemin Sisteminin Dinamik Davranışının İncelenmesi. Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
- Housner, G. W., Bergman, L. A., Caughey, T. K., Chassiakos, A. G., Claus, R. O., Masri, S. F., Skelton, R. E., Soong, T. T., Spencer, B. F., and Yao, J. T. P. 1997, Sep. Structural control: Past, present, and future. *Journal of Engineering Mechanics*, 123(9), 897-971.
- Hu, S., Qiu, C., & Zhu, S. (2023). Floor acceleration control of self-centering braced frames using viscous dampers. *Journal of Building Engineering*, 74, 105944.
- Issa, A. S., & Alam, M. S. (2019). Experimental and numerical study on the seismic performance of a self-centering bracing system using closed-loop dynamic (CLD) testing. *Engineering Structures*, 195, 144-158.
- Iwata, M., & Murai, M. (2006). Buckling-restrained brace using steel mortar planks; performance evaluation as a hysteretic damper. *Earthquake engineering & structural dynamics*, 35(14), 1807-1826.
- Javadinasab Hormozabad, S., & Zahrai, S. M. (2019). Innovative adaptive viscous damper to improve seismic control of

- structures. *Journal of Vibration and Control*, 25(12), 1833-1851.
- Kelly, T. E. 2001. *Base isolation of structures: Design guidelines*. Wellington, New Zealand: Holmes Consulting Group Ltd.
- L. Zu, Y. Huang, W. Li, H. Zhang, and L. Cai, "Seismic damage analysis of Yematan Bridge under near-fault earthquakes," *Structures*, vol. 41, pp. 586–601, 2022.
- Marra, M., Palermo, M., & Silvestri, S. (2023). The "direct five-step procedure" for the design of added viscous dampers to be inserted into existing buildings: formulation and case study. *Frontiers in Built Environment*, 9, 1289851.
- Miyamoto, H. K., Gilani, A. S. J., Wada, A., and Ariyaratana, C. 2010, Sep. Limit states and failure mechanisms of viscous dampers and the implications for large earthquakes. *Earthquake engineering and structural dynamics*, 39(11), 1279-1297.
- Palermo, M., Silvestri, S., Landi, L., Gasparini, G., & Trombetti, T. (2018). A "direct five-step procedure" for the preliminary seismic design of buildings with added viscous dampers. *Engineering Structures*, 173, 933-950.
- Patel, C. C., and Jangid, R. S. 2014. Dynamic response of identical adjacent structures connected by viscous damper. *Structural Control and Health Monitoring*, 21(2), 205-224.
- Pérez, L., Avila, S., and Doz, G. 2015. Coupled structural dynamic response using passive dampers. 17th International Symposium on Dynamic Problems of Mechanics.
- Rojas, P., Ricles, J. M., & Sause, R. (2005). Seismic performance of post-tensioned steel moment resisting frames with

- friction devices. *Journal of structural engineering*, 131(4), 529-540.
- Shi, X., Guan, X., Shen, W., & Xing, L. (2022). A control strategy using negative stiffness and semi-active viscous damping for fully tracking active control force for bridge cables: Principles and simulations. *Structural Control and Health Monitoring*, 29(9), e2989.
- Shrimali, M. K., Bharti, S. D., and Dumne, S. M. 2015, Jun. Seismic response analysis of coupled building involving MR damper and elastomeric base isolation. *Ain Shams Engineering Journal*, 6(2), 457-470. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2014.12.007>
- Spencer, B. F., and Sain, M. K. 1997, Dec. Controlling buildings: A new frontier in feedback. *Ieee Control Systems Magazine*, 17(6), 19-35. <https://doi.org/Doi 10.1109/37.642972>
- Stavridis, A., & Shing, P. B. (2010). Finite-element modeling of nonlinear behavior of masonry-infilled RC frames. *Journal of structural engineering*, 136(3), 285-296.
- Wang, W., Yang, Z., Hua, X., Chen, Z., Wang, X., & Song, G. (2021). Evaluation of a pendulum pounding tuned mass damper for seismic control of structures. *Engineering structures*, 228, 111554.
- Wang, Y., Zhou, Z., Xie, Q., & Huang, L. (2020). Theoretical analysis and experimental investigation of hysteretic performance of self-centering variable friction damper braces. *Engineering Structures*, 217, 110779.
- Warnotte, V., Stoica, D., Majewski, S., and Voiculescu, M. 2007. State of the art in the pounding mitigation techniques. *Intersectii/Intersections*, 4(3).

- Xiang, N., Goto, Y., Obata, M., & Alam, M. S. (2019). Passive seismic unseating prevention strategies implemented in highway bridges: A state-of-the-art review. *Engineering Structures*, 194, 77-93.
- Xie, L., Cao, M., Funaki, N., Tang, H., & Xue, S. (2015). Performance study of an eight-story steel building equipped with oil dampers damaged during the 2011 great east Japan earthquake part 1: structural identification and damage reasoning. *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*, 14(1), 181-188.
- Xu, Y., Tong, C., & Li, J. (2021). Simplified calculation method for supplemental viscous dampers of cable-stayed bridges under near-fault ground motions. *Journal of Earthquake Engineering*, 25(1), 65-81.
- Yan, X., Alam, M. S., Shu, G., & Qin, Y. (2023). A novel self-centering viscous damper for improving seismic resilience: Its development, experimentation, and system response. *Engineering Structures*, 279, 115632.
- Yang, C., Chen, Z., Wang, W., Hua, X., & Wang, Y. (2021). Optimal design of two viscous dampers for multi-mode control of a cable covering broad frequency range. *Engineering Structures*, 245, 112830.
- Yao, J. 1972. Concept of structural control. *Journal of the Structural Division*, 98(st 7).
- Zhang, C., Zhang, W., Su, L., Chen, Y., & Du, X. (2023). Theoretical and Experimental Analysis of a Winding Rope Fluid Viscous Damper. *Structural Control and Health Monitoring*, 2023.
- Zhu, R., Guo, T., & Mwangilwa, F. (2020). Development and test of a self-centering fluidic viscous damper. *Advances in Structural Engineering*, 23(13), 2835-2849.

YÜZEYSEL AKIŞ TAHMİNİNDE YAPAY SİNİR AĞI UYGULAMALARI VE ÖRNEK BİR TAHMİN MODELİ GELİŞTİRİLMESİ

Hasan Törehan BABACAN¹

1. GİRİŞ

Su dünyadaki yaşamın devamlılığının sağlanması için en önemli unsurların başında yer almaktadır. Temel yaşamsal ihtiyaç olan suyun günümüzdeki verimli kullanımının sağlanması, suya bağlı yıkıcı faaliyetleri önleme çalışmaları yapılması ve suya dair gelecek tahminlerinin yapılması kritik öneme sahiptir. Bu sebeple hidrolojik araştırmalar en genel durumda iki ana başlık altında incelenebilir. Bu başlıklardan ilki suyun günümüzdeki varlığının incelendiği araştırmalardır. Bu araştırmalarda insan faaliyetlerinin ve yaşamın devamlılığın sağlanması için su ihtiyacı araştırılmakta ve mevcut su kaynaklarının planlanması ve yönetilmesi konularında çalışılmaktadır (Grafton vd., 2011, Jain ve Singh, 2023). Diğer bir başlık ise gelecekte suyun durumunun araştırılması olarak belirtilebilir. Bu çalışmalar çeşitli dış etkiler sonucunda hidrolojik proseslerde meydana gelebilecek değişiklikleri ve bu değişikliklerin yol açacağı problemleri değerlendirmekte ve gelecekteki etkilere bağlı olarak su varlığının tahmin edilebilmesi için optimum modelleme yöntemleri araştırmaktadır (Devia vd., 2015, Peel ve Blöschl, 2011, Anand vd., 2024). Bütün bu hidrolojik araştırmalar

¹ Dr. Öğretim Üyesi, Amasya Üniversitesi, Taşova Yüksel Akın Meslek Yüksekokulu, Ulaştırma Hizmetleri Bölümü, hasan.babacan@amasya.edu.tr, ORCID: 0000-0001-9570-1966.

genellikle suyun yeryüzündeki, yüzey altındaki ve atmosferdeki hareketlerini incelemektedir.

Hidrolojik modelleme kaotik ilişkilerin modellenmesini gerektirdiğinden seçilecek algoritmalar büyük öneme sahiptir (Taormina vd., 2016). Hidrolojik modelleme aşamasındaki kaotik ilişkinin modellenmesi ve sonsuz çözüm uzayından optimum çözümün seçilerek, yüksek doğrulukla tahminleme yapmak için son yıllarda makine öğrenmesi gerçekleştiren algoritmalar sıklıkla kullanılmaktadır (İbrahim vd., 2022). Makine öğrenmesi, gelişen bilgisayar teknolojisine paralel olarak geliştirilmiş, donanım bağımlı çalışan ve karmaşık örüntüleri modellemede başarılı sonuçlar üreten algoritmalarlardır. Bu algoritmalar çözüm fonksiyonunu elde etmek için modellemesi yapılacak prosesin verilerini kullanan yazılım işlemleridir (Mahesh, 2020). Hidrolojik süreçlerin modellendiği araştırmalar incelendiğinde makine öğrenmesi gerçekleştiren algoritmalar sıklıkla yararlanıldığı görülecektir (Mosaffa vd., 2022).

Makine öğrenmesi gerçekleştiren algoritmaların hidroloji alanındaki yaygın kullanımı planlama ve yönetim konusunda büyük fayda sağlamaktadır. Yaşanacak olumsuzlukların önceden bilinmesiyle, hükümetler ve kamu kurumları olumsuz durumlarla karşılaşmadan önlem alabilmek için büyük zaman kazanmaktadır. Makine öğrenmesi algoritmalarından hidrolojik modelleme aşamasında en çok yararlanılan Yapay Sinir Ağları (YSA) olarak karşımıza çıkmaktadır (Gunathilake vd., 2021). YSA çeşitli alanlardaki hidrolojik araştırmalarda, hidrolojik sürecin modellenmesi ve gelecek tahminlemesi yapılması amacıyla kullanılmaktadır (Mahesh, 2020). Akarsuda taşınan sedimentin modellenmesi ve gelecek tahmini yapılması (Boye vd., 2024, Katipoğlu vd., 2024, Moradinejad, 2024), yağış-akış modellemesi yapılması (Gholami ve Sahour, 2022, Mohseni ve Muskula, 2023), yüzeysel akış tahmini yapılması (Babacan vd., 2023, Ali ve Shahbaz, 2020, Ghimire vd., 2021), yeraltı suyu

modellemesi yapılması (Zeydalinejad, 2022, Pandey vd., 2020), taşkın ve kuraklık analizleri (Dtissibe vd., 2020, Ahmad vd., 2022, Liu vd., 2020, Dikshit vd., 2022) ve su yönetimi çalışmaları (Jawad vd., 2021) konularında başarılı sonuçlar ürettiği görülmektedir.

Bu bölümde hidrolojik süreçleri modelleme konusunda yapılan çeşitli araştırmalarda başarılı sonuçlar üreten YSA algoritması ve bu algoritma ile geliştirilen, yüzeysel akış tahmini gerçekleştiren modeller incelenmektedir. Modellerde kullanılan parametreler ve yapılan bazı kabuller değerlendirilmiş ve örnek olarak YSA algoritmasıyla yüzeysel akış tahmin modeli geliştirilerek model yapısı ve çıktıları incelenmiştir. Bu bölümün değişen hidrolojik süreçlerin incelemesi konusunda araştırmalara ve kamu kurumlarına fayda sağlayacağı düşünülmekte ve bir rehber niteliği taşıması amaçlanmaktadır.

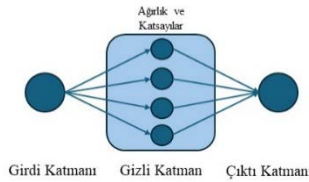
2. YAPAY SINIR AĞI YÖNTEMİ

YSA karmaşık örüntüleri çözümlmek için biyolojik sinir ağına benzer işlemleri taklit edebilen, makine öğrenmesi gerçekleştirerek insan karar verme sürecine benzer şekilde karar üretebilen bilgisayar sistemleri olarak tanımlanabilir (Babacan, 2015). Biyolojik sinir sistemi karar verici ve öğrenme birimi olarak çalışan beyin tarafından üretilen sinyallerin nöron denilen sinir hücrelerinden birbirlerine aktarılarak taşınması ve gerekli tepkinin oluşturulmasıyla sonuçlanmaktadır, ayrıca çıktı birimi olan tepkinin olduğu bölgeden alınan geri bildirimler tersinir olarak beyne iletilmekte ve beyin ürettiği komuta dair sonuçları öğrenmektedir (Şen, 2004). Araştırmacılar bu durumun makineler aracılığıyla kullanılabileceğini ve bu sayede çok karmaşık işlemlerin kısa sürede yapılabileceğini keşfetmişlerdir. Tasarlanan ilkel YSA yapılarında tek yönlü bir veri iletimi söz konusuydu, veri girdi katmanı denilen bir katmandan ağa

alınmakta gizli veya ara katman denilen kısımda işlenmekte ve çıktı katmanından çıktı olarak dış dünyaya aktarılmaktaydı (Ersoy ve Karal, 2012). Bu durum oluşturulan çıktı değerlerinin sağladığı çözümleri sınırlı bir aralıkta bırakıyor ve makine öğrenmesini efektif olmaktan uzak bir konumda tutuyordu. Bu sebeple yapılan araştırmalar neticesinde geri yayılım denilen işlemler YSA için kullanılabilir olmuştur. Geri yayılım, YSA tarafından oluşturulan çıktıların beklenen çıktılar ile farkının kıyaslandığı ve hesaplanan farkın fazla olması durumunda girdi katmanından tekrar öğrenme sürecinin başlatıldığı bir algoritmadır (Öztemel, 2003). Bu algoritmalar ağın öğrenme sürecine katkı sağladığından ağın performansını artırıcı etkisi olmaktadır. Bu nedenle geri yayılım algoritmaları günümüzde sıklıkla tercih edilmektedir.

Günümüzde kullanılan YSA yapıları incelendiğinde, girdi katmanı, ara/gizli katman ve çıktı katmanı olarak üç farklı düzeyde işlem biriminin kullanıldığı görülmektedir. Bu işlem birimlerinin hem kendi içerisinde hem de birbirleriyle veri alışverişi yapmak üzere bağlantıları bulunmaktadır (Şen, 2004). Bu bağlantılar fiziksel bağlantılar olmayıp geliştirilecek optimum tahmin fonksiyonunda kullanılacak katsayı ve ağırlık değerlerinin temsil ettiği değerlerdir. Şekil 1’de basit bir YSA yapısı gösterilmiştir.

Şekil 1. YSA Katmanları ve Katmanlar Arasında Veri Akış Yönleri



YSA bahsedilen bu katmanlar arasındaki fonksiyonları kullanarak sırasıyla eğitim, doğrulama ve test işlemlerini gerçekleştirmektedir. YSA girdi katmanından aldığı verileri

transfer fonksiyonları kullanılarak ara katmandaki işlem birimleri olan nöronlara aktarmaktadır. Bu aktarım sırasında çalışan öğrenme algoritması ağa belirli ağırlık değerleri atamaktadır. Atanan bu ağırlık değerleri ağın tahmin değerlerinin temelini oluşturmaktadır (Öztemel, 2003). Bu kısım eğitim aşaması olarak adlandırılmaktadır. Eğitim aşaması daha sonra geri yayılım algoritmasından gelen komutla yeniden çalıştırılarak optimize edilebilecektir. Ağırlık değerleri ve sabit değerlerin ataması tamamlandıktan sonra transfer fonksiyonları kullanılarak üretilmiş değerler çıktı katmanına aktarılır ve ağın çıktısı oluşturulmuş olur. Bu aşamadan sonra ağda doğrulama işlemi yapılacaktır. Oluşturulan çıktı değerleri beklenen değerler ile kıyaslanır ve kabul edilebilir hata düzeyinde tahmin yapılmamışsa ağırlık değerleri optimize edilerek ağ yeniden ara katmandan itibaren çalıştırılır. Bu işlem hatanın geri yayılmasını ifade eden geri yayılım olarak ifade edilmektedir. Doğrulama işlemi ağın beklenen değerler ile ürettiği değerleri kıyaslama aşamasını kapsamaktadır. Eğer doğrulama aşamasında hata oranı tolerans değeri içerisinde ise eğitim tamamlanarak, önceki aşamada belirlenen ağırlık değerleri ve katsayılar ağa kalıcı olarak atanır ve ağın test aşamasına hazırlığı gerçekleşmiş olur. Tolerans değeri dışında hata oranı ile karşılaşırsa bu aşama ve öncesinde yapılan işlemler tekrarlanarak yeniden ağın eğitim algoritması çalıştırılır. Test aşamasında ağa beklenen değerler olmaksızın girdi setine uygun biçimde girdi verileri okutulur ve ağın tahmin yapması sağlanır (Babacan, 2015). Ağın bu tahminleme performansı, tahmin edilen değerler ile beklenen değerler kullanılarak elde edilen korelasyon katsayısı (R), Nash-Sutcliffe Belirlilik Katsayısı (NSE), Hataların Karekökünün Ortalaması (RMSE) gibi performans indisleriyle ifade edilir (Babacan vd., 2023). Performans indislerinin hesaplaması için eşitlikler Tablo 1’de gösterilmiştir.

Tablo 1. Yaygın Olarak Kullanılan YSA Performans İndisleri

Performans İndisi	Sınır Değerler
$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} * \sum_{i=1}^n (Q_{i(obs)} - Q_{i(pre)})^2}$	$-\infty < RMSE < +\infty$
$R = \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{i(obs)} - \bar{Q}_{(obs)}) * (Q_{i(pre)} - \bar{Q}_{(pre)})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_{i(obs)} - \bar{Q}_{(obs)})^2 * \sum_{i=1}^n (Q_{i(pre)} - \bar{Q}_{(pre)})^2}}$	$-1 \leq R \leq +1$
$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{i(obs)} - Q_{i(pre)})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{i(obs)} - \bar{Q}_{(obs)})^2}$	$-\infty < NSE \leq 1$

Q: Debi (m³/s), (obs): Gözlenen veri, (pre): YSA modeli tarafından tahmin edilen veri

3. YAĞIŞ-AKIŞ MODELLEMESİ VE YÜZEYSEL AKIŞ TAHMİNİNDE YAPAY SİNİR AĞI PARAMETRE SEÇİMLERİNİN İNCELENMESİ

Yağış-Akış Modellemesi (YAM) ve Yüzeysel Akış Tahmini (YAT) konuları çoğu hidrolojik araştırma için temel oluşturmaktadır. Bir akarsu havzasında yağışın hangi oranda akışa dönüştüğünün, yağıştan sonra akışta değişikliklerin ne zaman ve hangi miktarda izlenmeye başladığının bilinmesi tüm hidrolik ve hidrolojik projeler için önemlidir. Ayrıca YAT çalışmalarından elde edilecek bulgular ekstrem akış değerlerinin ne zaman ve ne sıklıkla görüleceği, düzeyinin ne olacağı konularında fikir sağlayacağından olası kuraklık ve sel felaketlerine karşı risk yönetimi yapmayı sağlayacaktır (Babacan ve Yüksek, 2024). Bu nedenle bu bölümde YAM ve YAT konuları üzerinde durulmuştur.

YAM genelde YAT modellerine göre daha az parametre kullanılarak gerçekleştirilmektedir. YAM sadece yağış-akış sürecini açıklamaya çalışmakta ve genellikle girdi parametreleri Yağış (P) olmaktadır. Kullanılan yağış verileri ölçüm yapılan istasyonların gözlem verileridir. Akım Gözlem İstasyonlarından elde edilen Akış (Q) parametresi ise ağın hedef verisidir. Diğer

bir ifadeyle akış, yağışın bir fonksiyonu olarak ifade edilmeye çalışılmaktadır ($Q=f(P)$). YAM'da Q değerlerinin sadece P'ye bağlı ifade edilmesi genellikle kaotik olan yağış-akış ilişkisinin modellenmesini zorlaştırmakta ve tahmin performansının düşük olmasına sebep olmaktadır. Bu nedenle araştırmacıların gün gecikmeler kullandığı görülmektedir. Gün gecikmeler ardışık farklı günlerde gerçekleşen yağış olaylarını farklı veri setleri halinde girdi parametresi olarak kullanmak suretiyle oluşturulmaktadır. Bu durumun tahmin performansını arttırdığı görülmektedir.

YAT modellerinin ise YAM'a göre daha esnek olduğu söylenebilir. Araştırmacılar YAT modellerinde Q parametresini etkilediği hidrolojik olarak bilinen Buharlaşma (E), Buhar Basıncı (EVT), Sıcaklık (T) gibi parametreleri de modellerde girdi parametresi olarak kullanmış ve başarılı debi tahminleri yapmışlardır. YAT modellerinde yüzeysel akışın ifade edilmesi için çok çeşitli parametreler kullanıldığından sonucun oluşması bakımından hangi parametrenin diğerlerine göre daha etkin olduğunun belirlenmesi için farklı istatistiksel analizler yapmak gerekmektedir. YAT modellerinde de YAM'da olduğu gibi gün gecikmeli veri setleri kullanılabilen ve tahmin performansı artırılabilir. Tablo 2'de literatürde YSA kullanılarak gerçekleştirilen YAM ve YAT modellemesi konusundaki başlıca çalışmalara dair inceleme sunulmuştur. Tablo 2'deki çalışmalar, en uygun YSA modelinin deneme-yanılma yoluyla belirlendiğini göstermektedir. Ayrıca literatüre bağlı olarak YSA ile modelleme aşamasında dikkat edilmesi gereken hususlar özet olarak aşağıda verilmiştir:

- *Modellenecek prosese ilişkin ön tasarım yapılması ve girdi parametrelerine karar verilmesi.* Bu aşamada veriler direkt olarak ilgili kurum veya kurumlardan temin edilmiş olacağından mümkün olduğunca uzun ölçüm yapılan bölgeler seçilerek veri setleri

tasarlanmalıdır. Eğer ölçüm bulunmayan bölgelerde modelleme yapmak gerekirse bu durum farklı çözüm aşamaları gerektirmektedir.

- *Girdi parametrelerinde mümkün olan en uzun süre kesintisiz verinin sağlanması amacıyla veri ön hazırlama işleminin yapılması.* YSA temelinde geçmiş verileri kullanarak öğrenme işlemi gerçekleştirdiğinden zamana bağlı değişen (Gün, Ay, Yıl gibi) olayların modellenmesinde kesintisiz veri bulunması tahmin performansını olumlu etkilemektedir. Çünkü farklılıklar bulunsada hidrolojik süreçler genelde periyodik değişimler göstermektedir.
- *Basit istatistiksel incelemeler yapılarak veri setlerinin uygunluğunun değerlendirilmesi (Korelasyon İncelemesi).* Veri setlerinin oluşturulma aşaması YSA modellerindeki en önemli aşamalardandır. Bu nedenle oluşturulacak modelin basit korelasyon incelemesinin yapılarak modeli bu şablona uygun biçimde kurmak analiz süresini azaltmak açısından faydalı olacaktır.
- *Veri setlerinde aşırı uç değerlerin bulunması durumunda veri setinin ölçeklenmesi.* Yağış gibi zaman serileri dikkate alındığında, günlük ölçekte yıl içerisinde aşırı uç değişimler gözlenecektir. Yağış olmayan günlerdeki 0 değeri ağı değer üretmeye zorlayacağından ağın tahmin performansını etkileyecektir. Bu sebeple verilerin ölçeklenmesi model kararlılığını arttıracaktır.
- *Oluşturulacak YSA tasarımıda gizli katman sayısına karar verilmesi.* İncelenen çalışmalarda gizli katman sayısının tek olduğu görülmüştür. Bu seçimin gizli katman sayısının model karmaşıklığını arttırarak tahmin sürecini olumsuz etkilemesi kaynaklı yapıldığı söylenebilir.

- *Öğrenme algoritmasına karar verilmesi.* Literatürde önerilmiş çok sayıda algoritma bulunmaktadır. Bu algoritmaların birbirlerine karşı kesin bir üstünlüğünden söz edilemez ancak YAM ve YAT modellemelerinde Levenberg-Marquardt algoritmasının kullanımı daha yaygındır.
- *Gizli katmandaki nöron sayısına karar verilmesi ya da denenecek nöron sayılarının önceden belirlenmesi.* Bu konuda literatürde önerilmiş bir eşitlik bulunmadığından araştırmacıların optimum nöron sayısının belirlenmesi amacıyla deneme-yanılma yapması gerekmektedir. Nöron sayısındaki artışın model karmaşıklığını arttıracığı ve bu nedenle performans düşüşüne neden olacağı göz önünde bulundurulmalıdır.
- *Girdi katmanından gizli katmana ve buradan da çıktı katmanına doğru kullanılacak transfer fonksiyonunun seçimi.* Transfer fonksiyonları modelleme aşamasında belirlenecek önemli diğer parametredir. Bu fonksiyonların veri setine uygun biçimde seçilmesi model başarısını arttıracaktır. Literatürde hidrolojik süreçlerin modellenmesinde sigmoid fonksiyonların yaygın biçimde kullanıldığı görülmektedir.

Tablo 2. Literatürde YAM ve YAT Modellemesi İçin Kullanılan Bazı YSA Modelleri

Araştırma	Model	Girdi Verileri	Zaman Gecikmesi ¹	Veri Periyodu	Optimum Ağ Yapısı ²
Yüksek vd., 2018	YAM	P (mm/gün) Q (m ³ /s)	P (4) Q (1)	Günlük	Quasi-Newton ³ -1-8-HTS ⁴
Babacan vd., 2023	YAT	P (mm/gün) Q (m ³ /s) EVT (hPa)	P (3) Q (2) EVT (3)	Günlük	Levenberg-Marquardt ⁵ -1-5-HTS
Santos vd., 2023	YAT	P (mm/gün) Q (m ³ /s)	P (5) Q (5)	Günlük	Levenberg-Marquardt-1-22-HTS
Deulkar vd., 2024	YAM	P (mm/gün)	P (5)	Günlük	Levenberg-Marquardt-1-2-HTS
Yılmaz vd., 2022	YAT	Q (m ³ /s)	Q (3)	Günlük	Bayesian Regularization ⁶ -1-6-HTS
Katipoğlu, 2022	YAT	P (mm/ay) Q (m ³ /s) T (°C)	P (1) Q (1)	Aylık	Levenberg-Marquardt-1-10-HTS
Tayyab vd., 2019	YAM	P (mm/ay)	P (12)	Aylık	Radial Basis Function ⁷ -1-3-HTS

¹Günlük veri setlerinde verinin geciktirildiği en fazla gün sayısı her bir parametre için parantez içinde verilmiştir.

²Optimum ağ yapısı incelenen çalışmada en yüksek performans değeri elde edilen modelin yapısını sırasıyla Öğrenme Algoritması-Gizli Katman Sayısı-Gizli Katman Nöron Sayısı-Transfer Fonksiyonu olarak göstermektedir.

³Kademeli azaltım algoritması türüdür, detaylı bilgi için Powell, 1977 incelenebilir.

⁴Hiperbolik Tanjant Sigmoid

⁵Levenberg-Marquardt algoritması ile ilgili detaylı bilgi için Ranganathan, 2004 incelenebilir.

⁶Yöntem ile ilgili detay için Burden ve Winkler, 2009 incelenebilir.

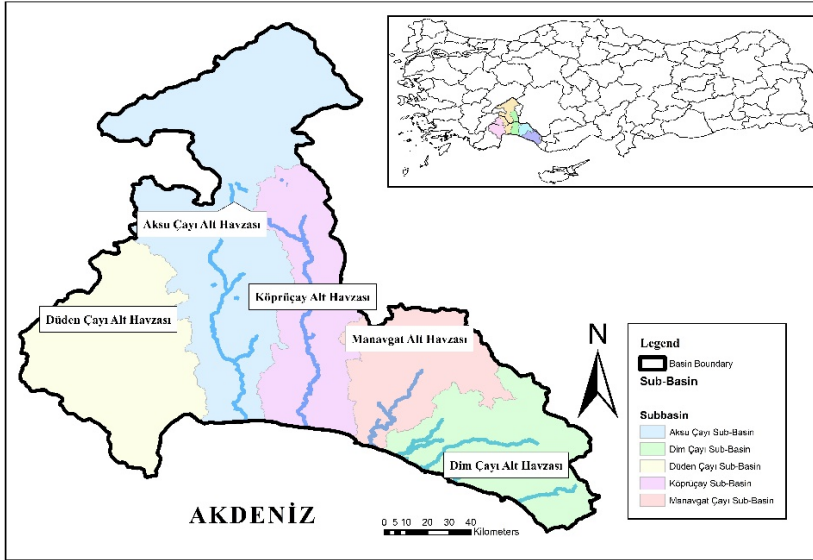
⁷Algoritmanın detayı ilgili çalışmada sunulmaktadır.

4. YAPAY SİNİR AĞI KULLANILARAK GELİŞTİRİLEN YÜZEYSEL AKIŞ TAHMİN MODELİ ÖRNEĞİ

Hidrolojik süreçleri modelleme çalışmaları öncesinde tüm bilimsel araştırmalarda olduğu gibi hipotetik bir yaklaşım ile başlamalıdır. Bu yaklaşım öncelikle problemin tespit edilmesi veya amaç belirlenmesi şeklinde başlar ve daha sonra bu probleme en uygun çözümün araştırılması şeklinde devam eder. Bu bölümde Türkiye'nin tarım ve turizm alanında önemli bir şehri olan Antalya ili, Köprüçay alt havzası dikkate alınmıştır. Köprüçay Nehri, Antalya Havzası Taşkın Yönetim Planı (Su

Yönetimi Genel Müdürlüğü, 2016) kapsamında taşkın riski barındıran bir akarsu olarak gösterilmektedir. Burada oluşacak bir taşkın tarihi, kültürel varlıklara ve bölge halkına ciddi zararları olacağı bilinmektedir. Köprüçay Nehri'nin gelecek akımlarının tahmin edilmesi önemli bir konu olduğundan bu akarsu için YAT modeli geliştirilmiştir. Antalya Havzası ve alt havza sınırları Şekil 2'de gösterilmiştir.

Şekil 2. Antalya Havzası ve Alt Havzaları Görünümü

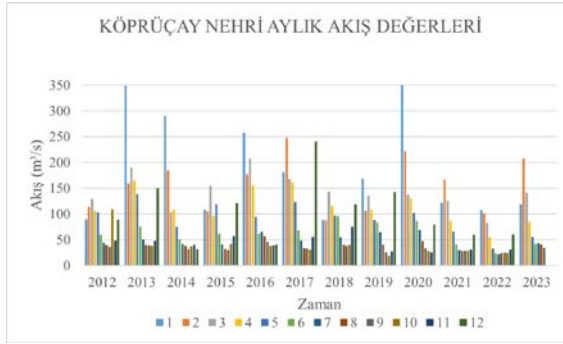


Yüzeysel akışın tahmin edilmesi önceki bölümlerde açıklandığı gibi karmaşık bir konudur. Bu karmaşık konunun çözümünde literatürdeki bazı varsayımlardan yararlanmak modelleme süresini kısaltarak model performansını arttırmaktadır. Bu nedenle modelleme aşamasında, öğrenme algoritması Levenberg-Marquardt, transfer fonksiyonu tanjant sigmoid ve gizli katman sayısı 1 olarak seçilmiştir. Modelde gizli katmandaki nöron sayısı 10 nörona kadar artırılarak denenmiştir.

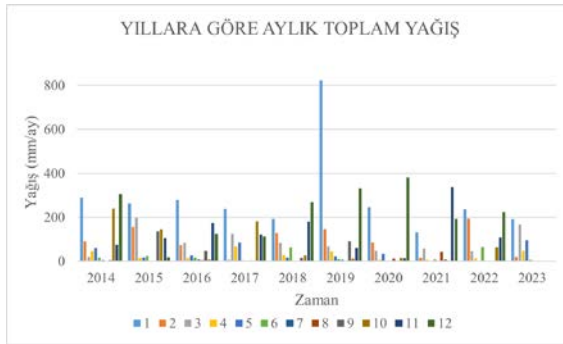
Modelleme aşamasında önemli diğer bir husus hidrolojik sürece ait kaydedilmiş gerçek veridir. Bu veriler Türkiye'de kamu kurumları tarafından sağlanmaktadır. Bu verilerin elde edilmesi

için kurumlarla iletişime geçilmesi gerekmektedir. Yağış ve Sıcaklık verisi Meteoroloji Genel Müdürlüğü, Akış verisi ise Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü'nden temin edilmiştir. Modelde çıktı verisi olan Akış (m^3/s) D09A101 numaralı Akım Gözlem İstasyonundan (AGİ) alınmıştır. Akış verisini tahmin etmek üzere hidrolojik olarak akış ile direkt ilişkili olduğu bilinen Yağış (mm) ve Sıcaklık ($^{\circ}C$) verileri 18306 numaralı Meteoroloji İstasyonundan (Mİ) alınarak girdi verisi olarak kullanılmıştır. Modellemede kullanılan verilerin periyodu aylık olarak belirlenmiştir. Verilerin %70'i eğitim, %30'u test aşaması için kullanılmıştır. Şekil 3, Şekil 4 ve Şekil 5'te sırasıyla akış, yağış ve sıcaklık parametreleri için yıllara göre aylık değişimi grafiksel olarak gösterilmiştir.

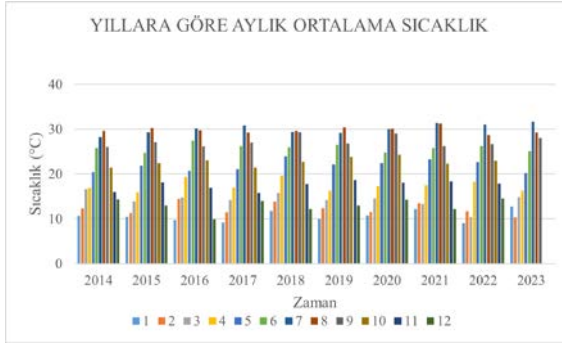
Şekil 3. Yıllara Göre Aylık Ortalama Akış Değerleri



Şekil 4. Yıllara Göre Aylık Toplam Yağış Değerleri



Şekil 5. Yıllara Göre Aylık Ortalama Sıcaklık Değerleri



Modelin performansı üç farklı indise göre değerlendirilmiştir. Modelleme aşamasında kullanılan veriler arasındaki ilişkiler diğer hidrolojik veri analizlerinde belirtildiği gibi karmaşık örüntülerin çözülmesi esasına dayanmaktadır. Bu model geliştirilirken model karmaşıklığını arttıracak fazla gizli katman sayısı gibi etkenlerden kaçınılmıştır. Ancak model karmaşıklığındaki artışın etkisini gösterebilmek için model gizli katmanında nöron sayısı 1 nörondan 10 nörona kadar artırılarak denenmiş ve modelin performans değerleri Tablo 3'te gösterilmiştir.

Tablo 3. YSA Kullanılarak Geliştirilen YAT Modeli Test Aşaması Performans Değerleri

Nöron Sayısı	RMSE	R	NSE
1	43,1	0,854	0,880
2	44,0	0,837	0,875
3	42,1	0,822	0,815
4	45,4	0,839	0,860
5	40,5	0,846	0,895
6	48,4	0,820	0,821
7	45,0	0,789	0,792
8	65,4	0,793	0,491
9	42,5	0,781	0,711
10	52,5	0,643	0,840

Yapay Sinir Ağı ile yapılan modellemede öğrenme algoritması Levenberg-Marquardt, Gizli Katman Sayısı: 1, Transfer Fonksiyonu: Tanjant Sigmoid ve girdi verileri P (mm/ay) ve T (°C) olarak belirlenmiş modele ait sonuçlardır

Tablo 3'teki performans kriterleri incelendiğinde, ölçütlerin tümü nöron sayısındaki artışın model tahmin performansını olumsuz etkilediğini göstermiştir. Bu durum daha önceki kısımlarda açıklandığı gibi nöron artışına bağlı model karmaşıklığının artması ile genel olarak açıklanabilecektir. Model sonuçları incelendiğinde RMSE ve NSE kriterlerine göre en iyi model gizli katmanda 5 nöron bulunan modeldir. Ancak tahminlerin gerçek veriler ile korelasyonuna bakılacak olursa modelin en iyi tahminini gizli katmanında 1 nöron bulunduğu anda yaptığı söylenebilir. Bu aşamada hidrolojik olarak değerlendirme yapmak ve en iyi modelin seçimini yapmak daha doğru olacaktır. Seri korelasyonları seri eğilimleri hakkında fikir vermekte ancak aralarındaki hata oranını yansıtmamaktadır. Bu modelde olduğu gibi aylık akışın tahmin edileceği çalışmalar su kuvveti tesislerinin kurulumu ve işletilmesi, rezervuar işletmeleri gibi konularda önemli bilgiler sağlayacağından bu gibi analizlerde düşük hata oranına sahip tahminlerin tercih edilmesi optimum maliyetli planlamanın yapılabilmesi için kesinliği yüksek bilgi sağlayacaktır. Bu nedenle en iyi model belirlenirken öncelikli olarak en düşük hata, sonra en yüksek korelasyon sağlanması hedeflenmiştir. En düşük hatanın sağlandığı tahminler gizli katmanda 5 nöronun bulunduğu modeldir. 5 nöronun bulunduğu modeldeki R değeri en yüksek değerine (0,854) göre %1 daha düşük olsa da bu durum kabul edilebilir bir hata payı olarak değerlendirilebilir. Bu nedenle geliştirilen model için en iyi performansı sağlayan yapı Tablo 4'te özet şeklinde gösterilmiştir.

Geliştirilen modelde performansı en yüksek olan yapı belirlendikten sonra tahmin edilen verilerin görselleştirilmesi tahmin performansının anlaşılabilmesi ve uç değerlerdeki farklılıkların değerlendirilebilmesi için gereklidir. Şekil 5'te en iyi model tahminlerinin beklenen değerlere göre değişimini gösteren bir zaman serisi ve saçılım diyagramı bulunmaktadır.

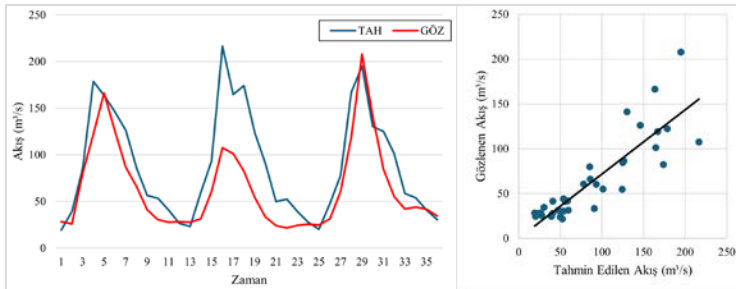
Model tahmin değerleri ve gözlenen değerler Şekil 5 üzerinden incelendiğinde tahmin setinin gözlenen sete göre daha yüksek ortalamaya sahip olduğu söylenebilmektedir. Ayrıca tahmin edilen verilerin daha yüksek akış değerlerine eriştiği görülmektedir. Bu durumda yapılan tahminlerin belirli bir katsayı ile çarpılarak düzenlenmesi veya modelden çıktığı gibi kullanılması iki ayrı seçenektir. Hidroloji alanında yapılan benzer çalışmalarda araştırmacılar model çıktılarını aynen kullanmıştır. Zaman serisi diyagramı üzerinden yapılacak diğer bir değerlendirme ise gözlenen verilerdeki periyodikliğin araştırılmasıdır. Geliştirilen bu modelin akışta artış-azalış yönleri ve miktarlarını büyük ölçüde tahmin edebildiği görülmektedir. Bu durum özellikle çok uzun yıllar için gelecek tahminlerinde (örneğin iklim değişikliğine bağlı akış tahminleri bkz. Babacan, 2024) akışın değişim yönü hakkında fikir sağlayacaktır.

Tablo 4. En İyi YAT Modeli Yapısı

Parametre	Detay	Parametre	Detay
Girdi Verileri	P (mm/ay) T (°C)	Tahminleyici Algoritma	Yapay Sinir Ağı
Hedef Veri	Q (m ³ /s)	Model Türü	YAT
Veri Periyodu	Aylık	Öğrenme Algoritması	Levenberg-Marquardt
Veri Dönemi	2014-2023 (9)*	Gizli Katman Sayısı	1
Eğitim Veri Aralığı	2014-2020 (9)*	Transfer Fonksiyonu	Tanjant Sigmoid
Test Veri Aralığı	2020 (10)* -2023(9)*	En İyi Modeldeki Nöron Sayısı	5

*İlgili yılın kaçınıcı ayına kadar verinin kullanıldığı gösterilmiştir.

Şekil 5. En İyi YAT Modeli Tahmini ve Gerçek Değerlerin Zaman Serisi Ve Saçılım Gösterimi



KAYNAKÇA

- Ahmad, M., Al Mehedi, M. A., Yazdan, M. M. S., & Kumar, R. (2022). Development of machine learning flood model using artificial neural network (ann) at var river. *Liquids*, 2(3), 147-160.
- Ali, S., & Shahbaz, M. (2020). Streamflow forecasting by modeling the rainfall–streamflow relationship using artificial neural networks. *Modeling Earth Systems and Environment*, 6(3), 1645-1656.
- Anand, V., Oinam, B., Wieprecht, S., Singh, S. K., & Srinivasan, R. (2024). Enhancing hydrological model calibration through hybrid strategies in data-scarce regions. *Hydrological Processes*, 38(2), e15084.
- Babacan, H. T. (2015). Giresun ili Aksu Deresi için farklı parametreler kullanılarak yapay sinir ağları ile akış modellemesi ve ileriye dönük akım tahminleri yapılması (Master's thesis, Gümüşhane Üniversitesi).
- Babacan, H. T., & Yüksek, Ö. (2024). Investigation of climate change impacts on daily streamflow extremes in Eastern Black Sea Basin, Turkey. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 134, 103599.
- Babacan, H. T., Yuksek, O., & Saka, F. (2023). Investigation of Impact of Vapor Pressure on Hybrid Streamflow Prediction Modeling. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 27(2), 890-902.
- Boye, C. B., Boye, P., & Ziggah, Y. Y. (2024). Comparative study of suspended sediment load prediction models based on artificial intelligence methods. In *Artificial Intelligence and Applications* (Vol. 2, No. 2, pp. 155-168).
- Deulkar, A. M., Londhe, S. N., Jain, R. K., & Dixit, P. R. (2024). Rainfall-runoff modelling—a comparison of Artificial

Neural Networks (ANNs) and Hydrologic Engineering Centre-Hydrologic Modelling System (HEC-HMS). *ISH Journal of Hydraulic Engineering*, 1-11.

Devia, G. K., Ganasri, B. P., & Dwarakish, G. S. (2015). A review on hydrological models. *Aquatic procedia*, 4, 1001-1007.

Dikshit, A., Pradhan, B., & Santosh, M. (2022). Artificial neural networks in drought prediction in the 21st century—A scientometric analysis. *Applied Soft Computing*, 114, 108080.

Dtissibe, F. Y., Ari, A. A. A., Titouna, C., Thiare, O., & Gueroui, A. M. (2020). Flood forecasting based on an artificial neural network scheme. *Natural Hazards*, 104, 1211-1237.

Ersoy, E., & Karal, Ö. (2012). Yapay sinir ağları ve insan beyni. *İnsan ve Toplum Bilimleri Araştırmaları Dergisi*, 1(2), 188-205.

Ghimire, S., Yaseen, Z. M., Farooque, A. A., Deo, R. C., Zhang, J., & Tao, X. (2021). Streamflow prediction using an integrated methodology based on convolutional neural network and long short-term memory networks. *Scientific Reports*, 11(1), 17497.

Gholami, V., & Sahour, H. (2022). Simulation of rainfall-runoff process using an artificial neural network (ANN) and field plots data. *Theoretical and Applied Climatology*, 147(1), 87-98.

Grafton, R. Quentin, and Karen Hussey, eds. *Water resources planning and management*. Cambridge University Press, 2011.

Gunathilake, M. B., Karunanayake, C., Gunathilake, A. S., Marasingha, N., Samarasinghe, J. T., Bandara, I. M., & Rathnayake, U. (2021). Hydrological models and artificial neural networks (ANNs) to simulate streamflow in a

- tropical catchment of Sri Lanka. *Applied Computational Intelligence and Soft Computing*, 2021(1), 6683389.
- Ibrahim, K. S. M. H., Huang, Y. F., Ahmed, A. N., Koo, C. H., & El-Shafie, A. (2022). A review of the hybrid artificial intelligence and optimization modelling of hydrological streamflow forecasting. *Alexandria Engineering Journal*, 61(1), 279-303.
- Jain, S. K., & Singh, V. P. (2023). *Water resources systems planning and management*. Elsevier.
- Jawad, J., Hawari, A. H., & Zaidi, S. J. (2021). Artificial neural network modeling of wastewater treatment and desalination using membrane processes: A review. *Chemical Engineering Journal*, 419, 129540.
- Katipoğlu, O. M., Aktürk, G., Kılınç, H. Ç., Terzioğlu, Z. Ö., & Keblouti, M. (2024). Suspended sediment load prediction in river systems via shuffled frog-leaping algorithm and neural network. *Earth Science Informatics*, 1-27.
- Katipoğlu, O.M. Monthly streamflow prediction in Amasya, Türkiye, using an integrated approach of a feedforward backpropagation neural network and discrete wavelet transform. *Model. Earth Syst. Environ.* 9, 2463–2475 (2023). <https://doi.org/10.1007/s40808-022-01629-7>
- Liu, X., Zhu, X., Zhang, Q., Yang, T., Pan, Y., & Sun, P. (2020). A remote sensing and artificial neural network-based integrated agricultural drought index: Index development and applications. *Catena*, 186, 104394.
- Mahesh, B. (2020). Machine learning algorithms-a review. *International Journal of Science and Research (IJSR)*. [Internet], 9(1), 381-386.
- Mohseni, U., & Muskula, S. B. (2023). Rainfall-runoff modeling using artificial neural network—a case study of purna sub-

- catchment of Upper Tapi Basin, India. Environmental Sciences Proceedings, 25(1), 1.
- Moradinejad, A. (2024). Suspended load modeling of river using soft computing techniques. Water Resources Management, 38(6), 1965-1986.
- Mosaffa, H., Sadeghi, M., Mallakpour, I., Jahromi, M. N., & Pourghasemi, H. R. (2022). Application of machine learning algorithms in hydrology. In Computers in earth and environmental sciences (pp. 585-591). Elsevier.
- Öztemel, E. (2003). Yapay Sinir Ağları, Papatya Yayıncılık, İstanbul.
- Pandey, K., Kumar, S., Malik, A., & Kuriqi, A. (2020). Artificial neural network optimized with a genetic algorithm for seasonal groundwater table depth prediction in Uttar Pradesh, India. Sustainability, 12(21), 8932.
- Peel, M. C., & Blöschl, G. (2011). Hydrological modelling in a changing world. Progress in Physical Geography, 35(2), 249-261.
- Powell, M. J. D. (1977). Restart procedures for the conjugate gradient method. Mathematical programming, 12, 241-254.
- Ranganathan, A. (2004). The levenberg-marquardt algorithm. Tutorial on LM algorithm, 11(1), 101-110.
- Santos, C. A. G., do Nascimento, G. R., de Farias, C. A. S., da Silva, R. M., & Mishra, M. (2023). Short-and long-term streamflow forecasting using wavelet neural networks for complex watersheds: a case study in the Mahanadi River, India. Ecological Informatics, 73, 101945.
- Su Yönetimi Genel Müdürlüğü (2016) Antalya Havzası Taşkın Yönetim Planı, Ankara.

- Şen, Z. (2004). Yapay sinir ağları. Su Vakfı.
- Taormina, R., Galelli, S., Karakaya, G., & Ahipasaoglu, S. D. (2016). An information theoretic approach to select alternate subsets of predictors for data-driven hydrological models. *Journal of Hydrology*, 542, 18-34.
- Tayyab, M., Zhou, J., Dong, X. et al. Rainfall-runoff modeling at Jinsha River basin by integrated neural network with discrete wavelet transform. *Meteorol Atmos Phys* 131, 115–125 (2019). <https://doi.org/10.1007/s00703-017-0546-5>
- Yilmaz, M., Tosunoğlu, F., Kaplan, N.H. et al. Predicting monthly streamflow using artificial neural networks and wavelet neural networks models. *Model. Earth Syst. Environ.* 8, 5547–5563 (2022). <https://doi.org/10.1007/s40808-022-01403-9>
- Zeydalinejad, N. (2022). Artificial neural networks vis-à-vis MODFLOW in the simulation of groundwater: A review. *Modeling Earth Systems and Environment*, 8(3), 2911-2932.

GÖZENEKLİLİK DAĞILIM MODELLERİNİN FONKSİYONEL DERECELENDİRİLMİŞ KİRİŞLERİN MEKANİK PERFORMANSINA ETKİLERİ

Uğur KAFKAS¹

1. GİRİŞ

Fonksiyonel derecelendirilmiş malzemeler (FDM'ler), malzeme bilimi ve mühendislik alanlarında yenilikçi malzemeler olarak öne çıkmaktadır. Bu malzemeler, mikro yapılarındaki bileşenlerin hacimsel olarak kademeli bir dağılım göstermesi ile karakterize edilir. Bu özellik, malzemenin belirli doğrultularda mekanik, termal, elektriksel ve kimyasal özelliklerinin istenilen şekilde ayarlanabilmesine olanak tanır (Khouja, 2024). FDM'ler, özellikle yüksek sıcaklıklara dayanıklı yapılar, termal bariyer kaplamalar, biyomedikal implantlar ve havacılık endüstrisinde büyük ilgi görmektedir (Wang ve Zu, 2017). FDM'ler, malzeme süreksizliklerini ortadan kaldırarak, termal ve mekanik stres yoğunluklarını minimize etme potansiyeliyle, geleneksel kompozit malzemelere kıyasla önemli avantajlar sunar. Malzemenin iç yapısındaki bileşenlerin sürekli ve düzenli bir gradyan ile değişmesi, malzemenin dayanıklılığını ve performansını artıran özellikler kazandırmaktadır. Bu tür malzemelerin tasarım esnekliği, birçok mühendislik alanında geniş uygulama alanları bulmasını sağlamaktadır (Saad, 2022).

¹ Dr. Öğretim Üyesi, Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Kütahya Teknik Bilimler MYO, İnşaat Teknolojisi, ugur.kafkas@dpu.edu.tr, ORCID: 0000-0003-1730-7810.

FDM'lerin geleneksel kompozit malzemelerden temel farkı, malzemenin iç yapısındaki farklı bileşenlerin keskin bir sınırla ayrılmaması, aksine bu bileşenlerin malzeme boyunca sürekli bir şekilde dağılım göstermesidir (Abdalla vd, 2020). Bu süreklilik, malzemde oluşabilecek çatlakların ve stres yoğunluklarının minimize edilmesine yardımcı olur, böylece malzemenin dayanıklılığı ve performansı artırılır. Bu özellikleri sayesinde, uzay ve havacılık, biyomedikal mühendisliği, otomotiv mühendisliği, denizcilik ve enerji (Turan ve Kahya, 2021) gibi birçok alanda kullanılmaktadır. Örneğin, havacılık endüstrisinde kullanılan FDM'ler, jet motorlarında termal bariyer kaplamaları olarak görev yaparak yüksek sıcaklıklara dayanıklılık sağlar ve motor bileşenlerinin ömrünü uzatırken, biyomedikal mühendislikte ise FDM'ler, biyoyumlu implantlar olarak kullanılarak insan dokusuyla optimal bir etkileşim sağlar (Zhao vd, 2007). Bu tür uygulamalar, FDM'lerin sunduğu malzeme tasarım esnekliğinin bir sonucudur.

FDM'lerin gelişimi, son yıllarda geniş çapta incelenen ve birçok mühendislik uygulamasında kullanım bulan önemli bir araştırma alanı haline gelmiştir. Özellikle, bu malzemelerin üretim süreçlerinde kullanılan teknikler ve bu tekniklerin malzeme özellikleri üzerindeki etkileri geniş bir literatür kapsamı oluşturmaktadır. Üretim aşamasındaki çeşitli sebeplerden ötürü özellikle FDM'lerde gözeneklilik durumu en çok karşılaşılan kusurlardan biridir (Kafkas, 2024). Oluşan gözeneklilik durumlarını modellemek için pek çok gözeneklilik modeli ortaya atılmıştır (Ghazwani vd, 2024; Kim vd, 2019; Uzun ve Yaylı, 2024). Gözeneklilik modelleri, FDM'lerin performansı üzerinde belirleyici bir role sahiptir. Gözeneklerin malzeme içindeki dağılımı ve hacimsel dağılımı, mekanik özellikleri ve yapısal bütünlüğü önemli ölçüde etkileyebilir ve farklı gözeneklilik modelleri, malzemenin izotropik veya anizotropik özellikler göstermesine neden olabilir.

Bu çalışma, FDM'lerin teorik temellerini, gözeneklilik modellerini ve bu gözeneklilik durum ve modellerinin malzemelerin mekanik performansı üzerindeki etkilerini ele almayı amaçlamaktadır. Çalışma, öncelikle FDM'lerin yapısal özelliklerini ve bu malzemelerin mühendislik uygulamalarındaki önemini tartışarak başlamakta, ardından çeşitli gözeneklilik modellerinin tanıtımını ve bu modellerin gözenekli FDM'den üretilmiş kiriş (G-FDMK) yapıların performansı üzerindeki etkilerini incelemektedir. Farklı gözeneklilik modellerinin kullanımıyla elde edilen rijitlik değerleri karşılaştırılarak, gelecekteki çalışmalar için bir temel oluşturulacaktır.

2. FONKSİYONEL DERECELENDİRİLMİŞ MALZEMELER

Katmanlı kompozit yapılarda, her bir katman arasındaki geçiş bölgeleri, malzeme özelliklerinin heterojen olmasına neden olur. Bu heterojenlik, komşu katmanlar arasındaki arayüzlerde malzeme özelliklerinde ani değişiklikler meydana gelmesi sonucunda yüksek kesme gerilmeleri oluşmasına yol açabilir. Buna karşın, FDM'ler, malzeme özelliklerinin hacimsel olarak sürekli ve düzenli bir gradyanla değiştiği, kompozit malzemelerin geliştirilmiş bir türüdür (Akgöz ve Civallek, 2015). Bu özellikleri FDM'lerin, mühendislik alanında, çok geniş bir uygulama alanı bulmasını sağlamıştır.

2.1.Homojenleştirme Teknikleri ve Hacim Dağılım Modelleri

FDM'ler genellikle seramik ve metal olmak üzere iki farklı malzeme fazını içerir; seramik faz, yüksek ısı ve korozyon direnci sağlarken, metal faz ise üstün mekanik dayanım ve mukavemet sunar (Jha vd, 2013). Bu iki fazın makroskobik düzeyde entegrasyonu, mühendislik uygulamalarında istenen özelliklere sahip ideal malzemelerin geliştirilmesine olanak tanır.

Bu sebeple, üretim aşamasından önce, nihai malzemenin çeşitli fiziksel özelliklerini öngörmek amacıyla farklı homojenleştirme ve matematiksel modelleme yöntemleri kullanılmaktadır. FDM'leri modellemek amacıyla birçok homojenleştirme modeli geliştirilmiştir; bu modellerin her biri, belirli amaçlar ve uygulama alanları doğrultusunda özel olarak tasarlanmıştır. Homojenleştirme teknikleri, FDM'lerin kompleks mikro yapılarını makroskopik ölçekte temsil edebilmek için geliştirilmiş çeşitli matematiksel modeller ve yaklaşımlardır. Bu teknikler, FDM'lerin mekanik ve fiziksel özelliklerini öngörmek için kullanılır ve her biri farklı varsayımlar ve hesaplama yöntemleri ile belirli uygulamalar için optimize edilmiştir.

Bunlardan en çok kullanılanların başında Voigt modeli (Voigt, 1889) gelmektedir. Karışım kuralı olarak da bilinen Voigt modeli, bir kompozit malzemenin mekanik özelliklerini (elastisite modülü, kayma modülü, poisson oranı, yoğunluk gibi) tahmin etmek için kullanılan en basit homojenleştirme tekniklerinden biridir. Bu model, bileşenlerin gerilme altında paralel olarak dizildiği varsayımına dayanır. Bu nedenle, Voigt modeli, malzemenin toplam elastik modülünü, bileşenlerin elastik modüllerinin hacimsel dağılımlarına göre ağırlıklı ortalaması olarak hesaplar. Bu yaklaşım, genellikle malzemenin üst sınır tahmini olarak kabul edilir. Reuss modeli (Reuss, 1929) ise, Voigt modelinin tam tersi bir yaklaşımla, bileşenlerin gerilme yerine deformasyon altında paralel olarak dizildiğini varsayar. Bu modelde, bileşenlerin deformasyonları aynı kabul edilerek, malzemenin elastik modülü, bileşenlerin elastik modüllerinin terslerinin hacimsel dağılımlarına göre ağırlıklı ortalaması olarak hesaplanır. Mori-Tanaka metodu (Mori ve Tanaka, 1973), bir heterojen malzemede bulunan sert ve yumuşak fazlar arasındaki etkileşimi dikkate alan daha gelişmiş bir homojenleştirme tekniğidir. Hashin-Shtrikman sınırları modeli ise (Hashin ve Shtrikman, 1962), bir kompozit malzemenin mekanik özellikleri

için elde edilen en dar sınırları verir. Bu sınırlar, bileşenlerin elastisite modüllerine ve hacimsel dağılımlarına bağlı olarak malzemenin üst ve alt sınırlarını belirler. Tamura metodu (Tamura vd, 1973) ise, partikül takviyeli kompozit malzemeler için özel olarak geliştirilmiş bir homojenleştirme tekniğidir. Burada bahsedilen bu tekniklerin dışında da daha spesifik amaçlar için tasarlanmış çeşitli homojenleştirme yaklaşımları mevcuttur.

FDM'lerin kullanılan tüm homojenleştirme teknikleri, FDM'lerin makroskopik özelliklerini belirlemek amacıyla kullanılan matematiksel idealleştirme ve hacimsel dağılım modelleri ile birlikte uygulanır. Hacimsel dağılım modelleri, malzemenin iç yapısındaki bileşenlerin nasıl dağıldığını tanımlayan matematiksel ifadeler sunar. Bu modeller, homojenleştirme teknikleri ile birleştirildiğinde, FDM'lerin mekanik, termal ve diğer fiziksel özelliklerinin makroskopik düzeyde nasıl ortaya çıktığını anlamak ve optimize etmek için güçlü bir araç sağlar.

Kuvvet yasası dağılımı (Yang ve Munz, 1997) ve üstel dağılım modeli (Delale ve Erdogan, 1983) başta olmak üzere çeşitli hacim fraksiyon modelleri FDM'lerin hacim dağılımlarının modellenmesinde kullanılmaktadır. Kuvvet yasası dağılımı malzemenin bileşenlerinin hacimsel fraksiyonunun belirli bir kuvvet fonksiyonu ile değiştiğini varsayar. Bu model, özellikle malzemenin elastisite modülü gibi mekanik özelliklerinin yüzeyden merkeze doğru kademeli bir şekilde değişimini öngörmek için kullanılır. Üstel dağılım modeli ise, bileşenlerin hacimsel fraksiyonunun üssel olarak değiştiği bir dağılım sunar. Bu model, yüzeyde yüksek bir sertlik ve dayanıklılık gerektiren uygulamalar için idealdir. Sigmoidal dağılım modeli (Chi ve Chung, 2002), bileşenlerin kademeli ve yumuşak bir geçişle değişmesini sağlar. Bu model, keskin özellik değişimlerini önleyerek, termal ve mekanik streslerin minimize

edilmesine yardımcı olur. Özellikle termal bariyer kaplamalarında tercih edilen bu model, malzemenin termal gradyanlara karşı direncini artırır. Trigonometrik dağılım modeli (Farsadi, 2021), bileşenlerin trigonometrik bir fonksiyon ile dağıldığı durumları tanımlar.

Bu çalışmada FDM'lerin homojenleştirilmesinde karışım kuralı adı da verilen Voight modeli ve hacim dağılım modeli olarak da kuvvet yasası dağılımı kullanılacaktır. Karışım kuralına ait homojenleştirme formülü, homojenleştirme gerçekleştirilecek FDM yapının kalınlık yönü z eksenini olmak üzere, şu şekildedir (Voigt, 1889):

$$P_e = P_s V(z) + P_m (1 - V(z)) \quad (1)$$

burada P FDM'nin herhangi bir mekanik özelliğini, $V(z)$ ise kirişin kalınlık yönündeki hacim dağılım fonksiyonunu temsil etmektedir. e , s ve m alt indisleri sırasıyla eşdeğer malzeme özelliğini, FDM'nin üst yüzeyinde bulunan seramik ve alt yüzeyinde bulunan metal malzemelerin malzeme özelliklerini temsil etmektedir. Kuvvet yasasına göre de $V(z)$ aşağıdaki gibi hesaplanabilir (Chi ve Chung, 2006):

$$V(z) = \left(\frac{z + \frac{h}{2}}{h} \right)^t \quad (2)$$

burada, z malzemenin kalınlık boyunca koordinatı ve t ise malzemenin karakteristiğini tanımlayan malzeme dağılım indeks parametresidir. h malzemenin kalınlığı olmak üzere $-h/2 \leq z \leq h/2$ 'dir. Kuvvet yasası modeli, t parametresine bağlı olarak malzemenin mekanik özelliklerinin alt ve üst yüzeyden merkeze doğru nasıl değiştiğini gösterir.

3. FONKSİYONEL DERECELENDİRİLMİŞ MALZEMELERDE GÖZENEKLİLİK

FDM'lerde gözeneklilik, malzemenin üretim süreçlerinde karşılaşılan teknik zorluklar ve infiltrasyon problemleri nedeniyle sıkça görülen bir kusur olarak ortaya çıkmaktadır. Örneğin Zhu vd. (2001) basınçsız sinterleme tekniği ile üretimi sırasında, malzeme bileşenlerinin katılma sıcaklıklarındaki büyük farktan dolayı yapının içerisinde çok sayıda gözenek oluşabileceğini ve bu gözeneklerin malzemenin mukavemetini belirgin ölçüde zayıflattığını göstermişlerdir. Öte yandan, çok adımlı ardışık infiltrasyon tekniği ile hazırlanan fonksiyonel derecelendirilmiş malzemelerin orta bölgelerinde de gözeneklerin oluştuğu ortaya konmuştur (Wattanasakulpong vd, 2012). Gözenekler, malzemenin homojenliğini bozarak, mekanik özelliklerde istenmeyen sapmalara ve performans kayıplarına neden olabilir. FDM'lerdeki gözeneklilik düzenlerinin etkilerini anlamak, bu malzemelerin mühendislik uygulamalarında optimize edilmesi için büyük önem taşımaktadır. Örneğin, gözenekliliğin dağılımı ve hacimsel dağılımına bağlı olarak FDM'lerin mekanik özellikleri önemli ölçüde değişebilir ve bu durum, bu malzemelerden yapılan yapıların dinamik tepkilerini etkileyebilir (Nikrad vd, 2021).

Yapılan çalışmalar, gözeneklerin gerilme yoğunlaşma noktaları olarak hareket edebileceğini ve bu nedenle malzemenin genel mukavemet ve rijitliğinde azalmaya yol açabileceğini göstermektedir; bu da özellikle yüksek yapısal bütünlük gerektiren uygulamalar için olumsuz bir durum yaratır (Matula vd, 2020). Öte yandan, bazı durumlarda, gözeneklilik artışı, termal yalıtkanlarda ısı iletkenliğini azaltmak gibi istenen özellikleri artırabilir. Bununla birlikte, gözenekli FDM yapıların biyomedikal mühendislik, enerji iletimi, yapı mühendisliği, havacılık teknolojisi ve araç mühendisliği gibi çeşitli alanlarda geniş uygulama alanları bulunmaktadır (Chen vd, 2023). Bu

nedenle, gözeneklilik modellerinin optimize edilmesi, malzemelerin belirli uygulama koşullarına ve performans gereksinimlerine uygun hale getirilmesi için esastır. Örneğin, yapılan çalışmalar, farklı gözeneklilik dağılımlarına sahip FD kirişlerin mekanik tepkisinin, yük altında meydana gelen sapmalar ve gerilmeler üzerinde önemli ölçüde etkili olabileceğini ortaya koymuştur (Phuong vd, 2019).

3.1. Gözeneklilik Modelleri

Gözeneklilik, malzemelerin mekanik özelliklerini önemli ölçüde etkileyebilen kritik bir parametredir. Yapısal bileşenlerin tasarımında ve analizinde, gözenekliliğin dağılımı ve yoğunluğunun doğru bir şekilde dikkate alınması gerekmektedir. FDM'lerde gözeneklilik, üretim sürecindeki teknik zorluklar nedeniyle sıklıkla karşılaşılan bir durumdur ve bu gözenekler malzemenin homojenliğini bozarak, mekanik performans kayıplarına yol açabilir.

Gözeneklilik, genellikle makro, mikro ve nano ölçeklerde farklı yapısal özellikler sergiler ve bu özelliklerin mekanik davranışlar üzerindeki etkisi, malzeme modelleri kullanılarak incelenir. Farklı gözeneklilik modelleri, gözeneklerin boyutu, şekli, dağılımı ve yönelimine bağlı olarak malzemenin davranışını etkileyebilir. Örneğin, eşit boyut ve şekle sahip homojen olarak dağıtılmış gözeneklerin oluşturduğu model, bir malzemenin izotropik özelliklerini simüle ederken; düzensiz şekilli ve yönlendirilmiş gözeneklerin bulunduğu bir model, anizotropik özellikler sergileyebilir (Higaeg vd, 2019).

Bu çalışma kapsamında altı farklı tip gözeneklilik dağılımı kullanılmıştır (Ghazwani vd, 2024; Kim vd, 2019; Uzun ve Yayli, 2024):

$$\begin{aligned} \text{Tip 1: } P(z) &= (P_s - P_m) \left(\frac{z + \frac{h}{2}}{h} \right)^t + P_m \\ &\quad - \left[\frac{\phi}{2} (P_s + P_m) \left(1 - \frac{2|z|}{h} \right) \right] \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \text{Tip 2: } P(z) &= (P_s - P_m) \left(\frac{z + \frac{h}{2}}{h} \right)^t + P_m \\ &\quad - \left[\frac{\phi}{2} (P_s + P_m) \left(\frac{1}{2} + \frac{z}{h} \right) \right] \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \text{Tip 3: } P(z) &= \left[(P_s - P_m) \left(\frac{z + \frac{h}{2}}{h} \right)^t + P_m \right] \left[1 \right. \\ &\quad \left. - \phi \cos \left(\frac{\pi}{2} \left[\frac{z}{h} - \frac{1}{2} \right] \right) \right] \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \text{Tip 4: } P(z) &= \left[(P_s - P_m) \left(\frac{z + \frac{h}{2}}{h} \right)^t + P_m \right] \left[1 \right. \\ &\quad \left. - \phi \cos \left(\frac{\pi}{2} \left[\frac{z}{h} + \frac{1}{2} \right] \right) \right] \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \text{Tip 5: } P(z) &= \left[(P_s - P_m) \left(\frac{z + \frac{h}{2}}{h} \right)^t + P_m \right] \left[1 \right. \\ &\quad \left. - \phi \cos \left(\pi \left[\frac{z}{h} \right] \right) \right] \end{aligned} \quad (7)$$

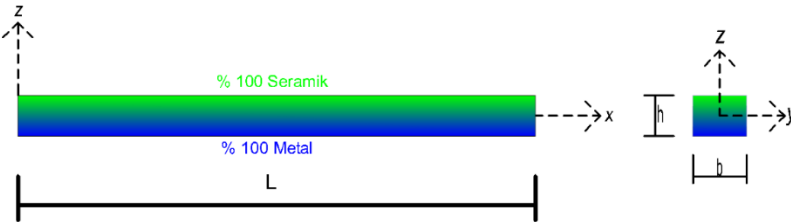
$$\text{Tip 6: } P(z) = \left[(P_s - P_m) \left(\frac{z + \frac{h}{2}}{h} \right)^t + P_m \right] \left[1 - \left\{ \phi - \phi \cos \left(\pi \left[\frac{z}{h} \right] \right) \right\} \right] \quad (8)$$

burada ϕ gözeneklilik parametresini temsil etmektedir ve $0 < \phi < 1$ 'dir. Bu altı farklı gözeneklilik modeli, malzemenin farklı mekanik özellikleri üzerinde çeşitli dağılımları temsil ederek, FDM'lerin mekanik performansını analiz etmek için kritik veriler sağlar. Bu modellerin seçimi, literatürdeki yaygın kullanım alanları ve yaklaşımlar göz önüne alınarak yapılmıştır. Her model, farklı bir gözeneklilik dağılımını ifade ederek, malzemenin rijitlik ve dayanıklılık özelliklerini optimize etmek için son derece önemlidir.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu bölümde, Şekil 1'de gösterildiği gibi bir G-FDMK'in mekanik performanslarını değerlendirmek amacıyla eğilme problemi üzerinde son derece önemli bir etkisi olduğu bilinen eğilme rijitliğinin gözeneklilik durumlarına göre nasıl değiştiği üzerine durulacaktır.

Şekil 1. FDM kiriş modeli



FDM'ler, mühendislik uygulamalarında yüksek performans sergileyen malzemeler olarak dikkat çekmektedir ve

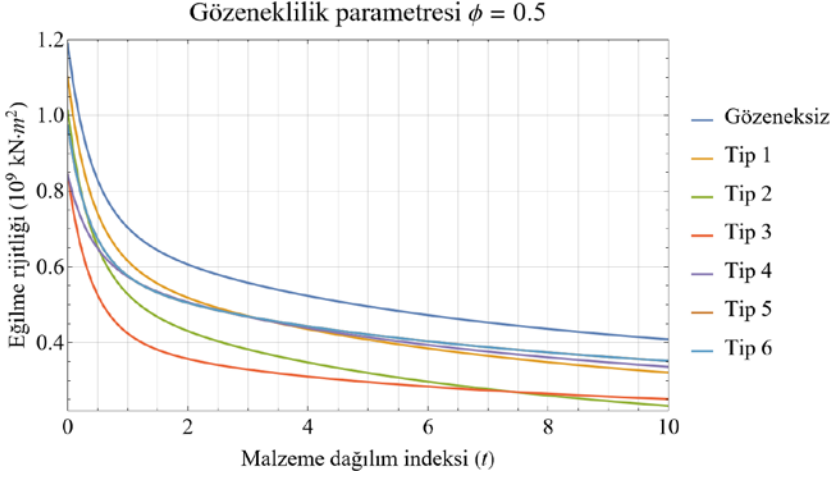
farklı gözeneklilik modellerinin bu malzemeler üzerindeki etkileri, malzemenin mekanik davranışını anlamak açısından son derece önemlidir. Bu çalışmada, farklı gözeneklilik modelleri (Tip 1-6) kullanılarak FDM'lerin eğilme rijitlikleri hesaplanıp, karşılaştırılacaktır. Bu analizler, FDM'lerin mekanik özelliklerinin değişiminin, yapının genel performansını nasıl etkilediğini göstermek amacıyla gerçekleştirilmiştir. Şekil 1'de gösterilen, G-FDMK'in uzunluğu $L = 3$ m, genişliği $b = 0.3$ m ve yüksekliği $h = 0.5$ m olarak alınmıştır. Malzeme özellikleri olarak da seramik için Alümina (Al_2O_3) ve metal için de Alüminyum (Al) seçilmiş, böylece $E_s = 380$ GPa ve $E_m = 70$ GPa (Baferani vd, 2011) olarak alınmıştır. G-FDMK'in eğilme rijitliği, aşağıdaki denklem yardımıyla hesaplanmıştır:

$$(EI)_{eş} = \int_A E(z)z^2 dA = E(z)I \quad (9)$$

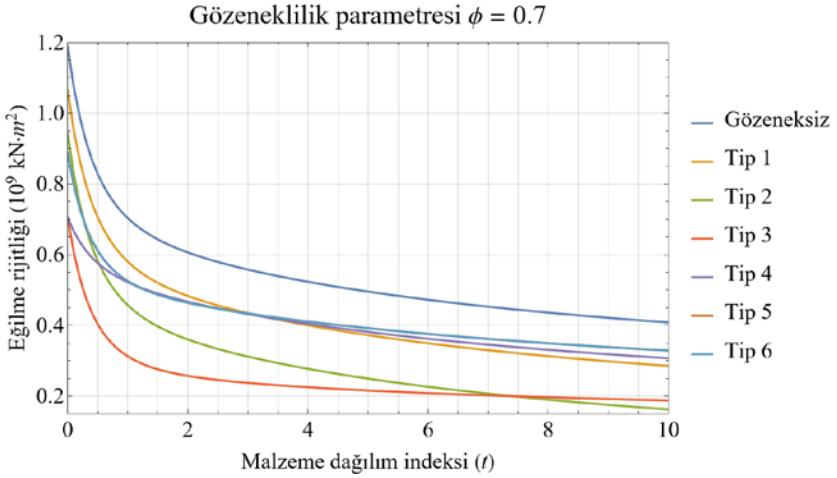
burada $(EI)_{eş}$ kirişin eşdeğer eğilme rijitliğini ve I atalet momentini temsil etmektedir. Farklı gözeneklilik parametreleri ve gözeneklilik dağılım modellerinin fonksiyonel derecelendirilmiş kirişlerin eğilme rijitliği üzerindeki etkileri grafiksel olarak sunulacak olan bu bölümde sunulan grafikler, gözeneklilik parametresi ve malzeme dağılım indeksi değişimlerine bağlı olarak, kirişlerin eğilme rijitliğinin nasıl etkilendiğini göstermektedir.

Şekil 2-4, gözeneklilik parametresinin artmasıyla birlikte kirişlerin eğilme rijitliğindeki değişimleri sunmaktadır.

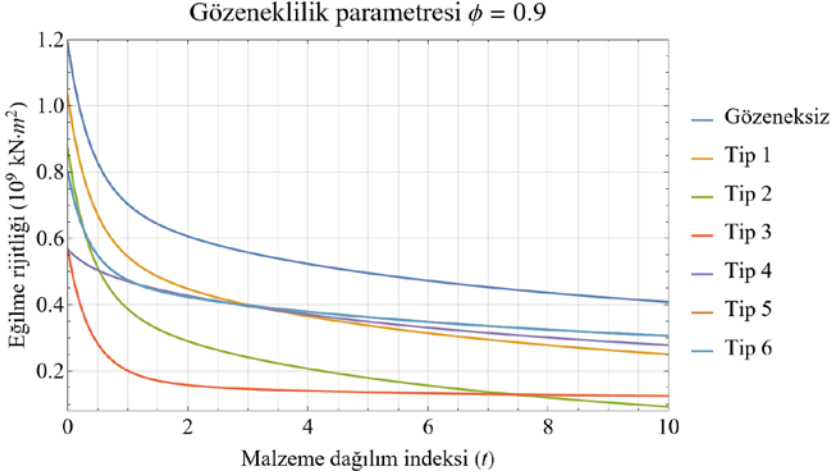
Şekil 2. G-FDMK için farklı gözeneklilik tipleri ve t değerlerine göre $(EI)_{e\phi}$ değerleri ($\phi = 0.5$)



Şekil 3. G-FDMK için farklı gözeneklilik tipleri ve t değerlerine göre $(EI)_{e\phi}$ değerleri ($\phi = 0.7$)



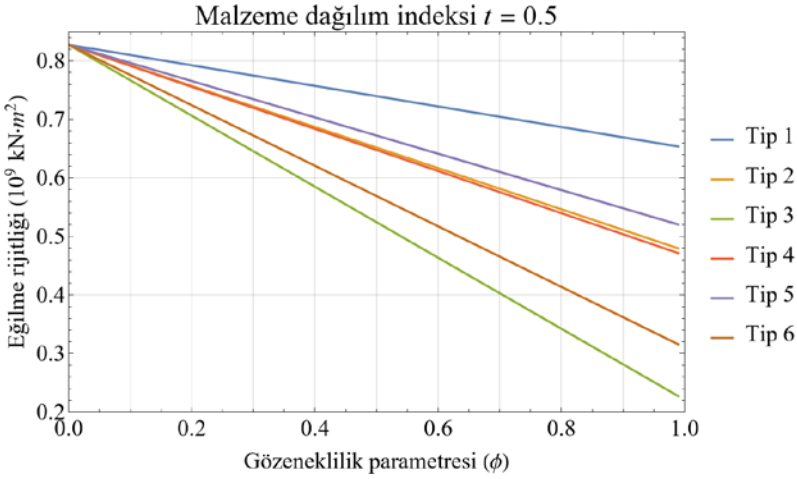
Şekil 4. G-FDMK için farklı gözeneklilik tipleri ve t değerlerine göre $(EI)_{e\phi}$ değerleri ($\phi = 0.9$)



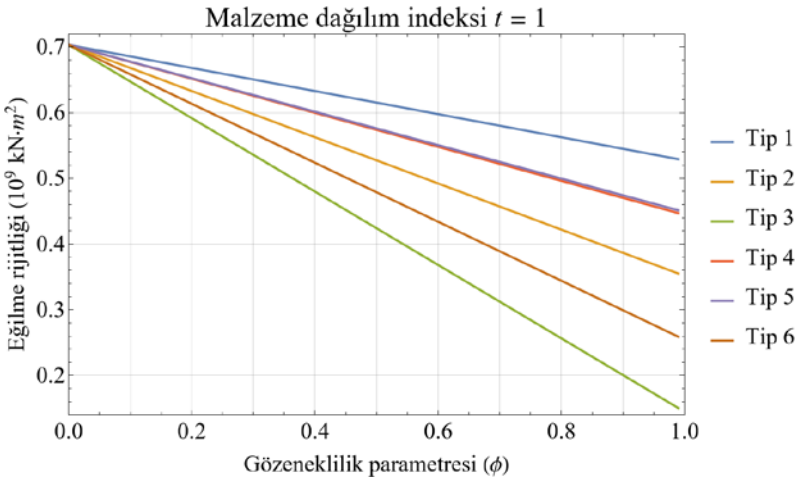
Gözeneklilik parametresinin artışı ($\phi = 0.5, 0.7, 0.9$), tüm gözeneklilik tipleri için eğilme rijitliğinde belirgin bir azalmaya neden olmaktadır. Bu, gözeneklilik oranının artmasıyla malzemenin rijitliğinin kaybolduğunu ve eğilme davranışının zayıfladığını göstermektedir. t arttıkça, eğilme rijitliği genel olarak düşme eğilimi göstermektedir. Gözeneksiz model en yüksek eğilme rijitliğine sahipken, artan t değeri ile rijitlik kaybı daha belirgin hale gelmektedir. Bu durum, malzeme yapısındaki dağılımın değişimi ile rijitliğin olumsuz etkilendiğini işaret etmektedir. Tip 2 ve Tip 3 modellerinin t arttıkça eğilme rijitliğinde belirgin bir azalma gösterdiği görülmektedir. Özellikle, t değeri yükseldikçe bu modeller en düşük rijitlik değerlerini sergilemektedir. Buna karşın, Tip 4 ve Tip 6, diğer tiplere kıyasla daha yüksek eğilme rijitliği değerlerini koruyarak yapısal performans açısından avantaj sağlamaktadır.

Şekil 5-7 ise malzeme dağılım indeksi t değerlerinin farklı gözeneklilik tipleri üzerindeki etkilerini incelemektedir.

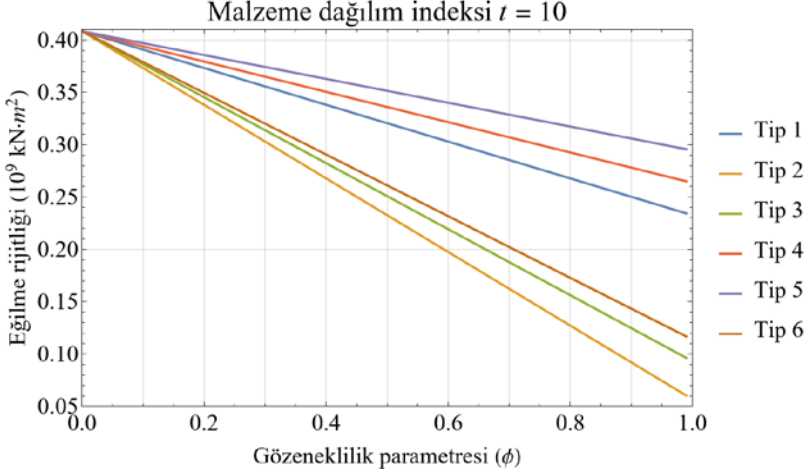
Şekil 5. G-FDMK için farklı gözeneklilik tipleri ve ϕ değerlerine göre $(EI)_{e\phi}$ değerleri ($t = 0.5$)



Şekil 6. G-FDMK için farklı gözeneklilik tipleri ve ϕ değerlerine göre $(EI)_{e\phi}$ değerleri ($t = 1$)



Şekil 7. G-FDMK için farklı gözeneklilik tipleri ve ϕ değerlerine göre $(EI)_{eş}$ değerleri ($t = 10$)



Şekil 5-7’de görüldüğü üzere, t değeri arttıkça, gözeneklilik tiplerinin eğilme rijitliği üzerindeki etkileri belirgin bir şekilde değişmektedir. Özellikle, t değerleri yükseldikçe Tip 4 ve Tip 5 modellerinin eğilme rijitliğinde bir artış gözlemlenmekte olup, bu modellerin yüksek t değerlerinde mekanik performansını koruma ve rijitliği artırma potansiyeline sahip olduğu görülmektedir. Bu durum, Tip 4 ve 5’in yapısal dayanıklılık açısından en avantajlı modeller olduğunu ortaya koymaktadır. Bunun aksine, t ’nin daha düşük olduğu durumlarda Tip 1 modeli yüksek eğilme rijitliği sergilemektedir, bu da düşük dağılım indeksinde bu tipin performansını artırdığı anlamına gelmektedir. Dikkat çekici bir diğer nokta, t değerinin artmasıyla birlikte Tip 2 modelinde eğilme rijitliğinde çok keskin bir düşüş yaşanmasıdır. Bu, Tip 2’nin özellikle yüksek t değerlerinde rijitlik kaybı yaşayarak yapısal bütünlüğünü korumakta zorlandığını göstermektedir. Tip 2’nin rijitliğinin t ile birlikte bu denli azalması, bu modelin artan dağılım indekslerine duyarlılığını ortaya koymaktadır ve yapısal performans açısından en olumsuz sonuçları vermektedir.

5. SONUÇ

Bu çalışmada, FDM'lerden üretilmiş kirişlerin eğilme rijitliği üzerindeki farklı gözeneklilik dağılım modellerinin etkilerini incelemiştir. Farklı gözeneklilik tipleri ve malzeme dağılım indeksleri kullanılarak yapılan analizler, gözeneklilik oranı ve dağılımının malzemenin yapısal performansı üzerinde kritik bir rol oynadığını ortaya koymuştur. Genel olarak, gözeneklilik parametresinin artışı, tüm gözeneklilik tiplerinde eğilme rijitliğinde belirgin bir azalmaya neden olurken, malzeme dağılım indeksinin artışı ise bu etkileri daha da güçlendirmiştir.

Sonuçlar, özellikle Tip 2 ve Tip 3 modellerinin, artan t değerleri ile birlikte eğilme rijitliğinde en belirgin düşüşleri sergilediğini göstermektedir. Bu durum, bu modellerin yüksek dağılım indeksine karşı en duyarlı ve yapısal dayanıklılık açısından en dezavantajlı modeller olduğunu ortaya koymaktadır. Buna karşılık, Tip 4 ve Tip 5 modellerinin, t değeri arttıkça eğilme rijitliğinde diğer tiplere göre daha rijit davrandıkları gözlemlenmiştir. Bu modeller, özellikle yüksek t değerlerinde rijitliği koruyarak yapısal performans açısından en avantajlı sonuçları vermiştir. Ayrıca, t 'nin düşük olduğu durumlarda, Tip 1'in yüksek eğilme rijitliği göstermesi, bu modelin belirli koşullar altında etkili bir performans sergileyebileceğini göstermektedir. Ancak, artan t ile birlikte Tip 2'nin rijitliğinin önemli ölçüde azalması, bu modelin tasarımda dikkatlice değerlendirilmesi gerektiğini işaret etmektedir.

KAYNAKÇA

- Abdalla, H. M. A., Novak Srnc, J., ve Casagrande, D. (2020). Lower bound estimate for buckling in axially graded cantilever rods. *Engineering Research Express*, 2(3), 035033. <https://doi.org/10.1088/2631-8695/abb4f1>
- Akgöz, B., ve Civalek, Ö. (2015). Bending analysis of FG microbeams resting on Winkler elastic foundation via strain gradient elasticity. *Composite Structures*, 134, 294-301. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2015.08.095>
- Baferani, A. H., Saidi, A. R., ve Jomehzadeh, E. (2011). An exact solution for free vibration of thin functionally graded rectangular plates. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 225(3), 526-536. <https://doi.org/10.1243/09544062JMES2171>
- Chen, D., Gao, K., Yang, J., ve Zhang, L. (2023). Functionally graded porous structures: Analyses, performances, and applications – A Review. *Thin-Walled Structures*, 191, 111046. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2023.111046>
- Chi, S. H., ve Chung, Y. L. (2002). Cracking in sigmoid functionally graded coating. *J Mech*, 18(2002), 41–53p.
- Chi, S.-H., ve Chung, Y.-L. (2006). Mechanical behavior of functionally graded material plates under transverse load—Part I: Analysis. *International Journal of Solids and Structures*, 43(13), 3657-3674. <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2005.04.011>
- Delale, F., ve Erdogan, F. (1983). The Crack Problem for a Nonhomogeneous Plane. *Journal of Applied Mechanics*, 50(3), 609-614. <https://doi.org/10.1115/1.3167098>
- Farsadi, T. (2021). Comparative Study of Functionally Graded Material Models For Structural Design of Thin-Walled

- Blades. Eskişehir Technical University Journal of Science and Technology A - Applied Sciences and Engineering, 22(3), 260-273. <https://doi.org/10.18038/estubtda.867690>
- Ghazwani, M. H., Alnujaie, A., Avcar, M., ve Van Vinh, P. (2024). Examination of the high-frequency behavior of functionally graded porous nanobeams using nonlocal simple higher-order shear deformation theory. *Acta Mechanica*, 235(5), 2695-2714. <https://doi.org/10.1007/s00707-024-03858-6>
- Hashin, Z., ve Shtrikman, S. (1962). A variational approach to the theory of the elastic behaviour of polycrystals. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 10(4), 343-352.
- Higaeg, M., Balac, I., Grbovic, A., Milovancevic, M., ve Jelic, M. (2019). Numerical modeling of the porosity influence on strength of structural materials. *Science of Sintering*, 51(4), 459-467. <https://doi.org/10.2298/SOS1904459H>
- Jha, D. K., Kant, T., ve Singh, R. K. (2013). A critical review of recent research on functionally graded plates. *Composite Structures*, 96, 833-849. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2012.09.001>
- Kafkas, U. (2024). Değiştirilmiş Gerilme Çifti Teorisi ile Gözenekli Fonksiyonel Derecelendirilmiş Konsol Nanokirişlerin Statik Analizi. *Uludağ University Journal of The Faculty of Engineering*, 29(2), 393-412. <https://doi.org/10.17482/uumfd.1459934>
- Khouja, F. A. (2024). Minimizing the Formation of Thermal Residual Stresses of the Elasto-Plastic Zone in Functionally Graded Materials. *International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology*, 12(2), 1347-1355. <https://doi.org/10.22214/ijraset.2024.58597>

- Kim, J., Žur, K. K., ve Reddy, J. N. (2019). Bending, free vibration, and buckling of modified couples stress-based functionally graded porous micro-plates. *Composite Structures*, 209, 879-888. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.11.023>
- Matuła, I., Dercz, G., ve Barczyk, J. (2020). Titanium/Zirconium functionally graded materials with porosity gradients for potential biomedical applications. *Materials Science and Technology*, 36(9), 972-977. <https://doi.org/10.1080/02670836.2019.1593603>
- Mori, T., ve Tanaka, K. (1973). Average stress in matrix and average elastic energy of materials with misfitting inclusions. *Acta Metallurgica*, 21(5), 571-574. [https://doi.org/10.1016/0001-6160\(73\)90064-3](https://doi.org/10.1016/0001-6160(73)90064-3)
- Nikrad, S. F., Kanellopoulos, A., Bodaghi, M., Chen, Z. T., ve Pourasghar, A. (2021). Large deformation behavior of functionally graded porous curved beams in thermal environment. *Archive of Applied Mechanics*, 91(5), 2255-2278. <https://doi.org/10.1007/s00419-021-01882-9>
- Phuong, N. T. B., Tu, T. M., Phuong, H. T., ve Long, N. Van. (2019). Bending analysis of functionally graded beam with porosities resting on elastic foundation based on neutral surface position. *Journal of Science and Technology in Civil Engineering (STCE) - NUCE*, 13(1), 33-45. [https://doi.org/10.31814/stce.nuce2019-13\(1\)-04](https://doi.org/10.31814/stce.nuce2019-13(1)-04)
- Reuss, A. (1929). Berechnung der Fließgrenze von Mischkristallen auf Grund der Plastizitätsbedingung für Einkristalle. *ZAMM - Journal of Applied Mathematics and Mechanics / Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Mechanik*, 9(1), 49-58. <https://doi.org/10.1002/zamm.19290090104>

- Saad, A. (2022). A Review on Functionally Graded Materials and Their Applications in the Field of Prosthetics. ERJ. Engineering Research Journal, 45(4), 553-560. <https://doi.org/10.21608/erjm.2022.144631.1186>
- Tamura, I., Tomota, Y., ve Ozawa, M. (1973). Strength and Ductility of Fe-Ni-C Alloys Composed of Austenite and Martensite With Various Strength. Inst Met (London) Monogr Rep Ser, 1(3), 611-615.
- Turan, M., ve Kahya, V. (2021). Fonksiyonel derecelendirilmiş sandviç kirişlerin Navier yöntemiyle serbest titreşim ve burkulma analizi. Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 36(2), 743-758. <https://doi.org/10.17341/gazimmfd.599928>
- Uzun, B. ve Yaylı, M. Ö. (2022). Porosity dependent torsional vibrations of restrained FG nanotubes using modified couple stress theory. Materials Today Communications, 32, 103969. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2022.103969>
- Uzun, B. ve Yayli, M. Ö. (2024). Rotary inertia effect on dynamic analysis of embedded FG porous nanobeams under deformable boundary conditions with the effect of neutral axis. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 46(2), 111. <https://doi.org/10.1007/s40430-023-04605-z>
- Voigt, W. (1889). Ueber die Beziehung zwischen den beiden Elasticitätsconstanten isotroper Körper. Annalen der Physik, 274(12), 573-587. <https://doi.org/10.1002/andp.18892741206>
- Wang, Y. Q., ve Zu, J. W. (2017). Vibration behaviors of functionally graded rectangular plates with porosities and moving in thermal environment. Aerospace Science and

Technology, 69, 550-562.
<https://doi.org/10.1016/j.ast.2017.07.023>

Wattanasakulpong, N., Gangadhara Prusty, B., Kelly, D. W., ve Hoffman, M. (2012). Free vibration analysis of layered functionally graded beams with experimental validation. *Materials & Design* (1980-2015), 36, 182-190.
<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2011.10.049>

Yang, Y. Y., ve Munz, D. (1997). Stress analysis in a two materials joint with a functionally graded material. *İçinde Functionally Graded Materials 1996* (ss. 41-46). Elsevier.

Zhao, F., Wang, Z., ve Liu, H. (2007). Thermal post-buckling analyses of functionally graded material rod. *Applied Mathematics and Mechanics*, 28(1), 59-67.
<https://doi.org/10.1007/s10483-007-0107-z>

Zhu, J., Lai, Z., Yin, Z., Jeon, J., ve Lee, S. (2001). Fabrication of ZrO₂-NiCr functionally graded material by powder metallurgy. *Materials Chemistry and Physics*, 68(1-3), 130-135. [https://doi.org/10.1016/S0254-0584\(00\)00355-2](https://doi.org/10.1016/S0254-0584(00)00355-2)

MEKANİKTE VARYASYONEL YAKLAŞIM YÖNTEMLERİ¹

Şule TAŞ²

Gökhan GÜÇLÜ³

1. GİRİŞ

Mekanikte bir problemin çözümü için iki temel yaklaşım bulunmaktadır: vektör mekaniği prensipleri ve Lagrange mekaniği prensipleri. İki prensipte de amaç problemin yönetici denklemlerini elde etmektir. Sonrasında analitik ya da sayısal yöntemler kullanılarak yönetici denklemler çözülmektedir. Vektör mekaniğinde (örnek, Newton'un hareket yasası) problemin yönetici denklemleri, kuvvetlerin ve momentlerin dengesinden elde edilmektedir. Ancak problem karmaşıklaştıkça bu yaklaşım pratikliğini yitirmekte, içinden çıkılmaz bir hal almaktadır.

Lagrange mekaniği (örnek, Hamilton prensibi), enerji ilkeleri temeline oturmaktadır. Ana fikri, enerjideki değişimin harekete neden olduğudur. Lagrange mekaniği, tüm modern fiziğin tanımlandığı dildir. Sistemin kinetik ve potansiyel enerjileri bilindiğinde hareket denklemleri Euler-Lagrange denklemleri olarak elde edilebilmektedir. Lagrange mekaniğinde, yönetici denklemler sistematik bir biçimde türetilmektedir. Önce, ilgili problemle ilgili genelleştirilmiş koordinatlar belirlenmektedir. Sonrasında problemin Lagrangian'ı (kinetik ve potansiyel enerji ifadelerini içerisinde barındıran bir fonksiyon) genelleştirilmiş

¹ Bu kitap bölümü, Taş (2024)'ün yüksek lisans tezinden hazırlanmıştır.

² Yüksek İnşaat Mühendisi, suletas95@gmail.com, ORCID: 0009-0006-4741-2688.

³ Dr., Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, gokhan.guclu@dpu.edu.tr, ORCID: 0000-0003-2931-9501.

koordinatlar cinsinden ifade edilir ve sistem için seçilen her bir koordinat bileşeni için bir tane olacak biçimde Euler-Lagrange denklemlerine ulaşılır. Elde edilen bu hareket denklemlerinin çözümü, çeşitli metodlarla gerçekleştirilir. Temel değişken enerji olduğundan ve enerji bir skaler olduğundan Lagrange mekaniğindeki hesaplamalar, vektör mekaniğine göre daha sade ve basit olmaktadır. Özellikle karmaşık problemlerin incelemesinde Lagrange mekaniği, tek pratik yaklaşımdır (Hirvonen, 2023). Lagrange mekaniği, enerji ve varyasyonel prensiplerden faydalanarak yönetici denklemleri elde eder.

Enerji prensipleri veya enerji yöntemleri katı cisim mekaniğinde, sistemin belirli bir noktasında bilinmeyen bir yer değiştirme veya kuvvet değerlerini elde etmek için sistemin toplam potansiyel enerjisini (yani, şekil değiştirme enerjisi ve uygulanan yüklerden kaynaklanan potansiyel enerji) kullanan yöntemleri ifade etmektedir. Bunlar arasında Castigliano'nun teoremleri, birim gölge yük ve birim gölge yer değiştirme yöntemleri ile Betti ve Maxwell'in teoremleri sayılabilir. Bu yöntemler genellikle incelenen problemin tanım bölgesindeki sabit noktalarda genelleştirilmiş yer değiştirmelerin veya kuvvetlerin kesin değerlerinin elde edilmesi ile sınırlıdır. Çoğu durumda, sistemdeki konumun bir fonksiyonu olarak kesin (analitik) çözümü (yer değiştirmeler ve/veya kuvvetler) belirlemek için kullanılamazlar. Öte yandan, varyasyonel yöntemler ifadesi, bir cisimdeki konumun sürekli fonksiyonları olarak yaklaşık çözümleri belirlemek için virtüel iş ilkeleri (virtüel yer değiştirme, virtüel kuvvet) ve minimum toplam potansiyel enerji ilkesi gibi varyasyonel ilkeleri kullanan yöntemleri ifade eder (Reddy, 2017).

Klasik anlamda, varyasyonel bir prensip, varsayılan çözümde yer alan bir dizi değeri belirlenmemiş parametreye göre bir fonksiyonelin minimizasyonu veya durağan değerlerinin bulunması ile ilgilidir. Fonksiyonel, katı cisim mekaniği problem-

lerinde sistemin toplam enerjisini temsil eder ve diğer problemlerde yönetici denklemlerinin bir integral gösterimidir. Her durumda bahsedilen fonksiyonel, yönetici denklemler, sınır ve/veya başlangıç koşulları ve kısıtlama koşulları gibi problemin tüm içsel özelliklerini içerir. Varyasyonel ilkeler mekanikte her zaman önemli bir rol oynamıştır.

Varyasyonel formülasyonlar birbiriyle ilişkili üç şekilde faydalı olabilir. İlk olarak, mekaniğin birçok problemi ekstremum (yani minimum veya maksimum) bulma açısından ortaya konur ve bu nedenle doğaları gereği varyasyonel ifadeler açısından formüle edilebilir. İkinci olarak, vektör mekaniği gibi başka yollarla formüle edilebilen problemler vardır, ancak bunlar da varyasyonel ilkeler aracılığıyla formüle edilebilir. Üçüncüsü ise, varyasyonel formülasyonlar, birçoğu başka türlü çözülemeyecek olan pratik problemlere yaklaşık çözümler elde etmek için güçlü bir temel oluşturur. Örneğin, minimum toplam potansiyel enerji ilkesi, elastik bir cismin denge denklemlerinin yerine geçebileceği gibi, cisimdeki yaklaşık yer değiştirme ve gerilme alanlarını belirlemek için kullanılacak yer değiştirme sonlu eleman modellerinin geliştirilmesi için de bir temel olarak görülebilir. Varyasyonel formülasyonlar ayrıca farklı alanları birleştirmeye, yeni teoriler önermeye ve problemlerin çözümlerinin varlığını ve tekliğini incelemek için kullanılabilirler. Birçok durumda, yaklaşık çözümlerin üst ve alt sınırlarının belirlenmesini sağlarlar.

Bahsedilen bu özelliklerinden dolayı mekanik alanında, varyasyonel yaklaşım yöntemleri büyük ilgi görmüş ve bir çok bilimsel çalışmada kullanılmıştır. Bu makaleler ve kitaplar, varyasyonel prensiplerin mekanikteki çeşitli uygulamalarını, sayısal yöntemleri ve optimizasyon tekniklerini incelemektedir. Bu çalışmalardan bazılarına aşağıda değinilmektedir.

Glowinski (1985), yazmış olduğu kitapta akışkanlar dinamiği, elastisite ve uygulamalı mekaniğin diğer alanlarındaki

karmaşık varyasyonel problemleri çözmek için sonlu elemanlar yöntemleri ve doğrusal olmayan gevşeme gibi sayısal tekniklerin sistematik bir incelemesini sunmaktadır. Wunderlich ve Pilkey (2002); elastisite, varyasyonel prensipler, yapısal matris analizi ve sonlu elemanlar gibi hesaplamalı yöntemlerin temel konuları kapsayan, çubuklar, plakalar ve kabuklara uygulamalarla yapı mekaniğine birleşik bir yaklaşım sunmaktadır. Cassel (2013), temel teorinin açık bir sunumu ve öğrenciler ve araştırmacılar için çok sayıda pratik örnek ile mühendislik ve fiziksel bilimlerdeki uygulamalarına odaklanarak varyasyonel yöntemlere kapsamlı bir giriş sağlamaktadır.

Reddy (2007), Euler-Bernoulli, Timoshenko ve Reddy gibi giriş teorilerini Eringen'in yerel olmayan diferansiyel bünye bağıntılarını kullanarak yeniden formüle etmiş; eğilme, burkulma ve titreşim için analitik çözümler elde etmiş ve yerel olmayan etkilerin yer değiştirmeler, burkulma yükleri ve doğal frekanslar üzerindeki etkisini incelemiştir. He (1999), doğrusal olmayan analitik bir teknik olan Varyasyonel Yineleme Yöntemini sunmuş ve karmaşık doğrusal olmayan problemleri çözmek için çeşitli örneklerdeki uygulamasını göstermiştir. Wang ve Qian (2020), hesaplama verimliliğini korurken gelişmiş doğruluk ve kararlılık için yeniden üreten çekirdek işlevini tanıtan yeni bir ağırsız stabilize kollokasyon yöntemi önermişlerdir. Jiang ve Xiaowei (2024), kollokasyon yöntemlerinin kapsamlı bir incelemesini sunmuşlar ve çeşitli bilim ve mühendislik problemlerinin çözümündeki etkinlikleri ile uygulamalarını vurgulamışlardır. Toprakseven (2021), tekil olarak pertürbe edilmiş iki noktalı eliptik sınır-değer problemleri için süper yakınsama gösteren ve sayısal çözümlerde gelişmiş doğruluk sağlayan değiştirilmiş bir zayıf Galerkin yöntemini incelemiştir. Ziaee (2017), nano gözenekli grafen tabakaların doğrusal serbest titreşim analizini, Aifantis'in gradyan elastisite teorisini ve nano gözeneklerin

titreşim davranışı üzerindeki etkilerini belirlemek için Ritz yöntemini kullanarak incelemiştir.

2. VARYASYONEL YÖNTEMLER

Varyasyonel formülasyon denildiğinde, problemin yönetici denklemlerine eşdeğer olan bir fonksiyonelin oluşturulması ya da varyasyonel bir prensibin kullanılması anlaşılmaktadır. Sürekli ortam mekaniği ve yapısal mekanikte sıklıkla kullanılan virtüel iş ve minimum toplam potansiyel enerji ilkeleri varyasyonel formülasyona örnek olarak gösterilebilirler. Varyasyonel problem ise yönetici denklemlerin ve bunlarla ilgili bazı sınır koşullarının eşdeğer integral ifadelerle çevrildiği formülasyonu ifade etmektedir.

Yönetici denklemlerin (bu denklemler diferansiyel denklemlerden oluşmakta) çözümünü belirlemek için kullanılan yaklaşık yöntemlerin neredeyse tamamında aşağıdaki formda çözüm aranır.

$$u(x) \approx U_N(x) = \sum_{j=1}^N c_j \phi_j(x) \quad (1)$$

(1)'de u belirli bir diferansiyel denklem ve bu denklemle ilişkili sınır koşullarına ait çözümü, U_N ise bilinen $\phi_j(x)$ fonksiyonlarının ve bilinmeyen c_j parametrelerinin lineer kombinasyonu olarak ifade edilen yaklaşık çözümü göstermektedir. $\phi_j(x)$ fonksiyonlarına yaklaşım fonksiyonları denilmektedir. c_j parametreleri, U_N 'nin belirli bir koşulu sağlayacak biçimde yönetici diferansiyel denklemin çözümü olması ile belirlenir.

Yönetici diferansiyel denklemini sağlamak için seçilebilecek koşullardan biri, diferansiyel denklemin tanım bölgesi üzerindeki ağırlıklı integralinin sıfır olmasının sağlanmasıdır. İncelenen

problemin aşağıdaki formda bir operatör denklemi ile tanımlandığı varsayalım:

$$A(u(x)) = f(x) \quad 0 < x < L \quad (2)$$

Burada A diferansiyel bir operatördür, f ise verilen bir fonksiyondur. (1)'de verilen yaklaşık çözüm, (2)'de yerine konulursa $A(U_N)$ elde edilir ve elde edilen bu değer f 'e eşit değildir. Amaç, kalan olarak adlandırılan $R = A(U_N) - f$ farkını ağırlıklı integral anlamında sıfıra götürmektir:

$$\int_0^L w_i [A(U_N(x)) - f(x)] dx = 0 \quad i = 1, 2, \dots, N \text{ için} \quad (3)$$

w_i ağırlık fonksiyonlarının kullanılmasının nedeni, $c_j, j = 1, 2, \dots, N$ parametreleri arasında yeterli sayıda ilişkinin elde edilmesidir. Bu, lineer bağımsız N adet fonksiyonun seçilmesiyle mümkündür. Yani her w_i seçimi için c_1, c_2, \dots, c_N parametreleri arasında cebirsel bir denklem elde edilmektedir.

2.1. İntegral Formülasyonları ve Yaklaşık Yöntemler

Ritz, Galerkin, en küçük kareler, kollokasyon, alt bölge gibi var-yasyonel yaklaşım yöntemleri ya da genel anlamda ağırlıklı kalan yöntemleri, yönetici denklemlerin ağırlıklı integral biçiminde ifade edilmesine dayanmaktadır. Ağırlıklı integral ifadeleri kullanılarak diferansiyel denklemlerin zayıf formlarına ulaşılabilir. Zayıf form sayesinde problemin değişkenleri birincil tip ve ikincil tip olarak sınıflandırılır ve düalete çiftleri belirlenir. Katı cisim mekaniğinde, zayıf formlar, virtüel yer değiştirme ilkesine veya minimum toplam potansiyel enerji ilkesine eşdeğerdir.

Aşağıda verilen formdaki tipik ikinci dereceden bir adi diferansiyel denklemde

$$-\frac{d}{dx}\left[a(x)\frac{du}{dx}\right]+cu=f(x), \quad 0 < x < L \quad (4)$$

sınır koşulları

$$u(0)=u_0, \quad \left[a\frac{du}{dx}+\beta(u-u_\infty)\right]_{x=L}=Q_L \quad (5)$$

olsun. Burada $a(x)$, $c(x)$ ve $f(x)$ bağımsız değişkeni x olan bilinen fonksiyonları, u_0 , u_∞ , β ve Q_L bilinen değerleri ve L tek boyutlu bölgenin uzunluğunu göstermektedir. (5)'teki sınır koşulları homojen değildir; $u(0)=u_0$ sınır koşulunun homojen

formu $u(0)=0$ ve $\left[a\frac{du}{dx}+\beta(u-u_\infty)\right]_{x=L}=Q_L$ sınır koşulunun

homojen formu $\left[a\frac{du}{dx}+\beta(u-u_\infty)\right]_{x=L}=0$ 'dır.

(4)'teki türden denklemler, yüzey konveksiyonlu bir çubuktaki tek boyutlu ısı akışı probleminde ortaya çıkmaktadır. Diğer bir durum ise bir çubuğun aksenal deformasyonu problemidir. (2)'deki A operatörü bu diferansiyel denklem için

$$A(\cdot)=-\frac{d}{dx}\left[a(x)\frac{d(\cdot)}{dx}\right]+c(\cdot) \quad (6)$$

olmaktadır. (3)'teki ağırlıklı kalan integral ifadesi bu problemde

$$0 \neq -\frac{d}{dx}\left[a(x)\frac{dU_N}{dx}\right]+cU_N-f(x) \equiv R(x,c_1,c_2,\dots,c_N) \quad (7)$$

olmaktadır. (7) ifadesine diferansiyel denklemde yaklaşımın kalanı denilmektedir. Yaklaşımın kalanı x ve c_1, c_2, \dots, c_N 'nin fonksiyonudur. Herhangi bir yaklaşık yöntemin amacı, yaklaşımın kalanının kabul edilebilir bir biçimde sıfır olmasının sağla-

tılmasıdır. Yaklaşık yöntemlerin bazıları aşağıda incelenmektedir.

2.1.1. Kollokasyon Yöntemi

R 'nin sıfır yapılabileceği olası kabul edilebilir biçimlerden bir tanesi, R 'nin tanım bölge-sinde seçilen N noktada sıfır yapılmasıdır (böylece c_i sabitleri için N tane denklem elde edilir):

$$R(x_i, c_1, c_2, \dots, c_N) = 0 \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (8)$$

R 'nin seçilen N noktada sıfıra eşitlendiği bu metoda kollokasyon yöntemi denilmektedir ve seçilen x_i noktaları kollokasyon noktaları olarak isimlendirilir. Yaklaşık çözüm U_N , seçilen N kollokasyon noktasında R kalanını sıfır yaparken, tanım bölgesindeki diğer noktalarda R 'nin değeri sıfır olmamaktadır.

2.1.2. Alt Bölge Yöntemi

R 'yi sıfır yapmanın bir başka yolu; kalan integralinin, tanım bölgesinin N farklı alt aralığında değerinin sıfır olmasıdır. Yani, $(0, L)$ tanım bölgesi N adet kesişmeyen ve birleşimi tanım bölgesini veren (x_a^i, x_b^i) alt aralığı-na bölünür.

$$\int_{x_a^i}^{x_b^i} R(x, c_1, c_2, \dots, c_N) dx = 0 \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (9)$$

Burada x_a^i ve x_b^i sırasıyla i . aralığın sol ve sağ uçlarının x koordinatlarını göstermektedir. Bu yöntemde R kalanı, her aralıkta integral anlamında sıfır yapılmaktadır. Ancak R 'nin değeri tanım bölgesinde noktasal anlamda sıfır olmamaktadır.

2.1.3. En Küçük Kareler Yöntemi

R 'yi sıfır yapmanın bir başka yolu da kalanın karesinin integralinin değerini c_i 'lere göre minimize etmektir.

$$\frac{\partial}{\partial c_i} \int_0^L R^2 dx = 2 \int_0^L \frac{\partial R}{\partial c_i} R dx = 0 \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (10)$$

(10)'da R 'nin karesinin yer almasının nedeni bu değeri pozitif yapmaktır. Aksi durumda pozitif ve negatif kalanların toplamının birbirini iptal etme olasılığı bulunmaktadır. (10)'a dayanan yöntem en küçük kareler yöntemi denilmektedir. A operatörü doğrusal olduğunda $\partial R / \partial c_i = A(\phi_i)$ eşitliği geçerlidir.

2.1.4. Ağırlıklı Kalan Yöntemleri

(10)'daki en küçük kareler yöntemi, kalanı lineer bağımsız fonksiyonlar kümesiyle ağırlıklandırarak integral değerini sıfıra eşitlemek fikrine yol açmaktadır. Yani, R 'nin ağırlıklı kalan biçiminde ifade edilerek değerinin sıfır yapılması ile c_j değerleri hesaplanmaktadır. Bu fikire göre R kalanı, ağırlık fonksiyonları kümesinin elemanları-na ortogonal yapılmaktadır:

$$\int_{x_a}^{x_b} w_i(x) R(x, c_1, c_2, \dots, c_N) dx = 0 \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (11)$$

Burada $\{w_i(x)\}$, ağırlık fonksiyonları olarak adlandırılan ve genel olarak elemanları $\{\phi_i(x)\}$ yaklaşım fonksiyonları kümesi elemanlarından farklı olabilen lineer bağımsız fonksiyonlar kümesidir. Bu yöntem ağırlıklı kalan yöntemi denilir.

(11), özel durumlar olarak (8)'deki kollokasyon yöntemini ve (10)'daki en küçük kareler yöntemini de içerir. $w_i = \delta(x - x_i)$ ($\delta(\cdot)$, Dirac delta fonksiyonunu göstermekte) seçildiğinde (8), $w_i = \partial R / \partial c_i$ seçildiğinde ise (10) elde edilmektedir. (11)'in özel durumları aşağıda listelenmektedir:

$$\begin{aligned} \text{Petrov-Galerkin:} & \quad w_i = \psi_i \neq \phi_i \\ \text{Galerkin:} & \quad w_i = \phi_i \\ \text{En küçük kareler:} & \quad w_i = A(\phi_i), \quad A = -\frac{d}{dx} \left[a(x) \frac{d}{dx} \right] + c \quad (12) \\ \text{Kollokasyon:} & \quad w_i = \delta(x - x_i) \end{aligned}$$

(12) ifadesinde x_i 'ler problemin tanım bölgesinde seçilen kollokasyon noktalarını göstermektedir. Dirac delta fonksiyonu;

$$\begin{aligned} \delta(x - x_0) &= 0 \quad x \neq x_0 \text{ için} \\ \int_{-\infty}^{\infty} f(x) \delta(x - x_0) dx &= f(x_0) \end{aligned} \quad (13)$$

denklemleri kullanılarak tanımlanabilmektedir. Ağırlık fonksiyonu w_i 'lerin farklı biçimlerde seçilebilmesi nedeniyle, cebirsel denklem sistemi farklı yöntemlerde farklı özelliklere sahip olmaktadır. Ağırlıklı kalan yöntemleri arasında sadece en küçük kareler yöntemi, herhangi bir mertebeden doğrusal diferansiyel denklem için simetrik katsayılar matrisine sahip lineer denklem sistemi verir.

2.1.5. Ritz Yöntemi

Ritz yöntemi ilk olarak, yönetici denkleme ve belirli sınır koşullarına eşdeğer olan ikinci dereceden bir fonksiyonelin, yaklaşık çözümün c_1, c_2, \dots, c_N parametrelerine göre minimize edildiği bir yöntem olarak sunulmuştur. Yöntem, yönetici diferansiyel denklemlere ve problemin doğal sınır koşullarına eşdeğer olan herhangi bir integral ifadeye uygulanabilir. Bu türdeki integral ifadeleri, zayıf form olarak isimlendirilir. Sonlu elemanlar yöntemindeki denklemler genellikle Ritz yöntemi kullanılarak türetilmektedir. Çoğu sonlu elemanlar modelinde, Ritz yöntemi fikri kullanılır, ancak bu açık bir biçimde ifade edilmez. Bunun yerine yanlış bir şekilde Galerkin sonlu

elemanlar modelleri ifadesi literatürde yaygın bir biçimde kullanılmaktadır.

2.2.Zayıf İntegral Formu

Zayıf integral formunun türetilmesinin arkasındaki ana fikir, U_N üzerindeki (eşdeğer olarak ϕ_i üzerindeki) türevlenebilirlik gereksiniminin zayıflatıl-masıdır. Herhangi bir differansiyel denklemin zayıf formunun geliştirilmesi üç temel adımdan oluşmaktadır. Bu adımlar, (4)diferansiyel denklemi ve (5) sınır koşulları kullanılarak açıklanacaktır. Zayıf formlar, 2. ve daha yüksek mertebeden herhangi bir diferansiyel denklem için geliştirilebilir.

Birinci adım: *Ağırlıklı integral ifadesi*. Bu adım, bir differansiyel denklemin ağırlıklı kalan ifadesiyle aynıdır. Diferansiyel denklemin tüm terimleri bir tarafa taşınmakta (böylece $\dots = 0$ ifadesi elde edilir), tüm denklem keyfi bir $w_i(x)$ fonksiyonu ile çarpılmakta ve elde edilen ifade problemin tanım bölgesi olan $\Omega = (0, L)$ aralığı üzerinde integre edilmektedir:

$$0 = \int_0^L w_i \left[-\frac{d}{dx} \left(a \frac{dU_N}{dx} \right) + cU_N - f \right] dx \quad (14)$$

Gerçek u çözümü yerine yaklaşık çözüm olan U_N kullanıldığından köşeli parantez içindeki ifade özdeş olarak sıfır değildir. Matematiksel olarak (14), diferansiyel denklemdeki hatanın (yaklaşık çözümün kullanılmasından dolayı) ağırlıklı integral bakımından sıfır olduğunu ifade etmektedir. (14)'teki integral ifadesi, her w_i seçimi için c_1, c_2, \dots, c_N parametrelerini içeren bir cebirsel denklem verir. w_i için lineer bağımsız N tane fonksiyon seçildiğinde c_1, c_2, \dots, c_N parametrelerini içeren N tane lineer bağımsız cebirsel denklem elde edilir.

Herhangi bir birinci dereceden veya daha yüksek dereceden differansiyel denklemin ağırlıklı integral ifadesi kolayca yazılabilir. Ağırlıklı integral ifadesi sadece differansiyel denkleme eşdeğerdir ve herhangi bir sınır koşulu içermemektedir. (14)'teki $\{w_i\}$ ağırlık fonksiyonları kümesi, lineer bağımsız ve integre edilebilir herhangi bir fonksiyon kümesi olabilir. (14) ifadesi, (12)'de listelenen ağırlıklı kalan yöntemlerinin temelini oluşturmaktadır.

İkinci adım: *Kısmi integrasyon kullanılarak türev işlemini bağımlı değişkenler ve ağırlık fonksiyonu arasında eşit olarak dağıtmak ve birincil ve ikincil değişkenleri tanımlamak.* (14)'teki ağırlıklı integral ifadesi, ağırlık fonksiyonunun N farklı seçimi için c_i 'lerin hesaplanması için gereken N sayıda cebirsel ilişkinin elde edilmesini sağlar. Ayrıca, (14), (7)'deki yaklaşık çözümün (4)'teki orijinal diferansiyel denklem ve (5)'te verilen sınır koşullarının gerektirdiği derecede türevlenebilir olması için $\{\phi_i(x)\}$ yaklaşım fonksiyonlarının sağlaması gereken türevlenebilirlik şartlarını belirler.

Eğer Galerkin yönteminde olduğu gibi w_i 'ler için ϕ_i fonksiyonları kullanılacaksa (14)'teki ağırlıklı integral ifadesinde türevlerin yarısını U_N 'den w_i 'ye kaydırmak mantıklı olmaktadır. Böylece w_i ve U_N 'nin eşit mertebede türevi alınmakta (bu durum, çift mertebeden diferansiyel denklemler için geçerli) ayrıca ϕ_i 'ler üzerindeki süreklilik gereksinimi azaltılmakta yani zayıflatılmaktadır. Elde edilen integral form, bu nedenle zayıf form olarak adlandırılır. U_N (dolayısı ile ϕ_i) üzerindeki türevlenebilirlik koşulunun zayıflatılması tamamen matematiksel bir durumdur. Zayıf formülasyonun arzu edilen iki temel özelliği vardır. Birincisi, bağımlı değişkenin sağlaması gereken süreklilik koşulunun zayıflatılması ve çift mertebeden diferansiyel denklemler için bunun her zaman için simetrik katsayılar matrisi

ile sonuçlanmasındır. İkincisi ise, U_N ifadesinin türevi ile ilgili problemin sınır koşullarının zayıf forma dahil edilmesi ve bu nedenle, yaklaşık çözüm U_N 'nin yalnızca u ile ilgili sınır koşullarını sağlamasının yeterli olmasıdır. Zayıf formun bu iki özelliği Ritz yönteminde önemli rol oynar.

(14)'teki integral ifadesinde, ifadenin ilk terimine kısmi integrasyon uygulanırsa

$$\begin{aligned} 0 &= \int_0^L \left\{ w_i \left[-\frac{d}{dx} \left(a \frac{dU_N}{dx} \right) \right] + cw_i U_N - w_i f \right\} dx \\ &= \int_0^L \left(a \frac{dw_i}{dx} \frac{dU_N}{dx} + cw_i U_N - w_i f \right) dx - \left[w_i \cdot a \frac{dU_N}{dx} \right]_0^L \end{aligned} \quad (15)$$

(15)'e göre w_i ağırlık fonksiyonunun en az bir kez türevlenebilir olması gerekmektedir. Galerkin ve Ritz yöntemlerinde bu gereklilik, sorun oluşturmamaktadır çünkü bu yöntemlerde $\{w_i(x)\}$ ağırlık fonksiyonları için $\{\phi_i(x)\}$ yaklaşım fonksiyonları kullanılmaktadır.

İkinci adımda, düalete çiftinin (neden ve sonuç) belirlenmesi önemlidir. Diferansiyel denklemde yer alan değişken, yani u birincil değişken olarak tanımlanmaktadır. Ağırlık fonksiyonu w_i ile denklemin U_N değişkeni arasında türev operatörünün aktarımı kısmi integrasyon ile gerçekleştirildikten sonra, kısmi integrasyon işleminden kaynaklanan sınır ifadesi/ifadeleri incelenir. Sınır ifadesi/ifadeleri hem ağırlık fonksiyonu w_i 'yi hem de bağımlı değişken U_N 'nin türevlerini içerecektir. Ağırlık fonksiyonunun (ve daha yüksek mertebeli denklemler için ağırlık fonksiyonunun türevlerinin) sınır ifadesindeki/ifadelerindeki katsayıları ikincil değişken(ler) olarak tanımlanır.

Türev operatörünün U_N değişkeninden w_i ağırlık fonksiyonuna aktarılmasının nedenlerinden biri ϕ_i ile ilgili süreklilik

gereksinimlerinin zayıflatılmasıdır. Diğer bir nedense fiziksel olarak anlamlı sınır koşullarının zayıf formda yer almasıdır. Bu nedenden ötürü eğer bağımlı değişkenden ağırlık fonksiyonuna türev operatörünün aktarımı sonucunda fiziksel olarak anlamlı olmayan sınır koşulları zayıf formda yer alıyorsa türev aktarma işlemi yapılmamalıdır.

Birincil değişken u 'nun belirtilmesi temel sınır koşulunu, ikincil değişkenin belirtilmesi doğal sınır koşulunu oluşturur. Örneğin (15)'te ağırlık fonksiyonu w_i 'nin sınır koşulundaki katsayısı $a(dU_N / dx)$ 'tir. Dolayısıyla $a(dU_N / dx)$ ikincil değişkendir ve bu ifadenin sınır koşulunda kullanılması verilen sınır koşulunu doğal sınır koşulu yapmaktadır. İkincil değişkenler her zaman fiziksel bir anlama sahiptir ve genellikle ilgilenilen niceliklerdir. Isı transferi problemlerinde sıcaklık birincil değişkendir ve ikincil değişken ısıyı temsil eder. Çubukların eksenel deformasyonu probleminde, u yer değiştirmesi birincil değişkenken iken ikincil değişken, eksenel kuvvettir.

Birincil ve ikincil değişkenlerin sayısı ve biçimi diferansiyel denklemin mertebesine bağlıdır. Birincil ve ikincil değişkenlerin sayısı her zaman aynıdır ve her birincil değişkenle ilişkili bir ikincil değişken vardır; yani her zaman çiftler halinde bulunurlar (yer değiştirme ile kuvvet, sıcaklık ile ısı gibi). Bir noktada çiftin yalnızca bir üyesi, ya birincil değişken ya da ikincil değişken, belirtilebilir. Dolayısıyla, bir problemin sınır koşulları üç kategoriden birinde yer alır: (a) belirtilen tüm sınır koşulları temel tiptedir; (b) belirtilen sınır koşullarından bazıları temel tipte, geri kalanlar ise doğal tiptedir; veya (c) belirtilen tüm sınır koşulları doğal tiptedir. İkinci mertebeden bir diferansiyel denklem mesela (15) için bir tane birincil değişken u ve bir tane ikincil değişken $a(dU_N / dx)$ vardır ve bir noktada $(u; a(dU_N / dx))$ çiftinin yalnızca bir üyesi belirtilebilir. Euler-Bernoulli giriş teorisinde olduğu gibi dördüncü dereceden bir diferansiyel denklem için her

türden iki tane (iki birincil ve iki ikincil) değişken vardır. Genel olarak, $2m$. mertebeden bir diferansiyel denklem, m adet türevi U_N 'den w_i 'ye aktarmak için m adet kısmi integrasyon işlemine ihtiyaç duyar. Bu nedenle zayıf formda, m tane birincil değişken ve m tane ikincil değişken ($m-1$ mertebesine kadar türevleriyle birlikte) içeren m tane sınır terimi bulunur; yani, m adet birincil ve ikincil değişken çifti vardır.

(15) açık biçimde,

$$0 = \int_0^L \left(a \frac{dw_i}{dx} \frac{dU_N}{dx} + cw_i U_N - w_i f \right) dx \quad (16)$$
$$-w_i(L) a \frac{dU_N}{dx} \Big|_L + w_i(0) a \frac{dU_N}{dx} \Big|_0$$

olarak yazılır. (16)'ya, (4)'ün zayıf formu denir. Zayıf kelimesi, (15)'te U_N için gerekli olan indirgenmiş türevlenebilirliğe atıfta bulunmaktadır. (14)'teki ağırlıklı integral ifadesinde U_N 'nin veya (4)'teki diferansiyel denklemde u 'nun iki kez türevlenebilir olması gerekirken (15)'te U_N 'nin yalnızca bir kez türevlenebilir olması yeterli olmaktadır.

Üçüncü adım: *İkincil değişkenlerin ifadelerinin belirtilen değerleriyle değiştirilmesi ve zayıf formun nihai hale getirilmesi.* Zayıf formun elde edilmesinin üçüncü ve son adımı, ele alınan problemin gerçek sınır koşullarının uygulanmasıdır. w_i ağırlık fonksiyonunun temel sınır koşullarının belirtildiği sınır noktalarında sıfır değerini alması gerekir yani, w_i 'nin problemin belirtilen temel sınır koşullarının homojen formunu sağlaması gerekir. Bu matematiksel açıdan ağırlık fonksiyonu w_i 'nin, birincil değişken u 'nun varyasyonu $w_i \square \delta u$ olarak ele alınması anlamına gelmektedir. Birincil değişken bir noktada belirtildiğinde, buradaki varyasyon sıfır olmalıdır. İncelenen örnekte sınır koşulları (5)'te verilmektedir. Sınır koşullarının sınıflandırılması

tanımına göre, $u(0) = u_0$ temel sınır koşulu, $(a du / dx)|_{x=L}$ ise doğal sınır koşuludur. Bu nedenle, $i = 1, 2, \dots, N$ için ağırlık fonksiyonu w_i

$$w_i(0) = 0 \quad (17)$$

koşulunu sağlamalıdır çünkü $u(0) = u_0$ temel sınır koşulu, $x = 0$ noktasında belirtilmiştir. (5)'te verilen ikinci sınır koşulu,

$$Q(L) = \left(a \frac{dU_N}{dx} n_x \right) \Big|_L = \left(a \frac{dU_N}{dx} \right) \Big|_L = Q_L - \beta [U_N(L) - u_\infty] \quad (18)$$

ile gösterilecek olunursa ve (5)'teki sınır koşulları (15)'te kullanılırsa bu durumda (16)

$$0 = \int_0^L \left(a \frac{dw_i}{dx} \frac{dU_N}{dx} + cw_i U_N - w_i f \right) dx + \beta w_i(L) U_N(L) - w_i(L) Q_L - \beta w_i(L) u_\infty \quad (19)$$

olarak yazılabilir. (19), (4)'taki diferansiyel denklem ve (5)'te ikinci ifadede yer alan doğal sınır koşulunun zayıf formdaki eşdeğeridir. Diferansiyel denklemin zayıf formunun geliştirilmesinde yer alan adımlar böylece tamamlanmıştır.

Ağırlıklı integral ifadesi ya da bir diferansiyel denklemin zayıf formunun geliştirilmesindeki temel amacın, denklemin bağımlı değişkeni u 'nun yaklaşık ifadesinde yer alan bilinmeyen c_i katsayıları kadar cebirsel denklemin elde edilmesi olduğu unutulmamalıdır. w_i ağırlık fonksiyonunun farklı seçimleri için farklı cebirsel denklem takımları elde edilir. Bununla birlikte, zayıf formun oluşturulmasındaki üçüncü adımda w ağırlık fonksiyonuna getirilen kısıtlamalar nedeniyle w_i , yaklaşım fonksiyonlarıyla aynı fonksiyon vektör uzayına aittir (yani, $w_i \in \{\phi_i\}$). Elde edilen bu ayrık model, Ritz modeli olarak bilinir.

2.3.Ritz Yöntemi

Sonlu elemanlar modellerinin geliştirilmesi ile yakından bağlantılı olduğu için Ritz yaklaşım yöntemi, bu kısımda diğer ağırlıklı kalan yöntemlerinden ayrı olarak incelenmektedir. Ritz yönteminde, (1)'de verildiği gibi uygun yaklaşım fonksiyonları ϕ_j ve belirlenmemiş c_j parametrelerinin lineer kombinasyonu olarak ifade edilen yaklaşık bir çö-züm aranır. Ritz yönteminde c_j katsayıları, problemin zayıf for-mu kullanılarak belirlenir. Zayıf form, problemin diferansiyel denklemine ve belirtilen doğal sınır koşullarına eşdeğerdir. Ritz yönteminde, ağırlık fonksiyonları, yaklaşım fonksiyonlarına eşit alınmaktadır yani $w_i(x) = \phi_i(x)$ eşitliği geçerlidir. Ağırlık fonksiyonlarının, zayıf formun gerektirdiği biçimde yeterince türevlenebilir olmasının yanı sıra, belirtilen temel sınırın koşullarının homojen formunu sağlaması gerekmektedir. Bu kısım, lineer bir varyasyonel problem (zayıf form ile aynı) üzerinden açıklan-maktadır.

İncelenen varyasyonel problemde amaç

$$B(w, u) = l(w) \quad (20)$$

eşitliğini; u ile ilgili belirtilen temel sınır koşullarının homojen formunu ve yeterince türevlenebilir tüm w_i fonksiyonları için sağlayan u çözümünün elde edilmesidir. Genel olarak, $B(\cdot, \cdot)$ w ve u 'ya göre simetrik olmayabilir. Ayrıca u 'da doğrusal olmayabilir ancak $B(\cdot, \cdot)$ her zaman w 'ya göre doğrusaldır. Ayrık problem, aşağıdaki gibi yaklaşık bir u çözümü bulmaktan oluşur:

$$B(w_i, U_N) = l(w_i), \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (21)$$

(20)'nin yaklaşık çözümünün formu, homojen çözümü özel çözümden ayırmak için (1)'dekine göre az da olsa değiştirilmiştir:

$$U_N(x) = \sum_{j=1}^N c_j \phi_j(x) + \phi_0(x) \quad (22)$$

Burada Ritz katsayıları olarak adlandırılan c_1, c_2, \dots, c_N sabitleri, (21)'in N farklı w_i seçimi için sağlanacağı biçimde belirlenir, böylece c_1, c_2, \dots, c_N 'i içeren N tane bağımsız cebirsel ilişki elde edilir.

A $\{\phi_i\}_{i=0}^N$ ve ϕ_0 fonksiyonları, belirtilen temel sınır koşullarını U_N 'nin sağlayacağı şekilde seçilir. Belirtilen doğal sınır koşulları zaten varyasyon problemine dahil edildiğinden bu sınır koşullarının sağlatılması gerekmemektedir. i 'inci cebirsel denklem (21)'de, $w_i = \phi_i$ ve (22)'den U_N konularak elde edilir.

$$B\left(\phi_i, \sum_{j=1}^N c_j \phi_j + \phi_0\right) = l(\phi_i) \Rightarrow \sum_{j=1}^N B(\phi_i, \phi_j) c_j + B(\phi_i, \phi_0) = l(\phi_i) \quad (23)$$

ya da

$$\sum_{j=1}^N R_{ij} c_j = b_i \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (24)$$

ifadeleri elde edilir. (24)'teki R_{ij} ve b_i ;

$$R_{ij} = B(\phi_i, \phi_j), \quad b_i = l(\phi_i) - B(\phi_i, \phi_0) \quad (25)$$

olarak tanımlanmaktadır. (24), matris formunda

$$\mathbf{Rc} = \mathbf{b} \quad (26)$$

olarak ifade edilir. Ağırlıklı kalan yöntemleri de (1) ifadesini kullanırlar, ancak bu yöntemlerde ϕ_j 'nin özellikleri farklıdır.

Ağırlıklı kalan yöntemlerinde kullanılan ϕ_j 'ler genellikle Ritz yönteminde kullanılan ϕ_j 'lere göre daha yüksek mertebededir çünkü zayıf formu kullanan Ritz yönteminde ϕ_j 'ler, daha düşük türevlenebilirlik gereksinimlerini ve belirtilen temel sınır koşullarının homojen formunu sağlamaktadırlar.

KAYNAKÇA

- Cassel, K. W. (2013). *Variational methods with applications in science and engineering*. Cambridge University Press.
- Glowinski, R. (1985). *Numerical methods for nonlinear variational problems*. Springer-Verlag.
- He, J. H. (1999). Variational iteration method – a kind of non-linear analytical technique: some examples. *International Journal of Non-Linear Mechanics*, 34(4), 699-708. [https://doi.org/10.1016/S0020-7462\(98\)00048-1](https://doi.org/10.1016/S0020-7462(98)00048-1)
- Hirvonen, V. (2023). *Lagrangian mechanics for the non-physicist*. Bağımsız olarak yayınlandı.
- Jiang, W., & Gao, X. (2024). Review of Collocation Methods and Applications in Solving Science and Engineering Problems. *CMES-Computer Modeling in Engineering & Sciences*, 140(1). <https://doi.org/10.32604/cmes.2024.048313>
- Reddy, J. N. (2007). Nonlocal theories for bending, buckling and vibration of beams. *International Journal of Engineering Science*, 45(2-8), 288-307. <https://doi.org/10.1016/j.ijengsci.2007.04.004>
- Reddy, J. N. (2017). *Energy principles and variational methods in applied mechanics* (3. baskı). Wiley.
- Taş, Ş. (2024). *Varyasyonel yaklaşım yöntemleri ile kirişlerin statik analizi* [Yüksek lisans tezi, DPÜ Lisansüstü Eğitim Enstitüsü - Kütahya].
- Toprakseven, S. (2021). Superconvergence of a modified weak Galerkin method for singularly perturbed two-point elliptic boundary-value problems. *Calcolo*, 59(1), <https://doi.org/10.1007/s10092-021-00449-y>

- Wunderlich, W., & Pilkey, W. D. (2002). *Mechanics of structures: Variational and computational methods* (2. baskı). CRC Press.
- Wang, L., & Qian, Z. (2020). A meshfree stabilized collocation method (SCM) based on reproducing kernel approximation. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 371, 113303. <https://doi.org/10.1016/J.CMA.2020.113303>
- Ziaee, S. (2017). Linear free vibration of graphene sheets with nanopore via Aifantis theory and Ritz method. *Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 55(3), 823–838. <https://doi.org/10.15632/jtam-pl.55.3.823>

FERROCEMENT VE FERROCEMENTİN UYGULAMA ALANLARI

Hüseyin Hakan İNCE¹

Gülhan İNCE²

Melda ALKAN ÇAKIROĞLU³

1. GİRİŞ

Ferrocement, geleneksel betonarme veya öngerilmeli betondan donatılarının dağılma ve düzenlenme şekliyle ayrılan farklı bir betonarme çeşididir. Tamamen çimento esaslı harca gömülmüş, birbirine yakın, çok katmanlı tel örgü veya ince donatı çubuklarından oluşur. Geleneksel betonarmeden dayanım, şekil değiştirme ve olası uygulamalar yönünden farklı davranan bir kompozit malzemedir. En dıştaki donatılar üzerinde yalnızca ince bir harç kaplaması ile, çoğunlukla 25 mm'den daha fazla kalınlıkta ince paneller veya kesitler halinde yapılabilir. Geleneksel betondan farklı olarak, ferrocement donatısına şekil verildikten sonra harç herhangi bir kalıp kullanılmadan doğrudan yerinde sıvanabilir. Ferrocement terimi, çimentolu bir matrisle gömülü bir demir donatı kombinasyonunu ifade eder, ancak donatı olarak çelik örgü veya çelik çubuklar dışında malzemeler

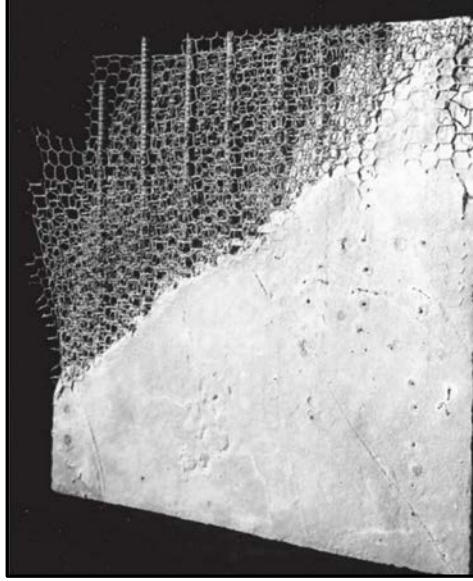
¹ Dr. Öğr. Üyesi, Burdur Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, hakanince@mehmetakif.edu.tr, ORCID ID: 0000-0003-1503-1742.

² Dr. Öğr. Üyesi, Burdur Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, gulhanince@mehmetakif.edu.tr, ORCID ID: 0000-0003-4887-2900.

³ Doç. Dr., Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, meldacakiroglu@isparta.edu.tr, ORCID ID: 0000-0002-8919-6278.

de kullanılabilir. Bunun için polipropilen örgüler, cam elyaf örgüler, jüt, telis bezi veya bambu liflerinden yapılmış organik kumaşlar gibi malzemeler de kullanılabilir. Bu nedenle, ferrocement terimi şu anda donatı olarak çelikten başka malzemeleri de içermektedir (ACI Committee 549, 2018). Şekil 1’de tipik ferrocement kesiti görülmektedir.

Şekil 1. Tipik Ferrocement Kesiti



Kaynak: (ACI Committee 549, 2018)

Ferrocement 1848’de Fransız mucit Joseph Louis Lambot tarafından icat edilmiştir. Lambot çimentolu harç içine metal takviyeler koyarak ilk ferrocement uygulamasını gerçekleştirmiştir. Şekil 2’de Lambot’un 1848’de yapmış olduğu ve halen Fransa’daki Brignoles müzesinde sergilenen ferrocement tekne görülmektedir. Fotoğraftaki teknenin alt kısmında ferrocement içindeki tel örgüler ve donatı görülmektedir.

1940’lara kadar geleneksel betonarmenin gölgesinde kalan ferrocement, Pier Luigi Nevri adında bir İtalyan

mühendisin bu malzemeden uçak hangarları, gemiler ve binalar yapması üzerine yeniden gündeme gelmiştir. 1960'lara dek işe yararlığı ve kalıcılığı tüm dünyadaki tanınmış mühendisler ve yapımcılarca uygun bulunmuş ve özellikle mavnalar, büyük fiçılar, tanklar ve ev yapımında uygun ve ekonomik olduğu onaylanmıştır (Naaman, 2000).

Şekil 2. Lambot'un Yaptığı Ferrocement Tekne



Kaynak: (Engin, 2021)

Klasik betonarme ile kıyaslandığında ferrocementin mekanik özellikleri ve dayanıklılığı daha iyidir. Sınır yükleme koşullarında ferrocement homojen elastik bir davranış gösterir ve bu sınır değerler normal betona göre daha büyüktür. Ferrocementin taşıma gücü kullanılan tel örgülerin oranına bağlı olarak değişmektedir (Topçu & Sarıbek, 2011). Tablo 1'de betonarme ve ferrocementin bazı özellikleri açısından karşılaştırması verilmiştir.

Tablo 1. Betonarme ve Ferrocement Karşılaştırması

	Özellikler	Betonarme	Ferrocement
1	Kalınlık	Minimum 75 mm	İnce kesitli, 25 – 50 mm
2	Matris malzemesi	Çimentolu beton	Zengin çimentolu harç
3	Donatı	Aralıklı dizilmiş çelik çubuklar > $\phi 6$ mm	Yapının gövdesi boyunca dağılmış sürekli ince tel örgü.
4	Dayanım	Zayıf kesme, aderans ve kayma dayanımı	Yüksek çekme dayanımı, üstün aderans ve kayma dayanımı
5	Çekme dayanımı	4 – 6 kg/cm ²	80 – 90 kg/cm ²
6	Dayanım/Ağırlık oranı	15 – 50	45 – 90
7	Döküm işlemi	Kalıp oldukça önemlidir. Kalıplar nedeniyle segregasyon oluşabilir.	Sıkıca bağlanmış tel örgüler, harç dökümünü destekler. Doldurma yoğun ve kompakttır, segregasyon oluşmaz.
8	Bileşimi	Heterojen	Homojene yakın
9	Dayanım kazanma	Boyut, şekil ve donatı nedeniyle	Yapının şeklinden dolayı
10	Yapısal davranış	Rijit	Rijit olmayan

Kaynak: (Maharashtra Engineering Research Institute, 2018)

Ferrocementin yapılarda kullanılmasının avantajları şöyle sıralanabilir:

- Ferrocementin temel hammaddeleri çoğu ülkede kolayca temin edilebilir.
- İstenilen şekil kolaylıkla verilebilir ve üretimi kolaydır.
- Çoğu ahşaptan daha dayanıklıdır ve ithal çelikten daha ucuzdur.
- Ferrocement inşaatı için ustalık kolayca kazanılabilir.
- Ferrocement inşaatı diğer inşaat yöntemlerine göre daha az sermaye yoğunudur ancak daha fazla emek yoğunudur (Hago vd., 2005).

Ferrocementin bütün bu avantajlarının yanında bazı dezavantajları da vardır. Bunlar:

- Ferrocement elemanlar ince kesitli olduğundan, su ve su ile taşınan zararlı maddeler donatıya kolay ulaşabilir. Bu sebeple önlem alınmazsa donatı daha kolay korozyona uğrar. Bunu önlemek için ferrocement korozyona karşı koruyucu bir maddeyle kaplanmalıdır.
- Harcın kalınlığının az olması nedeniyle yangına karşı direnci oldukça zayıftır.
- Harcın sıvama esnasında tel örgüler içine iyi girmemesi nedeniyle boşluklar oluşup dayanım düşebilir. Bunu önlemek için işçiliğe dikkat edilmelidir (Topçu, 2006).

2. FERROCEMENT YAPIMI

Ferrocement yapımı için deneyimli elemanlara ve hazır malzemelere ihtiyaç duyulur. Ferrocement yapımı için gerekli malzemeler:

- Çimento
- Agregası
- Su
- Çeşitli katkı maddeleri
- Tel örgü
- Kaplama malzemesi

Ferrocementin en önemli avantajı istenilen şekilde imal edilebilir olmasıdır. Yapım esnasında ince ferrocement kabuğun doğru olarak oluşturulabilmesi için şu aşamalar dikkatlice yürütülmelidir:

- Tel örgünün uygun pozisyonda yerleştirilmesi,
- Harcın karıştırılması,
- Harcın uygulanması,

- Kür (Topçu, 2006)

Ferrocementin harç fazı su, çimento ve 4 mm'yi aşmayan kumdan oluşur. Su/çimento oranı mümkün olduğunca düşük (0.35–0.45) tutulmaya çalışılır. Bunun için akışkanlaştırıcı katkı ve telleri korozyondan korumak amacıyla da bir anodik korozyon inhibitörü katkı (kalsiyum nitrür vb.) kullanılması uygundur. Çimento dozajı 600 kg/m^3 mertebesindedir, kum/çimento oranı 2 civarındadır. Ferrocementin donatısı çok katlı olarak gerilen çelik tel ağlardır. Ağlar kare veya altıgen açıklıklı örgülü veya kaynaklı tellerden meydana gelirler. Tellerin harcın hacim yüzdesi olarak ifade edilen pekiştirme oranı %3.5 mertebesindedir (Akman, 1992).

Ferrocement üretiminin esası tel örgü tabakalarının harç içine boşluksuz şekilde yerleştirilmesidir. Harcın sıvanmasına başlanmadan önce tel örgünün düzgün durumda olup olmadığı kontrol edilmelidir. Çelik çubuklar ve tel örgü toz ve yağdan arındırılmak için fırçalanmalıdır. El ile sıvama en çok tercih edilen yöntemdir. Şekil vermek için mala kullanılır. Sıva harcı katı olmalı, sürüldüğünde yerinde kalmalıdır. Bazı durumlarda harcın şeklinin bozulmaması ve desteklenmesi için ahşap kalıp kullanılabilir. Bu kalıp harcın yerleştirilmesi ve sıkıştırma işleminden bir süre sonra sökülür. Sıvamada iki teknik kullanılır:

1. Yerinde yapımda: Çimento harcı tel örgüye uygulanır.
2. Prefabrikasyonda: Tel örgü çimento harcına uygulanır.

Her iki yöntemde de kaliteli işçilik gerekmektedir ve bu tekniklerin geliştirilmesine ihtiyaç vardır (Özdemir & Kocataşkın, 1984; Topçu, 2006).

Ferrocement metal örgülerle güçlendirilmiş bir kompozittir. Ferrocement uygulamasında yapılacak yapının şekline göre çelik iskelet hazırlanır ve bu çelik iskelet üzerine tel

örgü bağlanır. Hazırlanan kafes her iki yüzeyden çimento harcı ile doldurulur (Şekil 3).

Şekil 3. İnşa Halindeki Ferrocement Ev



Kaynak: (Sebastian, 2018)

Ferrocement bünyesindeki örgü donatı yardımıyla büyük gerilmelere dayanabilir ve bu gerilmeler, donatıların dağılımı ve yapısal özelliklerine bağlı olarak beton yapının her yerine homojen olarak dağılır. Beton hacmi içerisinde yüksek oranda yer alan ve homojen dağılan tel donatılar, harcın sünek davranmasını sağlar, tokluğunu artırır ve ilk çatlama, çarpma, çekme etkilerine karşı direncini önemli ölçüde artırır. Tel donatının yapıda homojen bir şekilde dağılmış olması, çatlakların kontrollü bir

şekilde oluşmasını sağlar. İlk çatlama sonrası çatlak genişliği, tel donatılar sayesinde uzun süre sabit kalır. Bu durum, yapının taşıma kapasitesini önemli ölçüde korumasını sağlar. Bu nedenle, yüksek plastik deformasyonlara maruz kalındığında bile yapı elemanı yük taşımaya devam eder ve parçalanma ya da kopma oluşmaz.

3. FERROCEMENT UYGULAMALARI

Ferrocementin uygulama alanları çok geniştir. Gelişmekte olan ülkelerdeki ucuz iş gücü ferrocementin bu ülkelerde yaygın olmasının nedenlerinden biridir. Ferrocement şekil verilebilirlik açısından çok avantajlı bir malzemedir. İstenilen şekil donatısına verildikten sonra sıvanarak sonuca ulaşılır. Kolay şekil verildiği için çeşitli eğri ve karmaşık şekilli elemanların yapımında, ev, çatı ve gemi yapımında kolaylıkla kullanılır. Ferrocementin imalatı ya da kullanımı sırasında oluşabilecek kusurları kolaylıkla giderilebilir. Ferrocementin ahşap malzemeler yerine kullanılması çevre ve ormanlar açısından önemlidir. Ahşap, yenilenebilir bir kaynak olsa da aşırı tüketimi ormanları tehdit etmektedir. Ferrocement, bu açıdan daha sürdürülebilir bir alternatiftir. Ferrocement birçok özelliği ile çoğu malzemenin yerini alabilecek yapıya sahip bir malzemedir (Topçu, 2006).

3.1. Ev İnşasındaki Uygulamalar

Ferrocement, kolay inşa edilebilir olduğundan, maliyetinin düşük olmasından ve sahip olduğu daha birçok özellikten dolayı ev inşasında ve çatı yapımında kullanmak için uygun bir malzemedir. Hem dış hem de iç duvarların yanı sıra tavanlar için kullanılabilir. İnce duvar kalınlıklarına rağmen, çelik örgü ile güçlendirildiği için büyük gerilmelere dayanabilir. Ayrıca çatlama direnci de yüksektir. Geleneksel betonarme yapılara göre daha az beton ve çelik kullanıldığı için, maliyetleri düşürür. Ayrıca ferrocement yapılar, düşük bakım maliyeti ile

uzun ömürlüdür. Ferrocement, düşük maliyetli ve dayanıklı konutlar inşa etmek için gelişmekte olan ülkelerde ve kırsal bölgelerde popüler hale gelmiştir. İnce ve hafif olması sayesinde eğrisel veya özel geometrilere sahip yapıların inşasında kolaylık sağlar. Bu da daha yaratıcı ve fonksiyonel tasarımlar yapılabilmesine imkan tanır. Şekil 4’de ferrocementten yapılan bazı evler gösterilmiştir.

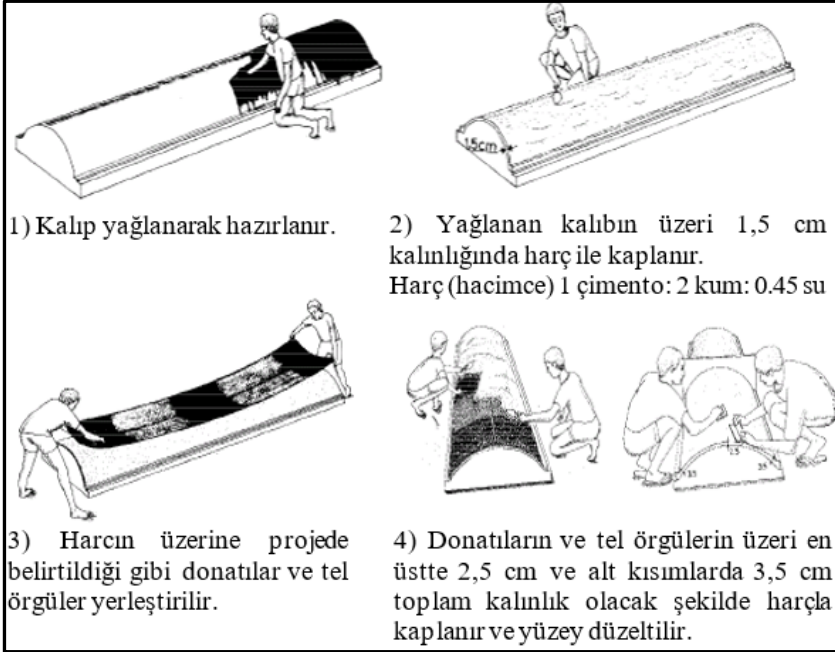
Şekil 4. Ferrocementten Yapılan Evler



Gelişmekte olan ülkelerde, küçük konut inşasındaki en büyük problemden biri de çatı malzemesi tayinidir. Konutun döşemeleri ve duvarları yerel malzemelerle yapılabilmektedir.

Ancak aynı malzemelerle düşük maliyetli, dış ortam şartlarına ve depreme dayanıklı çatılar yapmak pek mümkün olamamıştır. Bu ülkelerde çatı örtüsü olarak lifli çimento levhalar veya galvanizli sac levhalar kullanılmaktadır. Her iki çatı malzemesinin de maliyeti yüksektir. Dolayısıyla ferrocement bu malzemelerin yerine alternatif olarak kullanılabilir bir malzemedir (Özturan & Kocataşkın, 1987). Şekil 5’de ferrocement çatı panellerinin yapım aşamaları, Şekil 6’da ise ferrocement çatı paneli uygulaması gösterilmiştir.

Şekil 5. Ferrocement Çatı Paneli Yapım Aşamaları



Kaynak: (UNCHS (Habitat) & AVBC, 2001)

Şekil 6. Hazırlanmış Ferrocement Çatı Panelleri ve Uygulaması



3.2. Güçlendirme Uygulamaları

Ferrocement son yıllarda yapıların güçlendirilmesinde de kullanılmaya başlanmıştır. Bu konuda çeşitli araştırmalar mevcuttur. Kolonların ferrocement ceketlerle güçlendirilmesi konusunda yapılan araştırmalar, ferrocement ceketlerin kesme çatlağı oluşumunu azatlığını ve yüksek süneklik değerlerinde dahi homojen dağılım göstermiş uygun çatlak oluşumunu sağladığını göstermiştir. Bu sonuçlara dayanarak, geliştirilmiş çelik ağırlar kullanılarak üretilen ferrocement ceketlerin, kesme mukavemeti yetersiz kolonların güçlendirilmesinde etkili bir şekilde kullanılabileceği söylenebilir (Takiguchi, 2003; Kazemi ve Morshed, 2005)

Ferrocement kompozitler, gelişmekte olan ülkelerde yapıların onarım ve güçlendirilmesi için yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu tür kompozitlerin donatılarının (tel örgü) homojen dağılımı ve yüksek yüzey alanı/hacim oranı, çatlak durdurma mekanizmasını geliştirmektedir (Kaish vd., 2018). Ayrıca hafif agregalı ferrocement paneller, hafif olması, çekmeye karşı dayanıklı, düşük maliyetli ve kullanışlı olması nedeniyle tercih edilmektedirler (Hocaoğlu vd., 2023).

Ferrocementin ekonomik ve hızlı üretimi ve binanın boşaltmasına gerek kalmaksızın uygulanabilen diğer güçlendirme yöntemlerine alternatif bir yöntemdir. Bilinen güçlendirme yöntemlerinin çoğunun uygulanması zordur ve

binanın boşaltılması gerektirir. Farklı araştırmalar ferrocement ile güçlendirme yönteminin yapı performansını artırdığını göstermiştir. Ferrocement panellerle güçlendirilen betonarme çerçevesi bina yapılarının dayanım, rijitlik, enerji dağıtma ve ötelenme özelliklerini iyileştirmektedir. Ayrıca bu yöntem çevre dostu, uygun maliyetli ve pratik olarak uygulanabilir sismik güçlendirme tekniği olmaktadır (Hocaoğlu vd., 2023). Ferrocement ile mantolama, yığma yapıların güçlendirilmesi için uygulanabilir ve oldukça etkili bir yöntemdir (Şekil 7). Deneysel çalışmalar, ferrocement ile güçlendirilmiş duvarların, kontrol numunelerine kıyasla kesme dayanımında ve deformasyonunda kayda değer bir iyileşme sergilediğini göstermiştir. Ferrocement güçlendirmesinde küçük çaplı çelik tellerin kullanılmasını sınırlayan en önemli etken korozyon riskidir. Ancak, yüksek mukavemetli paslanmaz çelik ızgaralar kullanılarak bu risk azaltılabilir (Mustafaraj vd., 2023). Ferrocement kompoziti, betonarme kolon elemanları güçlendirmek için bir mantolama malzemesi olarak da kullanılabilir (Kaish vd., 2018).

Şekil 7. Ferrocement ile Güçlendirme Aşamaları



Kaynak: (El-Diasity vd., 2023)

3.3. Denizcilik Uygulamaları

Ferrocementin en yaygın kullanım alanlarından biri de tekne yapımıdır. Ferrocement teknelerin boyları 7 m ile 30 m arasında değişmektedir. Bu teknelerin gövdelerinin belli bir et kalınlığına sahip olması gerektiğinden, ferrocement tekneler ancak boyları 14-15 m'yi aştıktan sonra diğer malzemelerden yapılmış teknelerle ağırlıkça eşitlenirler. Daha küçük boyutlardaki ferrocement tekneler emsallerine göre daha ağırdırlar. Teknenin gövdesinde kullanılan teller çatlakların genişlemesini ve büyümesini önlerler, bu bakımdan su geçirmeye karşı da yararlı olurlar. Mekanik yönden malzeme darbeye dayanıklıdır. Çarpışmada meydana gelen hasar yerel çökme olarak kalır. Ferrocement teknelerin aşınma ve korozyon dayanıklılıkları yüksektir. Bakımları düşük düzeydedir (Akman, 1992). Hasar almaları durumunda yerel iş gücüyle ve basit ekipmanlarla kolayca tamir edilebilirler. Harç karışımını ve donatı örgüsünü yeniden uygulayarak hasar onarımı mümkündür. Şekil 8'de 1980 yılında yapılmış ve halen kullanılmakta olan, 10,57 m boyunda ve ağırlığı 11000 kg olan ferrocement tekne görülmektedir.

Şekil 8. Ferrocement Tekne



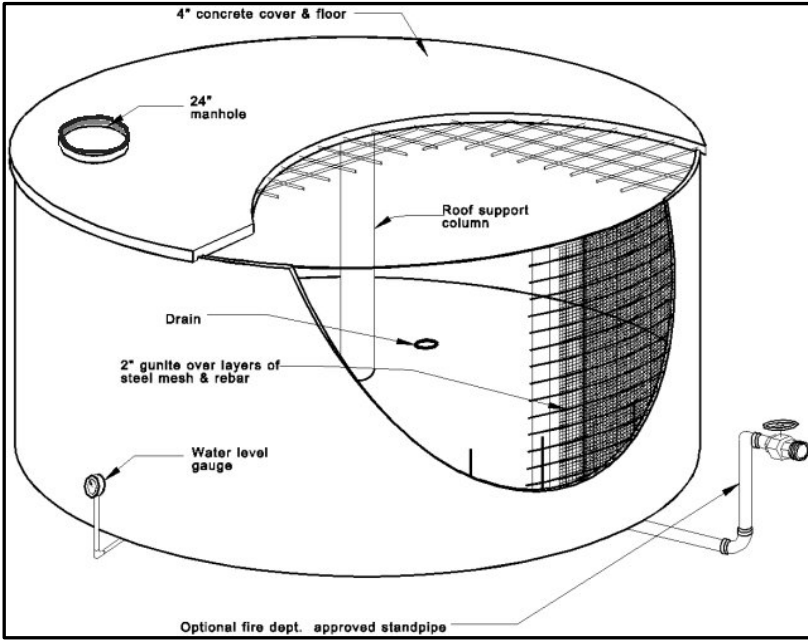
Kaynak: (Brighton Boat Sales, 2024)

Ferrocement deniz ortamında tekne yapımının dışında çeşitli uygulamalarda da yaygın olarak kullanılmaktadır. Ferrocementten yapılan diğer denizcilik uygulamaları şunlardır: şamandıralar, iskeleler, yüzen dalgakıranlar, su altı ve üstü madeni yağ (yakıt) depoları, açık deniz tanker terminalleri, yüzen köprüler vb. (Hago vd., 2005; Topçu, 2006).

3.4. Su Depoları

Ferrocement su depolarının yapımında da kullanılabilen bir malzemedir. Ferrocement su depoları içten ve dıştan ince bir çimentolu harç tabakası ile kaplanmıştır. Ferrocement su depolarının bakımı kolaydır. Malzemedeki eğilme etkilerini önlemek için, çoğu ferrocement tanklar kavisli duvarlara sahiptir, bu nedenle ferrocement tanklarının şekli bir silindir veya bir küre olabilir. Beton su depolarıyla karşılaştırıldığında, ferrocement depolar daha hafif ve esnektir (Patil vd., 2020). Şekil 9'da ferrocementten yapılan bir su deposunun kesiti gösterilmiştir.

Şekil 9. Ferrocementten Yapılan Su Deposu Kesiti



Ferrocement tankların en önemli özelliği geçirimsiz olmalarıdır. Bu özellik su depoları için oldukça önemlidir. Geçirimsizlik hijyeni kolaylaştırdığından, bu malzemeler sürekli kullanılabilir. Beton ve çelik gibi geleneksel su tankları ile karşılaştırıldığında ferrocement tankların maliyeti ve ağırlığı daha düşüktür. Çelik tanklarla karşılaştırıldığında ferrocement tanklar bakım gerektirmemeleri açısından daha sürdürülebilirdir (Topçu, 2006).

3.5. Gıda Depoları

Ferrocementin ısı geçirimsizliği yüksek olduğundan gıda depolarının yapımında da kullanılmaktadır (Şekil 10). Ferrocement depolar su ve hava geçirmez, fazla bakım gerektirmez. Bu olumlu özellikleri sebebiyle ferrocement kullanarak ürünleri yeterli derecede koruyabilecek gıda depolarının yapılması mümkündür. Ferrocement meyve ve sebzelerin korunması için, balık, bira, şarap vs. için fermantasyon teknelerinde, meyve sularının, bitkisel yağların, içme sularının vs. depolanma teknelerinde, çay, kahve, kakao, biber vb. kurutucular gibi basit yapıların yapımında da kullanılır (Topçu, 2006).

Şekil 10. Ferrocement Tahıl Deposu Yapım Aşamaları



Kaynak: (ECHO, 2013)

Ferrocement tahıl depolarının avantajları arasında düşük maliyetli olması, işçiliğinin ve yapımının kolay olması dışında,

hasat sonrası depolanan üründe kemirgen, zararlılar ve nem kaynaklı kayıpları azaltması da vardır.

3.6. Çeşitli Yapılar

Bütün bu anlatılanların dışında ferrocement, sulama kanallarının, dekoratif amaçlı doğal kayaların ve süs havuzlarının, açıklığı az olan köprülerin ve biyogaz tutucuların yapımında da kullanılmaktadır.

4. SONUÇ

Ucuzluğu, kolay imal edilebilmesi ve malzemesinin kolayca bulunabilmesi açısından ferrocement pek çok alanda kullanılabilen bir yapı malzemesidir. Hem ekonomik hem de çevresel açıdan birçok avantajı bulunmaktadır. Bütün bu özellikleri sayesinde bu çok yönlü kompozit malzeme bilhassa gelişmekte olan ülkelerde giderek daha fazla ilgi görmektedir.

Ferrocementin avantajları çok fazladır, fakat ülkemizde yaygın kullanım alanı bulamamaktadır. Bu avantajlı malzemenin ülkemizde de yaygın kullanımını sağlamak için ülkemiz özelliklerine has yeni kullanım alanlarının da araştırılması gereklidir.

Ferrocementin alternatif yapı malzemesi olarak kabul edilebilirliği için dayanıklılık yönlerinin de kapsamlı bir şekilde araştırılması gerekmektedir. Farklı koşullarda ferrocement kompozitin ömrünü uzatabilecek yöntemlerin geliştirilmesi ferrocementin kullanım alanlarını daha da arttıracaktır.

KAYNAKÇA

- ACI Committee 549. (2018). *Report on Ferrocement (ACI 549R-18)*. Farmington Hills, Michigan: American Concrete ACI Committee 549. (2018). *Report on Ferrocement (ACI 549R-18)*. Farmington Hills, Michigan: American Concrete Institute.
- Akman, M. S. (1992). *Deniz Yapılarında Beton Teknolojisi*. İstanbul: İTÜ Gemi İnşaatı ve Deniz Bilimleri Fakültesi Ofset Baskı Atölyesi.
- Brighton Boat Sales (2024). Hartley Queenslander Ferrocement Yacht. <https://www.brightonboatsales.co.uk/boats-for-sale/hartley-queenslander-ferrocement-yacht/> adresinden alındı
- ECHO Community (2013). Household Grain Storage Options. <https://www.echocommunity.org/en/resources/9530e2f8-baa1-4248-945b-346dc10b9351> adresinden alındı
- El-Diasity, M., Salah, S., El-Hariri, M. O., Gamal, A. A., & Elsalakawy, T. S. (2023). Numerical and Experimental Behavior of Two-Story Confined Masonry Structure Subjected to Cyclic Loads. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 17(1), 70.
- Engin, Y. (2021). *Betonarme: Bir Asrı Aşan Evliliğin Hikayesi*. Beton ve Çimento: <https://www.betonvecimento.com/betonarme-yapilar/betonarme-bir-asri-asan-evliligin-hikayesi> adresinden alındı
- Hago, A. W., Al-Jabri, K. S., Alnuaimi, A. S., Al-Moqbali, H., & Al-Kubaisy, M. A. (2005). Ultimate and service behavior of ferrocement roof slab panels. *Construction and Building Materials*, 19(1), 31-37.
- Hocaoğlu, İ., Topçu, İ. B., & Öcal, C. (2023). Alternative Ferrocement Panels for Reinforcement of Reinforced

Concrete Structures Damaged on the 6 February 2023 Turkey Earthquake. *Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 4(2), 254-269.

Kaish, A. B. M. A., Jamil, M., Raman, S. N., Zain, M. F. M., & Nahar, L. (2018). Ferrocement composites for strengthening of concrete columns: A review. *Construction and Building Materials*, 160, 326-340.

Kazemi, M. T., Morshed, R., (2005). Seismic Shear Strengthening of R/C Columns with Ferrocement Jacket. *Cement and Concrete Composites*, , 27, pp.834-842.

Maharashtra Engineering Research Institute. (2018). *Ferrocement Technology* (First Edition b.). Nashik, India: Government of Maharashtra Water Resources Department.

Mustafaraj, E., Corradi, M., Yardim, Y., Luga, E., & Codur, M. Y. (2023). Ferrocement, Carbon, and Polypropylene Fibers for Strengthening Masonry Shear Walls. *Materials*, 16(13), 4597.

Naaman, A. E. (2000). *Ferrocement and Laminated Cementitious Composites*. Ann Arbor, Michigan, USA: Techno Press 3000.

Özdemir, N., & Kocataşkın, F. (1984). Ferrocementin tanıtılması ve Türkiye’de uygulama olanakları. *Malzeme seminerleri* (s. 1-8). içinde İstanbul: İTÜ İnşaat Fakültesi.

Özturan, T., & Kocataşkın, F. (1987). Ferrocement’in Konut Yapımında Kullanılma Olanakları. *Türkiye İnşaat Mühendisliği IX. Teknik Kongresi. Cilt 1*, s. 603-612. Ankara: TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası.

Patil, M., Patel, S., Dhonde, Y., & Patel, P. (2020). Comparative Study of Ferro Cement Water Tank and RCC Water Tank.

International Research Journal of Engineering and Technology, 07(04), 5307-5312.

- Sebastian, B. (2018). This New Tech By Kerala Architects Could Build Post-Flood Houses Under Rs 5 Lakh!. <https://architexturez.net/pst/az-cf-188236-1535616854> adresinden alındı
- Takiguchi, A. K., (2003). An Investigation Into the Behavior and Strength of Reinforced Concrete Columns Strengthened with Ferrocement Jackets, *Cement and Concrete Composites*, 25, pp.233-242.
- Topçu, İ. B. (2006). *Ferrocement Teknolojisi Ders Notları*. Eskişehir: Osmangazi Üniversitesi.
- Topçu, İ. B., & Sarıbek, S. (2011). Ferrocement Su Tanklarının Tasarımı ve Yapımı. *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, XXIV(1), 1-14.
- UNCHS (Habitat), & AVBC. (2001). *Ferrocement Channels*. UN Habitat: <https://mirror.unhabitat.org/content.asp?typeid=19&catid=281&id=1265> adresinden alındı

ZEMİNLERİN STABİLİZASYONUNDA SÜRDÜRÜLEBİLİR BİYOPOLİMER BAĞLAYICILARIN KULLANIMI ÜZERİNE BİR DERLEME ÇALIŞMASI

Mehmet Fatih YAZICI¹

Tayfun ŞENGÜL²

1. GİRİŞ

Nüfusun artışına paralel olarak ortaya çıkan hızlı kentleşme ihtiyacı, çoğu zaman problemlili zeminlere sahip arazilerde inşaat faaliyetlerinin gerçekleştirilmesine neden olmaktadır. İnşaat mühendisliği yapılarının servis ömrü boyunca güvenli bir şekilde hizmet verebilmesi için yapı inşaatına başlanmadan önce problemlili zeminlerin geoteknik özelliklerinin amaca uygun olarak iyileştirilmesi gerekmektedir. Bu amaç için zeminlerin sıkışabilirlik, mukavemet, geçirimsizlik ve durabilite gibi geoteknik özelliklerinde gerekli iyileşmelerin sağlanabilmesi amacıyla kimyasal zemin stabilizasyon yöntemlerinden çokça faydalanılmaktadır. Geleneksel kimyasal stabilizasyon yöntemlerinde çimento, kireç, uçucu kül ve bitüm gibi malzemelerin zemine eklenmesi ile zeminin özelliklerinin kimyasal olarak iyileştirilmesi amaçlanmaktadır. Ancak kimyasal stabilizatörler kullanılarak zeminlerin geoteknik özelliklerinin iyileştirmesinin amaçlandığı geleneksel stabilizasyon yöntemleri,

¹ Arş. Gör. Dr., Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, mehmetyazici@sdu.edu.tr, ORCID: 0000-0002-3557-7817.

² Dr. Öğr. Üyesi, Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, tayfun.sengul@dpu.edu.tr, ORCID: 0000-0003-3473-7724.

çevresel etkilerin giderek daha fazla sorgulandığı endişe verici bir senaryoyu gözler önüne sermektedir. Zeminlerin stabilizasyonunda çimento malzemesi uzun yıllardır en çok kullanılan katkı malzemesidir. Özellikle çimentonun üretimi ve nakliyesi aşamalarında meydana gelen yüksek miktarda karbon salınımı (küresel CO₂ salınımlarının yaklaşık %8'i), zemin içerisine katılması neticesinde toprağın pH'ındaki artışa paralel olarak doğal bitki örtüsü ve mikrobiyom gelişimini kısıtlaması ve ısı adası oluşumu gibi ekosistem üzerindeki olumsuz etkileri, çevre dostu stabilizasyon malzemelerinin araştırılması ve geliştirilmesine yönelik ihtiyacı doğurmuştur (Rodgers 2018; Sujatha vd., 2021; Soldo vd., 2020). Bununla birlikte çimento ve kireç gibi kimyasalların karıştırıldığı zeminin geri dönüşünün olmaması, bu malzemelerin çevresel açıdan sağladığı dezavantajlardan bir diğeridir (Oliveira vd., 2023).

2010 ile 2018 yılları arasında küresel ölçekte çimento üretim miktarı 3310 milyon tondan 4100 milyon tona yükselmiştir (Wang 2019). Çimento bazlı ürünlere olan bağımlılığın artması, bu sorunları daha da kötüleştirerek küresel ısınma ve iklim değişikliği konusundaki endişeleri daha da artırmaktadır (Raj vd., 2023). Bu çalışma, bahsi geçen bu çevresel problemleri ortadan kaldırabilmek için geleneksel stabilizasyon malzemelerine alternatif olarak çevre dostu zemin stabilizasyon tekniklerini teşvik etmek amacıyla, geoteknik mühendisliği uygulamalarında biyopolimer malzemelerin kullanımını araştırarak bu değişime uyum sağlamayı amaçlamaktadır. Günümüz dünyasında sürdürülebilir ve çevre dostu zemin iyileştirme tekniklerine duyulan ihtiyaç doğrultusunda bu çalışma; guar zımkı, ksantan zımkı, agar, sodyum aljinat, beta-glukan, kitosan, gellan sakızı ve karajenan gibi doğal biyopolimer materyallerinin zeminlerin mühendislik özelliklerini iyileştirme potansiyellerini keşfetmeye çalışmaktadır. Bu araştırma literatürde biyopolimerler ile zeminlerin stabilizasyonu üzerine

yürütülen çalışmalardan elde edilen bilgileri derleyerek biyopolimer malzeme tanımları, biyo bazlı stabilizasyon tekniğine ait metodoloji ve bu tekniğin farklı zeminler üzerindeki faydalarını detaylandırmayı amaçlamaktadır. Genel olarak bu çalışmada zeminlerin kıvam limitleri, serbest basınç dayanımı, kompaksiyon, permeabilite, kayma mukavemeti parametreleri ve durabilite gibi özellikleri üzerine farklı dozaj ve türlerde biyopolimer malzemesinin etkileri farklı çalışmalardan elde edilen bilgiler ışığında değerlendirilerek derlenmiştir.

2. GEOTEKNİK MÜHENDİSLİĞİNDE POTANSİYELİ ARAŞTIRILAN BİYOPOLİMERLER

Biyopolimerler doğal kaynaklardan üretilen organik polimerler olup elde edildikleri kökenlerine göre bitki bazlı, hayvan bazlı ve mikroorganizmalar tarafından üretilen biyopolimerler olmak üzere üç ana gruba ayrılırlar. Guar (Soldo vd., 2022), lignin (Zhang vd., 2015), agar (Smitha ve Rangaswamy, 2020), beta-glukan (Chang ve Cho, 2012) ve sodyum aljinat (Soldo vd., 2020), geoteknik mühendisliğindeki uygulamaları daha önce incelenen bitki bazlı biyopolimerlerin bazı örnekleridir. Atık kabuklu deniz hayvanlarının kabuklarından üretilen kitosan ve süt ve süt ürünlerinden ekstrakte edilen protein bazlı bir biyopolimer olan kazein, geoteknik mühendisliğindeki uygulamaları araştırılan iki hayvan bazlı biyopolimerdir (Fatehi vd., 2021; Hataf vd., 2018). Ksantan zamkı dekstran ve gellen zamkı gibi mikroorganizma bazlı biyopolimerler ise fermantasyon işlemi ile elde edilmektedirler.

2.1.Guar Zamkı (Guar Gum-GG)

Botanik adı *Cyamopsis tetragonolobus* olarak bilinen guar zamkı ($C_{10}H_{14}N_5Na_2O_{12}P_3$), baklagiller familyasına ait olan guar fasulyesi tohumlarının endosperm polisakkaritlerinden üretilen

nötr yüke sahip doğal bir polisakkarittir. 1:2 oranında D-galaktoz ve D-mannoz polimerlerini içeren GG'nin en önemli özelliği, soğuk suda hızlı bir şekilde hidrate olabilmesi ve düşük konsantrasyonlarda bile oldukça viskoz yapıya sahip çözelti sunabilmesidir (Mudgil vd., 2014; Chang vd., 2020). Hidrasyon sürecinin tamamlanması neticesinde GG, viskoz ve kolloidal yapıya sahip dispersiyonlar meydana getirmektedir. GG, hidrasyondan sonra jel benzeri kohezif yapıların oluşumuna neden olan borat iyonları içerir (Eldaw, 1998). GG, %40.83 K₂O, %16.26 CaO, %10.24 Fe₂O₃, %7.03 SO₃, %5.84 P₂O₅, %4.5 PbO, %4.25 Cl, %3.18 MgO, %2.39 CuO, %1.62 SiO₂ ve %3.86 diğer oksitler içerir (Sujatha ve Saisree, 2019).

2.2.Ksantan Zamkı (Xanthan Gum-XG)

Ksantan zamkı (C₃₅H₄₉O₂₉); glikoz, sakaroz ve nişasta gibi şekerleri içeren ortamda Xanthomonas campestris bakterisi türünün aerobik fermantasyonu ile oluşan, iki glikoz, iki mannoz ve bir glukuronik asit birimi içeren polisakkarittir (Garcia vd., 2000; Milas ve Rinaudo, 1979). Anyonik bir biyopolimer olan XG, bir çözeltinin hidrokolloid reolojisini değiştirme yeteneğine sahip olduğundan yaygın olarak gıda endüstrisinde katkı maddesi olarak kullanılmaktadır (Chang vd., 2020). Geniş bir sıcaklık ve pH aralığında sergilediği yüksek stabilitesi ve psödo plastisite özelliği, XG'nin çeşitli uygulamalarda tercih edilmesine neden olan önemli unsurlardandır. Kozmetik, yağ, kâğıt, boya, ilaç, gıda, tekstil endüstrilerinde ve son zamanlarda inşaat endüstrisinde jelleştirici, kıvamlaştırıcı, süspanse edici bir malzeme olarak veya bir flokülün ajanı olarak veya viskozite kontrolü için XG'den faydalanılmaktadır (Fatehi vd., 2021). Hem sıcak hem de soğuk suda çözünebilen XG, yapısındaki hidrojen bağları tarafından su moleküllerinin emilmesi yoluyla viskoz bir hidrojel oluşturma yeteneğine sahiptir (Krishna Leela ve Sharma, 2000).

2.3. Agar

Genel olarak agar; deniz yosunu olarak da bilinen Gelidium, Gracilaria ve Pterocladia gibi çeşitli kırmızı deniz alg türlerinin hücre duvarlarından elde edilen bir polisakkarit biyopolimerdir. Agar biyopolimeri (C₁₂H₁₈O₉)_n, nötr bir polimer olan agaroz ile sülfatlanmış yüklü bir polimer olan agaropektinin bileşik bir karışımıdır. Agaroz, ısıtılmış agar biyopolimeri ile zemin karıştırıldığında zemin daneleri arasında oluşan jelleşmeden sorumlu bir fraksiyondur (Venugopal, 2011). Agar, büyük miktarda su emdikten sonra önemli ölçüde şişen hidrofilik bir kolloiddir (Chang vd., 2015a). Soğuk suda çözünmeyen agarın suda çözünmesi için yaklaşık 85 °C sıcaklığa ihtiyacı vardır ve bu çözelti 32–43 °C aralığında bir sıcaklığa kadar soğutulduğunda agar jelleşmektedir. Agar hidrojeni, polimer zincirine bağlı hidrofilik fonksiyonel gruplar nedeniyle suyu emebilir; ancak ağ zincirleri arasında oluşan çapraz bağlantılar nedeniyle suda çözünmeye karşı dirençlidir (Okay 2009). Agar zankının özellikleri, üretiminde kullanılan deniz yosununa bağlı olarak değişmektedir (Hernandez-Carmona vd., 2013). Agar zankı, onlarca yıl önce keşfedildiğinden beri bir gıda katkı maddesi olarak kullanılmaktadır. Fırın ürünleri, şekerlemeler, süt ürünleri ve et ve balık ürünleri gibi gıdalarda jeller oluşturarak ürünlerin yoğun ve kıvamlı olmasına sağladığı katkılar nedeniyle agar, gıda sektöründe aktif bir şekilde kullanılan önemli bir katkı maddesidir (McHugh, 2003). Ayrıca agar; diş hekimliği, mikrobiyoloji ve tıp alanlarında da kullanılmaktadır (Imeson, 2011). Nispeten uzun moleküler yapıya ve düşük iyonik eğilime sahip olmaları nedeniyle, agar zankları zemin danelerini kaplayarak bir arada tutunmalarını sağlamaktadır. Nötr yüklü yapısı nedeniyle agar zankının zemin partikülleri ile doğrudan etkileşime girmesi zor olmaktadır (Chang vd., 2015a).

2.4.Sodjum Aljinat (Sodium alginate)

Sodyum aljinat (SA); kahverengi deniz alglerinin hücre duvarlarından elde edilen ve kimyasal formülü $C_5H_7O_4COONa$ olan, aljinik asit bazlı bir tuzdur (Raj vd., 2023). Anyonik bir polisakkarit olan SA, suda çözünen ve su molekülleriyle bağlanarak viskoz bir sakız oluşturan bir biyopolimerdir (Bagherinia, 2024). Statik koşullar altında az miktarda ilave edildiğinde dahi bir sıvının viskozitesini büyük ölçüde arttırabilen sodyum aljinatın su ile reaksiyonundan meydana gelen hidrojel, geniş bir pH ve sıcaklık aralığında ($80^{\circ}C$ 'nin altında) viskozite stabilitesini koruyabilir (Zhao vd., 2020). Aljinat, biyoyumluluğu, düşük toksisitesi ve nispeten ucuz maliyeti nedeniyle toprak iyileştirme uygulamaları için uygun bir seçenektir. Ayrıca aljinat çözeltisinin viskozitesi. pH değişiminden doğrudan etkilenmektedir. Sulu ortamlarda çok değerlikli katyonların varlığı SA çözeltisinin jel oluşumunu teşvik eder. Sodyum iyonlarının çok değerlikli katyonlarla değişimi SA'nın çapraz bağlanmasının ve jelleşmesinin birincil nedenidir (Kulkarni vd. 2010). Bu özellik, harici bir madde veya çözelti eklemeye gerek kalmadan killerin genellikle SA'nın çapraz bağlanmasını aktive edecek katyonlar açısından zengin olması nedeniyle killi zeminlerin stabilizasyonunda fayda sağlamaktadır (Arab vd., 2019). Ek olarak güçlü yüklü bileşiklere, hidrofobik ve polar kısımlara ve yan zincir karboksilatlarına sahip zeminlerde SA, benzersiz bir potansiyel katkı maddesidir (Fatehi vd., 2018). Endüstriyel ve tıbbi uygulamalarda ve gıda endüstrisinde SA, geniş bir kullanım yelpazesine sahiptir (El-Aassar vd. 2014).

2.5.Beta Glukan (Beta Glukan)

Beta-glukan (β -glukan), tipik olarak 1.3- veya 1.6-glikozidik bağlar yoluyla doğrusal bir yapı oluşturan D-glikoz monomerlerinin bir biyopolimer grubunu içerir (Chang ve Cho,

2012; Bohn ve BeMiller, 1995). Selüloz, kepek, maya, mantar ve bakteri hücre duvarları gibi çeşitli oluşumlarda β -glukan doğal olarak bulunur (Lazaridou ve Biliaderis, 2007). β -Glukanlar üretim kökenlerine göre moleküler kütleleri, çözünürlükleri, viskoziteleri ve üç boyutlu şekilleri bakımından büyük çeşitlilik gösterirler. Beta-glukan biyopolimeri, yüzey polarizasyonuna neden olan ve beta-glukanın su emme kapasitesini arttıran kenarlardaki hidroksil ve karboksil (COO^-) grupları sayesinde oldukça güçlü olan hidrojen bağları kurabilmektedir. Bu da gözenek doygunluğuna ve toprağın hacimsel olarak genişlemesine katkıda bulunur (Fatehi vd., 2021). Mühendislik uygulamaları açısından beta-glukan, betonda süper plastikleştiricilerde ve su azaltıcı maddelerde katkı maddesi olarak kullanılmıştır (Khayat ve Yahia, 1997).

2.6.Kitosan (Chitosan)

Kabukluların dış iskeletleri ve mantarların hücre duvarları, kitosan olarak bilinen kitinin parçalanmış formunu içerir. Kitosan, böceklerde, kalamar kemiklerinde ve kabuklu deniz hayvanlarının kabuklarında bulunan kitinin deasetilasyonu ile oluşan doğrusal bir polisakkarittir (Chang vd., 2020). Kitosan, β -1,4-D-glukozamin ($\text{C}_6\text{H}_{13}\text{NO}_5$) ve N-asetilglukozaminden ($\text{C}_8\text{H}_{15}\text{NO}_6$) oluşmaktadır. İnsan dokusuna benzer bir moleküler yapıya sahip kitosan, insan hücreleriyle uyumlu olduğundan bağışıklık tepkileri konusunda güvenlidir. Bu nedenle, gıda ürünleri ve biyomalzemeler için kitosan yaygın bir kıvamlaştırıcı, stabilize edici materyal ve imalat maddesi haline gelmiştir (Chang vd., 2020). Kitosan beslenme, mekatronik, sağlık bilimleri, mikrobiyal, immünoterapi ve çiftçilik, atık su yönetimi ve bozulan ürünler gibi diğer disiplinlerde kullanılmış ve araştırılmıştır (Raj vd., 2023). Kitosan, biyolojik olarak parçalanabilen, biyouyumlu, yenilenebilir ve kullanışlı bir biyopolimerdir. Biyolojik olarak parçalanabilirlikleri nedeniyle kitosan çevre dostu biyopestisitler

ve gübrelerde tarımda yaygın olarak kullanılmaktadır (Hirano vd., 1996). İnşaat ve çevre mühendisliğinde kitosan, atık su ve yeraltı suyu içerisinde bulunabilen Cu^{2+} , P^{3-} , Cd^{2+} , Zn^{2+} ve Pb^{2+} gibi kirleticileri gidermek için bir koagülan olarak kullanılmıştır (Renault vd., 2009; Liu vd., 2002; Cheung vd., 2003). Kitosan, negatif yüklü yüzeylere bağlanma eğiliminde olan, suda çözünür bir biyopolimerdir (Raj vd., 2023).

2.7.Gellan Sakızı (Gellan Gum)

Sphingomonas Elodea mikrobundan fermente edilen yüksek moleküler ağırlığa sahip gellan zamkı; iki D-glikoz kalıntısı, bir D-glukuronik asit ve bir L-ramnoz kalıntısının tekrarlayan bir zincirinden oluşan, çok sarmallı bir zincir yapısına sahip doğrusal bir termojelatin anyonik polisakkarittir (Giavasis vd., 2000; Stokke vd., 1993). Gellan zamkı, soğuk suda kısmen viskoz jeller oluşturmak için nemlenirken, gellan zamkı monomerlerini tamamen nemlendirmek ve düzgün bir hidrokolloid durumu oluşturmak için 90 °C'nin üzerindeki sıcaklıklar gerekir. Isıtıldıktan sonra, gellan zamkı hidrokolloidi 40 °C'nin altındaki sıcaklıklara soğutulursa, hidrokolloidler viskoz hidrojellere dönüşür (Chang vd., 2016a). Gellan sakızı, düşük pH ve yüksek sıcaklık koşullarında kararlı bir yapıya sahiptir (Chang vd., 2015a). Gellan zamkı ile stabilize edilmiş zeminlerde zemin-gellan hidrojelleri karışımı susuzlaştırıldığında, gellan zamkı hidrojelleri su molekülleri yerine killi parçacıklarla hidrojen bağı yoluyla etkileşime girmeye başlar. Bu nedenle, saf gellan zamkı biyopolimeri ile stabilize edilmiş zeminlerin nihai mukavemeti büyük ölçüde su içeriğine bağlıdır ve bu numuneler ısıtıldıktan sonra geri döndürülemeyen bir mukavemet kaybına uğrar (Chang vd., 2015a).

2.8.Karajenan

Karajenan, kırmızı yenilebilir deniz yosunlarından üretilen, anyonik, sülfatlanmış doğrusal bir polisakkarittir. Karajenan, $C_{24}H_{36}O_{25}S_2$ kimyasal formülüne sahip bir biyopolimerdir ve gıda, ilaç, kozmetik vb. birçok sektörde sıklıkla kıvamlaştırıcı ve jelleştirici madde olarak kullanılır (Kulkarni ve Shaw, 2015). Kappa (κ), lambda (λ) ve iota (ι) olmak üzere ticari olarak temin edilebilen üç tür karajenan vardır. Tekrarlayan galaktoz birimlerindeki ester sülfat gruplarının pozisyonu ve sayısı, bu üç türün özelliklerini etkileyen temel farklardır. Ester sülfatın kapsamı ne kadar büyükse, jel gücü ve çözünürlük sıcaklığı o kadar düşüktür (Necas ve Bartosikova, 2013). Kısaca, kappa bir sülfatlı gruba sahipken, iota ve lambda sırasıyla disakkarit birimi başına iki ve üç sülfat grubuna sahiptir. κ -Karajenan sert ve katı jeller, ι -Karajenan ise yumuşak jeller oluşturur (Mihaila vd., 2013). Bütün karajenanlar sıcak suda çözünürler ancak sadece κ ve ι -karajenanların sodyum tuzları soğuk suda çözünür (Santinon vd., 2022).

3. BİYOPOLİMER-ZEMİN KARIŞIMLARININ HAZIRLANMASI

Biyopolimerler ile stabilize edilmiş zemin karışımlarının hazırlanmasında benimsenen karışım hazırlama yönteminin biyopolimer-zemin kompozitinin mühendislik özellikleri üzerinde doğrudan etkisi olan bir parametre olduğu görülmektedir. Bu amaç için literatürde ıslak ve kuru olmak üzere iki tür karıştırma yöntemi kullanılmaktadır.

3.1.İslak Karıştırma Yöntemi

İslak karıştırma yönteminde zemin-biyopolimer karışımının su muhtevası ile bu karışıma katılacak biyopolimer dozajına göre biyopolimer konsantrasyonu belirlenmektedir. Bu

konsantrasyona göre toz halindeki biyopolimer malzemesi su içerisinde tamamen çözünene kadar bir mekanik veya manyetik karıştırıcı ile karıştırılmaktadır. Örneğin zeminin kuru ağırlığının bir yüzdesi olarak %0.5 dozajında biyopolimer içeren %20 su muhtevasında bir biyopolimer-zemin karışımı hazırlanmak istendiğinde Eşitlik 1 ve 2'den $M_w=20M_s$ ve $M_b=0.5M_s$ olarak hesaplanır. O halde biyopolimer ağırlığının suyun ağırlığına oranını ifade eden konsantrasyon değeri (C) Eşitlik 3 ile hesaplanmaktadır.

$$\omega = \frac{M_w}{M_s} \quad (1)$$

$$B_D = \frac{M_b}{M_s} \quad (2)$$

$$C = \frac{M_b}{M_w} \quad (3)$$

Burada M_w , M_s ve M_b sırasıyla su, kuru zemin ve toz halindeki biyopolimerin ağırlıklarını temsil etmektedir. B_D ve ω ise sırasıyla zemin içerisine katılacak biyopolimer dozajı ve su muhtevasını göstermektedir.

$M_b=0.5M_s$ ve $M_w=20M_s$ değerleri Eşitlik 3'te yerine konulduğunda konsantrasyon değeri 0.025 olacaktır. Bu, ağırlıkça %0.5 biyopolimer dozajına ve %20 su muhtevasına sahip bir zemin-biyopolimer karışımı hazırlanmak istendiğinde her 2.5 gr biyopolimer tozuna 100 gr su eklenerek biyopolimer solüsyonunun hazırlanması gerektiğini göstermektedir. Eğer bahsi geçen örnekte karışımda kullanılacak kuru zeminin ağırlığı 300 gr ise karıştırma işleminden önce 1.5 gr toz halinde biyopolimerin 60 gr su ile karıştırılarak solüsyon haline getirilmesi gerekmektedir.

Islak karıştırma yönteminde biyopolimer tozu su içerisinde çözülerek solüsyon haline getirildikten sonra bu

solüsyon kuru zemin ile homojen bir şekilde karıştırılarak biyopolimer-zemin karışımı hazırlanmaktadır (Fatehi vd., 2024; Lee vd., 2017; Sujatha ve Saisree, 2019).

3.2.Kuru Karıştırma Yöntemi

Kuru karıştırma yönteminde ilk olarak toz haldeki biyopolimer ile etüvde kurutulup soğutulan zemin, biyopolimer zemin içerisinde eşit bir şekilde dağıtılana kadar karıştırılmaktadır. Daha sonra bu karışıma ilgili su muhtevası eklenerek biyopolimer-zemin karışımları oluşturulmaktadır (Sulaiman vd., 2022; Bagheri vd., 2023; Vydehi ve Mogal, 2022).

Islak karıştırma yönteminde, su içerisine çözünürlük noktasından daha fazla biyopolimer eklenmesi durumunda biyopolimer çözeltisinin viskozitesi önemli ölçüde artmaktadır. Bu durum, işlenebilirliğin zayıf olmasına ve özellikle büyük ölçekli işler için karıştırma işleminin zorlaşmasına yol açmaktadır (Nugent vd. 2009; Chang vd. 2015b). Bu nedenle özellikle arazi uygulamaları gibi büyük ölçekli işlerde kuru karıştırma yönteminin kullanılması daha uygun olmaktadır (Vydehi ve Moghal, 2022). Ancak agar ve gellan sakızı gibi termojelatin biyopolimer malzemeler soğuk suda çözünemediğinden zemin içerisinde biyopolimer hidrojellerinin oluşabilmesi için ilk olarak bu biyopolimerler çözünürlük sıcaklığından yüksek sıcaklıkta bir su içerisinde çözüldükten sonra kuru zemin ile karıştırılmaktadır (Chang vd. 2015a; Smitha ve Sachan, 2016; Ferruzzi vd., 2000).

4. BİYOPOLİMER İLE STABİLİZE EDİLMİŞ ZEMİNLERİN GEOTEKNİK ÖZELLİKLERİ

Biyopolimer kullanılarak zeminlerin geoteknik özelliklerinin iyileştirilmesi kimyasal stabilizasyon yöntemlerine göre ekonomik, kolay uygulanabilir ve çevre dostu bir yöntem olup bu konuda yapılacak araştırmaların artması ile diğer

iyileştirme yöntemlerine alternatif olması bakımından güçlü bir potansiyele sahiptir. Bu yöntemde kullanılan biyopolimer tipi, miktarı ve içeriği, zemin özellikleri, karıştırma yöntemi biyopolimer kullanımını kontrol eden başlıca parametrelerdir. Bu stabilizasyon yöntemi ile zeminlerin işlenebilirliğinin artırılması, kompaksiyon özelliklerinin iyileştirilmesi, hidrolik iletkenliğinin azaltılması, kayma mukavemetinin ve durabilitenin artırılması ve sıvılaşma potansiyelinin azaltılması başlıca hedeflerdir. Zeminlerin biyopolimerler ile stabilizasyonu üzerine literatürde yürütülen çalışmalara ait bilgiler Tablo 1’de özetlenmiştir.

4.1.Guar Zamkı (GG) Biyopolimeri İle Stabilizasyon

GG, zeminlerin kayma mukavemeti ve stabilitesini arttırdığı ve geçirgenliğini azalttığı için geoteknik uygulamalarda etkili bir zemin iyileştirme katkı malzemesidir. Polimerik bir molekül olduğundan, parçalandıkça daha fazla biyopolimer açısından zengin hale gelir ve bu da onu ıslatma ve kurutma süreçlerine karşı daha dirençli hale getirir (Kumar vd., 2024).

Sujatha ve Saisree (2019), GG ile iyileştirilmiş zeminde biyopolimer dozajının artması ile kuru birim hacim ağırlığın arttığını, optimum su muhtevasının ise azaldığını gözlemlemişlerdir. Ayrıca GG ile stabilize edilmiş zeminin düşük enerjilerde sıkıştırılabileceğini ve su içeriğindeki değişikliklere duyarlılığının fark edilmediğini belirtmişlerdir. Gerilme şekil değiştirme davranışlarını incelediklerinde ise araştırmacılar, GG’nin dayanımı artırarak şekil değiştirmeyi azalttığını bildirmişlerdir. İyileştirilmiş zeminin mukavemetindeki artışın hem biyopolimer içeriğine hem de kürlenme süresine bağlı olduğunu, %2’lik GG ile iyileştirilmiş zeminin serbest basınç dayanımında %45’lik önemli bir artış olduğunu, bu artışın 90 günlük kür etkisiyle %131 seviyelerine ulaştığını ifade etmişlerdir. GG’nin eklenmesiyle boşluk hacmini azaltan ve aynı zamanda zemin matrisini de sertleştiren hidrojjellerin oluşumuyla

zeminin sıkışabilirliğinin etkili bir şekilde azaltıldığını gözlemlemiştir. GG'nin bozulmaya karşı hassas olduğu düşünülmese de, 90 gün süre sonunda guar zımkı içeren zemin örneklerinde gözle görülür bir bozulma olmadığını rapor etmiştir.

Jia vd. (2023), yağmur suyunun sebep olduğu erozyonu kontrol etmek için lös yamaçlarında üst seviyelerdeki zemini GG kullanarak stabilize etmek için yürüttükleri bir çalışmada, GG'nin lősün mekanik davranışını etkili bir şekilde iyileştirebileceğini, geçirimsizlik ve su tutma yeteneği kazandırabileceğini belirtmişlerdir. Araştırmacılar, GG ile stabilize edilmiş zemine ait kohezyonun arttığını, geçirgenliğin ise düştüğünü gözlemlemiştir. Taramalı elektron mikroskopu görüntülerinden faydalanarak araştırmacılar, bahsi geçen bu iyileşmelerin zemin parçacıklarına GG hidrojellerinin yapışması ve gözenekleri doldurması nedenleriyle meydana geldiğini ifade etmişlerdir. Ayrıca GG ile stabilize edilen lös zeminde çok iyi bir şekilde bitki örtüsü büyüme durumunun oluştuğu, GG'nin erozyon kontrol etkisine sahip olması nedeniyle yamaç koruma malzemesi olarak kullanılmasının büyük bir potansiyele sahip olduğu vurgulanmaktadır.

4.2.Ksantan Zımkı Biyopolimeri İle Stabilizasyon

Ksantan biyopolimerinin araştırıldığı çalışmalarda genel olarak düşük miktarda biyopolimer kullanılmasının zeminin pH değerlerini artırdığı, maksimum kuru birim hacim ağırlığı azalttığı, optimum su muhtevasını iyileştirdiği, özgül ağırlığı azalttığı ve ayrıca plastisite indeksini artırdığı belirtilmektedir. Ayrıca biyopolimerlerin eklenmesiyle zeminin serbest basınç dayanımının artması ve zeminin mühendislik özelliklerinin iyileşme eğiliminde olduğundan sürdürülebilir mühendislik için umut verici bir potansiyele sahip olduğu vurgulanmaktadır.

Bozyigit vd. (2021), %0.5, %1, %1.5 ve %2 oranında ksantan zankı kullanarak kaolin kilinin mekanik davranışı üzerindeki etkilerini araştırdıkları bir çalışmada, dört farklı su içeriğinde (%25, %30, %35 ve %40) standart Proctor enerjisi kullanılarak hazırladıkları numuneleri 1, 7, 28 ve 90 gün boyunca kr etkisine maruz bırakmışlardır. Ayrıca bazı numuneler 3 yıl boyunca kr koşullarında muhafaza edilerek biyopolimerlerin uzun dönem etkisi gözlemlenmiştir. Maksimum dayanım artışı %25 su içeriğı ve 90 günlük krl %2 ksantan zankı içeriğine sahip numunede belirlenirken bu artışın saf kile kıyasla 5.23 kat olduğu belirlenmiştir.

Reddy ve Varaprasad (2021), farklı olumsuz ortamlara maruz kalan ksantan biyopolimeri ile muamele edilmiş dispersif zeminlerin uzun dönem mukavemet ve dayanıklılık performansını değerlendirdikleri çalışmalarında, ıslanma ve kuruma çevrimlerine maruz kalan numunelerin serbest basınç dayanımını belirlemişlerdir. Elde ettikleri sonuçlara göre araştırmacılar, dispersif zeminlerin uzun dönem mukavemeti ve durabilitesinin Ksantan zankı biyopolimeri ilavesiyle önemli lde iyileştiğini belirtmişlerdir.

4.3. Agar Biyopolimeri ile Stabilizasyon

Agar biyopolimeri; daha kısa kürlenme süresi ve hızlı jelleşme süreci ile zeminlerin sıvılaşmaya karşı direncinin arttırılmasında umut verici bir katkı olarak kullanılmaktadır. Termal bozulmaya, oksidasyona, asit-alkali ortamlara ve tuz konsantrasyonlarına dayanıklıdır. Higroskopikliėi ve kararlılığı bu polimeri zemin stabilizasyonu için kullanışlı hale getirmektedir (Kumar vd., 2024).

Smitha ve Rangaswamy (2021), değişen oranlarda (0.5%, 1%, 2%) agar biyopolimeriyle iyileştirilmiş siltli kum zeminin farklı kürlenme sürelerinde (3, 7 ve 28 gün) serbest basınç dayanımlarını belirlemişlerdir. Ayrıca, yükleme frekansının

agarla stabilize edilmiş zeminin dinamik özellikleri ve artık boşluk suyu basıncı üzerindeki etkileri, farklı frekanslarda (0.2, 1, 1.5 ve 2 Hz) bir dizi şekil değiştirme kontrollü çevrimsel üç eksenli basınç deneyi gerçekleştirilerek araştırılmıştır. Belirlenen sonuçlara göre, agar içeriği ve kürlenme süresindeki artışla birlikte zeminin serbest basınç dayanımının arttığı, çevrimsel yüklemenin frekansının artmasıyla artık boşluk suyu basıncı oluşumunda ve sekant kesme modülünde azalma ve sönümlemede artış gözlemlendiği rapor edilmiştir.

Smitha and Rangaswamy (2022), siltli kum bir zeminde değişen oranlarda (0%, 0.5%, 1%, 2% ve 3%) agar polimeri kullanarak sıvılaşma potansiyelinin azaltılması üzerine bir araştırma yürütmüşlerdir. Bu çalışmada 1, 3, 7, 28 gün ve 1 yıllık kürlenme süresinin ve aşırı konsolidasyon oranının (OCR) değişen değerleri (1, 2, 3 ve 4) ile yükleme koşullarının etkisi konsolidasyonlu drenajsız çevrimsel üç eksenli basınç deneyleri ile araştırılmıştır. Sonuçlara göre artık boşluk suyu basıncının agar dozundaki ve OCR'deki artışla azaldığı, kürlenme periyodundaki artışla arttığı belirlenmiştir.

4.4.Sodjum Aljinat Biyopolimeri İle Stabilizasyon

Elkenawy vd. (2023), yürüttükleri çalışmada şişme potansiyeli düşük ve yüksek iki farklı kohezyonlu zeminin şişme potansiyelini azaltmak için bir katkı maddesi olarak sodyum aljinat (SA) biyopolimerinin kullanımını araştırmışlar ve zeminin kayma dayanımı ve su potansiyeli üzerindeki etkilerini değerlendirmişlerdir. Bu çalışmada araştırmacılar, %1 ile %4 arasında değişen oranlarda SA biyopolimerini hem ıslak hem de kuru karıştırma yöntemleri ile zeminle karıştırmışlardır. Daha sonra kompaksiyon, şişme, su emme ve üç eksenli basınç deneylerini yürütmüşlerdir. SA biyopolimerinin katkı olarak kullanılması durumunda zemin türü ve karıştırma yöntemine göre etkisinin değiştiğini, 1656 kPa'lık bir şişme basıncına sahip

zemine sadece %2 SA eklenmesi ile ıslak ve kuru karıştırma yöntemleri için şişme potansiyelinin sırasıyla %40 ve %22 oranlarında azaldığını rapor etmişlerdir. Aynı zamanda %2 SA eklenmesi ile drenajsız kayma dayanımı ve zemin modülünün yaklaşık %38 oranında arttığını gözlemleyen araştırmacılar, biyopolimerlerin şişen zeminleri iyileştirmedeki potansiyelini vurgulamışlardır. Düşük şişme potansiyeline sahip zeminde ise herhangi bir konsantrasyonda SA eklenmesinin şişme potansiyeli üzerinde daha az olumlu bir etki gösterdiği sonucunu elde etmişlerdir.

4.5.Beta Glukan Biyopolimeri İle Stabilizasyon

Chang ve Cho (2014), yürüttükleri araştırmada yapay bir biyopolimer olan β -1.3/1.6-glukan ile yerel atık bir zeminin mühendislik özelliklerinin iyileştirilmesi üzerine odaklanmışlardır. Zemine karıştırılan biyopolimer içeriğinin artması ile zeminin sıkıştırılabilirliği, Atterberg limitleri, şişme indeksi ve kayma modülünün arttığını, buna karşı basınç dayanımı üzerinde bir etkisinin olmadığını ve polimerin zemin boşluklarında biyolojik tıkanıklığa neden olarak hidrolik iletkenliğin azalmasına yol açtığını belirtmişlerdir.

4.6.Kitosan Biyopolimeri İle Stabilizasyon

Ilman ve Balkis (2023), biyopolimerlerin kimyasal stabilizasyonda kullanılan katkı malzemelerine çevre dostu bir alternatif olarak kullanılabilirliğine yönelik yürüttükleri çalışmada, kitosan biyopolimeri ile stabilize edilmiş zeminin mekanik özelliklerini, dayanıklılığını, mikro yapısını ve sürdürülebilirliğini araştırmışlardır. Bu çalışmada kuru zemin kütlelerinin %0.5 ile %3'ü arasında %0.5'lik artış oranıyla değişen miktarlarda kitosan biyopolimeri ile karıştırılarak hazırladıkları zemin numunelerini kür etkisine maruz bırakan araştırmacılar, ilgili süreler sonunda stabilize edilmiş numunelerin mekanik özelliklerini belirlemişlerdir. Kuru kütlece %2.5 oranında kitosan

biyopolimer katkı zeminin 28 günlük kür koşullarında optimum mekanik ve dayanıklılık özelliklerine ulaştığı belirtilmiştir. Ayrıca bu optimum karışım oranındaki numuneler %8 çimento içeriğine sahip kontrol numuneleri ile kıyaslandığında sırasıyla %27 ve %11 oranında daha yüksek ortalama kayma ve eğilme dayanımına sahip olduğunu ifade etmişlerdir. Bu sonuçlar biyopolimerlerin, çevre dostu zemin iyileştirme katkı malzemesi olarak kullanılabileceğine olan umutları arttırmaktadır.

Kitosan biyopolimeri ayrıca kirlenmiş zeminlerde ağır metallerin emilimi, toprak erozyonunun ve hidro iletkenliğinin azaltılması gibi çevre geotekniği konularında birçok araştırmaya konu olmuştur (Hataf vd., 2018). Karides kabuğu atıklarından sentezlenen biyoyumlu kitosan çözeltisi kullanılarak bir kil zeminin stabilizasyonu üzerine yürütülen çalışmada, farklı kürlenme süreleri ve koşullarında zeminin mekanik özellikleri araştırılmıştır. Sonuçlar kitosan biyopolimerinin eklenmesinin zemini oluşturan parçacıklar arasında etkileşimi artırma potansiyeline sahip olduğu ve bunun zeminin mekanik özelliklerinin iyileşmesine sebep olduğu belirtilmektedir. Parçacıklar arası etkileşim zamana ve zeminin nem içeriğine doğrudan bağlı olduğu için ıslak koşullarda kitosan çözeltisi karıştırıldığında başlangıçta daha yüksek etkileşime neden olurken zamanla bu etki azalmaktadır. Kuru koşullarda ise bağ mukavemeti oldukça zayıftır (Hataf vd., 2018).

4.7.Gellan Sakızı Biyopolimeri İle Stabilizasyon

Mikrobiyal kaynaklı kalsit çökmesi, reaktif enzimler ve biyopolimerler gibi mikrobiyal polimerlerin zemin iyileştirmede kullanımını dünya çapında araştırmacılar tarafından incelenmektedir. Chang vd. (2016a) yürüttükleri çalışmada, hidrojel reolojisi nedeniyle genellikle gıda endüstrisinde kullanılan bir mikrobiyal polisakkarit olan gellan sakızını bir kum zemini güçlendirmek için kullanmıştır. İlgili araştırmada Gellan

sakızının kumun geoteknik özellikleri üzerindeki etkileri, tek eksenli basınç ve direkt kesme deneyi, düşen seviyeli permeabilite deneyi ve taramalı elektron mikroskobu ile belirlenmiştir. Sonuç olarak değişen nem koşullarına göre Gellan sakızının yapay kohezyon yoluyla kohezyonsuz kumlar üzerinde belirgin bir güçlendirme etkisine sahip olduğu, gellan sakızı ile stabilize edilmiş kumların içsel sürtünme açısı, kohezyon ve serbest basınç dayanımı gibi geoteknik özelliklerinin, nem koşullarına bağlı olarak değiştiği belirlenmiştir. Bu değişimin tepkisiz kum parçacıkları arasındaki gelişmiş bağlanma ve hidrojel yoğunlaşması yoluyla kum parçacıklarının birikmesinin bir sonucu olduğu, burada bir araya gelen kum parçacıklarının ise zeminde genişlemiş agregalar gibi davrandığı şeklinde açıklanmaktadır.

4.8.Karajenan Biyopolimeri İle Stabilizasyon

Biyolojik olarak parçalanabilen doğal bir polimer olan karajenan biyopolimeri, kerpiç yapıların fiziksel ve mekanik özelliklerini iyileştirmek için bir biyokatki maddesi olarak kullanıldığında blok imalatı sırasında karışıma dahil edilmesinin veya mevcut toprak yapılarda bir kaplama olarak kullanılmasının, su geçirmezlik ve su damlalarının aşındırmasına karşı direnç sağladığı ayrıca basınç ve çekme dayanımında önemli bir artışa sebep olduğu belirtilmektedir. Bu sonuç geleneksel yapı malzemelerinin davranışını değiştirmek için karajenan biyopolimeri gibi doğal ve çevre dostu bileşiklerin kullanılmasının uygulanabilirliğini göstermektedir (Nakamatsu vd. (2017).

Fatehi vd. (2024) yürüttükleri bir çalışmada, biyopolimerle stabilize edilmiş zemin örneklerinin performansını değerlendirmek için biyopolimer içeriği, su muhtevası, kürlenme süresi, zemin dane boyutu ve ıslanma-kuruma çevrimlerinin serbest basınç dayanımı üzerindeki etkilerini belirlemiştir.

Araştırmacılar karajenanın, tüm durumlarda doğal zemine göre basınç dayanımını iyileştirdiği, ince dane içeriğinin artması durumunda karajenanın, basınç ve kesme dayanımı açısından ksantan zamkından önemli ölçüde daha iyi performans gösterdiği sonucunu elde etmişlerdir. Ayrıca karajenanın zemin danelerini bağlama ve mekanik dayanımı artırma konusundaki önemli performansının ardındaki mekanizma ve kimyasal etkileşim FTIR analizi ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüleri aracılığıyla incelenmiştir. Bu çalışmada elde edilen sonuçlara göre, karajenanın çimento ve kireç gibi geleneksel malzemelere göre, sürdürülebilir bir alternatif olarak kabul edilebileceği sonucuna varılmıştır.

5. ZEMİNLERİN STABİLİZASYONUNDA BİYOPOLİMERLERİN FAYDALARI, SINIRLAMALARI VE ZORLUKLARI

Küresel sera gazı salınımında çimento endüstrisinin göz ardı edilemeyecek büyüklükteki payı, hükümetlerin birçok sektöre ve uygulamalara yaptırımlar getirilmesini zorunlu hale getirmiş durumdadır. Ülkemizde 2025-2029 yılları arasında kamu ihalelerinde klinker oranı en fazla %80 olan yeşil çimento (green cement) ürününün kullanımının Çevre ve Şehircilik Bakanlığı tarafından zorunlu hale getirilmesi, bu alanda atılan önemli bir başlangıç adıdır. Bu amaçla geoteknik uygulamalarda da geleneksel stabilizasyon materyallerinin yerini biyopolimerlerin alması, çevre ve sürdürülebilirlik açısından umut vadeden bir gelecek fırsatı sunacaktır. Qureshi vd. (2017) tarafından yürütülen çalışma, XG ve çimento ilavesinin kum zeminin serbest basınç dayanımı üzerindeki etkilerini karşılaştırmış ve %2 XG kullanımı ile elde edilen dayanım artışının %10 çimento kullanılarak elde edilene benzer olduğunu ortaya koymuştur. Bu, zeminlerin stabilizasyonunda çok küçük miktarlarda dahi biyopolimer

kullanmanın mukavemet açısından oldukça efektif artışlar sağladığının göstergesidir. Ancak geoteknik mühendisliği uygulamalarında biyopolimerlerin kullanımı nispeten yeni bir teknik olduğundan farklı biyopolimer malzemeleri ile iyileştirilmiş farklı zeminlerin mühendislik özelliklerinin arazi ve/veya laboratuvar ortamında araştırılarak etkilerinin somut olarak kanıtlanması gerekmektedir. Biyopolimerlerin farklı pH, sıcaklık, ıslanma-kuruma ve donma-çözünme döngüleri ve UV radyasyonu gibi gerçek çevre koşulları altındaki kullanımının daha fazla araştırılması gerekmektedir. Ayrıca küresel piyasalarda biyopolimerler, birçok farklı endüstride kullanılıyor olsalar da henüz geleneksel zemin stabilizasyon materyallerine kıyasla daha az rekabetçidir. Ancak inşaat endüstrisi dahil olmak üzere birçok endüstride kullanımlarının olumlu etkileri keşfedildikçe biyopolimerlere olan talebi karşılayacak arzda artış meydana geleceği ve bunun biyopolimer maliyetini uzun vadede düşüreceği öngörülmektedir. 1960 yılında 30000 ABD Doları/ton olan XG'nin fiyatının 2017'de 1500-4000 ABD Doları/tona düşmesi bu beklentinin gerçekleştiğinin bir kanıtıdır (Chang vd., 2015c; Chang vd., 2016b; Yegin vd., 2017). Ayrıca IndustryARC adlı bir endüstri, küresel biyopolimer pazarı büyüklüğünün, 2024-2030 tahmin döneminde %11.5'lik bir yıllık bileşik büyüme oranı ile büyüyerek 2030 yılına kadar 27.5 milyar ABD dolarına ulaşmasını öngörmektedir. Sonuç olarak biyopolimerler hem zeminlerin geoteknik özelliklerinin iyileştirilmesi hem de yeşil çevre ve sürdürülebilir bir kalkınma açısından umut vadeden bir alternatif olarak keşfedilmeyi beklemektedir.

6. SONUÇLAR

Çok farklı özelliklere sahip biyopolimerlerin farklı zeminlerin kayma mukavemetini, kohezyonunu, sıvılaşmaya karşı direncini, durabilitesini, şev stabilitesini, su tutma

yeteneğini arttırdığını, permeabilitesini, etkili bir sıkıştırma için gerekli kompaksiyon enerjisini, şekil değiştirme davranışını ve şişme potansiyelini düşürdüğü, bitki örtüsü gelişmesini arttırdığı ve bunun gibi birçok amaç için kullanılabileceği literatürdeki farklı araştırmalar ile ortaya konmaktadır.

Çevre dostu zemin iyileştirme katkı malzemesi olarak birçok projede farklı amaçlar için kullanılabilme potansiyeline sahip biyopolimerlerin uzun süreli performanslarının araştırılması ve doğrulanması için daha fazla deneysel çalışmaya ihtiyaç duyulmaktadır.

KAYNAKLAR

- Ahn, S., Ryou, J. E., Ahn, K., Lee, C., Lee, J. D., & Jung, J. (2021). Evaluation of dynamic properties of sodium-alginate-reinforced soil using a resonant-column test. *Materials*, 14(11), 2743.
- Arab, M. G., Mousa, R. A., Gabr, A. R., Azam, A. M., El-Badawy, S. M., & Hassan, A. F. (2019). Resilient behavior of sodium alginate-treated cohesive soils for pavement applications. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 31(1), 04018361.
- Ayeldeen, M., Negm, A., El-Sawwaf, M., & Kitazume, M. (2017). Enhancing mechanical behaviors of collapsible soil using two biopolymers. *J Rock Mech Geotech Eng* 9: 329–339.
- Bagheri, P., Gratchev, I., & Rybachuk, M. (2023). Effects of xanthan gum biopolymer on soil mechanical properties. *Applied Sciences*, 13(2), 887.
- Bagherinia, M. (2024). Mechanical, durability, and microstructure of soft clay stabilised with anionic biopolymer. *Construction and Building Materials*, 417, 135343.
- Bagriacik, B., Ok, B., & Kahiyah, M. T. M. A. (2021). An experimental study on improvement of cohesive soil with eco-friendly guar gum. *Soils and Rocks*, 44, e2021060020.
- Berkane, H. A., Della, N., Benziane, M. M., Denine, S., Elroul, A. B., & Feknous, H. (2022). Laboratory investigation on the effect of a combination of xanthan gum and clay on the behavior of sandy soil. *Innovative Infrastructure Solutions*, 7(4), 269.

- Bohn, J. A., & BeMiller, J. N. (1995). (1→3)-β-d-Glucans as biological response modifiers: a review of structure-functional activity relationships. *Carbohydrate polymers*, 28(1), 3-14.
- Bozyigit, I., Javadi, A., & Altun, S. (2021). Strength properties of xanthan gum and guar gum treated kaolin at different water contents. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 13(5), 1160-1172.
- Cabalar, A. F., Wiszniewski, M., & Skutnik, Z. (2017). Effects of xanthan gum biopolymer on the permeability, odometer, unconfined compressive and triaxial shear behavior of a sand. *Soil mechanics and foundation engineering*, 54, 356-361.
- Chang, I., & Cho, G. C. (2012). Strengthening of Korean residual soil with β-1, 3/1, 6-glucan biopolymer. *Construction and Building Materials*, 30, 30-35.
- Chang, I., & Cho, G. C. (2014). Geotechnical behavior of a beta-1,3/1,6-glucan biopolymer-treated residual soil. *Geomechanics and Engineering*, 7(6), 633-647.
- <https://doi.org/10.12989/GAE.2014.7.6.633>
- Chang, I., Prasadhi, A. K., Im, J., & Cho, G. C. (2015a). Soil strengthening using thermo-gelation biopolymers. *Construction and Building Materials*, 77, 430-438.
- Chang, I., Prasadhi, A. K., Im, J., Shin, H. D., Cho, G. C. 2015b. "Soil treatment using microbial biopolymers for anti-desertification purposes", *Geoderma*, 253, 39-47.
- Chang, I., Jeon, M., & Cho, G. C. (2015c). Application of microbial biopolymers as an alternative construction binder for earth buildings in underdeveloped countries. *International journal of polymer science*, 2015(1), 326745.

Chang, I., Im, J., & Cho, G. C. (2016a). Geotechnical engineering behaviors of gellan gum biopolymer treated sand. *Canadian Geotechnical Journal*, 53(10), 1658-1670.

<https://doi.org/10.1139/cgj-2015-0475>

Chang, I., Im, J., & Cho, G. C. (2016b). Introduction of microbial biopolymers in soil treatment for future environmentally-friendly and sustainable geotechnical engineering. *Sustainability*, 8(3), 251.

Chang, I., Im, J., Lee, S. W., & Cho, G. C. (2017). Strength durability of gellan gum biopolymer-treated Korean sand with cyclic wetting and drying. *Construction and Building Materials*, 143, 210-221.

Chang, I., Lee, M., Tran, A. T. P., Lee, S., Kwon, Y. M., Im, J., & Cho, G. C. (2020). Review on biopolymer-based soil treatment (BPST) technology in geotechnical engineering practices. *Transportation Geotechnics*, 24, 100385.

Cheung, W. H., Ng, J. C. Y., & McKay, G. (2003). Kinetic analysis of the sorption of copper (II) ions on chitosan. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology: International Research in Process, Environmental & Clean Technology*, 78(5), 562-571.

Dehghan, H., Tabarsa, A., Latifi, N., & Bagheri, Y. (2019). Use of xanthan and guar gums in soil strengthening. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 21, 155-165.

El-Aassar, M. R., Hafez, E. E., El-Deeb, N. M., & Fouda, M. M. (2014). Microencapsulation of lectin anti-cancer agent and controlled release by alginate beads, biosafety approach. *International journal of biological macromolecules*, 69, 88-94.

Eldaw GE (1998) A study of guar seed and guar gum properties (Cyamopsis tetragonolabous)

- Elkenawy, M., Gabr, A. & Arab, M.G. (2023). Mechanical Properties of Unsaturated Expansive Soils Treated with Eco-Friendly Sodium Alginate Biopolymer. *Int. J. of Geosynth. and Ground Eng.* 9, 34
<https://doi.org/10.1007/s40891-023-00452-z>
- Fatehi H, Abtahi SM, Hashemolhosseini H, Hejazi SM (2018). A novel study on using protein based biopolymers in soil strengthening. *Constr Build Mater* 167:813–821. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.02.028>
- Fatehi, H. Ong, D.E.L. Yu, J. Chang, I. (2021). Biopolymers as Green Binders for Soil Improvement in Geotechnical Applications: A Review. *Geosciences*, 11, 291. <https://doi.org/10.3390/geosciences11070291>
- Fatehi, H., Ong, D. E., Yu, J., & Chang, I. (2024). Sustainable soil treatment: Investigating the efficacy of carrageenan biopolymer on the geotechnical properties of soil. *Construction and Building Materials*, 411, 134627.
- Ferruzzi, G. G., Pan, N., & Casey, W. H. (2000). Mechanical properties of gellan and polyacrylamide gels with implications for soil stabilization. *Soil science*, 165(10), 778-792.
- Garcia-Ochoa, F., Santos, V. E., Casas, J. A., & Gómez, E. (2000). Xanthan gum: production, recovery, and properties. *Biotechnology advances*, 18(7), 549-579.
- Giavasis, I., Harvey, L. M., & McNeil, B. (2000). Gellan gum. *Critical reviews in biotechnology*, 20(3), 177-211.
- Hamza, M., Nie, Z., Aziz, M., Ijaz, N., Ijaz, Z., & Rehman, Z. U. (2022). Strengthening potential of xanthan gum biopolymer in stabilizing weak subgrade soil. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 24(9), 2719-2738.

- Hamza, M., Nie, Z., Aziz, M., Ijaz, N., Akram, O., Fang, C., ... & Madni, M. F. (2023). Geotechnical behavior of high-plastic clays treated with biopolymer: macro–micro-study. *Environmental Earth Sciences*, 82(3), 91.
- Hataf, N., Ghadir, P., & Ranjbar, N. (2018). Investigation of soil stabilization using chitosan biopolymer. *Journal of cleaner production*, 170, 1493-1500.
- Hernandez-Carmona, G., Freile-Pelegrín, Y., & Hernández-Garibay, E. (2013). Conventional and alternative technologies for the extraction of algal polysaccharides. In *Functional ingredients from algae for foods and nutraceuticals* (pp. 475-516). Woodhead Publishing.
- Hirano, S., Kitaura, S., Sasaki, N., Sakaguchi, H., Sugiyama, M., Hashimoto, K., & Tanatani, A. (1996). Chitin biodegradation and wound healing in tree bark tissues. *Journal of environmental polymer degradation*, 4, 261-265.
- Ilman, B., & Balkis, A. P. (2023). Sustainable biopolymer stabilized earthen: Utilization of chitosan biopolymer on mechanical, durability, and microstructural properties. *Journal of Building Engineering*, 76, 107220.
- Imeson, A. (Ed.). (2011). *Food stabilisers, thickeners and gelling agents*. John Wiley & Sons.
- Jia Z., Yan C., Li B., Bao H., Lan H., Liang Z., Shi Y., Ren J., (2023). Performance test and effect evaluation of guar gum-stabilized loess as a sustainable slope protection material, *Journal of Cleaner Production*, 408, 137085, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.137085>.
- Khayat, K. H., & Yahia, A. (1997). Effect of welan gum-high-range water reducer combinations on rheology of cement grout. *Materials Journal*, 94(5), 365-372.

- Krishna Leela, J., & Sharma, G. (2000). Studies on xanthan production from *Xanthomonas campestris*. *Bioprocess Engineering*, 23, 687-689.
- Kulkarni, R. V., V. Sreedha, S. Mutalik, C. M. Setty, and B. Sa. 2010. "Interpenetrating network hydrogel membranes of sodium alginate and poly(vinyl alcohol) for controlled release of prazosin hydrochloride through skin." *Int. J. Biol. Macromol.* 47 (4): 520-527. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2010.07.009>
- Kulkarni, V. S., & Shaw, C. (2015). *Essential chemistry for formulators of semisolid and liquid dosages*. Academic Press.
- Kumar, M. A., Moghal, A. A. B., Vydehi, K. V., & Almajed, A. (2023). Embodied energy in the production of guar and xanthan biopolymers and their cross-linking effect in enhancing the geotechnical properties of cohesive soil. *Buildings*, 13(9), 2304.
- Kumar, S., Yadav, B.D. & Raj, R. (2024). A review on the application of biopolymers (xanthan, agar and guar) for sustainable improvement of soil. *Discov Appl Sci* 6, 393. <https://doi.org/10.1007/s42452-024-06087-7>
- Lazaridou, A., & Biliaderis, C. G. (2007). Molecular aspects of cereal β -glucan functionality: Physical properties, technological applications and physiological effects. *Journal of cereal science*, 46(2), 101-118.
- Lee, S., Chang, I., Chung, M. K., Kim, Y., & Kee, J. (2017). Geotechnical shear behavior of xanthan gum biopolymer treated sand from direct shear testing. *Geomechanics and Engineering*, 12(5), 831-847.
- Lee, S., Chung, M., Park, H. M., Song, K. I., & Chang, I. (2019). Xanthan gum biopolymer as soil-stabilization binder for

- road construction using local soil in Sri Lanka. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 31(11), 06019012.
- Lee, M., Kwon, Y. M., Park, D. Y., Chang, I., & Cho, G. C. (2022). Durability and strength degradation of xanthan gum based biopolymer treated soil subjected to severe weathering cycles. *Scientific Reports*, 12(1), 19453.
- Liu, X. D., Tokura, S., Haruki, M., Nishi, N., & Sakairi, N. (2002). Surface modification of nonporous glass beads with chitosan and their adsorption property for transition metal ions. *Carbohydrate Polymers*, 49(2), 103-108.
- McHugh, D. J. *A Guide to the Seaweed Industry*. Food and Agriculture Organization of the United Nations; Rome, Italy: 2003. FAO Fisheries Technical Paper, 441.
- Mihaila, S. M., Gaharwar, A. K., Reis, R. L., Marques, A. P., Gomes, M. E., & Khademhosseini, A. (2013). Photocrosslinkable kappa-carrageenan hydrogels for tissue engineering applications. *Advanced healthcare materials*, 2(6), 895-907.
- Milas, M., & Rinaudo, M. (1979). Conformational investigation on the bacterial polysaccharide xanthan. *Carbohydrate Research*, 76(1), 189-196.
- Mudgil D, Barak S, Khatkar BS. (2014). Guar gum: processing, properties and food applications-a review. *J Food Sci Technol*; 51:409-18. <https://doi.org/10.1007/s13197-011-0522-x>.
- Nakamatsu J., Kim S., Ayarza J., Ramírez E., Elgegren M., Aguilar R., (2017). Eco-friendly modification of earthen construction with carrageenan: Water durability and mechanical assessment, *Construction and Building Materials*, 139, 193-202, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.02.062>.

- Necas, J., & Bartosikova, L. (2013). Carrageenan: a review. *Veterinarni medicina*, 58(4), 187-205.
- Ni, J., Li, S. S., Ma, L., & Geng, X. Y. (2020). Performance of soils enhanced with eco-friendly biopolymers in unconfined compression strength tests and fatigue loading tests. *Construction and Building Materials*, 263, 120039.
- Ni, J., Li, S.S., & Geng, X.Y., (2022). Mechanical and biodeterioration behaviours of a clayey soil strengthened with combined carrageenan and casein. *Acta Geotechnica*, 17(12), 5411-5427.
- Nugent, R. A., Zhang, G., & Gambrell, R. P. (2009). Effect of exopolymers on the liquid limit of clays and its engineering implications. *Transportation Research Record*, 2101(1), 34-43.
- Okay, O. (2009). General properties of hydrogels. *Springer Series on Chemical Sensors and Biosensors*, 6, 1–14.
- Oliveira, P. J. V., & Reis, M. J. (2023). Effect of the organic matter content on the mechanical properties of soils stabilized with Xanthan gum. *Applied Sciences*, 13(8), 4787.
- Qureshi, M. U., Chang, I., & Al-Sadarani, K. (2017). Strength and durability characteristics of biopolymer-treated desert sand. *Geomech. Eng*, 12(5), 785-801.
- Raj, N., Selvakumar, S., Soundara, B., & Kulanthaivel, P. (2023). Sustainable utilization of biopolymers as green adhesive in soil improvement: a review. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(56), 118117-118132.
- Reddy, J. J., & Varaprasad, B. J. S. (2021). Long-term and durability properties of xanthan gum treated dispersive soils—An eco-friendly material. *Materials Today: Proceedings*, 44, 309-314.

- Renault, F., Sancey, B., Badot, P. M., & Crini, G. (2009). Chitosan for coagulation/flocculation processes—an eco-friendly approach. *European Polymer Journal*, 45(5), 1337-1348.
- Rodgers L (2018) Climate change: The massive CO₂ emitter you may not know about. *BBC News* 17(12):2018. <https://www.bbc.com/news/science-environment-46455844>. Accessed 24 Jan 2023
- Santinon, C., Ochi, D., Beppu, M. M., & Vieira, M. G. A. (2022). Chemical modifications in the structure of seaweed polysaccharides as a viable antimicrobial application: A current overview and future perspectives. *Algal Research*, 66, 102796.
- Singh, S. P., & Das, R. (2020). Geo-engineering properties of expansive soil treated with xanthan gum biopolymer. *Geomechanics and Geoengineering*, 15(2), 107-122.
- Smitha, S., & Sachan, A. (2016). Use of agar biopolymer to improve the shear strength behavior of sabarmati sand. *International Journal of Geotechnical Engineering*, 10(4), 387-400.
- Smitha, S., & Rangaswamy, K. (2020). Effect of biopolymer treatment on pore pressure response and dynamic properties of silty sand. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 32(8), 04020217.
- Smitha, S., Rangaswamy, K. (2021). Experimental study on unconfined compressive and cyclic triaxial test behavior of agar biopolymer-treated silty sand. *Arab J Geosci* 14, 590. <https://doi.org/10.1007/s12517-021-06955-1>
- Smitha S. & Rangaswamy K. (2022). Effect of different parameters on cyclic triaxial response of biopolymer treated soil, *European Journal of Environmental and Civil*

Engineering, 26:15, 7645-7663, DOI:
10.1080/19648189.2021.2004451

- Soldo, A., Miletić, M., & Auad, M. L. (2020). Biopolymers as a sustainable solution for the enhancement of soil mechanical properties. *Scientific Reports*, 10(1), 267.
- Soldo, A., Aguilar, V., & Miletić, M. (2022). Macroscopic stress-strain response and strain-localization behavior of biopolymer-treated soil. *Polymers*, 14(5), 997.
- Stokke, B. T., Elgsaeter, A., & Kitamura, S. (1993). Macrocyclization of polysaccharides visualized by electron microscopy. *International journal of biological macromolecules*, 15(1), 63-68.
- Sujatha, E. R., & Saisree, S. (2019). Geotechnical behaviour of guar gum-treated soil. *Soils and Foundations*, 59(6), 2155-2166.
- Sujatha, E. R., Sivaraman, S., & Subramani, A. K. (2020). Impact of hydration and gelling properties of guar gum on the mechanism of soil modification. *Arabian Journal of Geosciences*, 13, 1-12.
- Sujatha, E. R., Atchaya, S., Sivasaran, A., & Keerdthe, R. S. (2021). Enhancing the geotechnical properties of soil using xanthan gum—An eco-friendly alternative to traditional stabilizers. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 80, 1157-1167.
- Sulaiman H., Taha M.R., Rahman N.A., Taib A.M., (2022). Performance of soil stabilized with biopolymer materials-xanthan gum and guar gum, *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 128, 103276, <https://doi.org/10.1016/j.pce.2022.103276>.

- Venugopal V. Marine Polysaccharides: (2011). Food Applications. Boca Raton: CRC Press Taylor & Francis Group.
- Vydehi, K. V., & Moghal, A. A. B. (2022). Effect of biopolymeric stabilization on the strength and compressibility characteristics of cohesive soil. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 34(2), 04021428.
- Wang (2019) IEA, Cement production, 2010-2018, IEA, Paris. <https://www.iea.org/data-andstatistics/charts/cement-production-2010-2018>, IEA. Licence: CC BY 4.0. Accessed 24 Jan 2023
- Yegin, C., Singh, B. P., Zhang, M., Biopharm, F., Balaji, K., Suhag, A., ... & Temizel, C. (2017, April). Next-generation displacement fluids for enhanced oil recovery. In *SPE Oil and Gas India Conference and Exhibition?* (p. D021S010R001). SPE.
- Zhang, T., Liu, S., Cai, G., & Puppala, A. J. (2015). Experimental investigation of thermal and mechanical properties of lignin treated silt. *Engineering Geology*, 196, 1-11.
- Zhang, J., Meng, Z., Jiang, T., Wang, S., Zhao, J., & Zhao, X. (2022). Experimental study on the shear strength of silt treated by xanthan gum during the wetting process. *Applied Sciences*, 12(12), 6053.
- Zhao, Y., Zhuang, J., Wang, Y., Jia, Y., Niu, P., & Jia, K. (2020). Improvement of loess characteristics using sodium alginate. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 79, 1879-1891.

Tablo 1. Literatür özeti

Zemin türü	Biyopolimer türü	Karışım hazırlama türü	Karışım oranları (%)	Kür süreleri (gün)	Yapılan deneyler	Referans
MH-CH	GG	Islak	0.5, 1, 1.5, 2	7, 14, 28, 56, 90	Kıvam limitleri, kompaksiyon, permeabilite, SBD, konsolidasyon, yaşlanma, durabilite	Sujatha ve Saisree (2019)
SC	XG, GG	Kuru	1, 2, 4, 5	1, 5	Özgül gravite, Kompaksiyon, SBD	Sulaiman vd., (2022)
CL	XG, GG	Islak, Kuru	0.25, 0.5, 1, 2, 3, 4	-	Kompaksiyon, Direkt kesme	Ayeldeen vd., (2017)
Kaolin	XG, GG	Islak	0.5, 1, 1.5, 2	1, 7, 28, 90	Kompaksiyon, SBD,	Bozyigit vd., (2021)
CL-CH	XG	Kuru	0.5, 1, 1.5, 2	28, 90, 180	Islanma-kuruma çevrimi, SBD, Kompaksiyon	Reddy ve Varaprasad (2021)
CH	XG	Kuru	0.2, 0.5, 0.8, 1	3, 7, 28	Kıvam limitleri, Kompaksiyon, SBD, Donma-çözünme, Konsolidasyon, Hidrolik iletkenlik	Singh ve Das (2020)
SP	XG	Islak	0.5, 1, 2	-	Direkt kesme	Lee vd., (2017)
SP	XG	Islak	0.5, 1, 2	-	CD	Lee vd., (2019)
Silt	XG	Kuru	0.5, 1, 1.5, 2	-	-	Zhang vd., (2022)
ML	XG	Kuru	0.5, 1, 2	1, 4, 7, 10, 14, 28, 35	Kıvam limitleri, SBD, UU, CU, Islanma-kuruma çevrimi,	Bagheri vd., (2023)
CL	XG GG	Kuru	0.5, 1, 2, 4	7, 14, 28, 45, 60	Kıvam limitleri, Kompaksiyon, Konsolidasyon, SBD, SEM, FTIR	Vydehi ve Mogal (2022)
CH	XG	-	0.5, 1, 1.5, 2, 5	4, 7, 14, 28, 60 (yaşlanma)	Konsolidasyon, Şişme, SBD,	Hamza vd., (2023)

İnşaat Mühendisliği

					Donma-çözünme, SEM, EDX, BET	
CL	GG	Islak	1, 2, 3	1, 7, 14, 21, 56, 196	Kıvam limitleri, Kompaksiyon, SBD, SEM, EDS, XRF	Bagriacik vd., (2021)
CL, CH	XG, GG	Kuru	-	14, 28, 60	Kıvam limitleri, Kompaksiyon, SBD, SEM	Kumar vd., (2023)
SP, SC	XG+Nişasta	Islak	1, 2	-	Islanma-kuruma çevrimi, Donma-çözünme, SBD, SEM	Lee vd., (2022)
CL, OL, OH	XG	Kuru	1	14	SBD, Konsolidasyon, SEM	Oliveria ve Reis, (2023)
SC	XG	Kuru	0.25, 0.5, 0.75, 1, 1.25, 1.5, 2, 3, 5	0, 3, 7, 14, 28, 56, 90	Endeks özellikler, Kompaksiyon, Permeabilite, SBD, Viskozite, SEM	Sujatha vd., (2021)
MH, SP	XG Karajenan	Islak	0.25, 0.5, 1, 1.5	1, 3, 7, 14, 28	SBD, CD, FTIR, SEM, Islanma kuruma çevrimi	Fatehi vd., (2024)
CL-ML	XG, GG	Islak	0.5, 1, 2	1, 7, 28	SEM, UU, Konsolidasyon, Kompaksiyon, Permeabilite	Dehghan vd., (2019)
SP	Sodyum Aljinat	Islak	7.5	-	Rezonant Kolon Deneyi	Ahn vd., (2021)
CH	XG	Kuru	0.5, 1, 1.5, 2, 5	4, 7,14, 28, 60 (yaşlanma)	Kompaksiyon, SBD, CBR, Şişme, Konsolidasyon, XRF, SEM	Hamza vd., (2022)
SP	XG	-	0.5, 1, 1.5	1, 3, 7, 14, 28	Permeabilite,	Cabalar vd., (2017)

İnşaat Mühendisliği

					Konsolidasyon, SBD, CD	
CL	Karejenan, Kazein	Kuru	2, 4, 6, 8	7, 14, 21, 28	Konsolidasyon, SBD, Biyolojik bozunma analizi	Ni vd., (2022)
CH	GG	Islak	0.5, 1, 1.5, 2	7, 28, 90 (kür) 7, 14, 28, 56, 90 (yaşlanma)	Kıvam limitleri, Kompaksiyon, Permeabilite, SBD, SEM	Sujatha vd., (2020)
SM	Agar	Islak	0.5, 1, 2	3, 7, 28	SBD, Dinamik üç eksenli	Smitha ve Rangaswamy (2020)
SP	XG	Islak	0.25, 0.5	7, 14, 28	Direkt kesme	Berkane vd., (2022)
SW-SM	XG, GG, Beta 1.3/1.6 glukan, Kitosan, Aljinat	Kuru, Islak	1, 2, 4	1, 2, 3, 4, 5, 30 (SBD) 5, 30 (UU, Direkt Kesme)	Direkt kesme, UU, SBD, Yarmada Çekme, SEM	Soldo vd., (2020)
SC	XG	Kuru	1, 2, 3, 4, 5	14	SBD, SEM	Ni vd., 2020
CL	Sodyum Aljinat	Kuru	0.25, 0.5, 0.75, 1	7, 14, 28	SBD, Donma-çözünme, SEM, EDX, XRD	Bagherinia, 2024
SC	Kitosan	-	0.5, 1, 1.5, 2, 2.5, 3	7, 28	Basınç testi, Eğilme testi, SEM	Ilman ve Balkis, 2023
Lös	Sodyum Aljinat	Kuru	0.5, 1, 2, 3	15	SBD, CU, SEM XRD	Zhao vd., 2020

İnşaat Mühendisliği

Kum	Gellan sakızı	Islak	0.5, 1, 2	28	SBD, Islanma-kuruma, SEM	Chang vd., 2017
-----	---------------	-------	-----------	----	--------------------------------	-----------------

GG : Guar gum (guar zamkı)

XG : Ksantan gum (ksantan zamkı)

SBD : Serbest basınç dayanımı

CD : Konsolidasyonlu drenajlı üç eksenli basınç deneyi

CU : Konsolidasyonlu drenajsız üç eksenli basınç deneyi

UU : Konsolidasyonsuz drenajsız üç eksenli basınç deneyi

CBR : Kaliforniya taşıma oranı

SEM : Taramalı elektron mikroskobu (Scanning Electron Microscope)

FTIR : Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi (Fourier-transform infrared spectroscopy)

EDX/EDS : Enerji Dağılımlı X-Işını Spektroskopisi (Energy-dispersive X-ray spectroscopy)

XRF : X-Işını Floresans Spektrometresi (X-ray fluorescence)

BET : Brunauer–Emmett–Teller yöntemi

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